

***Elimination von anthropogenen Spuren-  
stoffen auf kommunalen Kläranlagen***  
*(Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe)*

**Abschlussbericht**

gerichtet an das Bayerische Landesamt für Umwelt

13.03.2019



# ***Errichtung und Nachweis der Leistungsfähigkeit einer vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg***



Herausgegeben vom Bayerischen Landesamt für Umwelt und von der Universität der Bundeswehr München  
Augsburg / Neubiberg, 2019



gefördert durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



# Projektbearbeitung

## **Auftragnehmer**



Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert

Dipl.-Ing. Sascha Rödel

Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen,  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85577 Neubiberg bei München

## **Kooperationspartner**



Dr.-Ing. Eberhard Steinle

Dr.-Ing. Verena Rehbein

Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH  
Ziegelstraße 2  
D-83629 Weyarn

# IMPRESSUM

## Herausgeber

Bayerisches Landesamt für Umwelt und Universität der Bundeswehr München

## Autoren

Sascha Rödel und Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert, Universität der Bundeswehr München

Dr.-Ing. Verena Rehbein und Dr.-Ing. Eberhardt Steinle, Ingenieurbüro Steinle

Regine Schatz und Dr.-Ing. Tosca Zech, Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG

Dr. Manfred Sengl und Marc Eßlinger, LfU

Dr. Klaus Weiß und Willi Kopf, LfU

Mag. Georgia Buchmeier und Dr. Julia Schwaiger, LfU

Dr. Margit Schade und Dr. Elisabeth Müller, LfU

Ilona Schlößer, LfU

## Begleitung

Dr. Kurt Müller, StMUV

Stefan Bleisteiner, LfU

## Mitwirkung

Martina Hanke und Markus Eisenmann, Stadt Weißenburg

Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause, Universität der Bundeswehr München

Alessandro Piazzoli und Dr. Christian Götz, Envilab AG

Dr. Micheale Hunze, FlowConcept GmbH

Magdalena Josenhans und Tom Orawetz, Jacobi Carbons GmbH

Marlies Prahtel, TU München

My Huyen Tran und Eric Miller, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

## Zitierung

Rödel, S.; Günthert, F.W.; Rehbein, V.; Steinle, E.; Schatz, R.; Zech, T.; Sengl, M.; Eßlinger, M.; Weiß, K.; Kopf, W.; Buchmeier, G.; Schwaiger, J.; Schade, M.; Müller, E.; Schlößer, I. (2019): Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen (Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe). Errichtung und Nachweis der Leistungsfähigkeit einer vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg. Abschlussbericht gerichtet an das Bayerische Landesamt für Umwelt.

## Titelbild

Nachklärbecken und vierte Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg

Foto: Sascha Rödel (Universität der Bundeswehr München)

## PDF-Download

<https://athene-forschung.unibw.de/doc/128025/128025.pdf>

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.



## Inhaltsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Inhaltsverzeichnis .....   | I    |
| Autorenverzeichnis .....   | VI   |
| Abbildungsverzeichnis .....  | VII  |
| Tabellenverzeichnis .....  | XIII |
| 1 Veranlassung .....   | 1    |
| 2 Zielsetzung .....  | 3    |
| 2.1 Allgemein .....  | 3    |
| 2.2 Reinigungsleistung .....   | 3    |
| 2.3 Betriebliche Zielsetzung.....  | 4    |
| 3 Projektverlauf .....   | 5    |
| 3.1 Vorauswahl .....   | 5    |
| 3.2 Aufgaben und Projektbeteiligte .....   | 5    |
| 3.3 Projektablauf .....  | 6    |
| 3.4 Tätigkeiten und Meilensteine während des Projektverlaufs .....   | 11   |
| 4 Untersuchungen zur Auswahl und Auslegung der errichteten Verfahrenskonzeption. 13                                |      |
| 4.1 Bestandsaufnahme und Auswertung Betriebsdaten Kläranlage.....  | 14   |
| 4.1.1 Einzugsgebiet und Kanalnetz .....  | 14   |
| 4.1.2 Einleiter und Indirekteinleiter .....  | 14   |
| 4.1.3 Einleitbedingungen .....   | 14   |
| 4.1.4 Abwasser- und Schlammbehandlung der Kläranlage Weißenburg (Stand:<br>2015) .....                             | 15   |
| 4.1.5 Auswertung Betriebsdaten (2011 - 2013).....  | 17   |
| 4.1.5.1 Wassermengen .....   | 17   |
| 4.1.5.2 Zulauffrachten zur KA Weißenburg .....   | 21   |
| 4.1.5.3 Ablaufwerte KA Weißenburg .....  | 23   |
| 4.1.5.4 Weitere Analyseparameter .....   | 31   |
| 4.2 Voruntersuchungen zur Erhöhung der Planungssicherheit .....  | 32   |
| 4.2.1 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse .....  | 32   |
| 4.2.2 Testverfahren Ozonierbarkeit .....   | 32   |
| 4.2.3 Strömungssimulation Ozonreaktor .....  | 34   |
| 4.2.4 Vergleich der Gaseintragungssysteme.....   | 38   |
| 4.2.5 Stromverbrauch Kläranlage Weißenburg und Prognose des<br>Stromverbrauchs für die vierte Reinigungsstufe..... | 41   |
| 4.2.6 Kohleauswahl und Hinweise zur Filterinbetriebnahme .....   | 44   |
| 4.2.6.1 Mögliche Voruntersuchungen zur Kohleauswahl .....  | 44   |
| 4.2.6.2 Erfahrungen mit kontinuierlich betriebenen Filtern in Emmingen-Liptingen.....                              | 46   |
| 4.2.6.3 Kohleauswahl in Weißenburg.....  | 47   |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.2.6.4 | Wissenschaftliche Erkenntnisse beim Einsatz von GAK als BAK.....  | 49  |
| 4.2.6.5 | Hinweise bei Inbetriebnahme und beim Einbau von GAK .....   | 51  |
| 5       | Auswahl, Bemessung und Beschreibung des Verfahrenskonzepts in Weißenburg ....   | 53  |
| 5.1     | Verfahrensempfehlung und Variantenvergleich.....  | 53  |
| 5.1.1   | Synergieeffekte bei der Verfahrenskombination Ozonung mit<br>Aktivkohlestufe .....  | 54  |
| 5.1.2   | Variantenvergleich.....   | 55  |
| 5.2     | Auslegung der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg.....  | 58  |
| 5.2.1   | Ermittlung Bemessungszufluss .....  | 59  |
| 5.2.2   | Hinweise zum Reaktorvolumen und zur hydraulischen Aufenthaltszeit .....   | 62  |
| 5.2.3   | Vorschlag zum Reaktorvolumen und zur hydraulischen Aufenthaltszeit in<br>Weißenburg.....  | 64  |
| 5.2.4   | Hinweise zur baulichen Gestaltung .....   | 65  |
| 5.2.5   | Hinweise und Bemessung bezüglich Ozonproduktion .....   | 66  |
| 5.2.6   | Hinweise und Erkenntnisse zur Steuerung/Regelung der Ozondosierung<br>sowie Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung .....   | 68  |
| 5.2.6.1 | Allgemeines .....   | 68  |
| 5.2.6.2 | Untersuchungen in Deutschland, der Schweiz und den USA .....  | 74  |
| 5.2.6.3 | Das Redox-Signal für eine bedarfsgerechte Ozondosierung.....  | 80  |
| 5.2.6.4 | Empfehlung einer geeigneten Steuer- und Regelstrategie in Weißenburg.....   | 81  |
| 5.2.6.5 | Umsetzung des Steuer- und Regelkonzepts in Weißenburg .....   | 82  |
| 5.2.7   | Hinweise zur Auslegung und zum Betrieb der Filterstufe.....   | 85  |
| 5.2.8   | Verfahrensschema und Anlagenbestandteile der vierten Reinigungsstufe in<br>Weißenburg.....  | 88  |
| 6       | Untersuchungen und Ergebnisse im Pilotprojekt.....  | 92  |
| 6.1     | Untersuchungsprogramm in Weißenburg.....  | 92  |
| 6.1.1   | Zielsetzung .....   | 94  |
| 6.1.2   | Umfang Probenahme und Analytik.....   | 96  |
| 6.1.3   | Messtechnik und Online-Sonden.....  | 97  |
| 6.2     | Untersuchungen zu Spurenstoffen 2013 und 2014 .....   | 99  |
| 6.3     | Spurenstoffscreening Kläranlage 2015/2016.....  | 101 |
| 6.4     | Reinigungsleistung Indikatorsubstanzen mit vierter Reinigungsstufe.....   | 105 |
| 6.5     | Bildung von Transformationsprodukten .....  | 111 |
| 6.6     | Non-Target-Analytik.....  | 112 |
| 6.7     | Gesamteliminationsrate der Kläranlage Weißenburg .....  | 113 |
| 6.8     | Reinigungsleistung DOC und CSB in der vierten Reinigungsstufe.....  | 115 |
| 6.9     | Untersuchungen zur Anorganik .....  | 119 |
| 6.10    | Monitoring zur Ermittlung estrogener und toxischer Wirkungen auf Fische und<br>Muscheln im Kläranlagenablauf der Kläranlage Weißenburg sowie in der<br>Schwäbischen Rezat unterhalb und oberhalb der Kläranlage ..... | 119 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 6.10.1 | Ergebnisse aus dem Fischmonitoring estrogene Wirkung .....  | 119 |
| 6.10.2 | Methodik Fischmonitoring - Estrogene und toxische Wirkungen.....  | 120 |
| 6.10.3 | Methodik In Vitro Assay - Estrogene Wirkung und begleitende<br>Wasseranalytik (GC/MS-Screening und Steroidanalytik) ..... | 122 |
| 6.10.4 | Methodik - Abflussmessung .....   | 122 |
| 6.10.5 | Methodik - Muschelschadstoffmonitoring .....  | 123 |
| 6.10.6 | Ergebnisse zum Akkumulationsmonitoring bei Muscheln .....   | 125 |
| 6.11   | Mikrobiologisch-hygienische und molekularbiologische Untersuchungen .....   | 126 |
| 6.11.1 | Bestimmung der Fäkalindikatorbakterien .....  | 126 |
| 6.11.2 | Bestimmung fäkaler DNA-Marker mittels quantitativer PCR („Microbial<br>Source Tracking“) .....                            | 126 |
| 6.11.3 | Nachweis der bakteriellen Biomasse und von Antibiotikaresistenzgenen<br>(ARG) mittels quantitativer PCR.....              | 127 |
| 6.11.4 | Ergebnisse zu den Fäkalindikatorbakterien vor Inbetriebnahme der vierten<br>Reinigungsstufe.....                          | 128 |
| 6.11.5 | Ergebnisse zu den Fäkalindikatoren nach Inbetriebnahme der vierten<br>Reinigungsstufe.....                                | 129 |
| 6.11.6 | Ergebnisse Krankheitserreger .....  | 132 |
| 6.11.7 | Molekularbiologische Untersuchungen von Antibiotikaresistenzgenen<br>(ARG) .....  | 132 |
| 6.12   | Überprüfung des Vorhandenseins Antibiotikaresistenter Bakterien in der<br>Kläranlage Weißenburg .....                     | 137 |
| 6.13   | Ergebnisse YES-Test zu endokrinen Wirkungen.....  | 138 |
| 6.13.1 | Endokrine Belastungen vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe  | 138 |
| 6.13.2 | Endokrine Belastungen mit vierter Reinigungsstufe .....   | 140 |
| 6.14   | Ökologische Untersuchungen.....   | 141 |
| 6.14.1 | Biologie.....   | 141 |
| 6.14.2 | Basischemie .....   | 141 |
| 6.15   | Untersuchung der Kohleigenschaften.....   | 143 |
| 7      | Kosten und Stromverbrauch .....   | 146 |
| 7.1    | Investitionskosten .....  | 146 |
| 7.2    | Betriebskosten .....  | 146 |
| 7.3    | Spezifische Jahreskosten .....  | 147 |
| 7.4    | Energetische Betrachtungen .....  | 148 |
| 7.4.1  | Berücksichtigung des Stromverbrauchs in der Planung der<br>Versuchsanlage.....  | 149 |
| 7.4.2  | Stromverbrauch nach Betriebsphasen .....  | 150 |
| 7.4.3  | Hinweise zur Auswertung der Energiedaten aus dem Datenprotokoll .....   | 152 |
| 7.4.4  | Betrachtung der Stillstandzeiten der Ozonanlage .....   | 152 |
| 7.4.5  | Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe und der Kläranlage.....  | 153 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 7.4.6   | Stromverbrauch der Ozonung .....   | 155 |
| 7.4.7   | Stromverbrauch der Filter .....  | 157 |
| 7.4.8   | Anteilige Verbräuche der Verfahrensstufen und Anlagenkomponenten...  | 158 |
| 7.4.9   | Spezifische Verbräuche der vierten Reinigungsstufe und der<br>Verfahrensstufen und Anlagenkomponenten .....  | 159 |
| 7.4.10  | Vergleich der ermittelten Stromverbrauchswerte mit der Literatur .....                                       | 160 |
| 7.4.11  | Wärmeenergie .....   | 162 |
| 8       | Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus dem dem Anlagenbetrieb in<br>Weißenburg .....                     | 164 |
| 8.1     | Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb .....  | 164 |
| 8.1.1   | Anlagentechnik Ozonung .....   | 164 |
| 8.1.2   | Beobachtungen bei Abschaltungen der Ozonanlage .....   | 169 |
| 8.1.3   | Einfluss von Nitrit auf die Spurenstoffelimination .....   | 175 |
| 8.1.4   | Einfluss des DOC .....   | 180 |
| 8.1.5   | Filterbetrieb.....   | 182 |
| 8.1.6   | Messtechnik und Datenreport.....   | 184 |
| 8.1.7   | Beobachtungen beim SAK <sub>254</sub> .....  | 185 |
| 8.1.8   | Konzept der Vergleichsmessung des SAK <sub>254</sub> .....   | 188 |
| 8.1.9   | Bestimmung und Überprüfung der SAK <sub>254</sub> -Werte als Regelparameter ....                             | 188 |
| 8.1.9.1 | Vergleich der SAK <sub>254</sub> -Online-Messwerte mit den Laborwerten (LfU) .....                           | 188 |
| 8.1.9.2 | Vergleich der SAK <sub>254</sub> -Online-Messwerte mit den Laborwerten (Kläranlage<br>Weißenburg) .....      | 191 |
| 8.1.9.3 | Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme und Spurenstoffelimination .  | 193 |
| 8.1.9.4 | Einfluss des spezifischen Ozoneintrags auf die Absorbanzabnahme und<br>Spurenstoffelimination .....          | 195 |
| 8.2     | Hinweise und Parameter zur Betriebsführung und Eigenüberwachung .....  | 197 |
| 8.3     | Empfehlungen zur weiteren Betriebsweise.....   | 202 |
| 9       | Weitere Untersuchungen .....   | 207 |
| 9.1     | Weitere Untersuchungen zum Energiebedarf.....  | 208 |
| 9.2     | Erforderliche Untersuchungen zur Absorbanzabnahme in der Ozonung und<br>Überwachung des Reinigungsziels..... | 208 |
| 9.3     | Verhalten von ARB und ARG in den Verfahrensstufen .....  | 213 |
| 9.4     | Weitere Forschungsansätze .....  | 213 |
| 9.4.1   | Ökobilanzielle Betrachtung.....  | 213 |
| 9.4.2   | Optimierung von Gaseintragssystemen .....  | 214 |
| 9.4.3   | Untersuchungen zur Organik und biologischer Aktivität in den Filtern .....                                   | 214 |
| 9.4.4   | Untersuchungen zur qualitativen Differenzierung zwischen Adsorption und<br>biologischen Abbau .....          | 220 |
| 9.4.5   | Online-Überwachung der biologischen Aktivität in Filtersystemen.....   | 222 |
| 10      | Zusammenfassung .....  | 223 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Inhaltsverzeichnis           | V   |
| 11 Literaturverzeichnis..... | 231 |
| Anhang A.....                | 248 |
| Anhang B.....                | 249 |
| Anhang C.....                | 251 |
| Anhang D.....                | 256 |
| Anhang E.....                | 258 |
| Anhang F.....                | 260 |
| Anhang G.....                | 261 |

**Autorenverzeichnis**

| <b>Autoren</b>   | <b>Institution</b>   | <b>Kapitel</b>   |
|--|--|--|
| Sascha Rödel und Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert   | Universität der Bundeswehr München                             | Kapitel 1, 2, 3;<br>Kapitel 4.1 und 4.2;<br>Kapitel 5.1 und 5.2<br>Kapitel 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.12 und 6.15;<br>Kapitel 7.1, 7.2 und 7.3;<br>Kapitel 8, 9 und 10 |
| Dr.-Ing. Verena Rehbein und Dr.-Ing. Eberhardt Steinle | Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH | Kapitel 4.1 und 4.2;<br>Kapitel 5.2;<br>Kapitel 7.4  |
| Regine Schatz und Dr.-Ing. Tosca Zech                  | Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG                        | Kapitel 4.1 und 4.2;<br>Kapitel 5.1 und 5.2;<br>Kapitel 8.1  |
| Dr. Manfred Sengl und Marc Eßlinger                    | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 75                   | Kapitel 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 und 6.9   |
| Mag. Georgia Buchmeier und Dr. Julia Schwaiger         | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 73                   | Kapitel 6.10   |
| Dr. Margit Schade und Dr. Elisabeth Müller             | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 77                   | Kapitel 6.11   |
| Dr. Klaus Weiß und Willi Kopf                          | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 77                   | Kapitel 6.13   |
| Ilona Schlößer   | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 83                   | Kapitel 6.14   |

## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Abwasseranteil der Kläranlage Weißenburg im Gewässer .....  | 5  |
| Abbildung 2:  | Projektbeteiligte und Aufgaben.....   | 6  |
| Abbildung 3:  | Geplanter Standort der vierten Reinigungsstufe, Stand: Vorplanung 2015, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....                   | 7  |
| Abbildung 4:  | Zeichnerische Darstellung des Planungskonzepts als Lageplan mit Zu- und Ableitungen, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG ..... | 8  |
| Abbildung 5:  | Süd- und Westansicht der geplanten vierten Reinigungsstufe, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....                          | 8  |
| Abbildung 6:  | Spatenstich für die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg, Bild: Stadt Weißenburg .....  | 9  |
| Abbildung 7:  | Baufortschritt Oktober 2016, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG.....   | 9  |
| Abbildung 8:  | Baufortschritt November 2017 (links) und April 2017 (rechts), Bilder: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....                           | 9  |
| Abbildung 9:  | Aufbau Sauerstofftank (links) und leere Filterzellen (rechts), Bilder: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....                          | 10 |
| Abbildung 10: | Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, Bild: Bayerischer Rundfunk (links), Helmut Resch (rechts) .....                                   | 10 |
| Abbildung 11: | Ziele und Einstellungen der geplanten Versuchsphasen .....  | 11 |
| Abbildung 12: | Tätigkeiten (Auszug) und Meilensteine im Pilotprojekt Weißenburg.....   | 12 |
| Abbildung 13: | Vorgehensweise im Planungsverlauf beim Pilotprojekt.....  | 13 |
| Abbildung 14: | Verfahrensschema der KA Weißenburg, Stand: 2014, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....                                     | 16 |
| Abbildung 15: | Ganglinie Tagesdurchfluss von 2011 bis 2013 .....   | 17 |
| Abbildung 16: | Häufigkeitsverteilung Tagesdurchfluss.....  | 18 |
| Abbildung 17: | Häufigkeitsverteilung der Stundenzuflüsse von 2011 bis 2013 an allen Tagen sowie an Trockenwettertagen .....                                  | 19 |
| Abbildung 18: | Tageszuflüsse und Trockenwetterzuflüsse zur KA Weißenburg 2011 bis 2015... ..   | 20 |
| Abbildung 19: | Summenhäufigkeit des 2 h-Mittels der niedrigsten Nachtzuflüsse 2011 bis 2015 ..   | 21 |
| Abbildung 20: | Zulaufbelastung der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015 .....   | 23 |
| Abbildung 21: | Ablaufkonzentrationen BSB <sub>5</sub> und CSB aus Tagesmischproben von 2011 bis 2013 .....   | 24 |
| Abbildung 22: | Ablaufkonzentrationen N <sub>ges</sub> , NH <sub>4</sub> -N und Phosphor aus Tagesmischproben von 2011 bis 2013 .....                         | 24 |
| Abbildung 23: | Ablaufkonzentrationen CSB und BSB <sub>5</sub> aus 2 h-Mischproben von 2012 .....   | 25 |
| Abbildung 24: | Ablaufkonzentrationen N <sub>ges</sub> , NH <sub>4</sub> -N aus 2 h-Mischproben von 2012 .....  | 25 |
| Abbildung 25: | Ablaufkonzentrationen Gesamt-Phosphor aus 2 h-Mischproben von 2012.....   | 26 |
| Abbildung 26: | Ablaufkonzentrationen NO <sub>2</sub> -N aus 2 h-Mischproben von 2012.....  | 26 |
| Abbildung 27: | Ablaufkonzentrationen AFS aus 2 h-Mischproben von 2012 .....  | 27 |
| Abbildung 28: | Ablaufkonzentrationen AFS der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015.....  | 28 |
| Abbildung 29: | Häufigkeitsunterschreitung der Ablaufrachten KA Weißenburg .....  | 29 |
| Abbildung 30: | CSB und BSB <sub>5</sub> Ablaufwerte der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015.....   | 30 |
| Abbildung 31: | Stickstoff- und Phosphorablaufwerte der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015 30  |    |

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 32: | Konzentration von CSB und DOC in Abhängigkeit vom Wetter.....  | 31 |
| Abbildung 33: | Abbauleistung der Ozonung bei den Dosen 0,5 und 1,0 g O <sub>3</sub> / g DOC in Batch-Versuchen mit Abwasser der Kläranlage Weißenburg.....  | 34 |
| Abbildung 34: | Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor, Längsschnitt (rot = 0,2 m/s, gelb = 0,13 - 0,14 m/s, blau = 0 m/s) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) .....  | 35 |
| Abbildung 35: | Verteilung des Ozongases (Vol.-%), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot = 0,040 Vol.-%, gelb = 0,024 - 0,030 Vol.-%, blau = 0 Vol.-%) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts).....  | 37 |
| Abbildung 36: | Tracerverteilung (%), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot = 0,025 %, gelb = 0,015 - 0,019 %, blau = 0 %) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) .....   | 37 |
| Abbildung 37: | Metoprolol-Verteilung (g/l), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot = 1,0e-07 g/l, gelb = 6,0e-08 - 7,0e-08 g/l, blau = 1,0e-10 g/l) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) .....  | 37 |
| Abbildung 38: | Projektkostenbarwert der Mehrkosten der Varianten des Ozoneintragssystems .  | 39 |
| Abbildung 39: | Jährlicher Energiebedarf (elektrisch, in [kWh/a]) auf der Kläranlage Weißenburg mit und ohne vierte Reinigungsstufe .....  | 43 |
| Abbildung 40: | Einwohnerspezifischer Energiebedarf (elektrisch, in [kWh/(E•a)]) auf der Kläranlage Weißenburg mit und ohne vierte Reinigungsstufe .....   | 43 |
| Abbildung 41: | Variante 1 - Ozonung mit BAK-Filter, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG.....   | 55 |
| Abbildung 42: | Variante 2 - Ozonung und zweistraßige Filter, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG.....  | 56 |
| Abbildung 43: | Variante 3 - Ozonung und biologisches Festbett, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....   | 56 |
| Abbildung 44: | Spurenstoffelimination bei Teil- und Vollstrombehandlung .....   | 58 |
| Abbildung 45: | Einfluss von Wirkungsgrad und Abwassermenge der vierten Reinigungsstufe auf den Gesamtwirkungsgrad der Spurenstoffelimination in der Kläranlage .....  | 59 |
| Abbildung 46: | Vorgehensweise zur Ermittlung der Auslegungswassermenge .....  | 60 |
| Abbildung 47: | Behandelte Abwassermenge für den festgelegten Bemessungswert (430 m <sup>3</sup> /h); Basis: 2 h-Mittel des Abflusses.....   | 61 |
| Abbildung 48: | Jährliche Verteilung der 2 h-Zuflüsse zur Kläranlage Weißenburg.....   | 61 |
| Abbildung 49: | Verweilzeit-Summenfunktion F(t) bei einer mittleren Verweilzeit (HRT) von 15 min. für unterschiedliche Stufenanzahlen idealer Reaktoren.....   | 64 |
| Abbildung 50: | Häufigkeitsverteilung der hydraulischen Verweilzeit .....  | 65 |
| Abbildung 51: | Berechnung Ozondosis mit Nitritkompensation .....  | 67 |
| Abbildung 52: | Korrelation zwischen Absorbanzabnahme und Ozondosis für drei verschiedene Abwässer .....   | 75 |
| Abbildung 53: | Gegenüberstellung der erreichbaren Elimination und Ablaufkonzentrationen der mengenproportionalen (dO <sub>3</sub> = 5,0 mgO <sub>3</sub> /L) und der Ozonzugabe in Abhängigkeit der Ozonkonzentration in der wässrigen Phase (dO <sub>3</sub> = 4,6 mgO <sub>3</sub> /L)..... | 76 |
| Abbildung 54: | Gegenüberstellung der erreichbaren Elimination der Ozonungsstufe der mengenproportionalen und der SAK-basierten Ozonzugabe bei gleicher applizierter spezifischer Ozondosis in Höhe von 0,38±0,01 mg O <sub>3</sub> /mg DOC .....  | 77 |
| Abbildung 55: | Redoxpotential und Keimabbau in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration .....   | 81 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 56: | Q-Proportionale Steuerung.....   | 83  |
| Abbildung 57: | Frachtproportionale Steuerung nach UV-Messung.....   | 83  |
| Abbildung 58: | Regelung nach $\Delta$ SAK.....  | 84  |
| Abbildung 59: | $\Delta$ SAK Regelung mit Vorsteuerung .....   | 84  |
| Abbildung 60: | Schema kontinuierlich betriebener Filter .....   | 87  |
| Abbildung 61: | Geplanter Standort der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG .....  | 90  |
| Abbildung 62: | Grundfließschema der vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg .   | 91  |
| Abbildung 63: | Übersicht über die Probenahme- und Messstellen .....   | 93  |
| Abbildung 64: | Probenahmesystem auf der Kläranlage .....  | 93  |
| Abbildung 65: | Messtöpfe mit Sonden (Zulauf & Ablauf Ozonung, Ablauf Sandfilter/Aktivkohlefilter) .....   | 98  |
| Abbildung 66: | Messtöpfe für die Onlinemessungen .....  | 98  |
| Abbildung 67: | Schema der Messwerterfassung im PLS in Weißenburg.....   | 99  |
| Abbildung 68: | Eliminationsleistung – Vergleich der Durchschnittswerte, Verhältnis von Zulauf/Ablauf.....   | 100 |
| Abbildung 69: | Konzentration Indikatorsubstanzen Ablauf KA – Jahresmittel 2015 - 2016 (n = 15, außer für Mecoprop n = 3).....   | 102 |
| Abbildung 70: | Konzentrationen der Indikatorsubstanzen im Vergleich mit Literaturangaben....  | 103 |
| Abbildung 71: | Konzentrationen von weiteren Spurenstoffen im Vergleich mit Literaturangaben .....   | 103 |
| Abbildung 72: | Konzentrationen der Indikatorsubstanzen und Abwassermengen am Ablauf der KA Weißenburg – Jahresprofil.....   | 104 |
| Abbildung 73: | Vergleich der Eliminationsgrade der KA Weißenburg mit Literaturangaben.....  | 105 |
| Abbildung 74: | Mittlere Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen und Ozoneintrag.....  | 106 |
| Abbildung 75: | Nitritkonzentrationen im Zulauf zur Ozonung .....  | 106 |
| Abbildung 76: | Mittlere Eliminationsraten und Konzentrationen einzelner Indikatorsubstanzen in den einzelnen Filterstraßen .....  | 107 |
| Abbildung 77: | Gemittelte Eliminationsraten der zwölf Indikatorsubstanzen für die verschiedenen Verfahrensstufen und berechneter spezifischer Ozoneintrag und Ozoneintrag vom 23.11.2017 bis 18.07.2018 bei stabilem Anlagenbetrieb ..... | 109 |
| Abbildung 78: | Mittlere Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen in den einzelnen Filterstraßen und durchgesetzte Bettvolumina und EBCT vom 23.11.2017 bis 18.07.2018.....   | 109 |
| Abbildung 79: | Nachweis von Clarithromycin und Clarithromycin N-Oxid in der vierten Reinigungsstufe.....  | 112 |
| Abbildung 80: | Bildung von Transformationsprodukten in der Ozonung.....   | 112 |
| Abbildung 81: | Gebildete Transformationsprodukte (Abwasserprobe vom 10.07.2018 aus dem Ablauf der Ozonung) nach der Ozonung, dargestellt als Features (Datenpunkte) in einem Masse-Retentionszeit-Diagramm .....                          | 113 |
| Abbildung 82: | DOC-Konzentrationen und Elimination in den einzelnen Verfahrensstufen.....   | 117 |
| Abbildung 83: | CSB-Konzentrationen und Elimination in den einzelnen Verfahrensstufen .....  | 118 |
| Abbildung 84: | DOC und CSB Reduktion im Aktivkohlefilter in Abhängigkeit vom durchgesetzten Bettvolumina (BVT).....   | 118 |
| Abbildung 85: | Vitellogeninkonzentration im Fischblut 2014 .....  | 120 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 86:  | Langstromrinne zur Fischexposition mit Probenehmer und Online-Messsonden am Stand-ort Silbermühle im Herbst 2014 .....  | 121 |
| Abbildung 87:  | Abflussmessung an der Schwäbischen Rezat unterhalb der KA Weißenburg ...  | 123 |
| Abbildung 88:  | Muschelkäfige in der Langstromrinne am Standort Kläranlage Weißenburg im Herbst 2014 .....  | 124 |
| Abbildung 89:  | Muschelkäfig zur Langzeitexposition am Standort Silbermühle im Frühjahr 2015 .....  | 124 |
| Abbildung 90:  | Langstromrinne zur Muschelexposition mit Online-Messsonden am Standort Kläranlagenablauf im Frühjahr 2015 .....   | 125 |
| Abbildung 91:  | Analysenergebnisse Muschelpoolproben 2014 (Expositionszeit vier Wochen) ..  | 126 |
| Abbildung 92:  | Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Zu- und Ablauf der Kläranlage Weißenburg (EC = <i>Escherichia coli</i> ; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = <i>Clostridium perfringens</i> ; HF183 und BacHum = humanbürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuerbürtige Fäkal-DNA-Marker).....   | 128 |
| Abbildung 93:  | Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in der Schwäbischen Rezat (EC = <i>Escherichia coli</i> ; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = <i>Clostridium perfringens</i> ; HF183 und BacHum = human-bürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuer-bürtige Fäkal-DNA-Marker).....   | 129 |
| Abbildung 94:  | Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Zulauf der Kläranlage Weißenburg (Ablauf Vorklämung) und in den verschiedenen Zu- und Abläufen der vierten Reinigungsstufe (EC = <i>Escherichia coli</i> ; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = <i>Clostridium perfringens</i> ) .....   | 130 |
| Abbildung 95:  | Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in der Schwäbischen Rezat während des Betriebs der vierten Reinigungsstufe (EC = <i>Escherichia coli</i> ; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = <i>Clostridium perfringens</i> ; HF183 und BacHum = human-bürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuer-bürtige Fäkal-DNA-Marker).....  | 132 |
| Abbildung 96:  | Bakterielle Biomasse (16S rRNA-Gen) und ARG im unbehandelten (Kläranlagenzulauf = Ablauf Vorklämung) und behandelten Abwasser (Ablauf Nachklämung) der KA-WUG vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe und in der Schwäbischen Rezat (KA-WUG = Kläranlage Weißenburg, KA-D = Kläranlage Dettenheim). LOQ = Limit of Quantification (Quantifizierungsgrenze), LOD = Limit of Detection (Nachweisgrenze) .....  | 136 |
| Abbildung 97:  | Bakterielle Biomasse (16S rRNA-Gen) und ARG im unbehandelten (Kläranlagenzulauf = Ablauf Vorklämung) Abwasser der KA-WUG, im Abwasser in der vierten Reinigungsstufe (Zulauf Ozonung = Ablauf NKB, Ablauf Ozonung (4,9 g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> ), Ablauf Sandfilter, Ablauf Aktivkohlefilter und Gesamtablauf Kläranlage) sowie in der Schwäbischen Rezat (KA-WUG = Kläranlage Weißenburg, KA-D = Kläranlage Dettenheim). LOQ = Limit of Quantification (Quantifizierungsgrenze), LOD = Limit of Detection ..... | 137 |
| Abbildung 98:  | Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg, Wochengänge mit Tagesmischproben im November 2014 und Juni 2015.....   | 139 |
| Abbildung 99:  | Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg, Stichproben und Wochengänge mit Tagesmischproben im Juni 2016 und November 2016.....   | 139 |
| Abbildung 100: | Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, Wochengang mit Tagesmischproben im Januar 2018 .....   | 140 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 101: Partikelgrößenverteilung und Siebkurve der Frischkohle (8x30 mesh), erstellt durch Jacobi Carbons GmbH .....   | 145 |
| Abbildung 102: Partikelgrößenverteilung und Siebkurve der Gebrauchtkohle nach ca. einem Jahr Filterbetrieb, erstellt durch Jacobi Carbons GmbH .....  | 145 |
| Abbildung 103: Übersicht Leistungsmessungen vierte Reinigungsstufe.....   | 149 |
| Abbildung 104: Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe unterschieden nach Verfahrensstufen und Betriebsphasen.....   | 151 |
| Abbildung 105: Stillstandzeiten Ozonung und Stromverbrauch Gesamtanlage.....  | 153 |
| Abbildung 106: Stromverbrauch gesamte Kläranlage und vierte Reinigungsstufe absolut [kWh/d] .....   | 154 |
| Abbildung 107: Verbrauch Ozongenerator, Pumpen, Kleinverbraucher .....  | 156 |
| Abbildung 108: Spezifischer Verbrauch vierte Reinigungsstufe und Ozonung .....  | 156 |
| Abbildung 109: Spezifischer Stromverbrauch der Ozonerzeugung [kWh/kg O <sub>3</sub> ] .....   | 157 |
| Abbildung 110: Gesamtverbrauch und spez. Verbrauch Filteranlage .....   | 158 |
| Abbildung 111: Verbrauchsanteile in Betriebsphase 5 (01.09. – 15.10.2018) .....   | 159 |
| Abbildung 112: Strombedarf einer nachgeschalteten Ozonung auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus Weißenburg mit Literaturangaben .....  | 161 |
| Abbildung 113: Strombedarf von nachgeschalteten GAK-Filtrationsanlagen – Vergleich von Daten aus Weißenburg mit Literaturangaben .....  | 161 |
| Abbildung 114: Wärmeerzeugung durch Ozongenerator .....   | 163 |
| Abbildung 115: Regenwetterkorrektur auf der Kläranlage Regensdorf.....  | 165 |
| Abbildung 116: Regenwetterkorrektur bei der zuflussproportionalen Steuerung der Ozonzugabe (Auszug Messwerte vom 03.04.2018 aus Datenreport) .....  | 166 |
| Abbildung 117: Reaktorquerschnitt mit Zulaufrohr und Austrittsöffnungen .....   | 167 |
| Abbildung 118: Ergebnisse der Druckanalyse bei vergrößerten Zutrittsöffnungen im Zulaufrohr   | 167 |
| Abbildung 119: Ausfällungen im vorderen Teil des Ozonreaktors, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG.....   | 169 |
| Abbildung 120: Verlauf der Ozonkonzentration im Zugas von November 2017 bis Anfang März 2018 .....  | 170 |
| Abbildung 121: Ozonbetrieb zwischen 28. und 29. Januar 2018 .....   | 170 |
| Abbildung 122: Ozonbetrieb zwischen 19. und 20. Februar 2018 .....  | 171 |
| Abbildung 123: Ozonbetrieb zwischen 25. und 26. Februar 2018 .....  | 171 |
| Abbildung 124: Verlauf von Zufluss zur vierten Reinigungsstufe u. Ozonproduktion im April 2018 .....  | 172 |
| Abbildung 125: Sauerstoffmessungen im April 2018.....   | 173 |
| Abbildung 126: Abschaltung der Ozonproduktion durch Störungen im Anlagenbetrieb (grau = Gasstrom Injektor, rot = Ozondosis, blau = Ozonproduktion) .....                                      | 174 |
| Abbildung 127: Nitritkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage von 2010 bis 2018 (ab Oktober 2017 beinhaltet der Gesamtablauf der Kläranlage auch den Ablauf der vierten Reinigungsstufe)..... | 176 |
| Abbildung 128: Nitritkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Ozonung (blaue Punkte = Ozonung Kläranlage Weißenburg, Dreiecke = Referenzmessungen aus anderen Versuchen) .....                | 176 |
| Abbildung 129: Spurenstoffelimination bezüglich der Abwasserprobe aus Weißenburg (blauer Punkt = KA Weißenburg, Dreiecke = Referenzmessungen aus anderen Versuchen,                           |     |

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
|                | CBZ = Carbamazepin, DCF = Diclofenac, SMX = Sulfamethoxazol, FAA = 4-Formylaminoantipyrin, VLX = Venlafaxin) .....   | 177 |
| Abbildung 130: | Spurenstoffelimination bezüglich der Abwasserprobe aus Weißenburg (blauer Punkt = KA Weißenburg, Dreiecke/schwarze Punkte = Referenzmessungen aus anderen Versuchen, ACS = Acesulfam, BTA = Benzotriazol, GAB = Gabapentin, MBT = 4/5-Methylbenzotriazol, MTP = Metoprolol, GPL = Gabapentin-Lactam) 178 |     |
| Abbildung 131: | Nitritkorrektur bei der Ozondosierung (spezifische Ozondosis gewählt mit 0,5 g O <sub>3</sub> /g DOC für 5 mg (blau), 7 mg (orange) und 10 mg (grau) Ozon pro Liter).....  | 179 |
| Abbildung 132: | Veränderungen des DOC u. BDOC vor/nach der Ozonung.....  | 181 |
| Abbildung 133: | Biofilmbewuchs Luftverteilerkopf der Mammutpumpe März 2018 .....   | 183 |
| Abbildung 134: | Verlauf des $\Delta\text{SAK}_{254}$ und der Konzentration an Ozon im Offgas während der $\Delta\text{SAK}_{254}$ – Regelung.....  | 186 |
| Abbildung 135: | Einfluss der Trübung auf den Ozongehalt im Offgas .....  | 186 |
| Abbildung 136: | Verhalten des nicht trübungskompensierten $\text{SAK}_{254}$ für die verschiedenen Messstellen.....  | 187 |
| Abbildung 137: | Korrelation des $\text{SAK}_{254}$ mit der Trübung im Zulauf der Ozonung.....  | 187 |
| Abbildung 138: | Vergleich der Laborwerte (LfU) mit den Onlinemessungen bezüglich $\text{SAK}_{254}$ aus Zu- und Ablauf Ozonung.....  | 190 |
| Abbildung 139: | Vergleich der Laborwerte (Kläranlage Weißenburg) mit den Onlinemessungen bezüglich $\text{SAK}_{254}$ aus Zu- und Ablauf Ozonung .....   | 192 |
| Abbildung 140: | Vergleich der Laborwerte (Kläranlage Weißenburg) mit den Onlinemessungen bezüglich $\text{SAK}_{254}$ aus Ablauf Sandfilter und Aktivkohlefilter.....  | 193 |
| Abbildung 141: | Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme und Spurenstoffentnahme in der Ozonung, Vergleich der Laborergebnisse (LfU) mit den Online-Messwerten.....  | 195 |
| Abbildung 142: | Zusammenhang zwischen spezifischen Ozoneintrag und Absorbanzabnahme sowie Spurenstoffentnahme in der Ozonung .....   | 196 |
| Abbildung 143: | Absorbanzabnahme und Spurenstoffelimination in der Ozonung bei unterschiedlichen $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwerten .....  | 210 |
| Abbildung 144: | Vergleich der $\text{SAK}_{254}$ -Werte aus Labor mit den Onlinemesswerten.....  | 211 |
| Abbildung 145: | Vergleich zwischen dem Abbau der Leitsubstanzen über den Ozonreaktor mit dem online gemessenen $\Delta\text{SAK}$ bei 254 nm in der Ozonung .....  | 212 |
| Abbildung 146: | Zeitabhängige Veränderung der Biomasse in unterschiedlichen Filtertiefen eines BAK-Filters.....  | 220 |
| Abbildung 147: | Quantification of the removal of organic matters by adsorption and biodegradation .....  | 222 |

## Tabellenverzeichnis

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1:  | Einleitungsbedingungen u. Wassermengen der Kläranlage Weißenburg (Stand: 2015).....  | 15  |
| Tabelle 2:  | Berechnung der Stundenspitze bei Trockenwetter nach A 198 zur Plausibilitätsprüfung der Messwerte der Stundenzuflüsse.....   | 19  |
| Tabelle 3:  | Wassermengen Kläranlage Weißenburg von 2011 bis 2013 (Stand: 2014).....  | 20  |
| Tabelle 4:  | Tagesfrachten Zulauf KA Weißenburg für 2011 bis 2013 .....   | 22  |
| Tabelle 5:  | Tagesfrachten Ablauf Nachklärung der KA Weißenburg .....   | 28  |
| Tabelle 6:  | Zusammenfassende Beurteilung der untersuchten Abwasserprobe der Kläranlage Weißenburg .....  | 33  |
| Tabelle 7:  | Gemessene Bromid-, und Bromatkonzentrationen .....   | 33  |
| Tabelle 8:  | Vergleich der verschiedenen Simulationsvarianten .....   | 36  |
| Tabelle 9:  | Mehrbetriebskosten der Ozoneintragssysteme.....  | 38  |
| Tabelle 10: | Nutzwertanalyse zur Wahl des Eintragungssystems für Ozon.....  | 40  |
| Tabelle 11: | Zusätzlicher Strombedarf (elektrischer Energiebedarf) der Kläranlage Weißenburg durch die vierte Reinigungsstufe mit Pumpwerk und Erhöhung des Stromverbrauchs in Prozent (Prognosewerte) verglichen mit dem Ist-Zustand....                         | 42  |
| Tabelle 12: | Eigenschaften von Aquasorb 2000 und Filtrasorb .....   | 48  |
| Tabelle 13: | Kostenschätzungen für die erarbeiteten Varianten im Vorentwurf.....  | 57  |
| Tabelle 14: | Abwassermengen KA Weißenburg von 2011 bis 2015.....  | 60  |
| Tabelle 15: | Ermittlung der erforderlichen Ozondosis .....  | 68  |
| Tabelle 16: | Charakteristika von Möglichkeiten der Ozondosierung.....   | 70  |
| Tabelle 17: | Steuerungs- und Regelungskonzepte zur Ozondosierung.....   | 71  |
| Tabelle 18: | Relative Absorbanzabnahme bei 254 nm für eine 50 % und 80 % Elimination von ausgewählten Spurenstoffen in verschiedenen Abwässern.....   | 79  |
| Tabelle 19: | Ergebnisse der verschiedenen auf der ARA Neugut getesteten Strategien .....  | 80  |
| Tabelle 20: | Auslegungsdaten und Kenngrößen Filterstufe in Weißenburg .....   | 88  |
| Tabelle 21: | Probenahmestellen im Gewässer.....   | 94  |
| Tabelle 22: | Merkmale der Probenahme und Ziele der Erfolgskontrolle .....   | 95  |
| Tabelle 23: | Konzentration Indikatorsubstanzen Kategorie 1 Ablauf Kläranlage ( $\mu\text{g/l}$ ).....   | 100 |
| Tabelle 24: | Konzentration Indikatorsubstanzen Kategorie 2 Ablauf Kläranlage und Gabapentin ( $\mu\text{g/l}$ ).....  | 101 |
| Tabelle 25: | Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen in den Verfahrensstufen.....   | 110 |
| Tabelle 26: | Rechnerische Gesamtreduktion in der Kläranlage.....  | 115 |
| Tabelle 27: | 16S rRNA Gen zur Quantifizierung der bakteriellen Biomasse und vier verschiedene Antibiotikaresistenzgene (ARG) .....  | 127 |
| Tabelle 28: | Reduktionsleistung (in log-Stufen) zwischen den verschiedenen Stufen der weitergehenden Abwasserbehandlung auf der Kläranlage Weißenburg (EC = <i>Escherichia coli</i> ; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = <i>Clostridium perfringens</i> ) ..... | 131 |
| Tabelle 29: | Basischemische Parameter .....   | 142 |
| Tabelle 30: | Basischemische Untersuchungsergebnisse 2015 bis 2017 (Rot: Unterschreitung und Überschreitung der Orientierungswerte in Fließgewässern .....   | 143 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 31: | Vergleich der ASTM-Parameter .....   | 144 |
| Tabelle 32: | Investitionskosten der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg.....  | 146 |
| Tabelle 33: | Ermittelte Betriebskosten pro Jahr für den Betrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase ..... | 147 |
| Tabelle 34: | Unterteilung in Betriebsphasen .....   | 151 |
| Tabelle 35: | Stromverbrauch gesamte Kläranlage und vierte Reinigungsstufe absolut [kWh/d] .....   | 154 |
| Tabelle 36: | Mittlere Verbrauchszahlen über Versuchsphasen.....   | 158 |
| Tabelle 37: | Spezifischer Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe und der Verfahrensstufen und Anlagenkomponenten.....   | 159 |
| Tabelle 38: | Betriebsparameter der vierten Reinigungsstufe .....  | 164 |
| Tabelle 39: | Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung am 23. und 26. April 2018 (SP = Stichproben) .....   | 178 |
| Tabelle 40: | Beobachtungen und Optimierungspotenziale bei den SAK-Sonden.....   | 184 |
| Tabelle 41: | Mögliche Parameter zur Dokumentation und Überwachung des Anlagenbetriebes .....  | 198 |
| Tabelle 42: | Ergänzende Parameter zur Eigenkontrolle.....   | 202 |
| Tabelle 43: | Überprüfung relevanter Messwerte im PLS anhand einer Checkliste.....   | 205 |
| Tabelle 44: | Stufenversuch mit Vorgabe unterschiedlichen $\Delta$ SAK <sub>254</sub> -Sollwerten.....   | 209 |
| Tabelle 45: | Vergleich der AOC Bestimmungsmethoden.....   | 216 |
| Tabelle 46: | BDOC Bestimmungsmethoden .....   | 216 |
| Tabelle 47: | Übersicht über AOC und BDOC Bestimmungsmethoden .....  | 217 |
| Tabelle 48: | Vor- und Nachteile von Methoden zur NOM-Charakterisierung.....   | 219 |

## 1 Veranlassung

Kommunale Kläranlagen gelten für viele anthropogene Spurenstoffe als ein wesentlicher Eintragungspfad in den Wasserkreislauf (Umweltbundesamt, 2015b, 2018; Abegglen und Siegrist, 2012). Insbesondere Arzneimittelwirkstoffe werden aufgrund ihrer meist schlechten biologischen Abbaubarkeit nur bedingt eliminiert. Sollen Spurenstoffe in Kläranlagen gezielt reduziert werden, ist eine zusätzliche sogenannte vierte Reinigungsstufe notwendig. Anthropogene Spurenstoffe, wie z.B. Arzneimittel, hormonell aktive Substanzen, Stoffe aus Industrie und Gewerbe sowie Haushaltschemikalien und Wirkstoffe aus Personal Care Products sind ein noch nicht ausreichend erforschtes und in seinen langfristigen Auswirkungen sowie dem erforderlichen Umgang noch nicht sicher abschätzbares Umweltthema. Negative Langzeitwirkungen auf aquatische Ökosysteme und Wasserressourcen durch anthropogene Spurenstoffe sind bei hohen Abwasseranteilen in Oberflächengewässern nicht auszuschließen (Ternes, 2015; Kümmerer et al., 2011; Kümmerer, 2010; Knopp und Cornel, 2015; Gunten, 2015; DWA, 2014; Schwaiger, 2014; Bolong et al., 2009; Jongh et al., 2011; Kumar und Xagorarakis, 2010; Maier et al., 2015; Steffen et al., 2015; LfU, 2016; Schwarzenbach et al., 2006; Eawag, 2009). Grundsätzlich gibt es v.a. auf EU- und Bundesebene Bestrebungen Umweltqualitätsnormen in Gewässern auch für Arzneimittel rechtlich zu verankern (Umweltbundesamt, 2015a).

Bayern verfolgt hinsichtlich des Umgangs mit diesen Stoffen eine schrittweise Vorgehensweise. Neben der Erstellung eines georeferenzierten Stoffflussmodells (Modellierung) zur Darstellung der räumlichen Konzentrationsverteilung von anthropogenen Spurenstoffen (vgl. Klasmeier et al., 2011) und der Überprüfung der prognostizierten Belastungsschwerpunkte in bayerischen Oberflächengewässern durch Messprogramme (Monitoring), wurde die Universität der Bundeswehr München vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) beauftragt, vorhandene Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen zu bewerten (Rödel et al., 2014). Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studien (Modellierung, Monitoring, Bewertung) sollen die betrieblichen Erfahrungen mit einer vierten Reinigungsstufe in Bayern und die Kenntnisse zum Eliminationsverhalten und den Auswirkungen auf das Gewässer erweitert werden.

In der Schweiz und einigen Bundesländern, insbesondere Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen, werden mittlerweile verstärkt Technologien zur Reduktion von anthropogenen Spurenstoffen erprobt und z.T. großtechnisch eingesetzt (Metzger und Miehle, 2018; Wunderlin et al., 2017b). Umgesetzte Maßnahmen in Deutschland erfolgten bisher im Wesentlichen auf freiwilliger Basis und mit finanzieller Förderung der Länder. Die betrieblichen Erfahrungen mit einer vierten Reinigungsstufe, die Kenntnisse zum Eliminationsverhalten und den Auswirkungen auf das Gewässer sind aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen teilweise sehr verschieden. Weiterhin lassen sich für die Zukunft rechtlich verbindliche Anforderungen nicht ausschließen. In Zukunft könnte im Vollzug der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sowie der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) eine gezielte Elimination vom Gesetzgeber gefordert werden. Ein Positionspapier des Umweltbundesamts (vgl. Umweltbundesamt, 2015b) fordert zum Beispiel die Fortschreibung des Stands der Technik und die Einführung weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren bei Kläranlagen der Größenklasse 5 sowie bei kleineren Kläranlagen an sensiblen Gewäs-

sern. Falls sich zukünftig aufgrund geänderter gesetzlicher Grundlagen Anlagen zur Spurenstoffelimination für die Reduktion von anthropogenen Spurenstoffen in bayerischen Gewässern als notwendig erweisen sollten, sollte dies jedoch auf Grundlage gesicherter Kenntnisse erfolgen.

Hierzu wurde vom Freistaat Bayern zusammen mit der Stadt Weißenburg i. Bay. ein Pilotvorhaben initiiert, bei dem eine vierte Reinigungsstufe auf einer Kläranlage in Bayern geplant, gebaut und in Betrieb genommen wurde. Mit Förderung des Freistaats Bayern wurde somit bayernweit erstmals die Nachrüstung der Kläranlage Weißenburg mit einer großtechnischen Anlage zur Spurenstoffelimination realisiert. Konzeption, Bau und Betrieb dieser vierten Reinigungsstufe sowie der Nachweis einer erfolgreichen Spurenstoffelimination wurden wissenschaftlich und ingenieurtechnisch begleitet.

Die Auswahl einer geeigneten Projektkläranlage erfolgte im Vorfeld durch das Bayerische Umweltministerium nach Vorprüfung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt und Bewertung durch ein Expertengremium im Rahmen eines Auswahlverfahrens. Die Verfahrenstechnik war zu Projektbeginn nicht abschließend festgelegt. Es sollte für das Pilotvorhaben jedoch bevorzugt eine Ozonungsanlage mit nachgeschalteter adsorptiver Filterstufe (granulierte Aktivkohle = GAK) bzw. biologischer Stufe zum Abbau von entstehenden Transformationsprodukten eingesetzt werden. Die Kläranlage Weißenburg wurde aufgrund der Belastungssituation (Ergebnisse aus der Stoffflussmodellierung), der Lage in einem sensiblen Flusseinzugsgebiet und einem abflussschwachen Gewässer als besonders geeigneter Standort für das Pilotvorhaben ausgewählt.

## 2 Zielsetzung

Derzeit gibt es noch keine rechtlichen Anforderungen zur Elimination von Spurenstoffen auf Kläranlagen (Metzger und Miehe, 2018; Bleisteiner et al., 2016; Bleisteiner, 2017). Durch das Pilotvorhaben möchte der Freistaat Bayern sich jedoch frühzeitig der Thematik annehmen, um für zukünftige Entwicklungen vorbereitet zu sein. Mit dem Pilotprojekt in Weißenburg sollen verschiedene Zielsetzungen verfolgt werden.

### 2.1 ALLGEMEIN

Das Pilotprojekt in Weißenburg soll dazu beitragen praktische Erkenntnisse zu Bemessung, Betrieb und der Leistungsfähigkeit sowie zu den wichtigsten Prozessparametern einer großtechnischen vierten Reinigungsstufe zu gewinnen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anderen Vorhabensträgern sowie Planern zur Verfügung gestellt. Das Vorhaben wird im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt ingenieurtechnisch und wissenschaftlich durch die Universität der Bundeswehr München (Institut für Wasserwesen, Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert) in Kooperation mit der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft begleitet. Die Planung und ingenieurtechnische Umsetzung obliegen dem Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner. Träger des Vorhabens ist die Stadt Weißenburg.

### 2.2 REINIGUNGSLEISTUNG

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der vierten Reinigungsstufe erfolgt ein Vergleich der Zustände im Gewässer vor und nach der Inbetriebnahme. Durch ein umfassendes Untersuchungsprogramm des Bayerischen Landesamtes für Umwelt wird eine chemische, ökotoxikologische und mikrobiologische Bewertung des aufnehmenden Gewässers sowie des Kläranlagenzu- und -ablaufs vor und nach der Nachrüstung der vierten Reinigungsstufe vorgenommen.

Für die Beurteilung der Reinigungsleistung der vierten Reinigungsstufe wurden ein bestimmtes Reinigungsziel definiert und verschiedene Indikatorsubstanzen ausgewählt.

Das Reinigungsziel einer weitergehenden Abwasserbehandlung zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen kann sich sowohl nach einem emissionsbasierten als auch nach einem immissionsbasierten Ansatz (Grenzwertvorgabe für gewässerspezifische Einzelparame-ter) orientieren. Für den emissionsbasierten Ansatz wird das Erreichen des Reinigungsziels durch Sicherstellung eines definierten Eliminationsgrads, bezogen auf die Gesamtkläranlage für ausgewählte Indikatorsubstanzen, sowie durch die Vorgabe einer zu behandelnden Abwassermenge überprüft (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016). Die Schweiz hat bereits als erstes Land in Europa verbindliche Reinigungsanforderungen für die Elimination von Spurenstoffen für kommunale Kläranlagen erlassen. Für das Pilotprojekt Weißenburg soll in Anlehnung an das Vorgehen in der Schweiz (vgl. Götz et al., 2015; UVEK 2016) mindestens eine Reduktionsrate von 80 % (bezogen auf die Gesamtkläranlage) für die Indikatorsubstanzen Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Tolyltriazol und Venlafaxin erreicht werden (Mecoprop wurde nicht weiter bestimmt, da im Zulauf der Kläranlage nicht nachweisbar, siehe Kapitel 6.3). Die angestrebte Spurenstoffentnahme von 80 % in der gesamten Weißenburger Kläranlage (mit vierter Rei-

nigungsstufe) soll bei einem Zufluss von  $\leq 430 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $430 \text{ m}^3/\text{h} \triangleq$  dem 1,5-fachen des maximalen Trockenwetterzuflusses) zur Kläranlage sicher erreicht werden (ohne Bypass bzw. Umfahrung der vierten Reinigungsstufe). Dabei soll die Gesamtreduktion in der Kläranlage rund 80 % im Jahresdurchschnitt betragen (da Teilstrombehandlung in der vierten Reinigungsstufe).

Die festgelegten Substanzen sind grundsätzlich gut messbar, da ihre Zulaufkonzentrationen mindestens um das 10-fache höher als ihre Bestimmungsgrenze liegen. Bei der Substanzauswahl wurden sowohl Stoffe mit einer schnellen Reaktionskinetik mit Ozon als auch mit Ozon langsam reagierende Stoffe berücksichtigt. Daher werden die festgelegten Indikatormaterialien in zwei Kategorien eingeteilt:

- **Kategorie 1** = sehr gut oxidierbar/adsorbierbar: Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Metoprolol, Venlafaxin,
- **Kategorie 2** = gut oxidierbar/adsorbierbar: Tolytriazol, Benzotriazol, Candesartan, Irbesartan.

### 2.3 BETRIEBLICHE ZIELSETZUNG

Da es in Bayern kaum längere, betriebliche Erfahrungen mit einer vierten Reinigungsstufe gibt, werden im Vorhaben die technische Machbarkeit, die finanziellen Auswirkungen und der Nutzen einer vierten Reinigungsstufe dokumentiert. Dabei soll insbesondere untersucht werden, mit welchem Aufwand (Kosten, Energie) Spurenstoffe durch eine vierte Reinigungsstufe eliminiert werden können. Während der Projektlaufzeit werden die Betriebsstabilität und die Wirtschaftlichkeit (Energie und Kosten) der Pilotkläranlage überprüft und anhand eines Vorher-Nachher-Vergleichs bewertet.

Ziel ist der Erkenntnisgewinn zum Betrieb und der Wirtschaftlichkeit einer vierten Reinigungsstufe. Mit diesem Bericht sollen somit die gesammelten Erkenntnisse zu Planung/Auslegung sowie zum Betrieb einer vierten Reinigungsstufe veröffentlicht werden. Von den gewonnenen Erkenntnissen des Pilotvorhabens sollen v.a. die Betreiber anderer bayerischer Kläranlagen profitieren, die künftig Maßnahmen zur Spurenstoffreduktion umsetzen wollen oder müssen.

Es ist vorgesehen, dass die errichtete vierte Reinigungsstufe in Weißenburg dauerhaft betrieben wird. Aufbauend auf den gesammelten Erfahrungen aus der Betriebsphase wird ein Betriebskonzept vorgeschlagen. Dabei werden mögliche Handlungsempfehlungen zur Eigenkontrolle der vierten Reinigungsstufe und zur Durchführung erforderlicher Messungen (z.B. anhand der Bestimmung von ggf. konventionellen Kläranlagenparametern) und Maßnahmen für den Nachweis eines ordnungsgemäßen Betriebs der vierten Reinigungsstufe (Betriebsüberwachung und Gewährleistung Betriebssicherheit) formuliert. Zusätzlich soll eine Checkliste helfen, um betriebliche Aufgaben, zeitliche und organisatorische Prozesse für den Betrieb einer vierten Reinigungsstufe zu optimieren.

Auch wirtschaftliche und energetische Betrachtungen sind ein wesentlicher Bestandteil in diesem Projekt. Eine energetische Zustandsbewertung der Kläranlage Weißenburg mit vierter Reinigungsstufe soll belastbare Aussagen über einen Vorher-Nachher Vergleich des Stromverbrauchs der Gesamtkläranlage liefern.

### 3 Projektverlauf

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Meilensteine bei der Planung und Umsetzung der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg. Weiterhin wird ein Einblick in die geplanten Versuchseinstellungen gegeben.

#### 3.1 VORAUSWAHL

Die Kläranlage Weißenburg leitet in die Schwäbische Rezat ein. Die örtliche wasserwirtschaftliche Situation ist geprägt durch sehr ungünstige Mischungsverhältnisse im aufnehmenden Gewässer. Unter Niedrigwasserverhältnissen besteht der Abfluss an der Einleitungsstelle zu mehr als 50 % aus behandeltem Abwasser. Im sehr trockenen Sommer 2015 betrug der Anteil von behandeltem Abwasser bis zu 80 % (vgl. Abbildung 1). Die sensiblen wasserwirtschaftlichen Verhältnisse an der Einleitungsstelle waren daher eine wesentliche Voraussetzung für die Auswahl der Kläranlage in Weißenburg. Die Kläranlage Weißenburg wurde daher Anfang 2014 als Standort für das Pilotvorhaben im Rahmen eines Auswahlverfahrens vom Bayerischen Umweltministerium ausgewählt. Dabei wurden folgende Auswahlkriterien betrachtet:

- Lage an einem Belastungsschwerpunkt, d.h. – Überschreitung des PNECs (predicted no effect concentration) von Diclofenac (100 ng/l) auf einer Länge von mehr als 2,5 km im „Stoffflussmodell Bayern“ (Klasmeier et al., 2011),
- Lage im Einzugsgebiet des Mains,
- Mischungsverhältnis der Einleitung MNQ/QTW < 5,
- 19.999 EW < Ausbaugröße < 125.000 EW.

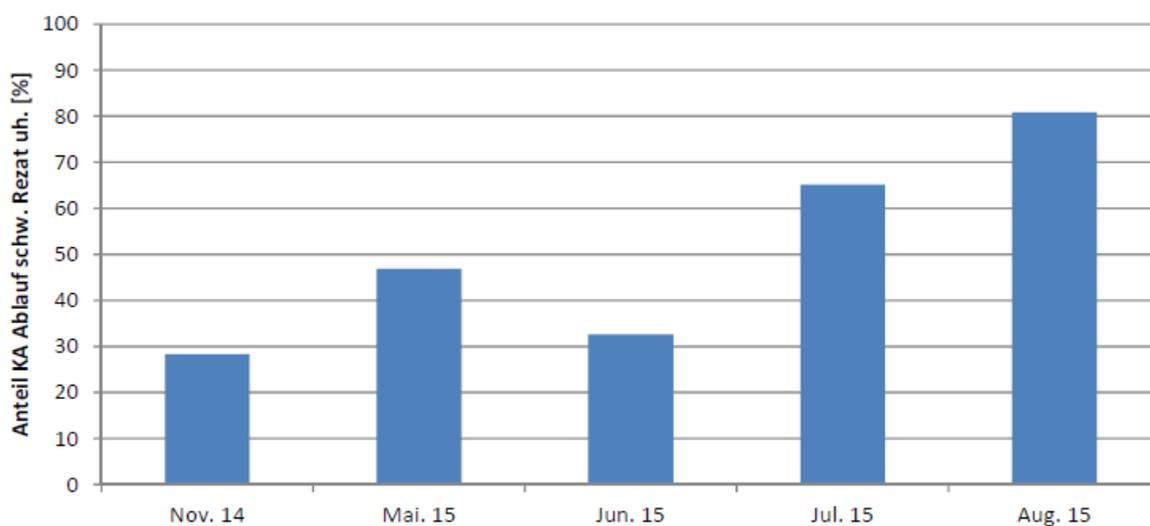
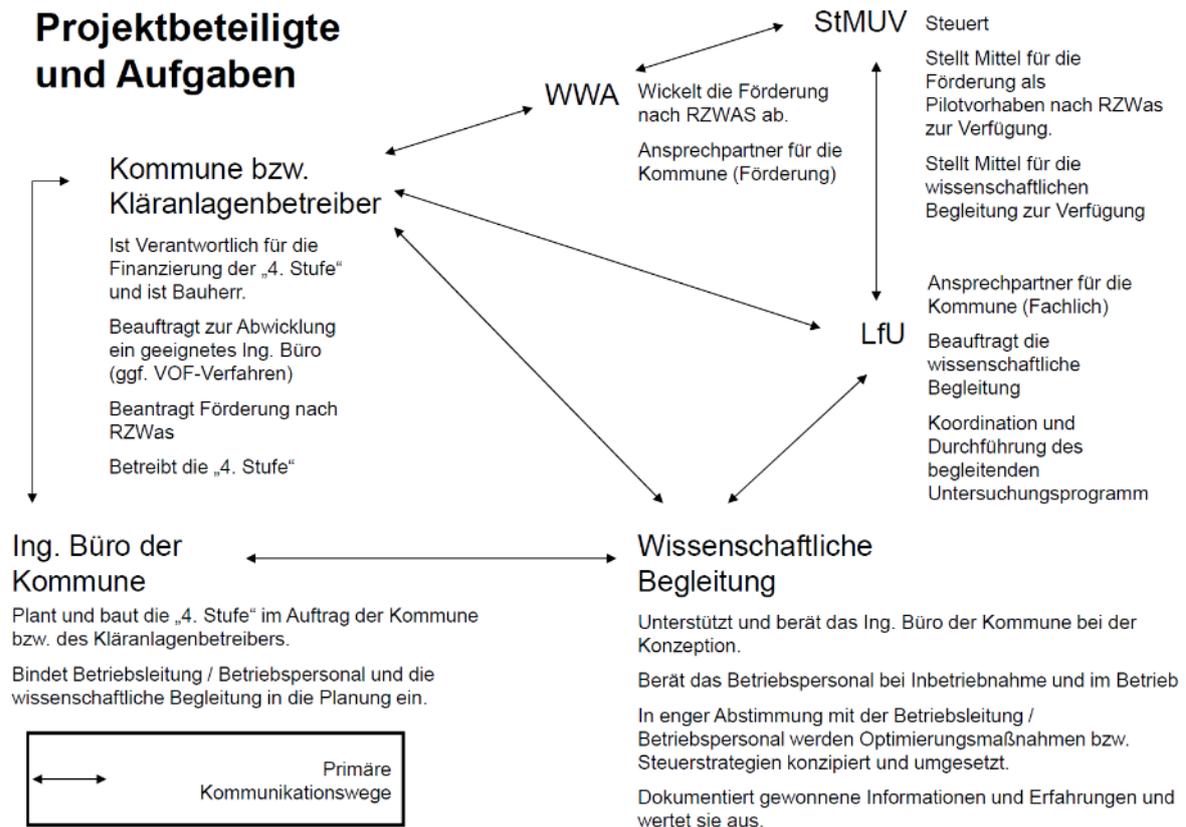


Abbildung 1: Abwasseranteil der Kläranlage Weißenburg im Gewässer

#### 3.2 AUFGABEN UND PROJEKT BETEILIGTE

Das Pilotvorhaben wird vom Freistaat Bayern gefördert. Um die Stadt Weißenburg bei der freiwilligen Errichtung der vierten Reinigungsstufe zu unterstützen, hat der Freistaat Bayern eine staatliche Förderung von 75 % der zuwendungsfähigen Investitionskosten zugesagt. Zuständige Behörde für das Förderverfahren ist das Wasserwirtschaftsamt (WWA) Ansbach. Das Bayerische Landesamt für Umwelt hat das WWA Ansbach bei der baufachlichen

Prüfung unterstützt. Das Vorhaben wird wissenschaftlich und ingenieurtechnisch durch die Universität der Bundeswehr (Institut für Wasserwesen, Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert) in Kooperation mit der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft begleitet. Die vom Landesamt für Umwelt beauftragte wiss. Begleitung hat die Stadt Weißenburg bei Bau und Betrieb der Anlage beraten und unterstützt. Die Grundlagenermittlung, Vorplanung der vierten Reinigungsstufe und auch die weiteren Leistungsphasen der HOAI (Entwurfsplanung bis Ausführungsplanung) erfolgten durch das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner. Abbildung 2 fasst die Aufgaben der Projektbeteiligten zusammen.



**Abbildung 2: Projektbeteiligte und Aufgaben**

### 3.3 PROJEKTBLAUF

Anfang Mai 2014 wurde als offizieller Projektbeginn das dritte Quartal 2014 und als Projektende das dritte Quartal 2017 festgelegt. Zum damaligen Zeitpunkt waren etwa zwei Jahre Vorlaufphase (Planung und Bau) und ein Jahr begleitete Betriebsphase (Betrieboptimierung, Nachweis der Leistungsfähigkeit) vorgesehen. Geplanter Inbetriebnahmezeitpunkt war zu diesem Zeitpunkt Mai 2016. Durch Verzögerungen bei der Planung verschob sich der Zeitplan um einige Monate, sodass die Vergabe der Bauleistungen im Januar 2016 und die Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe im August/September 2016 stattfinden sollten.

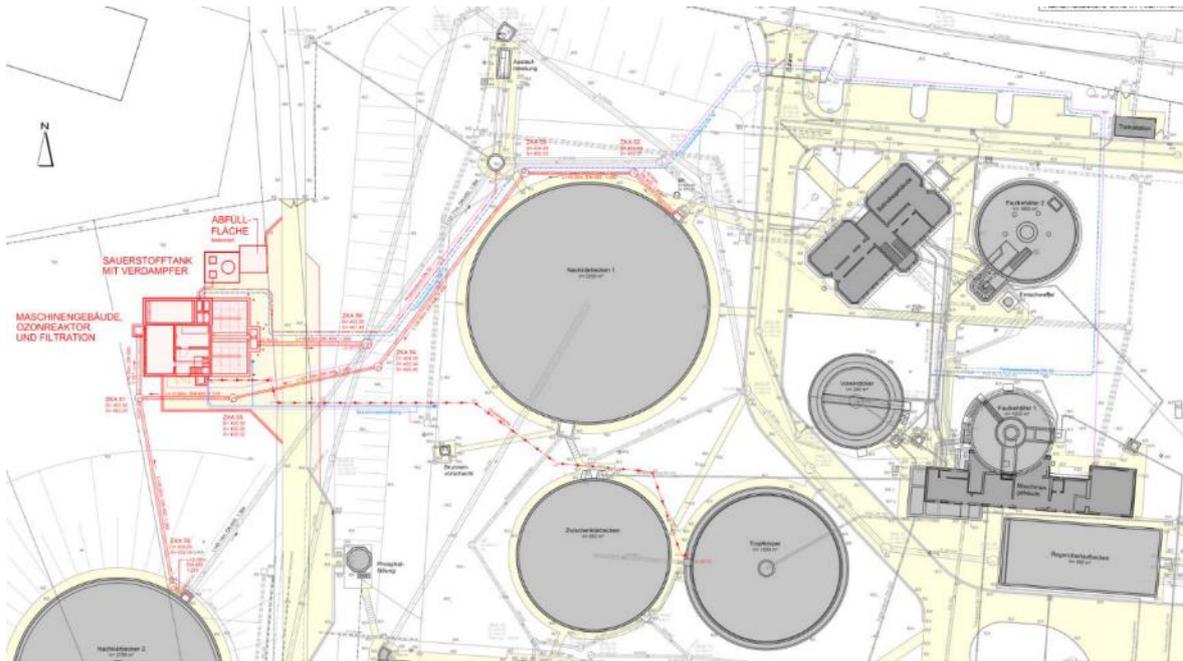
Im April 2015 hat der Stadtrat von Weißenburg auf Basis der Ergebnisse der Vorplanung und der Variantenuntersuchung mit Kostenvergleichsrechnung (siehe Kapitel 5.1) einstimmig beschlossen, die Variante Ozonung + biologisch aktivierter GAK Filter und Sandfilter (zweistraßig, parallel) weiter zu verfolgen. Die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg sollte

zwischen dem Ablauf der beiden bestehenden Nachklärbecken errichtet werden (vgl. Abbildung 3). Anfang bis Mitte 2016 erfolgte eine detaillierte Ausarbeitung des Planungskonzepts (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5) und Konkretisierung der Objektbeschreibung.

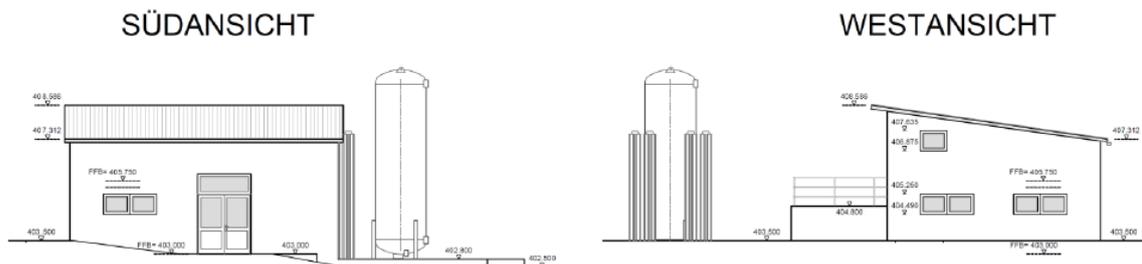


**Abbildung 3: Geplanter Standort der vierten Reinigungsstufe, Stand: Vorplanung 2015, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)**

Für die Ausführungsplanung und die Vergabe der Ingenieurleistung wurde ein VOF-Verfahren durchgeführt. Zur Abwicklung des VOF-Verfahrens wurde von der Stadt ein Ingenieurbüro beauftragt. Nach Abschluss des VOF-Verfahrens und Bewertung der verschiedenen Bewerber wurde das Angebot des Ingenieurbüros Dr. Resch + Partner von der Stadt Weißenburg angenommen. Aufgrund des notwendigen VOF-Verfahrens und dem dadurch erforderlichen Bewerbungsprozess wurde der Zeitplan erneut verschoben. Gegenüber dem gemeinsam am 09.05.2014 abgestimmten Zeitplan verschob sich mit dem neuen Zeitplan die Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe in den April/Mai 2017.



**Abbildung 4:** Zeichnerische Darstellung des Planungskonzepts als Lageplan mit Zu- und Ableitungen, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2016)



**Abbildung 5:** Süd- und Westansicht der geplanten vierten Reinigungsstufe, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG

Der Spatenstich für die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg erfolgte am 08.09.2016 (vgl. Abbildung 6). In einem Gebäude mit rund 150 Quadratmeter Grundfläche wurde auf dem bestehenden Gelände der Weißenburger Kläranlage die vierte Reinigungsstufe errichtet (vgl. Abbildung 7). Zu diesem Zeitpunkt waren die Lose für Bautechnik, Maschinentechnik und für die Ozonung bereits vergeben. Die Vergabe der Elektrotechnik und HLS-Technik erfolgte im September/Oktober 2016. Nach Abschluss der Bauausführung (September 2016 bis April 2017) sollte zum damaligen Zeitpunkt die Inbetriebnahme Mai 2017 erfolgen. Einige Impressionen zum Baufortschritt sind in Abbildung 6 bis Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 6: Spatenstich für die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg, Bild: Stadt Weißenburg**



**Abbildung 7: Baufortschritt Oktober 2016, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG**



**Abbildung 8: Baufortschritt November 2017 (links) und April 2017 (rechts), Bilder: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG**



**Abbildung 9: Aufbau Sauerstofftank (links) und leere Filterzellen (rechts), Bilder: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG**

2017 kam es aufgrund der Verzögerungen bei den Baumaßnahmen sowie bei der Umsetzung der EMSR-Technik zu einer weiteren Verschiebung der geplanten Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe. Die offizielle Einweihung der Anlage fand am 13.10.2017 statt (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 10: Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, Bild: Bayerischer Rundfunk (links), Helmut Resch (rechts)**

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Betriebsstabilität der vierten Reinigungsstufe war geplant im Zuge des knapp einjährigen Untersuchungsprogramm verschiedene Versuchseinstellungen zu testen. Dabei waren ergänzend zur Inbetriebnahme und zum Probebetrieb insgesamt drei verschiedene Versuchsphasen vorgesehen. Ziel bei den drei verschiedenen Versuchsphasen war die Erprobung unterschiedlicher Steuer- und Regelkonzepte sowie die Variation der Ozonkonzentration und die Reihenschaltung der Filterstufen. Abbildung 11 fasst die Ziele und geplanten Versuchseinstellungen zusammen.

Mit Beginn der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase konnten einige Optimierungspotenziale bei der Messtechnik und technische Mängel bei verschiedenen Aggregaten und Bauteilen dokumentiert werden. Ein stabiler Anlagenbetrieb konnte daher nur zeitweise erzielt werden. Versuchsphase 1 wurde aufgrund dieser Umstände verlängert, da noch kein dauerhafter stabiler Anlagenbetrieb vor allem für die Ozonung dokumentiert werden konnte (Stillstandszeiten und Abschaltungen bei der Ozonanlage). In Kapitel 8.1 werden die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Anlagenbetrieb für den Zeitraum von Herbst 2017 bis Anfang September 2018 genauer beschrieben. Ein wichtiger Bestandteil der Versuchsphase 1 war daher die Beseitigung aufgetretener Mängel und Auffälligkeiten bei der Anlagen- und Messtechnik. Aus diesen Gründen konnten die geplanten Versuchsphasen 2 und 3 nicht im Rahmen dieses Pilotprojektes durchgeführt werden. Zudem musste der Umfang

der ursprünglich geplanten Messkampagne reduziert werden. Das Untersuchungsprogramm für Versuchsphase 1 wird in Kapitel 6.1 vorgestellt.

|                | Inbetriebnahme  | Versuchsphase 1  | Versuchsphase 2   | Versuchsphase 3   |
|----------------|---|--|---|---|
|                | <b>Einfahrbetrieb mit Q-Steuerung</b>   | <b>Betrieb mit Basiseinstellungen</b>  | <b>Betrieb mit variabler Ozonkonzentration</b>  | <b>Betrieb in Reihenschaltung</b>   |
| <b>Ziel</b>    | Betriebsbereite Anlagentechnik (stabiler Betrieb)<br><br>Betrieboptimierung<br><br>Funktionstest EMSR & PLS; Steuerung und Regelung<br><br>Anpassung Spülbetrieb (Luft, Intervall, Dauer) | Ermittlung Wirkungsgrad Ozonung<br><br>Ermittlung Wirkungsgrad SF und GAK/BAK-Filter<br><br>Unterschied zwischen Sand- und GAK-Filter bzw. Adsorption und biologischem Abbau | Ermittlung Wirkungsgrad Ozonung<br><br>Bedarfsgerechte Ozonung<br><br>Ermittlung Wirkungsgrad SF und GAK/BAK-Filter<br><br>Unterschied zwischen Sand- und GAK-Filter bzw. Adsorption und biologischem Abbau | Ermittlung Wirkungsgrad Ozonung<br><br>Bedarfsgerechte Ozonung<br><br>Ermittlung Wirkungsgrad Filter in Reihe                         |
| <b>Setting</b> | Vorgabe Ozonkonzentration (aus Vorversuch)<br><br>Q-Steuerung<br><br>Parallelbetrieb  | Vorgabe Ozonkonzentration (aus Vorversuch)<br><br>Q-Steuerung<br><br>Parallelbetrieb   | Variation der Ozonkonzentration und Vorgabe Soll-Elimination<br><br>Fracht-Steuerung (DOC)<br>ΔSAK-Regelung<br>ΔSAK-Regelung mit Vorst. ggf. ΔRedox-Regelung<br><br>Parallelbetrieb                         | Variation der Ozonkonzentration und Vorgabe Soll-Elimination<br><br>ΔSAK-Regelung<br>ΔSAK-Regelung mit Vorst.<br><br>Betrieb in Reihe |

**Abbildung 11: Ziele und Einstellungen der geplanten Versuchsphasen**

### 3.4 TÄTIGKEITEN UND MEILENSTEINE WÄHREND DES PROJEKTVERLAUFS

Im Zuge des Pilotvorhabens wurden seitens des planenden Ingenieurbüros und der wissenschaftlichen Begleitung verschiedene Aufgaben und Tätigkeiten durchgeführt. Abbildung 12 illustriert nochmal die wichtigsten Meilensteine und Tätigkeiten.



Abbildung 12: Tätigkeiten (Auszug) und Meilensteine im Pilotprojekt Weißenburg

## 4 Untersuchungen zur Auswahl und Auslegung der errichteten Verfahrenskonzeption

Für die Planung und Errichtung der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg und zur Erhöhung der Planungssicherheit wurden verschiedene Untersuchungen und Erhebungen durchgeführt. Neben der Erfassung aller notwendigen Basisdaten und bemessungs- sowie projektrelevanten Informationen (Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse) wurden auch zusätzliche Voruntersuchungen durchgeführt. Zudem wurde auch ein Spurenstoffscreening (Ist-Zustand) zur Ermittlung der Konzentrationen auf der Kläranlage und im Gewässers durchgeführt (siehe hierzu Kapitel 6.2 und 6.3). Die Vorgehensweise im Planungsverlauf beim Pilotprojekt in Weißenburg ist in Abbildung 13 illustriert.

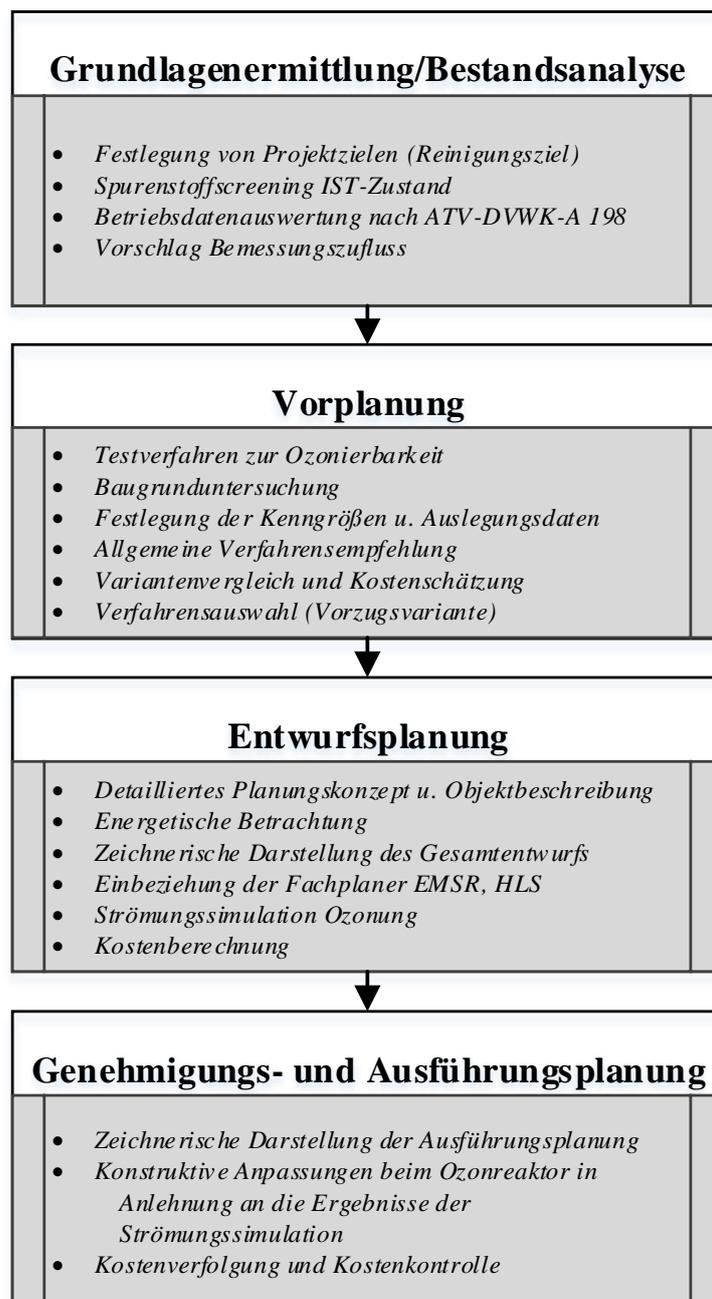


Abbildung 13: Vorgehensweise im Planungsverlauf beim Pilotprojekt (Rödel et al., 2017)

## 4.1 BESTANDSAUFNAHME UND AUSWERTUNG BETRIEBSDATEN KLÄRANLAGE

Im Zuge der Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse wurden u.a. Erhebungen zum Einzugsgebiet und Kanalnetz, zur Verfahrenstechnik der bestehenden Kläranlage (Ist-Zustand), zu den Einleitbedingungen und zu den bestehenden Indirekteinleitern durchgeführt. Weiterhin erfolgte eine Auswertung der Ablaufwerte bzw. der Standard-Abwasserparameter sowie der hydraulischen Belastung bzw. der Wassermengen gemäß ATV-DVWK-A 198 (DWA Arbeitsblatt A 198).

### 4.1.1 Einzugsgebiet und Kanalnetz

Die Kläranlage der Stadt Weißenburg befindet sich rund 50 km südlich von Nürnberg. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Weißenburg umfasst die Stadt Weißenburg mit den angeschlossenen Ortsteilen Hattenhof, Emetzheim, Holzingen, Kattenhochstatt, Weimersheim, Schmalwiesen, Hagenbuch, Wülzburg und Rohrwalk. Langfristig ist der Anschluss der Ortsteile Niederhofen, Oberhochstatt, Gänswirtshaus, Kehl, Hagenbuch (gesamt) und Dettenheim geplant. Die Entwässerung erfolgt hauptsächlich im Mischsystem und umfasst ein Einzugsgebiet von ca. 570 ha. Die befestigte Fläche liegt bei 303 ha.

### 4.1.2 Einleiter und Indirekteinleiter

An die Kläranlage Weißenburg sind rund 17.000 Einwohner angeschlossen. Neben dem häuslichen Abwasser gibt es maßgebliche Einleitungen aus der Industrie.

- Eloxal-Werk ( $Q_{\max} = 275 \text{ m}^3/\text{d}$ ),
- Chromatierung ( $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{d}$ ),
- Kunststoffherstellung, Kühlwassereinleitung von 16,5 bis 33  $\text{m}^3/\text{d}$ ,
- Schlachthof: Belastung bis 3.600 EW,
- zwei Brauereien.

An medizinischen Einrichtungen bzw. Pflegeeinrichtungen im Einzugsgebiet sind insbesondere das Kreisklinikum Weißenburg (200 Betten) mit Facharztzentrum, Radiologie und Dialysestation, drei Altenheime mit insgesamt 270 Bewohnern sowie betreutes Wohnen mit ca. 70 Bewohnern zu nennen. Zusätzlich erfolgt eine Fäkalschlammabfuhr bei den nicht angeschlossenen Anwesen, die Kleinkläranlagen betreiben. Hierbei handelt es sich nochmals um ca. 18 E ( $180 \text{ m}^3/\text{a}$ ), deren Entsorgungsrückstände in den Zulauf der Kläranlage zugeführt werden.

### 4.1.3 Einleitbedingungen

Der Wasserrechtsbescheid der Kläranlage Weißenburg für die gehobene Erlaubnis geht von einer  $\text{BSB}_5$ -Fracht von 2.100 kg/d (entsprechend 35.000 EW) aus. Dies entspricht der Größenklasse 4 nach Anhang 1 der Abwasserverordnung (AbwV). Die Belastung der Kläranlage (85-Perzentil des  $\text{BSB}_5$  an Trockenwettertagen) betrug 2015 rund 26.100 EW. Der Trockenwetterabfluss ( $Q_T$ ) beträgt regelmäßig bis zu 288  $\text{m}^3/\text{h}$  und der Mischwasserabfluss zur Kläranlage ( $Q_M$ ) bis zu 972  $\text{m}^3/\text{h}$ . Laut gültigem Wasserrechtsbescheid des Landratsamtes Weißenburg-Gunzenhausen sind bei der Einleitung in die Schwäbische Rezat die Werte in Tabelle 1 einzuhalten. Das Mischungsverhältnis ( $\text{MNQ}/Q_{T,\text{aM}}$ ) im aufnehmenden Gewässer (Schwäbische Rezat; Gewässer 2. Ordnung) beträgt 0,7.

**Tabelle 1: Einleitungsbedingungen u. Wassermengen der Kläranlage Weißenburg (Stand: 2015)**

| <b>Ausbaugrößen und Wassermengen</b>                           |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Ausbaugröße  | 35.000 E                          |
| Mittlerer Täglicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,aM}$          | 7.000 m <sup>3</sup> /d           |
| Maximaler stündlicher Trockenwetterwetterabfluss $Q_{T,h,max}$ | 180 l/s = 648 m <sup>3</sup> /h   |
| Mischwasserabfluss zur Kläranlage $Q_M$                        | 326 l/s = 1.174 m <sup>3</sup> /h |
| <b>Überwachungswerte (Konzentrationen)</b>                     |                                   |
| CSB  | < 75 mg/l                         |
| BSB <sub>5</sub>   | < 15 mg/l                         |
| NH <sub>4</sub> -N (vom 1.5. bis 31.10. jeden Jahres)          | < 5 mg/l                          |
| N <sub>ges</sub> (vom 1.5. bis 31.10. jeden Jahres)            | < 14 mg/l                         |
| P <sub>ges</sub>   | < 2 mg/l                          |
| AFS (nur bei TW-Zuflüssen)                                     | < 15 mg/l                         |

#### 4.1.4 Abwasser- und Schlammbehandlung der Kläranlage Weißenburg (Stand: 2015)

Die Abwasserbehandlung der Kläranlage Weißenburg erfolgt in einer mechanisch-biologisch-chemischen Kläranlage mit weitergehender Reinigung. Die bestehende Verfahrenstechnik umfasst Rechen, Langsandfang, Vorklärbecken, Tropfkörper, Zwischenklärung, Belebungsbecken und Nachklärbecken:

- Feinrechen mit Rechengutpresse, Fäkalschlammzugabe,
- belüfteter Langsandfang (ca. 200 m<sup>3</sup>) mit Sandgutreinigung,
- zwei Vorklärbecken, rechteckig,  $V = 2 \cdot 535 \text{ m}^3$  mit Zufuhr ÜS-Schlamm und Trübwasser,
- Aufteilung des Zulaufes auf zwei Straßen:
  - 1. Straße: Tropfkörper ( $V = 1.600 \text{ m}^3$ ) mit rundem Zwischenklärbecken ( $V = 550 \text{ m}^3$ ),
  - 2. Straße: Belebungsbecken (Kaskaden a 600 m<sup>3</sup>, Druckluftbelüftung, zwei Rührwerke) mit zwei Nachklärbecken ( $V_1 = 2.750 \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 2.200 \text{ m}^3$ ),
- Phosphorfällung als Simultanfällung, Dosierstelle Ablauf Belebung, frachtgesteuert,
- Mengenummessung und Beprobung Auslauf,
- Schlammbehandlung (Rohschlamm aus VKB) durch Voreindicker und zwei beheizte Faulbehälter (1.200 m<sup>2</sup> und 1.850 m<sup>3</sup>),
- Schlammentwässerung durch Siebbandpresse mit Flockungsmittelzugabe,
- Gasverstromung und Wärmenutzung.

Der Überschussschlamm aus der Belebung wird zur Vorklärung zurückgeführt und dort gemeinsam mit dem Primärschlamm abgesetzt. Von dort wird er zum Voreindicker (ca. 200 m<sup>3</sup>) gepumpt, wo der gesamte Rohschlamm gesammelt und statisch eingedickt wird. Die anaerobe Schlammstabilisierung erfolgt in den beiden beheizten Faulbehältern mit 1.200 m<sup>3</sup> und 1.850 m<sup>3</sup> Nutzvolumen, die wahlweise parallel oder hintereinander betrieben werden können. Das anfallende Klärgas wird in einem Gasbehälter (500 m<sup>3</sup>) gesammelt

und mittels Blockheizkraftwerk (Gasmotor) zur Strom- und Wärmeerzeugung bzw. im Winter über die Heizung zur Wärmegewinnung genutzt. Der ausgefauelte Klärschlamm wird in einem Vorlagebehälter zwischen gespeichert und von dort über eine Siebbandpresse entwässert und anschließend durch ein Fremdunternehmen entsorgt. Das anfallende Filtratwasser wird ohne Zwischenpufferung oder weitere Behandlung direkt dem Kläranlagenzulauf zugegeben.

Das Verfahrensschema mit den wichtigsten Kenngrößen der Abwasserbehandlung zeigt Abbildung 14.

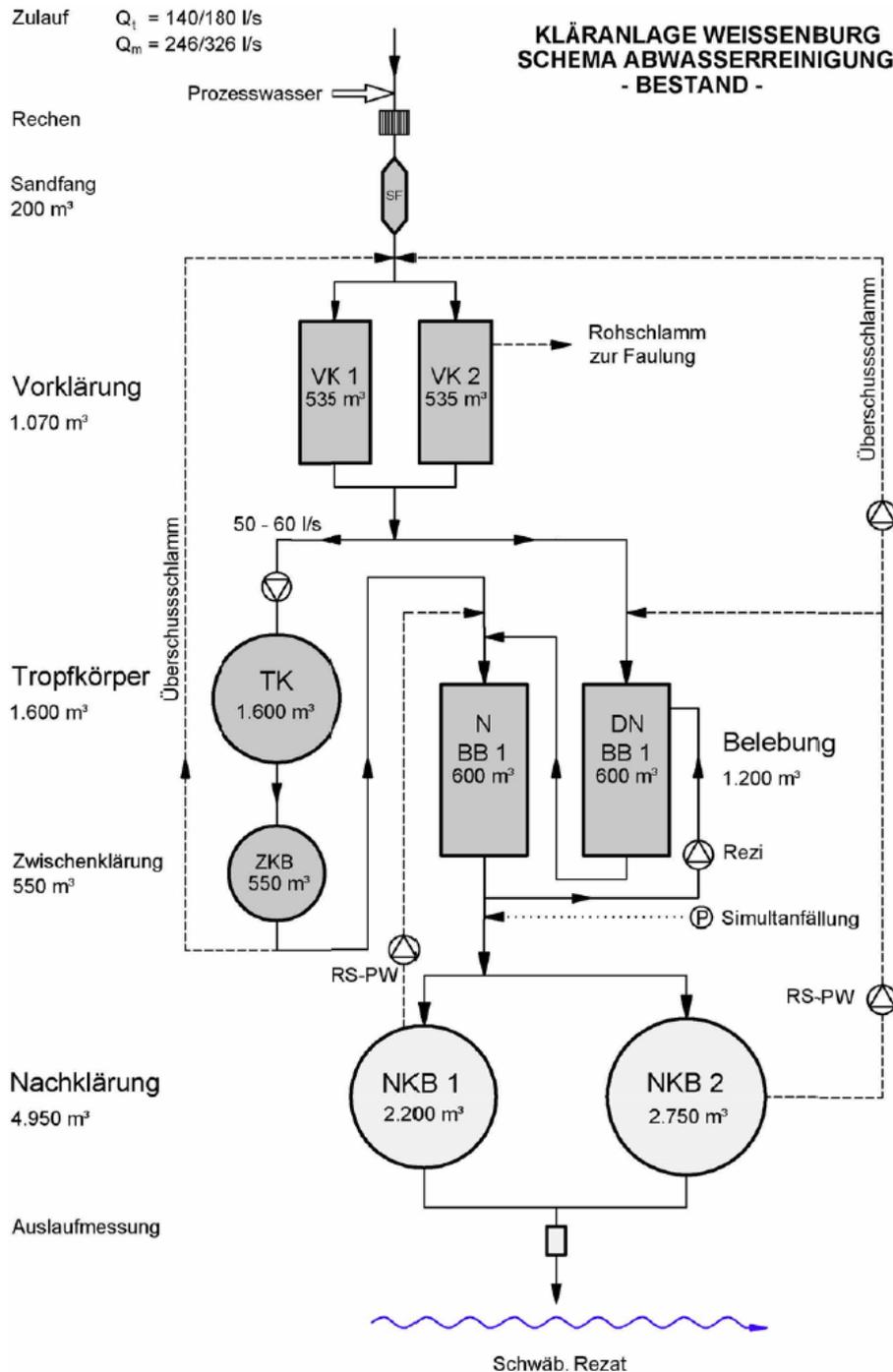


Abbildung 14: Verfahrensschema der KA Weissenburg, Stand: 2014, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)

#### 4.1.5 Auswertung Betriebsdaten (2011 - 2013)

Die Auswertung der Betriebstagebücher erfolgte nach Arbeitsblatt ATV-DVWK A 198 (2003): „Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“. Die Auswertung erfolgte für die Jahre 2011 bis 2013.

##### 4.1.5.1 Wassermengen

Folgende Messwerte der Wassermengen waren verfügbar und konnten ausgewertet werden:

- 24 h-Messwerte Tagesmittelwerte – Auslaufmessung Nachklärung 2011 bis 2013,
- 2 h Messwerte – Auslaufmessung Nachklärung 2011 bis 2013,
- Wetterschüssel zur Ermittlung der Abflussmengen bei Trockenwetter.

Abbildung 15 zeigt die Ganglinie der Tagesdurchflüsse in  $\text{m}^3/\text{d}$ . Die Trockenwettertage sind rot hervorgehoben. Saisonale Schwankungen, wie sie beispielsweise durch schwankende Grundwasserspiegel (z.B. durch Infiltration) oder Gästeübernachtungen entstehen können, sind nicht erkennbar. Auffallend sind langanhaltende Mischwasserperioden in den Wintermonaten. Bei Trockenwetter wird ein Tageszufluss von  $7.500 \text{ m}^3/\text{d}$  nicht überschritten, bei Regenwetter sind Tagesspitzen bis zu  $20.000 \text{ m}^3/\text{d}$  zu erwarten. Abbildung 16 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Tageszuflüsse. Dabei wurde unterschieden zwischen allen Tagen und Trockenwettertagen. Im Gegensatz zur sonst üblichen Betrachtung des 85-Perzentils wurde hier das 80-Perzentil ausgewertet. Der 80-Perzentilwert wurde anschließend herangezogen, weil für die Errichtung der vierten Reinigungsstufe keine Vollstrombehandlung geplant war. Investitionskosten für die Errichtung der Anlage können somit reduziert werden (siehe auch Kapitel 5.2). Die Auswertung aller Tage zeigt, dass ein Wert von  $10.310 \text{ m}^3/\text{d}$  in 80% aller Fälle unterschritten wird. Bei Trockenwetter ergibt sich ein 80-Perzentil von  $5.880 \text{ m}^3/\text{d}$ .

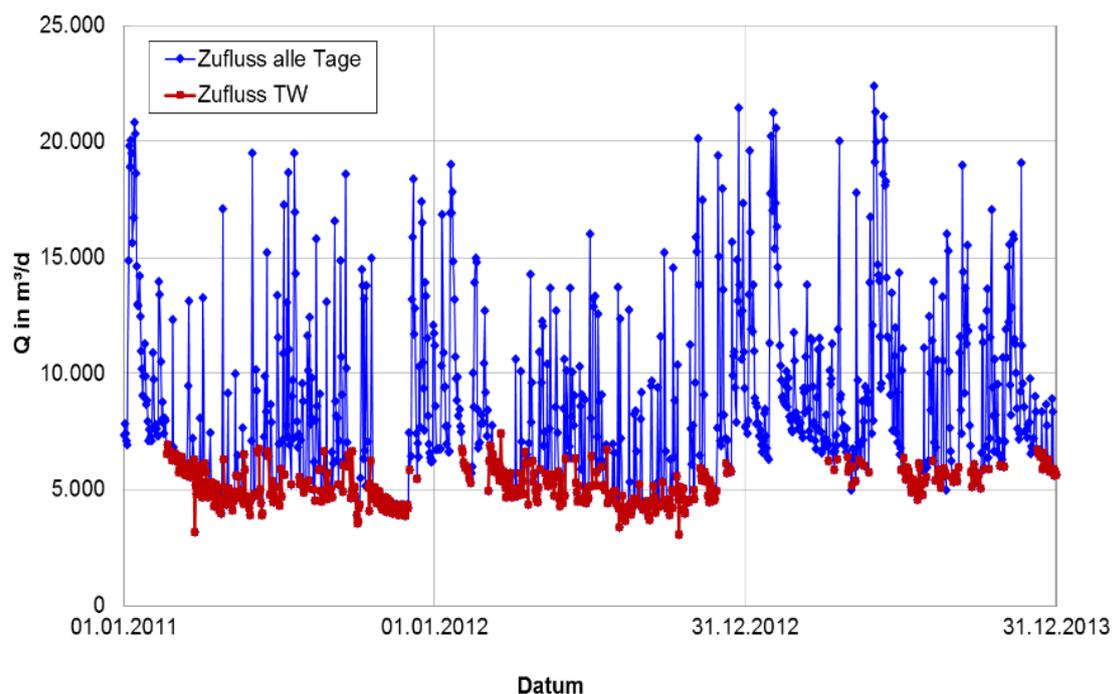
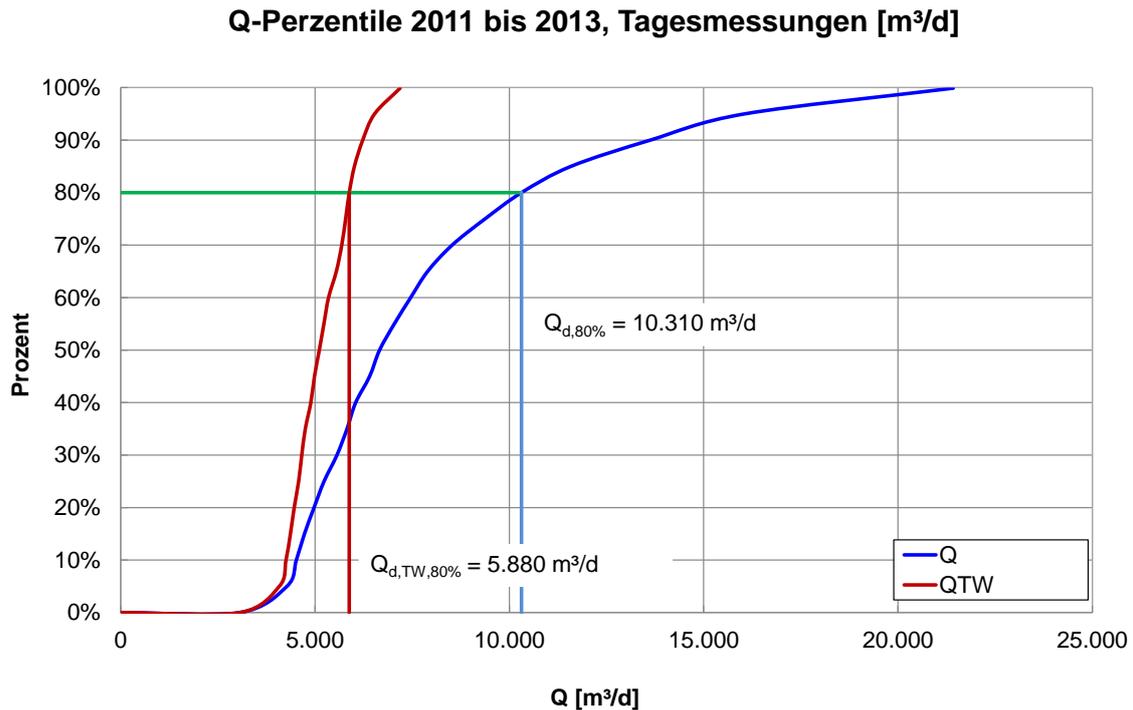


Abbildung 15: Ganglinie Tagesdurchfluss von 2011 bis 2013



**Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung Tagesdurchfluss**

Die Auswertung der Häufigkeiten der Stundenzuflüsse in Abbildung 17 ergibt für eine Unterschreitungshäufigkeit von 80 % einen Wert von 429 m<sup>3</sup>/h (gerundet auf 430 m<sup>3</sup>/h). Dieser Wert wurde nochmal zur Verdeutlichung in Abbildung 17 eingetragen. Eine andere Methode zur Berechnung der Tagesstundenspitzenwerte und des Mischwasserzuflusses gibt das ATV-DVWK A 198. Die damit ermittelten theoretischen Werte können als Vergleichswerte für die in Abbildung 17 ermittelten Werte herangezogen wurden. Die Berechnung erfolgt in Tabelle 2, sowohl für die einzelnen Jahre wie auch als Mittel. Da keine genauen Angaben über den Abwasseranfall aus Industrie und Gewerbe vorliegen, wurde ein Einwohnerwert von rund 30.000 EW aus der Frachtberechnung mit einem spezifischen Trinkwasserverbrauch von 100 l/(E·d) (Angaben Stadt Weißenburg) zugrunde gelegt. Der Anteil Wasserverbrauch in das Abwasser berücksichtigt Leitungsverluste im Trinkwassernetz und die Nutzung von Trinkwasser, dass nicht in den Kanal eingeleitet wird, z.B. zur Gartenbewässerung oder als Produktwasser. Damit ergibt sich ein Stundenspitzenwert bei Trockenwetter von 278 m<sup>3</sup>/d. Dieser Wert verifiziert den Messwert von 263 m<sup>3</sup>/h ( $Q_{T,h,max}$ ). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Messungen mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt worden sind.

Auffallend ist die Diskrepanz zwischen den tatsächlichen Trockenwetter- und Mischwasserzuflüssen zu den genehmigten deutlich höheren Zuflusswerten aus den Bescheidsauflagen. Diese werden in der Realität nicht erreicht.

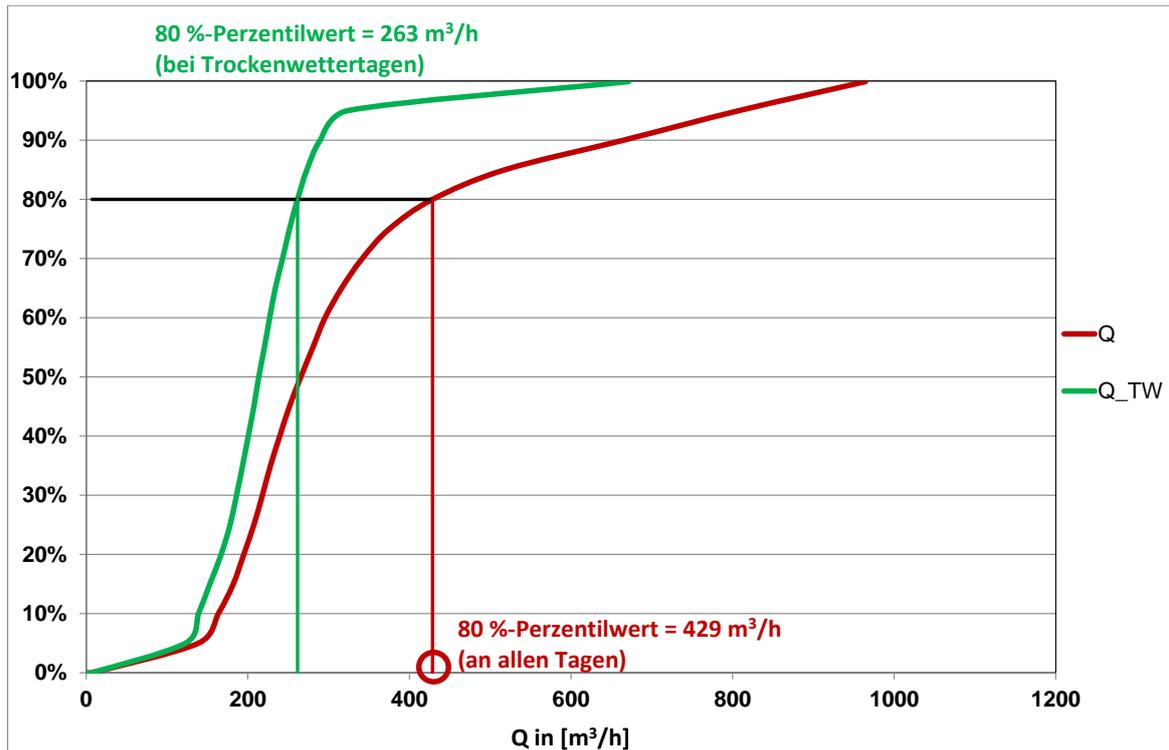


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Stundenzuflüsse von 2011 bis 2013 an allen Tagen sowie an Trockenwettertagen

Tabelle 2: Berechnung der Stundenspitze bei Trockenwetter nach A 198 zur Plausibilitätsprüfung der Messwerte der Stundenzuflüsse<sup>1)</sup>

|  |                                      |                          | IST 2011   | IST 2012   | IST 2013   | 2011-2013  |
|--|--------------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Tageszulauf Trockenwetter                    | Q <sub>T,aM</sub>                    | m <sup>3</sup> /d :      | 5052       | 5043       | 5742       | 5178       |
| Jahresschmutzwassermenge                     | JSWM                                 | m <sup>3</sup> /a :      | 1.844.000  | 1.841.000  | 2.096.000  | 1.890.000  |
| Spezifischer Wasserverbrauch Ist             | q <sub>WV</sub>                      | l/(E·d) :                | 100        | 100        | 100        | 100        |
| Einwohnerwerte aus Frachtberechnung:         | EW                                   | E:                       | 34860 E    | 26954 E    | 28292 E    | 30035      |
| Tagesverbrauch über Einwohner                | Q <sub>d,WV</sub>                    | m <sup>3</sup> /d :      | 3486       | 2695       | 2829       | 3004       |
| Anteil Trinkwasserverbrauch in das Abwasser  | Q <sub>S,aM</sub> /Q <sub>d,WV</sub> | % :                      | 90%        | 90%        | 90%        | 90%        |
| Abgeschätzter Schmutzwasserabfluss           | Q <sub>S,aM</sub>                    | m <sup>3</sup> /d :      | 3.137      | 2.426      | 2.546      | 2.703      |
| Berechneter Fremdwasseranteil                | Q <sub>FaM</sub> /Q <sub>T,aM</sub>  | % :                      | 38%        | 38%        | 38%        | 38%        |
|  | Q <sub>FaM</sub>                     | m <sup>3</sup> /d :      | 1914       | 2617       | 3196       | 2475       |
|  |                                      | m <sup>3</sup> /h :      | 80         | 109        | 133        | 103        |
| Bescheidswert Mischwasserzufluss             | Q <sub>M</sub>                       | l/s :                    | 326        | 326        | 326        | 326        |
|  |                                      | m <sup>3</sup> /h :      | 1173,6     | 1173,6     | 1173,6     | 1174       |
| Faktor Mischwasserabfluss                    | f <sub>S,QM</sub>                    | - :                      | 8,4        | 10,5       | 9,8        | 9,5        |
| Divisor zur Bestimmung der Tagesspitze **    | X <sub>Qmax</sub>                    | - :                      | 17,9       | 17,4       | 17,2       | 15,5       |
| <b>Tagesspitzenabfluss bei Trockenwetter</b> | <b>Q<sub>T,h,max</sub></b>           | <b>m<sup>3</sup>/h :</b> | <b>255</b> | <b>248</b> | <b>281</b> | <b>278</b> |
| Bescheidswert Tagesspitze                    |                                      | m <sup>3</sup> /h :      | 648        | 648        | 648        | 648        |

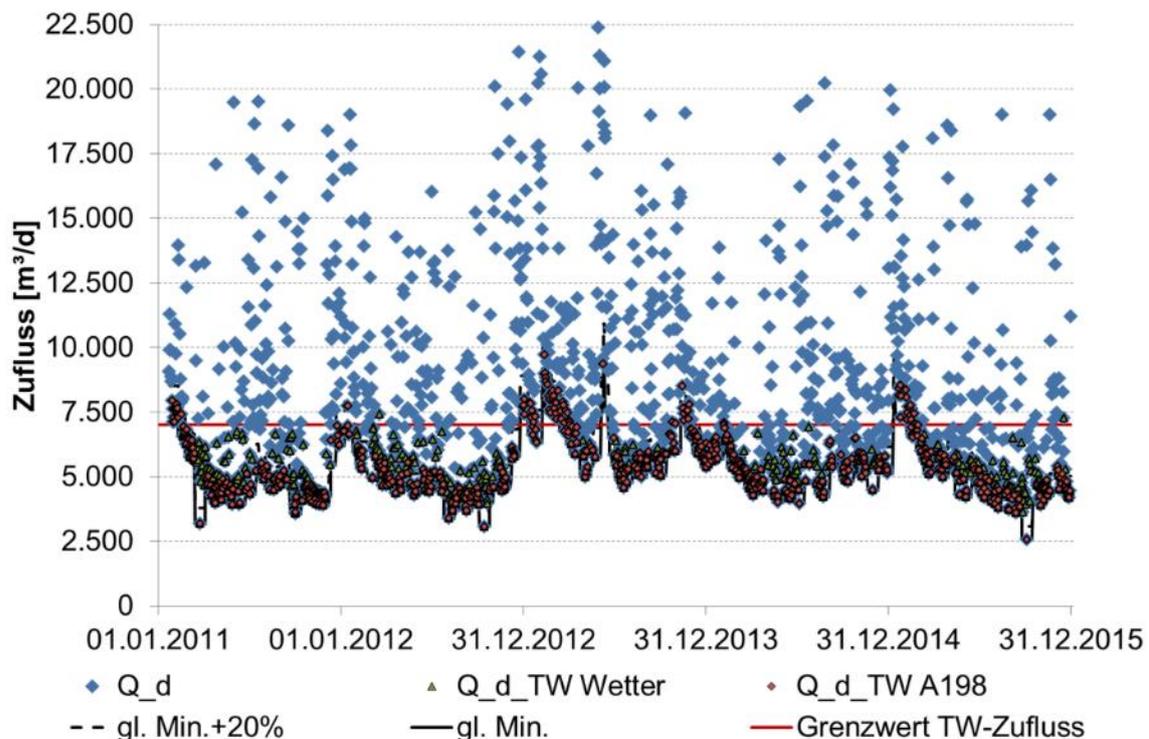
<sup>1)</sup> (Schwarze Zahlen: Berechnete Zellen, Blaue Zahlen: Handeingaben)

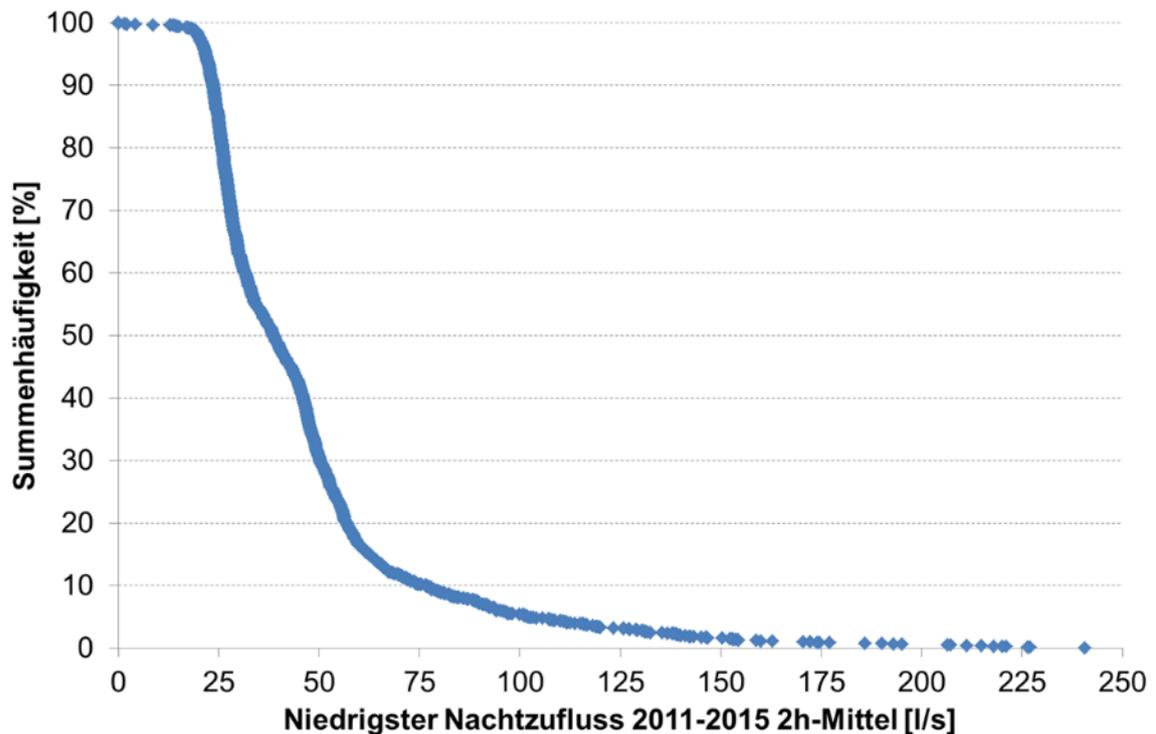
Die hydraulischen Werte für die Jahre 2011 - 2013 sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Der mittlere Abfluss beträgt 331 m<sup>3</sup>/h. Maximal wurden 970 m<sup>3</sup>/h im Betrachtungszeitraum abgeleitet. Die behandelte Jahresabwassermenge beträgt im Mittel 2.890.516 m<sup>3</sup>/a.

**Tabelle 3: Wassermengen Kläranlage Weißenburg von 2011 bis 2013 (Stand: 2014)**

| Alle Tage 2011-2013  |            | Trockenwettertage 2011-2013                 |       |
|--|------------|---|-------|
| Mittelwert $Q_d$ in $[m^3/d]$                                    | 7.919      | Mittelwert $Q_{T,d}$ in $[m^3/d]$           | 5.178 |
| 80-Perzentilwert $Q_d$ in $[m^3/d]$                              | 10.310     | 80-Perzentilwert $Q_{T,d}$ in $[m^3/d]$     | 5.879 |
| MIN $Q_h$ in $[m^3/h]$   | 7          | MIN $Q_{T,h,max}$ in $[m^3/h]$              | 7     |
| Mittelwert $Q_h$ in $[m^3/h]$                                    | 331        | Mittelwert $Q_{T,h,max}$ in $[m^3/h]$       | 219   |
| MEDIAN $Q_h$ in $[m^3/h]$  | 265        | MEDIAN $Q_{T,h,max}$ in $[m^3/h]$           | 215   |
| <b>80-Perzentilwert <math>Q_h</math> in <math>[m^3/h]</math></b> | <b>429</b> | 80-Perzentilwert $Q_{T,h,max}$ in $[m^3/h]$ | 263   |
| MAX $Q_h$ in $[m^3/h]$   | 970        | MAX $Q_{T,h,max}$ in $[m^3/h]$              | 870   |
| -  |            | $Q_{T,h,max}$ nach A 198 in $[m^3/h]$       | 296   |

Die Tageszuflüsse zur Kläranlage wurden auch ergänzend für die Jahre 2014 und 2015 ausgewertet und sind in Abbildung 18 graphisch dargestellt. Zusätzlich sind in dieser Grafik die Trockenwettertage nach Wetterschlüssel im Betriebstagebuch und nach DWA-A 198 ausgewertet dargestellt. Wie für ein Mischsystem typisch stieg der tägliche Kläranlagenabfluss in langen feuchten Perioden und während der Schneeschmelze an. In diesen Zeiten wird der Trockenwetterabfluss zur Kläranlage von 7.000  $m^3/d$  regelmäßig überschritten. Die statistische Auswertung der Zuflüsse an TW-Tagen ergibt einen mittleren Tageszufluss von 5.160  $m^3/d$  und ein 85-Perzentil von 6.700  $m^3/d$ . Zusätzlich wurden die 2 h-Mittelwerte des niedrigsten Nachtzuflusses ausgewertet. Abbildung 19 zeigt die Darstellung der niedrigsten Nachtzuflüsse über der Summenhäufigkeit. An 95 % der Tage liegt der 2 h-Mittelwert des niedrigsten Nachtzuflusses im IST-Zustand über 21,7 l/s. Zur Auslegung der vierten Reinigungsstufe wurde als geringster Nachtzufluss 22,2 l/s = 80  $m^3/h$  gewählt.

**Abbildung 18: Tageszuflüsse und Trockenwetterzuflüsse zur KA Weißenburg 2011 bis 2015 (Zech und Schatz, 2016)**



**Abbildung 19: Summenhäufigkeit des 2 h-Mittels der niedrigsten Nachtzuflüsse 2011 bis 2015 (Zech und Schatz, 2016)**

#### 4.1.5.2 Zulauffrachten zur KA Weißenburg

Tabelle 4 zeigt die Anlagenbelastung im Zulauf zur Kläranlage, die aus den Betriebstagebüchern ermittelt wurde. Diese liegt bei Trockenwetter im Mittel bei 1.233 kg<sub>BSB5</sub>/d. Die Ausbaugröße nach ATV-DVWK A 198 (85-Perzentil) liegt etwas höher bei 1.702 kg/d entsprechend 28.400 EW. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Bescheidswert von 35.000 EW.

Das Verhältnis 85-Perzentil zu Mittelwert liegt bei rund 1,2, so dass von einer relativ ausgeglichenen Belastung ausgegangen werden kann. Üblicherweise sind Werte von 1,4 und darüber zu erwarten.

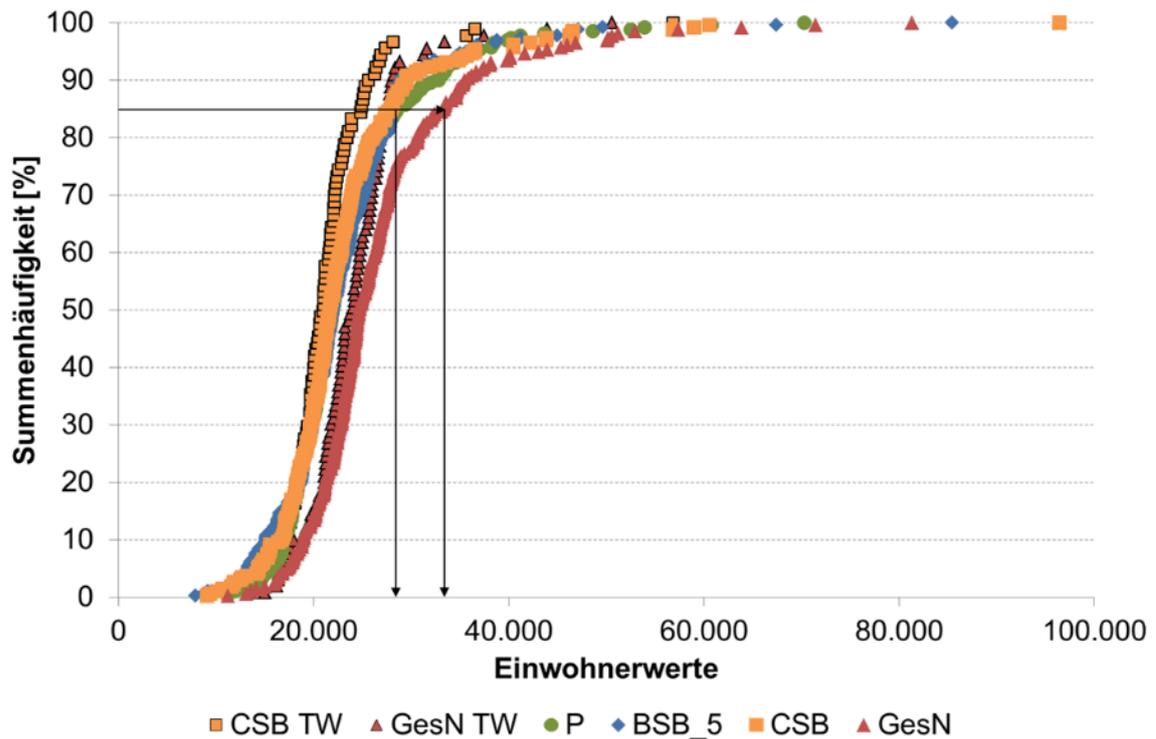
Für die Bewertung des Stromverbrauchs ist die mittlere CSB-Belastung aller Tage der maßgebende Wert, dieser liegt für 2011 bis 2013 bei 2.817 kg/d, das entspricht einem  $EW_{CSB,120,m}$  von 23.500 E.

**Tabelle 4: Tagesfrachten Zulauf KA Weißenburg für 2011 bis 2013**

|                                    |                     | <b>Zulauf</b> |               |
|------------------------------------|---------------------|---------------|---------------|
| <b>Alle Tage 2011-2013</b>         |                     | Mittelwerte   | 85%-Perzentil |
| Q <sub>d</sub>                     | [m <sup>3</sup> /d] | -             | -             |
| Q <sub>h</sub> aus Stundenwerten   | [m <sup>3</sup> /h] | -             | -             |
| B <sub>d,CSB</sub>                 | [kg/d]              | 2.817         | 3.379         |
| B <sub>d,BSB</sub>                 | [kg/d]              | 1.402         | 1.702         |
| B <sub>d,AFS</sub>                 | [kg/d]              | -             | -             |
| B <sub>d,Pges.</sub>               | [kg/d]              | 41            | 50            |
| B <sub>d,GesN (inkl. TKN)</sub>    | [kg/d]              | 294           | 370           |
|                                    |                     | <b>Zulauf</b> |               |
| <b>Trockenwettertage 2011-2013</b> |                     | Mittelwerte   | 85%-Perzentil |
| B <sub>d,CSB</sub>                 | [kg/d]              | 2.496         | 2.837         |
| B <sub>d,BSB</sub>                 | [kg/d]              | 1.233         | 1.436         |
| B <sub>d,AFS</sub>                 | [kg/d]              | -             | -             |
| B <sub>d,Pges.</sub>               | [kg/d]              | 36            | 40            |
| B <sub>d,GesN (inkl. TKN)</sub>    | [kg/d]              | 249           | 292           |

Auch hier wurden im Rahmen der Entwurfsplanung die Daten und Auswertungen zu den Zulauffrachten für die Jahre 2014 und 2015 ergänzt. Abbildung 20 zeigt die Summenhäufigkeit der Zulaufbelastung der Summenparameter und Nährstoffe der Jahre 2011 bis 2015. Die Verläufe der Kohlenstoff- und Phosphorverbindungen liegen dicht beieinander. Im 85-Perzentil liegen die Werte bei 28.000 EW für den CSB, bei 28.300 EW für den BSB<sub>5</sub> und bei 28.600 EW für P<sub>ges.</sub>. Der 85-Perzentilwert für Gesamt-Stickstoff liegt mit 33.500 EW darüber.

Das für die Festlegung der Ausbaugröße maßgebliche 85-Perzentil des BSB<sub>5</sub> lag in den separat ausgewerteten Trockenwetterdaten der Jahre 2011 bis 2015 bei 1.585 kg/d bzw. bei 26.103 EW.



**Abbildung 20: Zulaufbelastung der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015 (Zech und Schatz, 2016)**

#### 4.1.5.3 Ablaufwerte KA Weißenburg

Die Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Weißenburg für die Parameter CSB, BSB<sub>5</sub>, N<sub>ges</sub>, NH<sub>4</sub>-N, und P<sub>ges</sub> wurden als 24 h-Mischproben ausgewertet, da diese für die Dimensionierung der nachfolgenden vierten Reinigungsstufe relevant sind. Weiterhin lagen 2 h-Mischproben aus dem Jahr 2012 vor, die zur Beurteilung der Anforderungen an die Reinigungsleistung der Anlage (Überwachungswerte) eine Rolle spielen, jedoch nicht maßgeblich für die Dimensionierung der nachfolgenden vierten Reinigungsstufe sind (vgl. Abbildung 23 bis Abbildung 27). Für alle in den Diagrammen dargestellten Parameter (Abbildung 21 bis Abbildung 27) sind die Ablaufwerte stabil, und die Überwachungswerte konnten mit ausreichender Sicherheit eingehalten werden. Der Gesamtstickstoff braucht nur in den Sommermonaten (01.05. bis 31.10.) eingehalten zu werden.

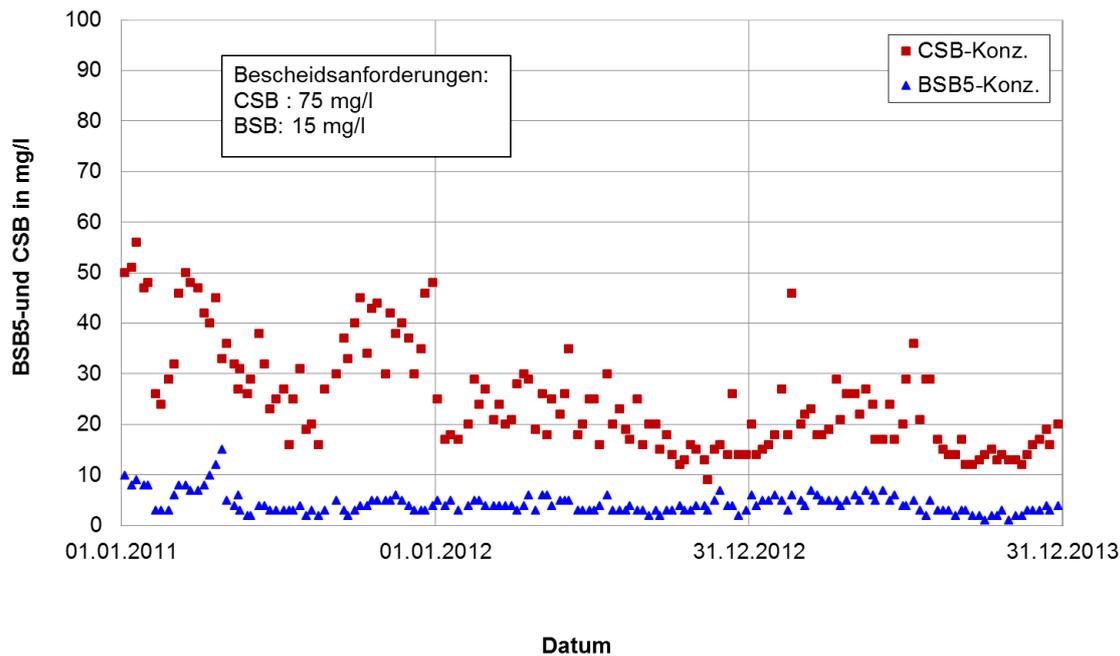


Abbildung 21: Ablaufkonzentrationen BSB<sub>5</sub> und CSB aus Tagesmischproben von 2011 bis 2013

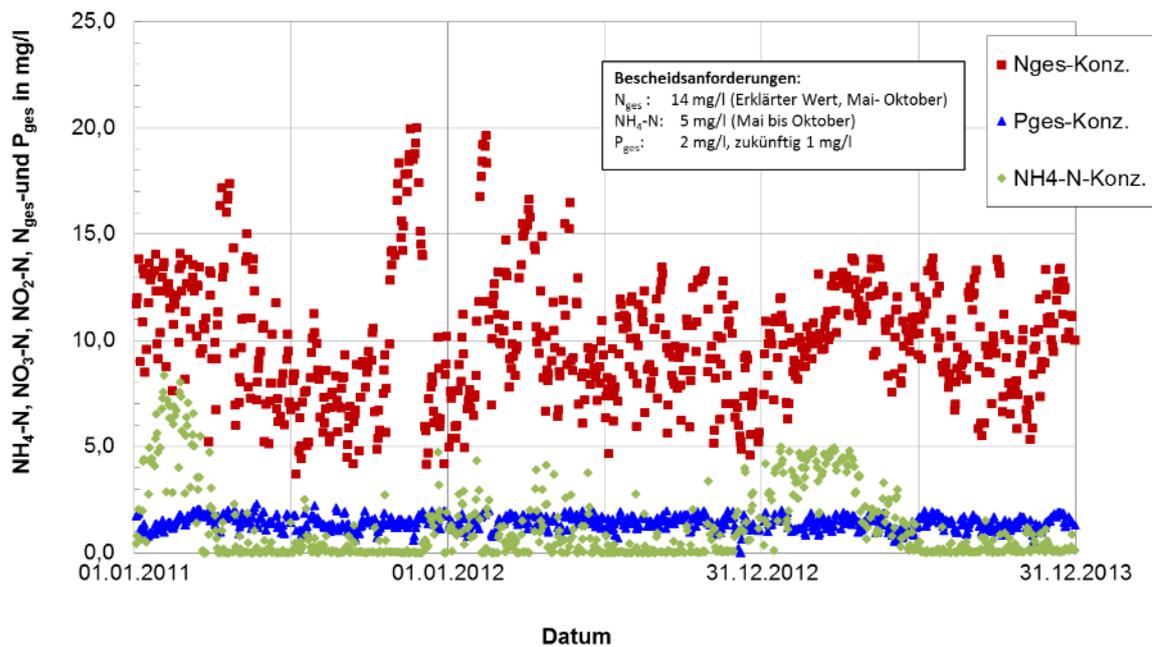


Abbildung 22: Ablaufkonzentrationen N<sub>ges</sub>, NH<sub>4</sub>-N und Phosphor aus Tagesmischproben von 2011 bis 2013

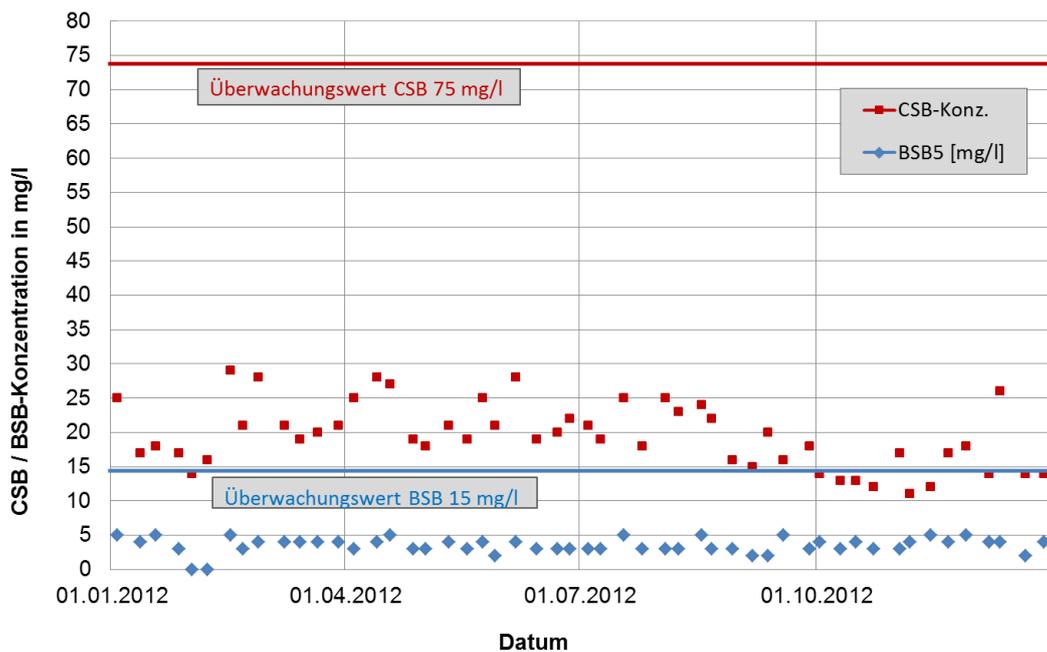


Abbildung 23: Ablaufkonzentrationen CSB und BSB<sub>5</sub> aus 2 h-Mischproben von 2012

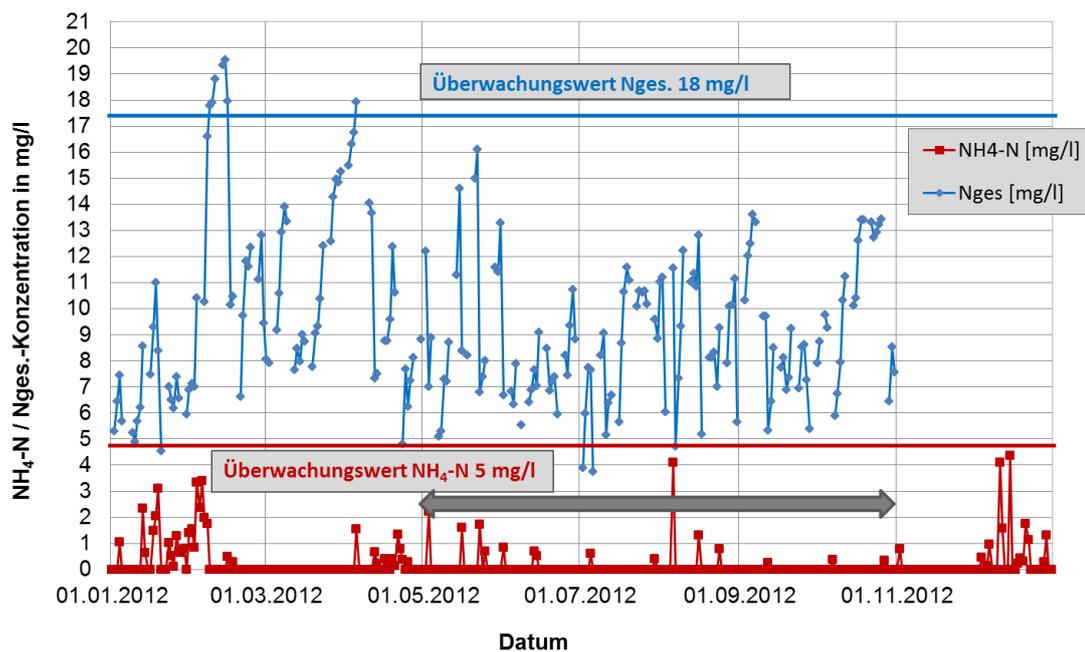
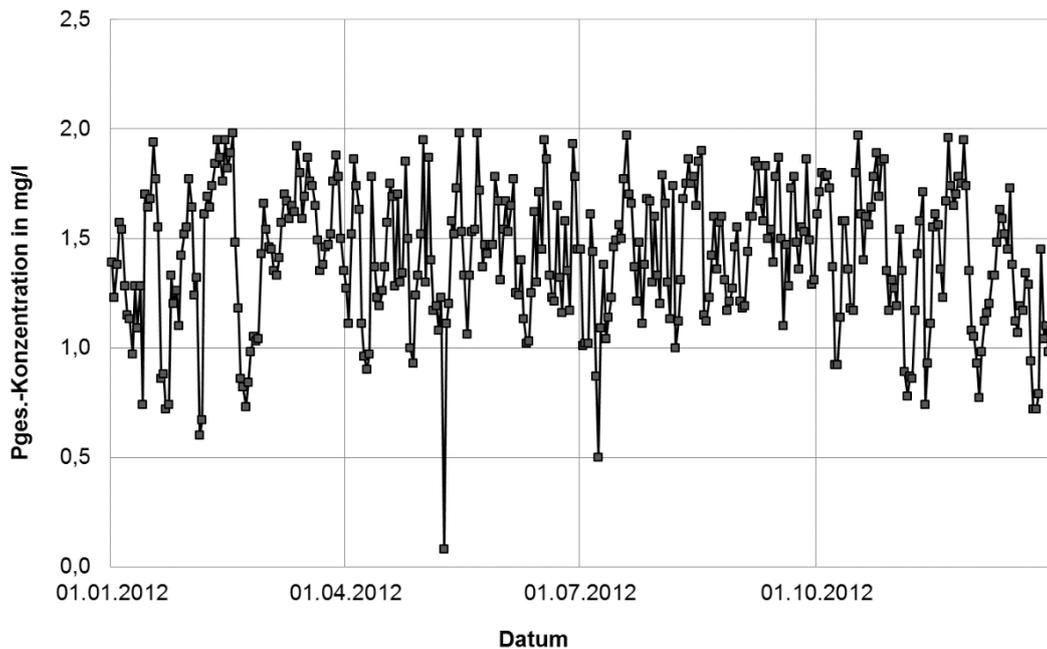
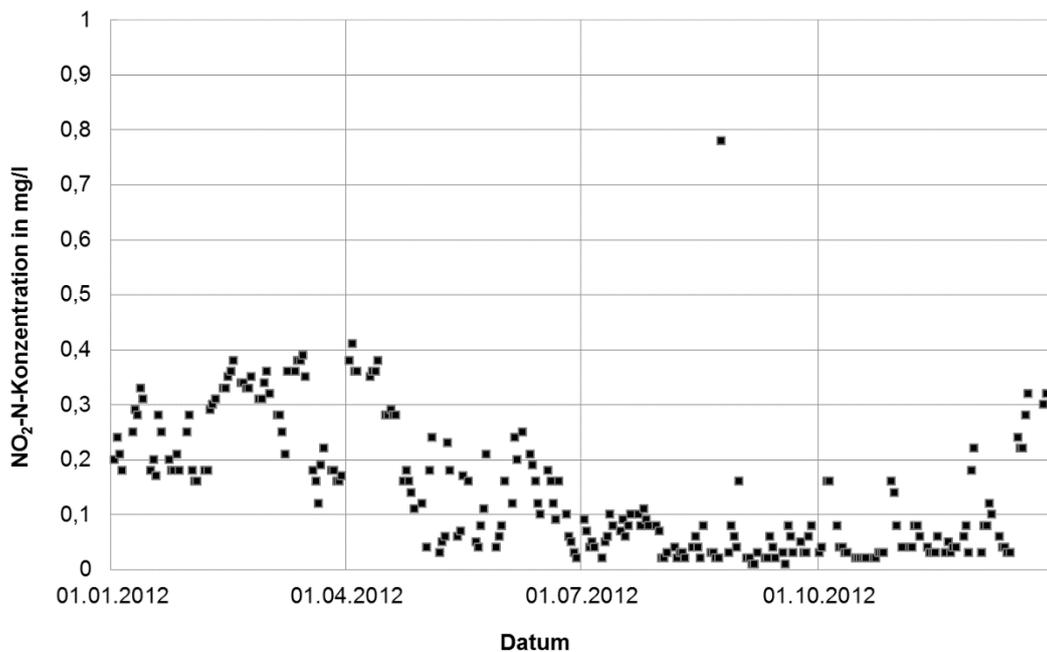


Abbildung 24: Ablaufkonzentrationen N<sub>ges</sub>, NH<sub>4</sub>-N aus 2 h-Mischproben von 2012



**Abbildung 25: Ablaufkonzentrationen Gesamt-Phosphor aus 2 h-Mischproben von 2012**

Nicht überwachungsrelevant, aber für die Dimensionierung einer Ozonungsstufe zu beachten, ist die Nitritkonzentration (siehe Abbildung 26). Erhöhte Nitritkonzentrationen können direkt zu einer Ozonzehrung führen, ohne dass das Ozon mit den zu entfernenden Reststoffen reagieren kann. Somit ist eine möglichst vollständige Nitrifikation eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz der Ozonung. Bei der Berechnung der Ozonmenge sind die Nitritkonzentrationen daher zu berücksichtigen.



**Abbildung 26: Ablaufkonzentrationen NO<sub>2</sub>-N aus 2 h-Mischproben von 2012**

Die Spitzenablaufkonzentrationen an abfiltrierbaren Stoffe (AFS) scheinen in den letzten Jahren (insbesondere in den letzten Monaten von 2012, vgl. Abbildung 27) leicht anzusteigen. Abbildung 28 zeigt ergänzende Messungen zur Bestimmung von abfiltrierbaren Stoffe

im Ablauf der Kläranlage Weißenburg für die Jahre 2011 bis 2015. Der Überwachungswert für abfiltrierbare Stoffe von 15 mg/l bei Trockenwetter wurde immer eingehalten. Seit 2013 hat sich der Mittelwert im Trockenwetterfall halbiert. Er fiel von 4 mg/l auf 2 mg/l. Die Werte für abfiltrierbare Stoffe sind bei der Errichtung einer vierten Reinigungsstufe (z.B. bei der Filterauslegung) im Auge zu behalten. Im Trockenwetterfall ist die Belastung durch abfiltrierbare Stoffe sehr gering. Zum damaligen Zeitpunkt wurde daher empfohlen bei Mischwasserzufluss zur Kläranlage zu überprüfen inwieweit die Betriebszustände, die bis Mitte 2013 regelmäßig zu mehr als 10 mg/l AFS im Ablauf der Nachklärung führten, für die Zukunft ausgeschlossen werden können. Sollten sie im weiteren Betrieb nicht mehr auftreten, ist zukünftig keine Vorfiltration erforderlich. Bei häufigem Auftreten von Werten über 20 mg/l sollte über die Nachrüstung einer Vorfiltration nachgedacht werden. Da sich die AFS-Belastungen nicht wesentlich geändert hatten, wurde im Zuge der Entwurfsplanung davon ausgegangen, dass keine zusätzlichen Maßnahmen getroffen werden müssen.

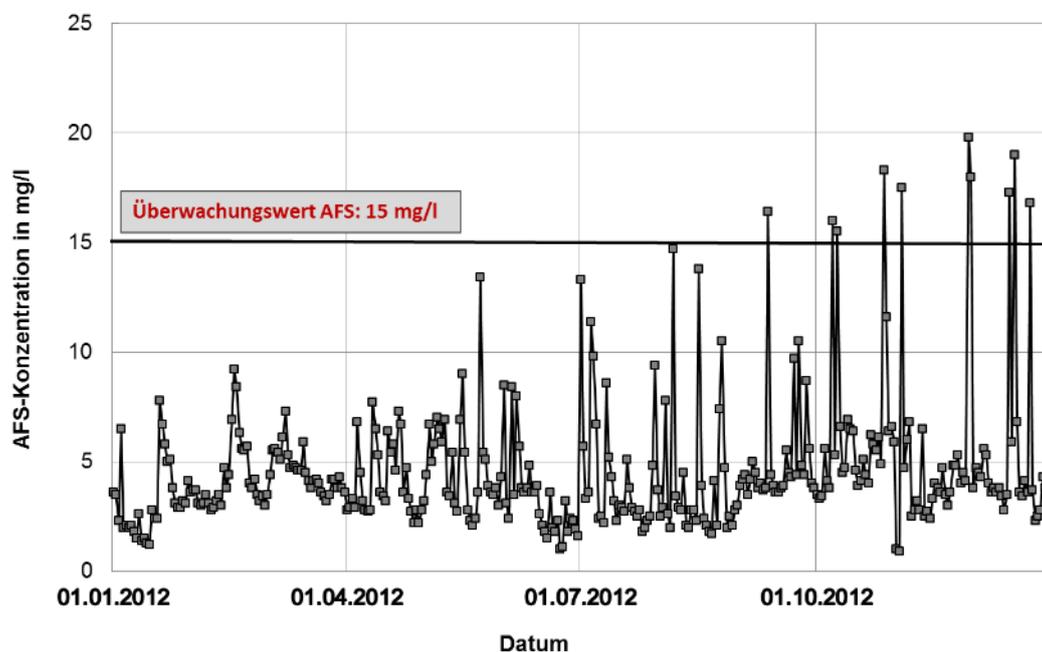
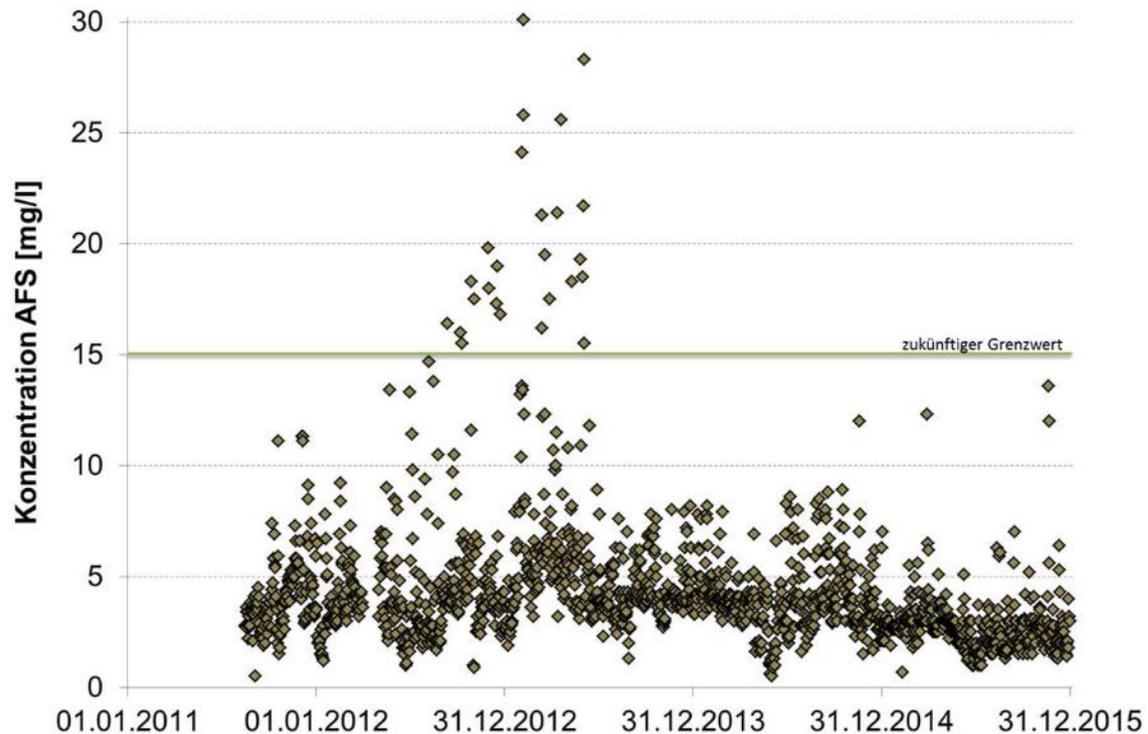


Abbildung 27: Ablaufkonzentrationen AFS aus 2 h-Mischproben von 2012

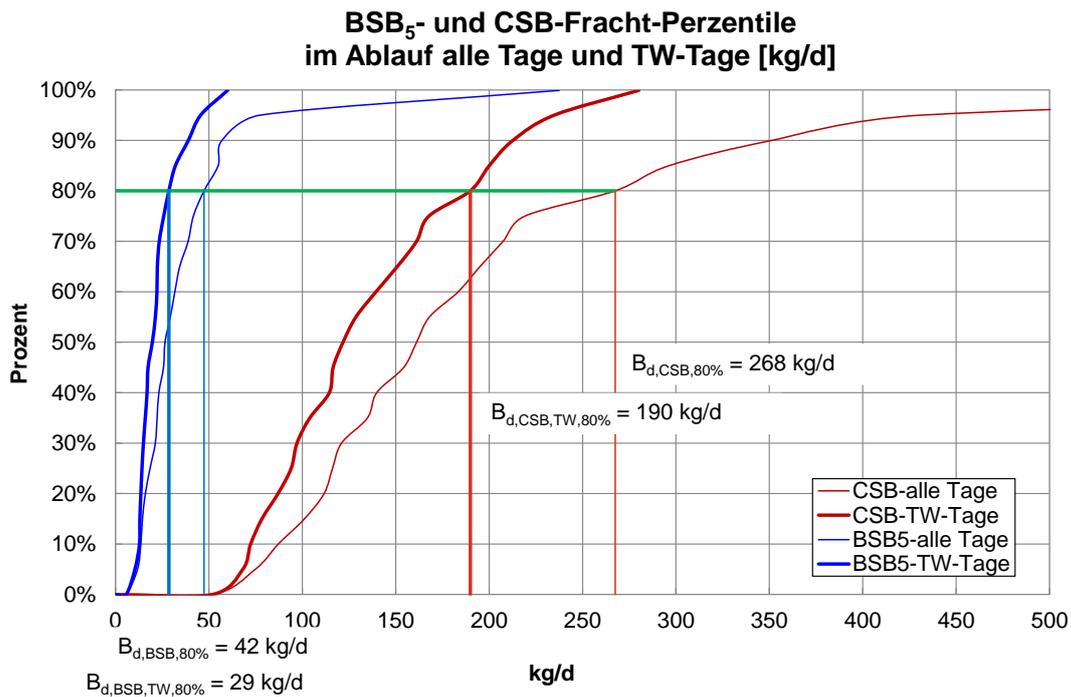


**Abbildung 28: Ablaufkonzentrationen AFS der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015 (Zech und Schatz, 2016)**

Tabelle 5 zeigt die Tagesfrachten des Ablaufs der Nachklärung (= Zulauf zur vierten Reinigungsstufe) von 2011 bis 2013. Hier wurden die Mittelwerte und das 80-Perzentil bestimmt, weil sie relevante Dimensionierungsgrößen für die vierte Reinigungsstufe sind. Eine Darstellung der Unterschreitungshäufigkeiten der Tagesfrachten zeigt Abbildung 29.

**Tabelle 5: Tagesfrachten Ablauf Nachklärung der KA Weißenburg**

|  |                     | <b>Ablauf NKB</b> |               |
|--|---------------------|-------------------|---------------|
| <b>Alle Tage 2011-2013</b>                             |                     | Mittelwerte       | 80%-Perzentil |
| $Q_d$  | [m <sup>3</sup> /d] | 7.919             | 10.312        |
| $Q_h$ aus Stundenwerten                                | [m <sup>3</sup> /h] | 331               | 429           |
| $B_{d,CSB}$  | [kg/d]              | 195               | 268           |
| $B_{d,BSB}$  | [kg/d]              | 35                | 47            |
| $B_{d,AFS}$  | [kg/d]              | 47                | 55            |
| $B_{d,Pges.}$  | [kg/d]              | 11                | 14            |
| $B_{d,GesN}$ (inkl. TKN)                               | [kg/d]              | 90                | 113           |
|  |                     | <b>Ablauf NKB</b> |               |
| <b>Trockenwettertage 2011-2013</b>                     |                     | Mittelwerte       | 80%-Perzentil |
| $B_{d,CSB}$  | [kg/d]              | 136               | 190           |
| $B_{d,BSB}$  | [kg/d]              | 22                | 29            |
| $B_{d,AFS}$  | [kg/d]              | 20                | 25            |
| $B_{d,Pges.}$  | [kg/d]              | 8                 | 10            |
| $B_{d,GesN}$ (inkl. TKN)                               | [kg/d]              | 67                | 81            |
| <b>Weitere relevante Parameter für Dimensionierung</b> |                     |                   |               |
| Nitrit   | [mg/l]              | 0,17              | 0,29          |
|  | [kg/d]              | 1,5               | 2,43          |



**Abbildung 29: Häufigkeitsunterschreitung der Ablauffrachten KA Weißenburg**

Auch die Ablaufwerte der zusätzlich ausgewerteten Jahre 2014 und 2015 entsprechen durchgehend den gesetzlichen Anforderungen. Abbildung 30 zeigt die Ablaufwerte der Parameter BSB<sub>5</sub> und CSB für die Jahre 2011 bis 2015. Demnach konnte der Mittelwert für CSB auf unter 20 mg/l gesenkt werden. Auch die Streuung hat gegenüber den Vorjahren deutlich abgenommen.

Die Ablaufwerte der Stickstoff- und Phosphorverbindungen sind in Abbildung 31 für die Jahre 2011 bis 2015 dargestellt. Der Grenzwert für Phosphor ist seit dem Jahre 2012 immer eingehalten. Die Grenzwerte für die Stickstoffparameter gelten nur von Mai bis Oktober. In diesem Zeitraum gab es keine Überschreitungen.

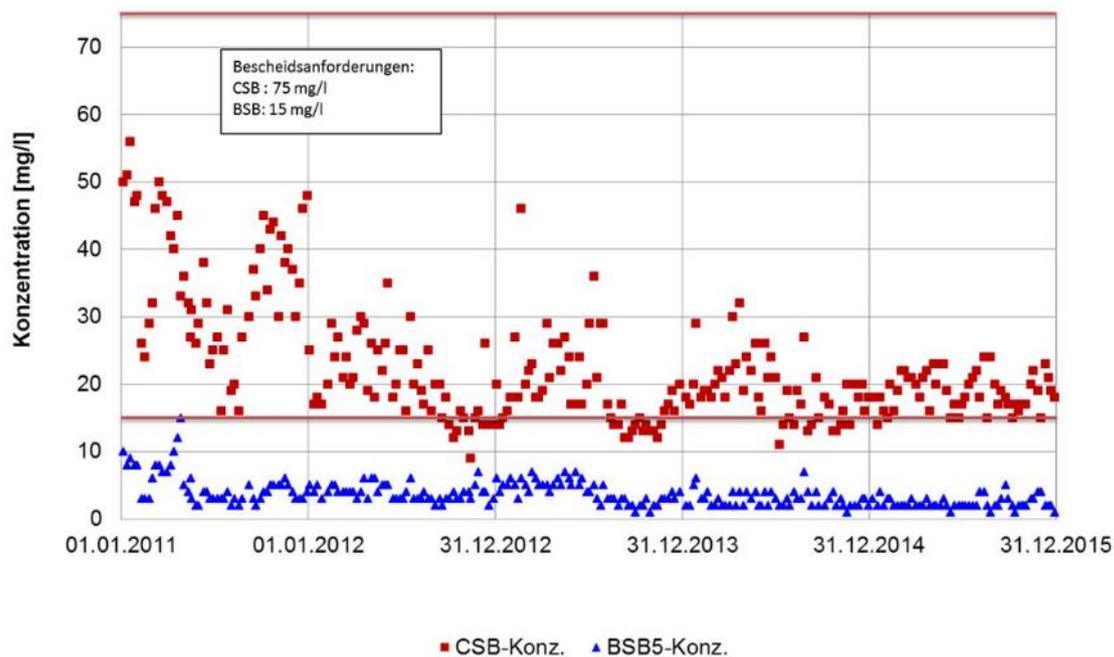


Abbildung 30: CSB und BSB<sub>5</sub> Ablaufwerte der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015

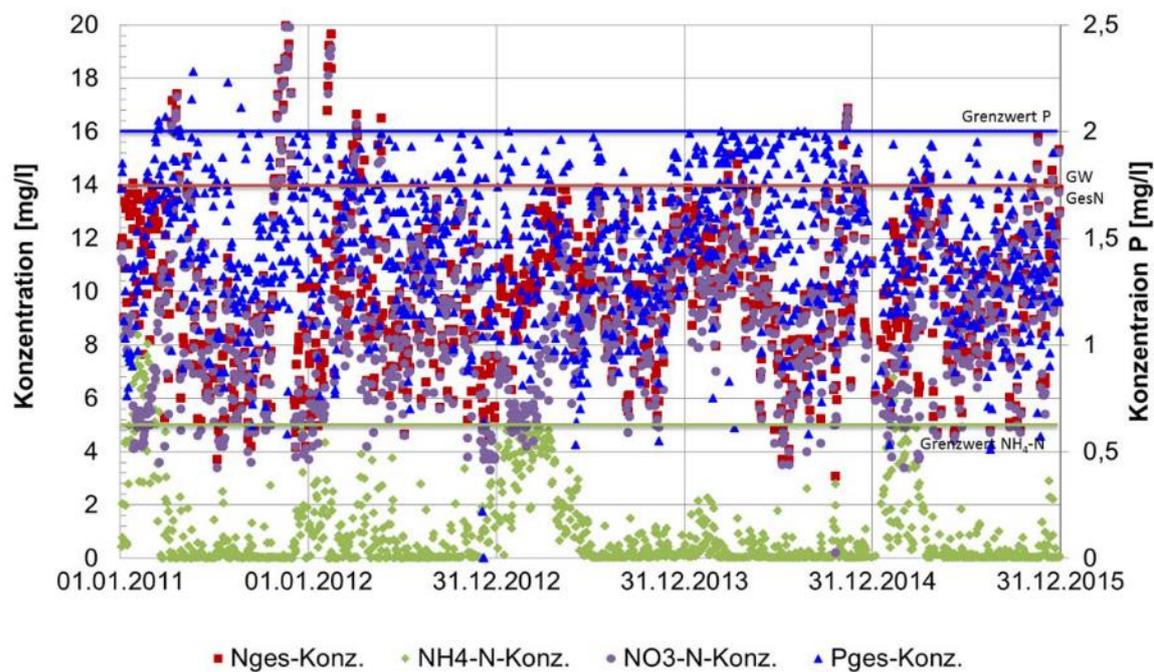


Abbildung 31: Stickstoff- und Phosphorablaufwerte der Kläranlage Weißenburg 2011 bis 2015

4.1.5.4 Weitere Analyseparameter

Ergänzend zu den Auswertungen aus den Betriebstagebüchern wurden Messungen für DOC und CSB vorgenommen. Regelmäßige DOC-Messungen über einen längeren Zeitraum fanden auf der Kläranlage Weißenburg nicht statt.

Um Aussagen über die aktuellen und zukünftigen CSB und DOC Belastungen bei verschiedenen Wetterszenarien (Trockenwetter, Regen, Regennachlauf) zu treffen, wurden im Zeitraum September bis Oktober 2014 Stichproben (n = 31) aus dem Ablauf Nachklärung der Kläranlage Weißenburg entnommen und im Labor der Universität der Bundeswehr München analysiert. Ziel der Auswertung der Proben war neben der Bestimmung eines Korrelationsfaktors für DOC, die Abbildung der Konzentration von CSB und DOC bei schwankenden Zuflüssen (aufgrund von Wetterereignissen) auf der Kläranlage (siehe Abbildung 32) unter Einbeziehung historischer Daten. Die DOC-Konzentration beträgt im Mittel 5,8 mg/l. Das mittlere CSB/DOC-Verhältnis liegt bei 2,1. Das CSB/DOC-Verhältnis ist bei Regenwetter etwas höher, da der Oxidationsgrad bei einer geringeren Verweilzeit im Vergleich zu Trockenwetter niedriger ist. Bei Trockenwettertagen ist diese und damit auch der Oxidationsgrad höher.

Die Ermittlung der erforderlichen Ozondosis in Abhängigkeit von DOC-Gehalt und der spezifischer Zehrung ist in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

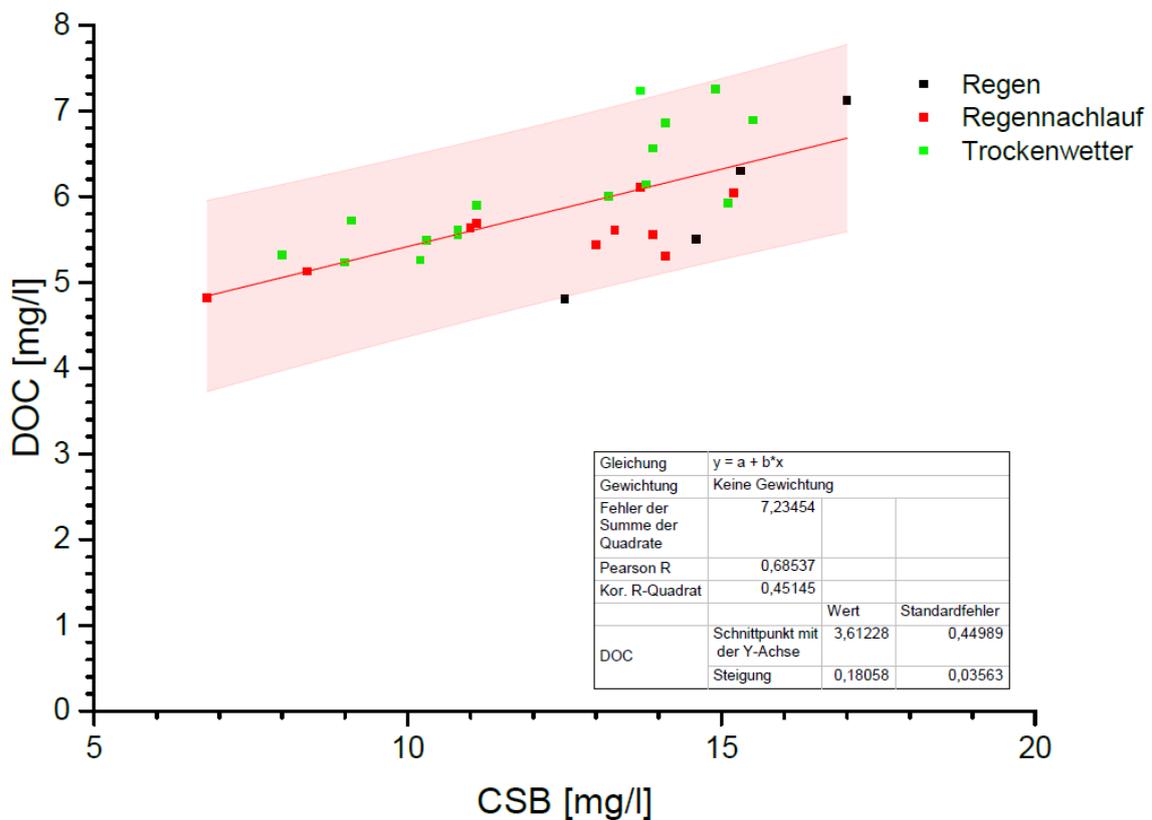


Abbildung 32: Konzentration von CSB und DOC in Abhängigkeit vom Wetter

## 4.2 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR ERHÖHUNG DER PLANUNGSSICHERHEIT

Während des Pilotprojekts Weißenburg wurden neben der Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse ein Testverfahren zur Ozonierbarkeit des Weißenburger Abwassers, ein Variantenvergleich, eine Strömungssimulation für den Ozonreaktor sowie eine Energieprognose für die vierte Reinigungsstufe durchgeführt. Die einzelnen Untersuchungen werden in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert.

### 4.2.1 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Zur Beurteilung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse und um herauszufinden, ob die Zuläufe zur vierten Reinigungsstufe im Freispiegelgefälle an das Bauwerk angeschlossen werden können, wurde ein Gutachten beauftragt. Nach Möglichkeit sollten die zu hebende Wasserspiegeldifferenz geringgehalten werden. Das Gutachten wurde durch ein Fachbüro 2015 erstellt.

Aus diesem Gutachten ging hervor, dass bei einer Planung mit Freispiegelgefälle eine Gründungstiefe von ca. 7 m unter der vorhandenen Geländeoberfläche (GOK) notwendig wäre. Grundwasser wurde in 3,7 m unter GOK angetroffen. Da das Grundwasser in Verbindung zur Schwäbischen Rezat steht, sind die Grundwasserstände von kurz- und mittelfristigen Witterungsverhältnissen beeinflusst und unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen. Der Bemessungsgrundwasserstand liegt demnach bei 400 m ü. NN. Während der Baumaßnahme wurde daher ein wasserundurchlässiger Baugruben-Verbau (Spundwand mit innenliegender Wasserhaltung) notwendig.

Das Material der Bodenprobe erfüllt die Z0-Bedingungen. An einen offenen Wiedereinbau, auch an anderer Stelle, sind damit keine besonderen Bedingungen geknüpft. Eine Stichprobe ergab für die Ablagerung des Materials die Deponieklasse DK 0.

Die bestehenden Höhenverhältnisse und die durchgeführten hydraulischen Berechnungen haben zudem gezeigt, dass eine Zuleitung zur geplanten vierten Reinigungsstufe im Freispiegelgefälle theoretisch möglich ist. Aufgrund der ermittelten Höhenlage wäre demnach eine Einbindung im freien Gefälle möglich gewesen, die erforderlichen Bauwerke hätten dann aber bis zu sieben Meter tief in das Gelände mit hohem Grundwasserstand eingebunden werden müssen. Daher wurde ein zusätzliches Heben der Wassermengen aus den Nachklärbecken als erforderlich erachtet, um die geplante vierte Reinigungsstufe sicher betreiben zu können.

### 4.2.2 Testverfahren Ozonierbarkeit

Für die Feststellung der grundsätzlichen Eignung des Kläranlagenablaufs für eine Ozonung wurde ein Laborversuch (CSB und SAK-Abbau bei verschiedenen Ozondosen) durch die Firma Xylem durchgeführt (24 h-Mischprobe bei Trockenwetter vom 11. bis 12.11.2014). Die Probe wurde unter verschiedenen Ozondosierungen im Bereich von 0,5 bis 1,4 mg Ozon/mg DOC analysiert. Dies entsprach für die gezogene Probe eine Ozondosis von 2,6 bis 7,4 g Ozon/m<sup>3</sup>. Die benötigte Ozonmenge wurde auf Basis dieser Untersuchung inklusive einer Reserve vorerst auf 3,2 kg O<sub>3</sub>/h abgeschätzt. Ein weiterer Laborversuch für die Validierung der Bemessungsparameter wurde durchgeführt, um zusätzlich Aussagen zum Verhalten von Ozon im vorgereinigtem Abwasser, zur OH-Radikal-Ausbeute sowie zur Bildung von toxischen Nebenprodukten treffen zu können und um Effizienzprobleme bei der Spurenstoffelimination frühzeitig zu identifizieren. Hierzu wurde ein Teil des modularen

Testverfahrens nach Wunderlin et al. (2015) angewendet. Mit den verschiedenen labor-technischen Untersuchungen (Batchsystem) wurde die Firma Envilab in der Schweiz beauftragt. Dafür wurde eine Wochenmischprobe vom Ablauf der Nachklärbecken der Kläranlage Weißenburg verwendet. Folgende Arbeitspakete wurden ausgeführt:

- Charakterisierung des Abwassers und Bestimmung der Prozessparameter sowie der Ozonzehrung und der OH-Radikal-Ausbeute bei drei verschiedenen Ozondosen in einer Probe (Wochenmischprobe),
- Ermittlung des Spurenstoffabbaus für die Ozonung (Wochenmischprobe),
- Bestimmung der Bromidbelastung in zehn Proben (Tagesmischproben) und des Oxidationsnebenprodukts Bromat in einer Probe (Wochenmischprobe).

Aus den Untersuchungen ging hervor, dass keine auffälligen Werte identifiziert wurden, welche die Implementierung einer Ozonung auf der Kläranlage Weißenburg grundsätzlich ausschließen (siehe Tabelle 6). Zudem wurde bei einer Dosierung von 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC keine signifikante Bromatbildung gefunden (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 6: Zusammenfassende Beurteilung der untersuchten Abwasserprobe der Kläranlage Weißenburg (Götz und Piazzoli, 2016)**

| Untersuchte Probe  | Modul 1   | Modul 2          | Modul 3                 |
|--|---|------------------|-------------------------|
|  | Charakterisierung des Verhaltens von Ozon im Abwasser | Spurenstoffabbau | Oxidationsnebenprodukte |
| Mischprobe Ablauf Nachklärbecken v. 17.03. - 21.03.2016 (Probe-Nr. 1305) |   |                  |                         |

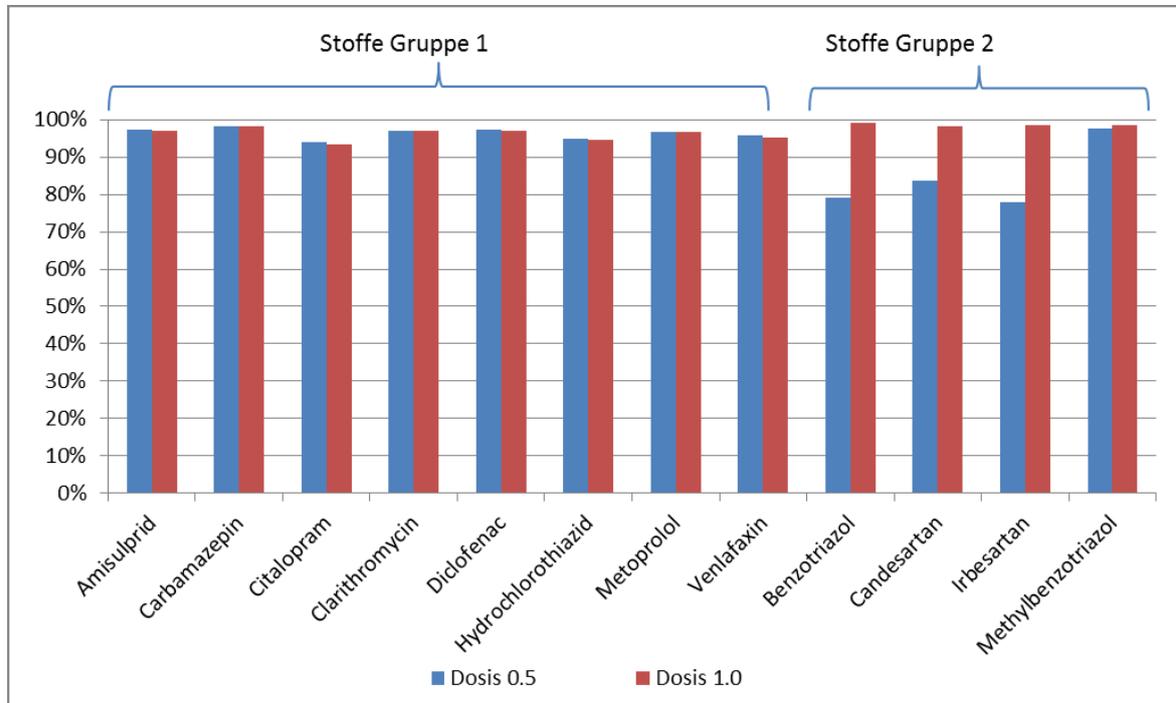
\*) **Grün:** Ergebnisse des Testmoduls weisen auf ein übliches Verhalten hin und würden eine Ozonung zulassen, **Orange:** Gewisse Aspekte müssen genauer abgeklärt werden; **Rot:** Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine Ozonung für diese Anlage nicht geeignet ist.

**Tabelle 7: Gemessene Bromid-, und Bromatkonzentrationen (Götz und Piazzoli, 2016)**

| Parameter                     | unbehandelte Probe | Probe mit 0,5 g O <sub>3</sub> / g DOC | Probe mit 1 g O <sub>3</sub> / g DOC | Probe mit 1,5 g O <sub>3</sub> / g DOC |
|-------------------------------|--------------------|--|--------------------------------------|--|
| Bromid (mg/l)                 | 0,050              | -                                      | -                                    | -                                      |
| Bromat (mg/l)                 | 0,0009             | 0,0010                                 | 0,0044                               | 0,0157                                 |
| Bromatbildungsrate (in mol %) | -                  | 0,14 %                                 | 4,2 %                                | 14 %                                   |

Durch die Untersuchungen zur Ozonstabilität konnte festgestellt werden, dass die Expositionen (= Restkonzentration x Reaktionszeit) von Ozon (mit 0,0027 mol • s) und von Hydroxylradikalen (•OH) (mit 1,74 • 10<sup>-10</sup> mol • s) bei einer Ozondosis von 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC nach Wunderlin et al. (2015) und Wildhaber-Schindler et al. (2015) im erwarteten Bereich für unproblematische Abwässer liegen. Treten im Vergleich zu Referenzabwässern (siehe Wildhaber-Schindler et al., 2015 und Wunderlin et al., 2015) signifikante Abweichungen auf, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Abwassermatrix stark von den bereits untersuchten Abwasserproben unterscheidet. Dies weist auf andere ozonzehrende Inhaltsstoffe hin, was potenziell zu einer erhöhten Bildung von Transformations- oder Oxidationsnebenprodukten und erhöhten Ozondosen führen kann.

Mit einer Ozondosis von  $0,5 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ , die im Fall der untersuchten Probe der Kläranlage Weißenburg  $5,6 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  Abwasser entspricht ( $2,5 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  wurden alleine zur Oxidation von Nitrit benötigt), wurde eine Abbauleistung von 90 % für die Ozonung erreicht, gemessen anhand von zwölf Spurenstoffen (siehe Abbildung 33).



**Abbildung 33: Abbauleistung der Ozonung bei den Dosen  $0,5$  und  $1,0 \text{ g O}_3 / \text{g DOC}$  in Batch-Versuchen mit Abwasser der Kläranlage Weißenburg (Götz und Piazzoli, 2016)**

Die hier ermittelten Ozonabbauraten der einzelnen Stoffe sind aufgrund der im Laborversuch optimalen Ozoneinbringung tendenziell leicht höher als auf Pilotanlagen oder großtechnischen Anlagen. Verschiedene aktuelle Pilotanlagen haben aber gezeigt, dass bei einer Dosierung von  $0,5 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  in kommunalem Abwasser durchaus auch eine mittlere Elimination dieser zwölf Stoffe von  $> 85 \%$  erreicht werden kann (Abegglen und Siegrist, 2012; Schachtler, 2015).

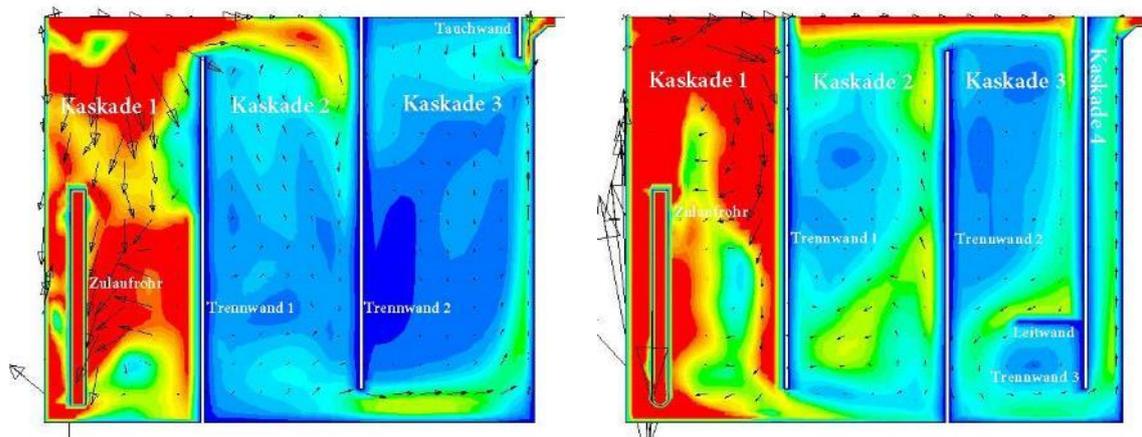
#### 4.2.3 Strömungssimulation Ozonreaktor

Zur konstruktiven Optimierung des Ozonreaktors erfolgte eine hydraulische Modellierung der Strömungs- und Durchmischungsverhältnisse durch die Firma FlowConcept. Die entsprechende Modellgeometrie (Reaktor, Abstand zwischen Einleitstelle und Reaktor, Rohrlänge zwischen Injektor und Einleitstelle etc.) sowie die Randbedingungen und Betriebsdaten wurden durch das planende Ingenieurbüro festgelegt. Es wurde für ein Zwei-Phasen-Gemisch, bestehend aus Wasser und gasförmigem Sauerstoff-Ozon-Gemisch, die Strömung dreidimensional und zeitabhängig für die relevanten Lastfälle berechnet. Im Fokus der Simulationsberechnungen standen dabei die Geometrieerstellung und Netzgenerierung, die Geschwindigkeitsverteilung und die Verteilung des Ozongases. Aufbauend auf den ermittelten Strömungsfeldern wurden zudem Tracerberechnungen durchgeführt, um die Einmischung des gelösten Ozons besser beurteilen zu können. Die Zulaufkonzentration des Tracers wurde mit 100 % angesetzt. Reaktive Prozesse wurden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Zusätzlich zum Tracertransport wurde für die Berechnungen die Oxidation

eines Inhaltsstoffes berücksichtigt. Die Grundlage dafür bildete der Oxidationsprozess für Metoprolol (Reaktionskonstante  $k = 2.700 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Als Tracer wurde gelöstes Ozon angesetzt. Bei Annahme eines Eintrags von  $2,7 \text{ kg O}_3/\text{h}$  und einer Löslichkeit von  $0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7 \text{ kg O}_3/\text{h}$  in 1 Liter Wasser ergibt sich am Zulauf für den Ozoneintrag ein Wert von  $1,539 \text{ kg/m}^3$ . Die Zulaufkonzentration für das Metoprolol wurde zu  $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$  angenommen.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Planungszustand und der bevorzugten Optimierungsvariante ist in Tabelle 8 und Abbildung 34 dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen für den Planungszustand, dass in der ersten Kaskade bei sehr hohen Geschwindigkeiten eine gute Einmischung des Zulaufstromes erfolgt, dass aber in den folgenden Kaskaden die Aufenthaltszeit stark eingeschränkt ist, was durch die Anordnung der Trennwände zwischen den Kaskaden bedingt war. Eine Walzenströmung und Durchmischung in Kaskade 2 und 3 war nicht festzustellen.

In einer ersten Optimierungsvariante wurde daher die Anordnung dieser Wände dahingehend verändert, dass die erste Wand unterströmt und die zweite überströmt wurde. Zusätzlich wurde eine dritte Wand statt der verkürzten Tauchwand vor dem Ablauf angeordnet. Die Ergebnisse zeigten eine verbesserte Einmischung in Kaskade 2, jedoch kam es zu einer Kurzschlussströmung vom Zulauf bis zur zweiten Trennwand. Um diese zu reduzieren, wurden in einer zweiten Optimierungsvariante die Zulauföffnungen am Zulaufrohr um  $45^\circ$  in Richtung Wasseroberfläche gedreht. Des Weiteren wurde eine horizontale Leitwand an der dritten Trennwand angeordnet, um die Abströmung aus der Kaskade 3 zur Kaskade 4 und damit zum Ablauf zu verlangsamen. Es zeigte sich, dass durch die veränderten Austrittsöffnungen die gesamte Abströmung aus dem Rohrleitungssystem verändert wurde, da das Wasser-Gas-Gemisch nun frei, ohne Begrenzung durch die Wand austreten konnte. Die Geschwindigkeiten in der Kaskade 1 stiegen an, jedoch wurde auch die Vermischung intensiviert. Insgesamt konnte eine Verlängerung der Aufenthaltszeiten verzeichnet werden. Aufgrund der gewonnen Erkenntnisse wurde die Optimierungsvariante 2 für die bauliche Ausführung des Ozonreaktors berücksichtigt.



**Abbildung 34:** Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor, Längsschnitt (rot = 0,2 m/s, gelb = 0,13 - 0,14 m/s, blau = 0 m/s) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) (Hunze, 2016)

**Tabelle 8: Vergleich der verschiedenen Simulationsvarianten aus Hunze (2016)**

| Merkmale                                  | Planungszustand   | Optimierungsvariante 2   |
|---|---|--|
| Lastfall                                  | Q <sub>Zulauf</sub> = 430 m <sup>3</sup> /h; Q <sub>Bypass</sub> = 30 m <sup>3</sup> /h, Q <sub>Ozongas</sub> = 18 m <sup>3</sup> /h  |  |
| Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 33) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Einmischung des Zulaufstroms nur in Kaskade 1 und hohe Geschwindigkeiten im Einstrombereich</li> <li>• geringe Geschwindigkeiten und reduzierte Aufenthaltszeiten in Kaskade 2 und 3</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• wandnahe Strömungen in Richtung Kaskade 2 werden reduziert</li> <li>• Schwankungen der Ozongasfahnen in eine Richtung begünstigt</li> <li>• keine geschlossene Walzenbewegung in Kaskade 2, dafür zwei Walzenbewegungen in Kaskade 3</li> <li>• verbesserte Durchmischung in Kaskade 2 und 3 durch Quervermischungen</li> <li>• Verlängerung der Aufenthaltszeit</li> </ul> |
| Verteilung Ozongases (Abbildung 35)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• bodennahe Sammlung des Ozongases in den außenwandnahen Eckbereichen in Kaskade 1, teilweise auch in Kaskade 2</li> <li>• in Kaskade 3 kein Ozongas mehr</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozongas strömt insbesondere an den Öffnungen aus</li> <li>• keine nennenswerte Menge des Ozongases in Kaskade 2 und 3</li> </ul>  |
| Tracerverteilung (Abbildung 36)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• zu schneller Transport von Kaskade 1 bis zum Ablauf</li> <li>• im Ablauf höhere Konzentrationen als in Kaskade 3</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• höhere Tracerkonzentration und bessere Einmischung des Tracers in den ersten beiden Kaskaden</li> </ul>   |
| Metoprolol-Verteilung (Abbildung 37)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• in Kaskade 2 noch Metoprolol vorhanden</li> <li>• Konzentration in der Kaskade 3 noch geringer</li> <li>• Ablaufwert beträgt <math>7,53 \cdot 10^{-10}</math> g/l</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• stärkere Oxidation, da erhöhte Konzentration an gelöstem Ozon bereits im Zulaufrohr vorliegt</li> <li>• Konzentration an Metoprolol insbesondere in den Kaskaden 2 und 3 geringer</li> </ul>  |

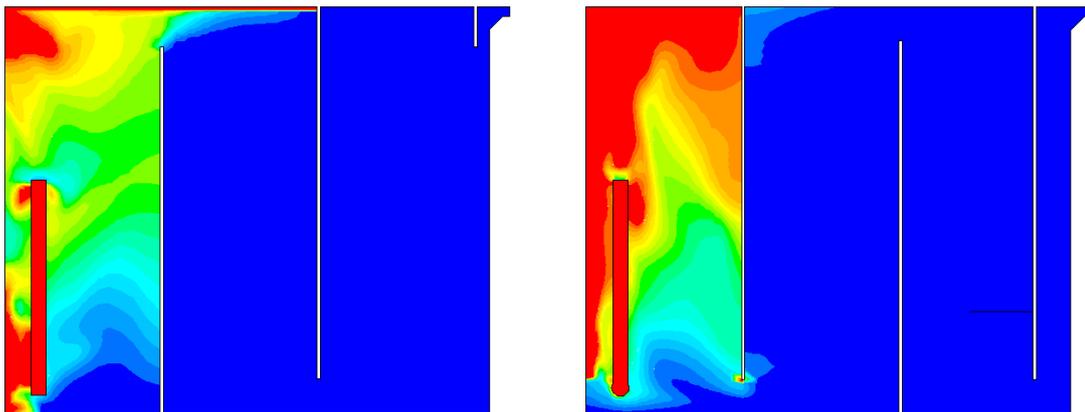


Abbildung 35: Verteilung des Ozongases (Vol.-%), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot = 0,040 Vol.-%, gelb = 0,024 - 0,030 Vol.-%, blau = 0 Vol.-%) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) (Hunze, 2016)

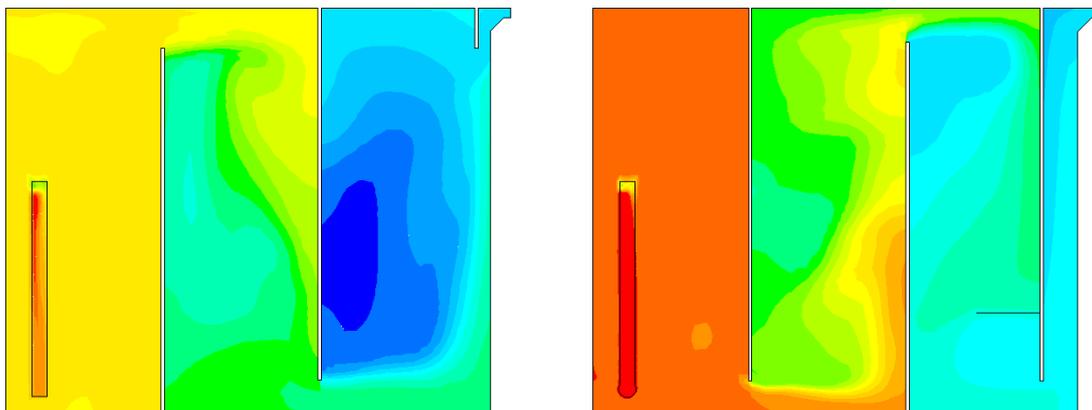


Abbildung 36: Tracerverteilung (%), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot = 0,025 %, gelb = 0,015 - 0,019 %, blau = 0 %) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) (Hunze, 2016)

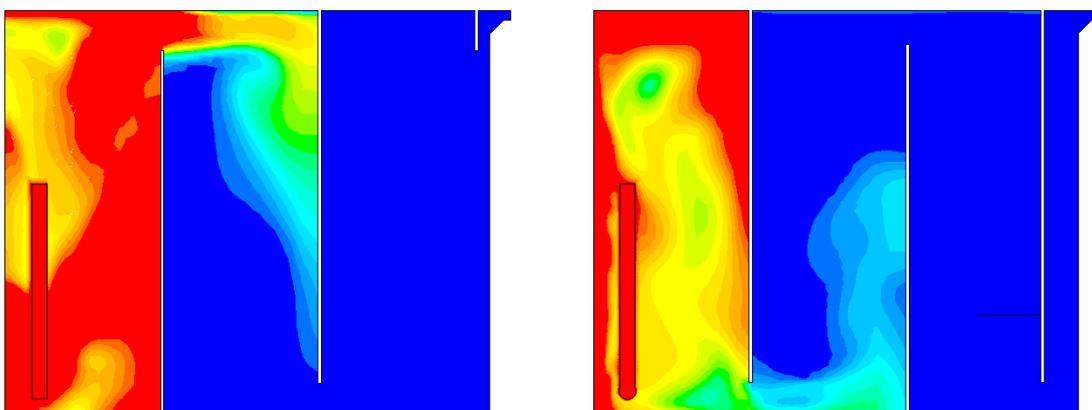


Abbildung 37: Metoprolol-Verteilung (g/l), Längsschnitt durch die Mitte des Beckens (rot =  $1,0e-07$  g/l, gelb =  $6,0e-08$  -  $7,0e-08$  g/l, blau =  $1,0e-10$  g/l) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) (Hunze, 2016)

#### 4.2.4 Vergleich der Gaseintragungssysteme

Als Eintragungssysteme für das Ozon kommen grundsätzlich Injektor, Diffusor und Radial-Diffusor in Betracht. Die Verwendung eines konventionellen Injektors als Ozoneintragungssystem erhöht, durch die zusätzliche benötigte Pumpe, den Stromverbrauch um etwa 1 bis 3 kWh/(E•a) im Vergleich zum Diffusor (bei ähnlicher Größenordnung und Ausführung wie in Weißenburg). Da ein Diffusorsystem immer eine Mindestgasbeaufschlagung benötigt, welche einen Stromverbrauch auch im Schwachlastbetrieb (z.B. nachts) erforderlich macht, kann ein Injektorsystem unter Umständen auch wirtschaftlicher sein (je nach Betriebseinstellungen und Auslegung). Durch die notwendige Mindestgasbeaufschlagung bei Diffusoren ist es möglich, dass zu viel Ozon eingetragen wird und so mehr Sauerstoff bereitgestellt werden muss, als eigentlich nötig wäre. Damit erhöht sich gleichzeitig auch der Stromverbrauch des Restozonvernichters, da durch den ungewollten Mehreintrag auch mehr Ozon vernichtet werden muss.

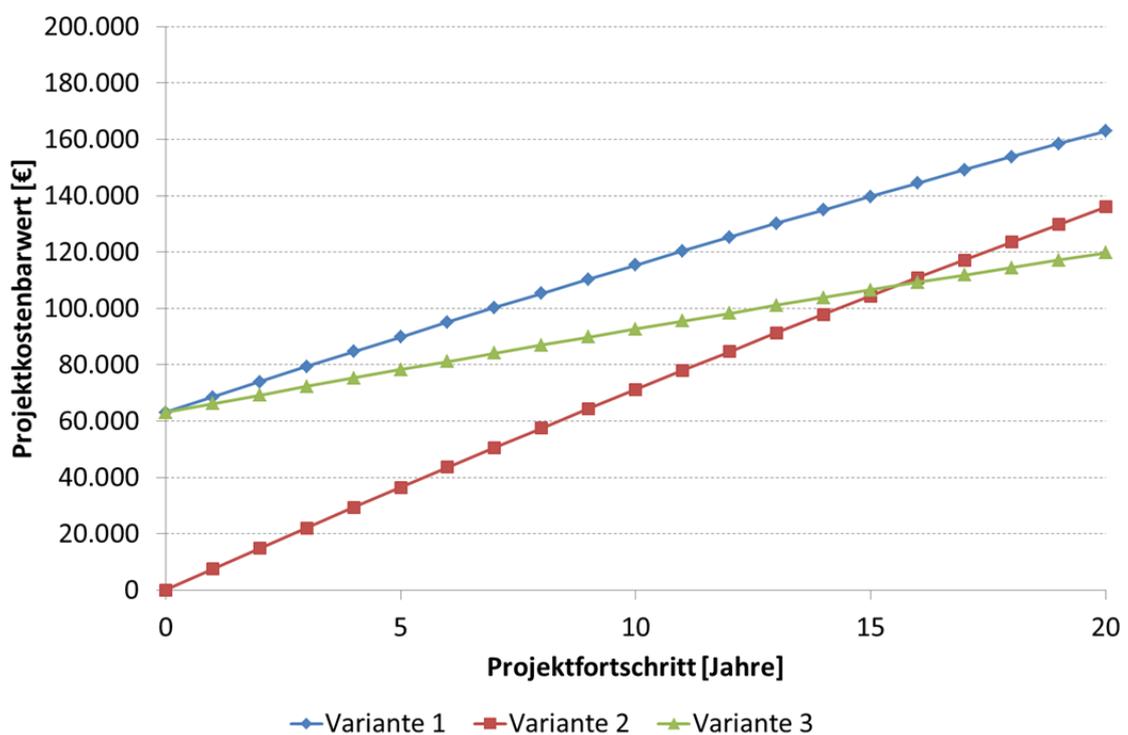
Gegebenenfalls kann auch ein Radialdiffusor verwendet werden. Dieser ist energiesparender und funktioniert ähnlich wie ein Injektor, der mit dem Vordruck aus dem Sauerstoff arbeitet.

Zur Ermittlung der Vorteilhaftigkeit der Systeme wurde daher durch das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner zunächst eine Ermittlung des Projektkostenbarwertes nach LAWA/DWA durchgeführt (DWA, 2012). Dazu wurden die Investitionskostenunterschiede und die Mehrbetriebskosten der verschiedenen Ozoneintragungssysteme ermittelt. Die Investitionsmehrkosten für den Injektor bzw. den Radial-Diffusor betragen gemäß Richtpreisangeboten ca. 63.000 Euro brutto ohne Nebenkosten. Die Mehrbetriebskosten der Ozoneintragungssysteme sind in Tabelle 9 aufgelistet. Der Injektor verursacht aufgrund der durchlaufenden Pumpen die höchsten Stromkosten. Für die Diffusoren wurde für 20 % der Zeit eine Abregelung der Ozonkonzentration im Ausgang des Ozonreaktors angenommen, die jährlich rund 2.500 Euro Mehrkosten für Sauerstoff erzeugen. Zusätzlich sind die Diffusoren wartungsintensiver als die Variante 1 und Variante 3. Dafür wurden 1,5 % der Investitionskosten, also ca. 5.000 Euro jährlich Mehrwartungskosten angesetzt. Die Pumpe des Radial-Diffusors ist kleiner als die des Injektors und benötigt demnach jährlich ca. 3.100 Euro mehr als der Diffusor. Insgesamt sind damit die Mehrbetriebskosten der Variante 2 Diffusor mit rund 7.500 Euro am höchsten.

**Tabelle 9: Mehrbetriebskosten der Ozoneintragungssysteme (Zech und Schatz, 2016)**

| Position   | Variante 1<br>Injektor | Variante 2<br>Diffusor | Variante 3<br>Radial-Diffusor |
|--|------------------------|------------------------|-------------------------------|
| zusätzliche Wartung/Instandhaltung (Euro/a)                                    | -                      | 5.000                  | -                             |
| Strommehrbezug (kWh/a) mit 0,21 (Euro/kWh)                                     | 26.280                 | -                      | 14.892                        |
| Sauerstoffmehrbedarf (kg O <sub>3</sub> /a) mit 0,17 (Euro kg/O <sub>3</sub> ) | -                      | 14.783                 | -                             |
| <b>Σ Mehrbetriebskosten (Euro)</b>   | 5.519                  | 7.513                  | 3.127                         |

Mit dem Projektkostenbarwert wurden die Investitionskosten mit den Betriebskosten verglichen. Der verwendete langfristige Zinssatz wurde mit 4 % angesetzt. Die allgemeine Preissteigerung wurde mit 3 % gewählt. Reinvestitionskosten sind nicht berücksichtigt, da über die Haltbarkeit von Diffusoren im ozonierten Abwasser noch keine Erfahrungen vorliegen. Abbildung 38 zeigt den Projektkostenbarwert der drei Varianten über einen Zeitraum von 20 Jahren. Spätestens nach 15 Jahren ist der Investitionsvorteil der Diffusoren gegenüber dem Radial-Diffusor aufgebraucht. Der Injektor stellte bei dieser Betrachtung vorerst keine wirtschaftliche Alternative dar, da sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten höher liegen als bei den anderen beiden Varianten.



**Abbildung 38: Projektkostenbarwert der Mehrkosten der Varianten des Ozoneintragssystems (Zech und Schatz, 2016)**

Vorraussetzung für eine Kostenvergleichsrechnung (KVR) nach der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) ist die technische Gleichwertigkeit und damit Vergleichbarkeit der Systeme. Ausgehend von der Nutzengleichheit der betrachteten Eintragssysteme wurde die durchgeführte KVR (wirtschaftliche Betrachtung) um eine Entscheidungsmatrix (anhand einer Nutzwertanalyse) ergänzt. Damit wurden verfahrenstechnische, betriebliche und weitere nicht monetäre Aspekte bei der Auswahl eines geeigneten Eintragssystems berücksichtigt. Dazu wurden im ersten Schritt Bewertungskriterien für die Auswahl des Ozoneintragssystems vom Projektteam zusammengetragen, kategorisiert und anschließend gemeinsam gewichtet.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist der Stromverbrauch der Eintragssysteme. Daher wurde dafür mit 37 % der größte Anteil für die Gewichtung angesetzt. Der Energiebedarf hängt vom Systemdruck (Vordruck/Unterdruck/Überdruck) und den Druckverlusten im Reaktor (hydraulische Verhältnisse) ab. Für die Ozonerzeugung und den Ozoneintrag ergibt sich der Stromverbrauch auch aus der Leistungsaufnahme der Kühlwasserpumpen und weiteren Peripherieaggregaten (Injektorpumpe, Treibstrahlpumpe bzw. Einmischapparatur,

Messtechnik Eintragungssystem, Steuerungstechnik der Systempumpen für das Eintragungssystem (z.B. via Drehzahl) etc.). Für die Bewertung der Betriebsweise sind u.a. die Mindestgasbeaufschlagung (bei Diffusor) und der Schwankungsbereich (Dosiermenge) wichtig. Bei der Nutzwertanalyse wurde daher die Verfahrenstechnik mit 16 % und die Betriebsführung mit 21 % gewichtet. Weiterhin wurden die Betriebs- und Arbeitssicherheit mit 16 % und die Planungssicherheit mit 11 % in die Nutzwertanalyse mit aufgenommen. Die Vergabe der Punkte erfolgte durch das Projektteam bestehend aus Vertretern der Stadt Weißenburg, der Kläranlage Weißenburg, des Ingenieurbüros Dr. Resch + Partner und des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr. Das Ergebnis ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Variante 3 erhielt mit 4,53 die höchste gewichtete Punktzahl und wurde zunächst als Vorzugsvariante ausgewählt.

Da die Vergabe des Loses 3 (Ozonung) an die Firma Xylem erfolgte, kam eine praktische Umsetzung der Variante Radial-Diffusor nicht in Frage. Der Radial-Diffusor ist eine Produktspezifikation der Firma Ozonia (Degrémont) und daher nicht Bestandteil der Xylem-Produkte. Schlussendlich kam mit der Variante 1 (Injektor) auch aufgrund des geringeren Wartungsaufwandes (im Vergleich zum Diffusor) und besseren Bedienkomforts, ein in der Praxis bewährtes und effizientes System für den Ozoneintrag zum Einsatz.

**Tabelle 10: Nutzwertanalyse zur Wahl des Eintragungssystems für Ozon**

| Kriteriensammlung                                 | Wertungsanteil | Wertung               |             |                       |             |                              |             |
|---|----------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|------------------------------|-------------|
|   |                | Variante 1 - Injektor |             | Variante 2 - Diffusor |             | Variante 3 - Radial-Diffusor |             |
|   |                | Punkte                | gewichtet   | Punkte                | gewichtet   | Punkte                       | gewichtet   |
| <b>Wirtschaftlichkeit</b>                         | 36,8%          |                       |             |                       |             |                              |             |
| Baukosten   |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Baunebenkosten                                    |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Material  |                | 3                     | 1,11        | 5                     | 1,84        | 4                            | 1,47        |
| Installationsaufwand                              |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Energie   |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Sauerstoffbereitstellung                          |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Projektkostenbarwert                              |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Personal  |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| <b>Verfahrenstechnik</b>                          | 15,8%          |                       |             |                       |             |                              |             |
| Eliminationsleistung                              |                | 5                     | 0,79        | 4                     | 0,63        | 5                            | 0,79        |
| Eintragungseffizienz                              |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Regelbereich                                      |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Weitere Nutzungsmöglichkeiten (Vorteile der Verfa |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| <b>Betriebsführung</b>                            | 21,1%          |                       |             |                       |             |                              |             |
| Personalaufwand                                   |                | 5                     | 1,05        | 3                     | 0,63        | 5                            | 1,05        |
| Bedienkomfort                                     |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Wartungsaufwand                                   |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| <b>Betriebs- und Arbeitssicherheit</b>            | 15,8%          |                       |             |                       |             |                              |             |
| Redundanz   |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Anfälligkeit bei Störungen                        |                | 5                     | 0,79        | 3                     | 0,47        | 5                            | 0,79        |
| Risiken bei Wartungsarbeiten                      |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Schutzvorkehrungen                                |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Auftriebssicherheit bei Beckenentleerung          |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| <b>Planungssicherheit</b>                         | 10,5%          |                       |             |                       |             |                              |             |
| Forschungsbedarf                                  |                | 4                     | 0,42        | 4                     | 0,42        | 4                            | 0,42        |
| Technischer Entwicklungsstand                     |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Vergleichbarkeit/Übertragbarkeit                  |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| Referenzen  |                |                       |             |                       |             |                              |             |
| <b>Summe</b>                                      | <b>100,0%</b>  | <b>22</b>             | <b>4,16</b> | <b>19</b>             | <b>4,00</b> | <b>23</b>                    | <b>4,53</b> |

#### 4.2.5 Stromverbrauch Kläranlage Weißenburg und Prognose des Stromverbrauchs für die vierte Reinigungsstufe

Mit Hilfe des Arbeitsblattes DWA-A 216 „Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“ (DWA Arbeitsblatt A 216) wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (vgl. Prahtel, 2016) eine vereinfachte Energieanalyse auf der Kläranlage Weißenburg durchgeführt, um den elektrischen Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage mit und ohne vierter Reinigungsstufe zu bestimmen (Prognosewerte für die vierte Reinigungsstufe). Im DWA Arbeitsblatt A 216 sind die Begriffe Energiecheck und Energieanalyse definiert und das Vorgehen hierzu festgelegt:

- Der Energiecheck dient der ersten Einschätzung des Energieverbrauchs einer Kläranlage anhand von Kennwerten. Durch ihn lässt sich die Dringlichkeit von Maßnahmen auf der Kläranlage und die Durchführung einer Energieanalyse feststellen. Eine jährliche Durchführung ist sinnvoll, um Veränderungen feststellen zu können. Die zu ermittelnden Kennwerte beziehen sich immer auf ein Betriebsjahr (DWA Arbeitsblatt A 216).
- Die Energieanalyse ist eine detaillierte Erfassung und Beurteilung der einzelnen Verfahrensstufen einer Kläranlage und zeigt Maßnahmen zur Effizienzsteigerung auf. Der Energiecheck wird durch eine systematische Erfassung aller Aggregate und deren Energieverbräuche (bzw. Stromverbräuche) mit anschließendem Vergleich der Werte durch anlagenspezifische Idealwerte ergänzt, so dass sich daraus konkrete Optimierungsmaßnahmen ableiten lassen.

Durch Vergleichen der einzelnen Verbräuche mit Idealwerten wurden auch Optimierungspotentiale vorhandener Aggregate und Verfahrensstufen ermittelt. Der Stromverbrauch des Ist-Zustandes wurde anschließend mit dem zukünftig geschätzten Verbrauch der vierten Reinigungsstufe verglichen (Prognosewerte, keine Messwerte). Zusätzlich wurde mit den Optimierungsmaßnahmen ein zukünftiger Stromverbrauch ermittelt.

Die energetische Betrachtung in Anlehnung an DWA-A 216 ergab einen spezifischen Gesamtstromverbrauch der Kläranlage Weißenburg von ca. 28,6 kWh/(E•a) für den Ist-Zustand (ca. 672 000 kWh/a bei einer mittleren CSB-Belastung aller Tage ( $EW_{CSB,120,m}$ ) von 23.500 E). Basierend auf den Unterlagen und Daten aus der Entwurfsplanung wurde für die geplante vierte Reinigungsstufe ein spezifischer Stromverbrauch von ca. 13,35 kWh/(E•a) abgeschätzt (Prognosewert). Dies entspricht einem zusätzlichen geschätzten Stromverbrauch von rund 314.000 kWh/a (Prognosewert ausgehend vom Mittelwert der Stundenabflüsse aller Tage mit 331 m<sup>3</sup>/h als mittlere Zulaufmenge). Dadurch ergibt sich ein fast 47 % höherer Stromverbrauch (Prognose). Der spezifische Gesamtstromverbrauch der Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe betrüge dann 42 kWh/(E•a). Ausgehend von einer in der vierten Reinigungsstufe behandelten Jahreswassermenge von 2,5 Millionen m<sup>3</sup>/a würde der prognostizierte spezifische Stromverbrauch (kein Messwert) der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg ca. 0,126 kWh/m<sup>3</sup> betragen. Für eine alleinige Ozonung liegen die gemessenen Werte für den Stromverbrauch nach Pinnekamp et al. (2015) im Bereich von ca. 0,04 kWh/m<sup>3</sup> bis ca. 0,17 kWh/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser. Die Literaturwerte für eine alleinige Ozonung wurden in Pinnekamp et al. (2015) mit einer Spannweite von 0,04 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,48 kWh/m<sup>3</sup> angegeben. Die aus der Literatur zusammengetragenen Werte für einen GAK-Filter (Schnellfilter) liegen nach Pinnekamp et al. (2015) in der Spannweite von 0,01 kWh/m<sup>3</sup> und 0,076 kWh/m<sup>3</sup>. In Abegglen und Siegrist (2012) wird der Energiebedarf

für Filter mit Granulierter Aktivkohle (GAK) bzw. GAK-Filter im Bereich von 0,01 bis 0,05 kWh/m<sup>3</sup>, ähnlich eines Sandfilters, angegeben. Ausgehend von diesen Daten liegt der spezifische prognostizierte Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg im Rahmen der aktuellen Praxis- und Literaturwerte. Der prognostizierte Strombedarf der Kläranlage Weißenburg durch die vierte Reinigungsstufe mit Pumpwerk im Vergleich mit dem Ist-Zustand ist in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 11: Zusätzlicher Strombedarf (elektrischer Energiebedarf) der Kläranlage Weißenburg durch die vierte Reinigungsstufe mit Pumpwerk und Erhöhung des Stromverbrauchs in Prozent (Prognosewerte) verglichen mit dem Ist-Zustand (Prahtel, 2016)**

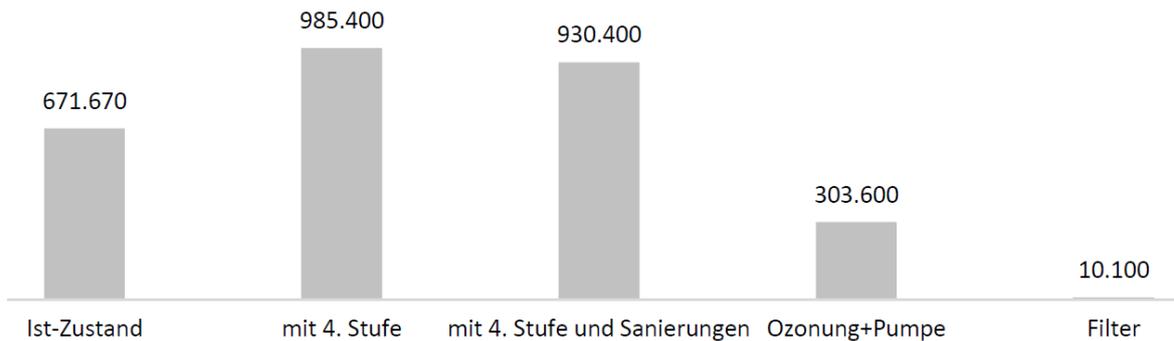
|   | Spezifischer Energiebedarf<br>[kWh/m <sup>3</sup> ] | Q [m <sup>3</sup> /h] | [kWh/a]           | Erhöhung<br>[%] |
|---|---|-----------------------|-------------------|-----------------|
| Pumpe                                       | 0,001   | 331                   | 28.125,73         | 4,19            |
| Ozonung                                     | 0,095   | 331                   | 275.458,20        | 41,01           |
| Sandfiltration                              | 0,005   | 165,5                 | 7.248,90          | 1,08            |
| BAK-Filtration                              | 0,002   | 165,5                 | 2.899,56          | 0,43            |
| KA Weißenburg                               | 671.670,00  |                       |                   |                 |
| Insgesamt                                   | 985.402,39  |                       |                   | 46,71           |
| <b>Zusätzlicher Energiebedarf insgesamt</b> |   |                       | <b>313.732,39</b> |                 |

Um die zu erwartende Steigerung des Stromverbrauchs durch die vierte Reinigungsstufe zumindest teilweise zu kompensieren, wurden verschiedene Optimierungsansätze auf der Kläranlage identifiziert. Optimierungspotentiale bestanden in der Eigenstromerzeugung und beim prozentual größten Verbraucher, der Belebung. Auch der Sandfang hat einen vergleichsweise schlechten spezifischen Stromverbrauch. Zusammen mit dem Energiecheck stellten sich folgende kurzfristige Maßnahmen heraus (Prahtel, 2016):

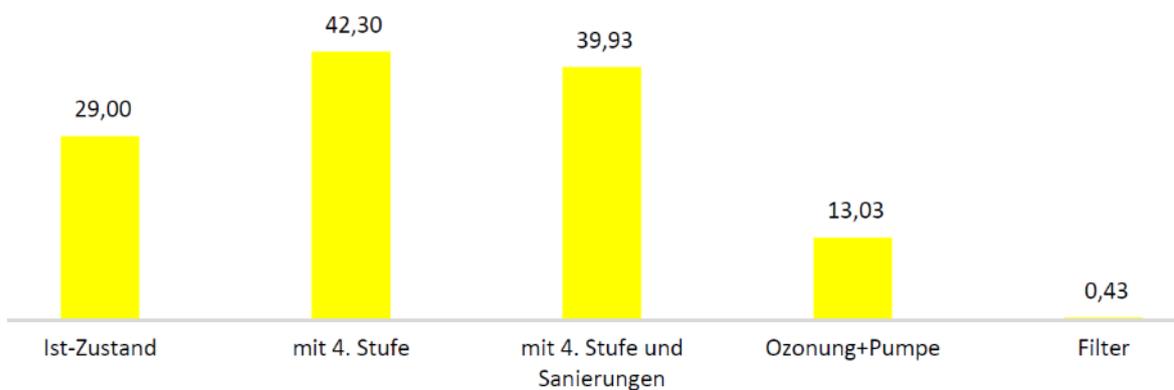
- neues Sandfanggebläse,
- neue Belüftung in der Belebung: vorhandenes Drehkolbengebläse durch Schraubenverdichter ersetzen,
- Austausch der alten BHKWs,

Nach Erneuerung der Gebläse in der Belebung und im Sandfang könnten theoretisch 55.000 kWh/a eingespart werden. Damit wird ein zukünftiger Strombedarf auf der Kläranlage Weißenburg von 930.000 kWh/a prognostiziert (vierte Stufe + energetische Sanierungen), was einem spezifischen Stromverbrauch von 40 kWh/(E•a) entspricht.

In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist eine mögliche Entwicklung des Strombedarfs auf der Kläranlage Weißenburg dargestellt. Die ersten drei Säulen bilden die drei betrachteten Zustände der Kläranlage Weißenburg ab. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg des Stromverbrauchs durch die vierte Reinigungsstufe. Er setzt sich aus den letzten beiden Säulen zusammen, aus der Ozonung mit vorgeschaltetem Pumpwerk und den Filtern. Durch die Sanierungen (Gebläse in der Belebung und im Sandfang) kommt es zu einer Energieeinsparung von etwa 55.000 kWh/a.



**Abbildung 39: Jährlicher Energiebedarf (elektrisch, in [kWh/a]) auf der Kläranlage Weißenburg mit und ohne vierte Reinigungsstufe (Prahtel, 2016)**



**Abbildung 40: Einwohnerspezifischer Energiebedarf (elektrisch, in [kWh/(E\*a)]) auf der Kläranlage Weißenburg mit und ohne vierte Reinigungsstufe (Prahtel, 2016)**

Grundsätzlich kann sich der Energiebedarf (keine Primärenergie) mit einer vierten Reinigungsstufe nach Abegglen und Siegrist (2012) um 30 % erhöhen. Auch Mousel et al. (2015) geben an, dass sich beim Betrieb einer vierten Reinigungsstufe der Strombedarf (ohne Primärenergie) auf der Kläranlage um ca. 10 - 30 % erhöht. Dabei bezieht sich der Vergleich in der Regel auf Kläranlagen mit konventioneller Abwasserbehandlung. In Weißenburg kommen jedoch zur biologischen Abwasserreinigung neben einer Belebung auch ein Tropfkörper (mittlerweile außer Betrieb, Stand: Dezember 2018) und eine nachgeschaltete Zwischenklärung zum Einsatz. Die biologische Stufe ist demnach zweistraßig aufgebaut, womit die Kläranlage Weißenburg als Sonderfall zu sehen ist. Dadurch können die Stromverbräuche nicht problemlos mit anderen Werten (z.B. mit den Idealwerten nach Müller et al. (1999)) verglichen werden. Der geschätzte 47 % zusätzlich höhere Stromverbrauch durch die vierte Reinigungsstufe ist relativ hoch, weil die spezifischen Stromverbräuche des Tropfkörpers und der Belebung weit unterhalb der Idealwerte nach Müller et al. (1999) liegen. Wie hoch der tatsächliche Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe bei stabilem Anlagenbetrieb ist, wird in Kapitel 7.4 diskutiert.

Durch effizientere Blockheizkraftwerke zur Stromerzeugung aus Klärgas könnte die Eigenstromerzeugung um ca. 80.000 kWh/a erhöht werden. Insgesamt kann somit fast ein Drittel des zukünftigen Strombedarfs aus Klärgas gewonnen werden. Durch die Sanierungsmaßnahmen und die erhöhte Eigenstromproduktion könnten von den 314.000 kWh/a durch die vierte Reinigungsstufe etwa 135.000 kWh/a ausgeglichen werden (entspricht ca. 43 %).

Werden weitere Sanierungen durchgeführt, könnte ein noch höherer Eigenversorgungsgrad erreicht werden.

In den Jahren 2016 bis Ende 2018 konnten folgende energetische Optimierungsmaßnahmen auf der Kläranlage Weißenburg geplant und umgesetzt werden:

- Erneuerung der BHKWs,
- Sanierung Gasspeicher,
- Sanierung der Belüftung in der Belebung,
- Errichtung Photovoltaik.

Erst wenn die energetischen Optimierungsmaßnahmen auf der Kläranlage Weißenburg vollständig abgeschlossen sind und über einen Zeitraum von mehr als ein Jahr die Stromverbräuche dokumentiert wurden, kann der Mehrstrombedarf der vierten Reinigungsstufe erneut und verlässlich ermittelt werden.

#### **4.2.6 Kohleauswahl und Hinweise zur Filterinbetriebnahme**

Aktivkohleprodukte unterscheiden sich teilweise erheblich bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit bzw. Adsorptionskapazität und ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften. Daher ist die Auswahl eines geeigneten und wirtschaftlichen Aktivkohleproduktes erforderlich, insbesondere für das zuvor definierte Aufbereitungsziel. Im Folgenden werden Erfahrungen aus der Wissenschaft und Praxis sowie Herstellerinformationen dargestellt, welche bei der Auswahl einer geeigneten Aktivkohle für Weißenburg eingeflossen sind. Vorversuche oder Filterschnelltests (siehe Kapitel 4.2.6.1) zur Eignung verschiedener granulierter Aktivkohlen (GAK) bzw. GAK-Produkte für den Einsatz in kontinuierlich betriebenen Filtern fanden in Weißenburg nicht statt.

##### **4.2.6.1 Mögliche Voruntersuchungen zur Kohleauswahl**

Eine Untersuchungsmöglichkeit zur Kohleauswahl und zur Bestimmung von Adsorptionisothermen ist die Durchführung von sogenannten Rapid-Small-Scale-Column-Tests (RSSCT). Speziell für Kornaktivkohlen können diese Kleinfiltertests durchgeführt werden. Dadurch kann mit der Verwendung von kleinen, definierten Korngrößenfraktionen das Durchbruchverhalten von realen Filtern mit größeren Korngrößen simuliert werden. Dies hat den Vorteil, dass im Vergleich zu Pilotuntersuchungen nur ein Bruchteil der nötigen Zeit und des nötigen Wasservolumens eingesetzt werden. Weiterhin sind umfangreiche mathematische Modelle und Untersuchungen zur Kinetik im großtechnischen Maßstab nicht erforderlich, sodass vergleichsweise schnelle und günstige Vorhersagen über den dynamischen Durchbruch von GAK-Filtern möglich sind.

Die Entwicklung der Rapid-Small-Scale-Column-Tests fand in den USA statt. Die ersten Modellansätze und Untersuchungsergebnisse zur Vorhersage des Durchbruchverhaltens finden sich in Crittenden et al. (1986) und Crittenden et al. (1991). Fokus der ersten RSSCT waren jedoch organische Spurenstoffe (wie z.B. Bromdichlormethan, Chloroform, Bromoform, Huminstoffe und andere) sowie der Summenparameter DOC im Trinkwasser. In den Studien von Crittenden et al. (1991) und in einem Review von Poddar et al. (2013) wird dabei auch auf die Problematik der Konkurrenzadsorption zwischen den organischen Einzelstoffen und dem adsorbierbaren Anteil der natürlichen Wasserinhaltsstoffe berichtet. Marcus (2005) führt in seiner Literaturrecherche an, dass für die DOC-Entfernung eine gute

Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen halbtechnischer Versuche und dem RSSCT festgestellt wurde.

Für die Festlegung der entscheidenden Betriebsparameter für die Durchführung eines RSSCT werden „down-scaling“-Gleichungen bzw. Formeln verwendet. Diese berücksichtigen dabei die Massentransfermechanismen während der Adsorption (Dispersion, Porendiffusion, Oberflächendiffusion etc.). Entsprechende mathematische Ansätze, Modelle und Gleichungen finden sich z.B. in Worch (2012).

Marcus (2005) führt in seiner Arbeit an, dass das Durchbruchverhalten definierter Einzelstoffe in Kleinfilterversuchen nach dem RSSCT-Konzept nicht vorhergesagt werden kann. Für das Ziel einer vergleichenden Bewertung von Adsorptiven und Adsorbentien auf der Basis eines einfachen standardisierten Schnelltests ist der RSSCT eher weniger geeignet. Bekannt ist, dass die Adsorbierbarkeit verschiedener Substanzen bereits im Einzelstoffsystem eine unterschiedliche Abhängigkeit von den Versuchsrandbedingungen (Ausgangskonzentration, pH-Wert, Polarität etc.) hat (Benstöm, 2017). Mögliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Laborexperimenten und den Erfahrungen auf Großanlagen sind im Wesentlichen auf konkurrierende Adsorptionsvorgänge des definierten Einzelstoffs und der weiteren Wasserinhaltsstoffe zurückzuführen, wobei insbesondere die natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffe einen deutlichen Kapazitätsverlust im Filter gegenüber dem Einzelstoffsystem verursachen (Marcus, 2005). Weiterhin kann mit einem RSSCT der biologische Abbau in einem Filter und eine potentielle Verlängerung der Standzeit durch Restadsorption (Bioregeneration) nicht simuliert werden. Aus o.g. Gründen ist der RSSCT für eine Vorhersage der Spurenstoffelimination nur bedingt sinnvoll, sodass halbtechnische Versuche eine vielversprechendere Aussagekraft haben. Ein RSSCT ist aber hilfreich, um den Einfluss von Betriebsgrößen (z.B. Empty Bed Contact Time (EBCT), Filtergeschwindigkeit) und das Durchbruchverhalten von Adsorbentien zu untersuchen.

In Marcus (2005) wurde der RSSCT weiter entwickelt. Hier wurde ein Aktivkohle-Kleinfiltertest konzipiert und aufgebaut, der eine Einstufung von organischen Substanzen, die auf den Rückhaltepotenzialen von Aktivkohlefiltern basiert, ermöglicht. Nach Marcus (2005) ergab die Validierung der neu entwickelten Versuchsmethode, dass die Kleinfilter-Durchbruchkurven von Substanzen, deren Entfernbarekeit in Aktivkohlefiltern von Wasserwerken bekannt ist (1,1,1-Trichlorethan, EDTA, Trichlorethen, Atrazin, Isoproturon), plausibel sind. Die Durchbruchreihenfolge und der Durchbruchbeginn der einzelnen Substanzen im Kleinfilter waren identisch mit denen in einem Großfilter. Durch die Versuchsergebnisse in Marcus (2005) konnte festgestellt werden, dass der Aktivkohle-Kleinfiltertest zur Bewertung von Aktivkohlen und zur Untersuchung von Konkurrenzeffekten zwischen mehreren organischen Schadstoffen und/oder natürlichen Wasserinhaltsstoffen geeignet ist.

Untersuchungen mit dem RSSCT für die Spurenstoffelimination im Abwasser wurden in Sperlich et al. (2014) und Zietzschmann et al. (2014) durchgeführt. Unter den dortigen Betriebsbedingungen konnte gezeigt werden, dass der RSSCT geeignet ist um Aktivkohleprodukte miteinander zu vergleichen und das Durchbruchverhalten eines großtechnischen Filters vorherzusagen. Auch hier wurde der Nachteil der Konkurrenzadsorption zwischen Spurenstoffen und organischen Abwasserinhaltsstoffen beschrieben. Das Vorgehen für den Schnelltest zum Vergleich von verschiedenen GAK-Produkten wird in Zietzschmann et al. (2014) beschrieben. Der vom TZW entwickelte Granular-Carbon-Selection-Test (GCS-Test) stellt eine weitere Möglichkeit zur Auswahl von Adsorbentien dar (Zeitbedarf: zwei bis drei Wochen) (Haist-Gulde, 2015).

#### 4.2.6.2 Erfahrungen mit kontinuierlich betriebenen Filtern in Emmingen-Liptingen

Der Einsatz von GAK in kontinuierlich betriebenen Filtern wurde bisher in zwei Kläranlagen untersucht (halb- und großtechnischer Maßstab in Emmingen-Liptingen und großtechnischer Maßstab in Rietberg). In Emmingen-Liptingen wurde auf Basis von Vorversuchen (Rücklöseverhalten, Fluidisierung, Abriebverhalten etc.) die CYCLECARB 401 (Reaktivat der Filtrasorb 300) von Chemviron für die anschließenden halb- und großtechnischen Versuche bevorzugt. Verglichen wurden hier sieben verschiedene Kohletypen, darunter auch die AquaSorb 2000 von Jacobi. Das Kohleprodukt von Chemviron wies neben der günstigen Korngrößenverteilung im Batch-Versuch sowohl im gemahlenen als auch ungemahlene Zustand die höchsten Eliminationsraten bezogen auf DOC, CSB und SAK<sub>254</sub> auf. Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchen mit der Kohle von Chemviron in Emmingen-Liptingen können wie folgt zusammengefasst werden (Locher et al., 2015):

Labortechnisch:

- *„Mindestkontaktzeit beim Einsatz granulierter Aktivkohle (Filtergeschwindigkeit < 10 m/h) kein relevanter Einflussparameter für die Spurenstoffentnahme im kontinuierlich arbeitenden Filter.*
- *Über den gesamten Versuchszeitraum war eine SAK-Entnahme feststellbar (errechnete Entnahmewirkungen via Differenz zwischen Zulauf und Ablauf bezüglich des SAK<sub>254</sub>). Sie nimmt von anfangs ca. 60 % kontinuierlich bis Versuchsende (67.000 BV) auf nahezu Null ab.*
- *Da die GAK im Dyna-Filter bei kontinuierlicher Kohleförderung etwa zweimal pro Tag vollständig umgewälzt wird, ist der Beladungsgradient der Spurenstoffe in der GAK-Schicht gering.*
- *Der Effekt einer Rücklösung von Spurenstoffen in gereinigtes Wasser ist vernachlässigbar.*
- *Die GAK beginnt unabhängig vom Säulendurchmesser bei einer Filtergeschwindigkeit von rd. 7 m/h zu fluidisieren. Bei 10 m/h expandiert das Filterbett um rd. 5 %.*
- *Ein Abrieb der GAK und einhergehende Veränderung der Korngröße war auch nach rd. 7.200 Umwälzungen nicht feststellbar. Am Ende der Versuche lag der messtechnisch erfassbare Kohleverlust unter 1 % der eingesetzten Menge.“<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> S. 24 bis 26 und S. 34 bis 35 in Locher et al. (2015).

Halbtechnische Versuchsanlage:

- *„Eine Veränderung im Verlauf der Korngrößenverteilung und damit ein möglicher Abrieb der GAK konnte auch nach sieben monatigem Betrieb nicht eindeutig festgestellt werden.“<sup>2</sup>*

Großtechnische Umsetzung in Emmingen-Liptingen:

- *„Während der ersten zehn Monate wurden nahezu monatlich Proben aus der Filterschicht entnommen und eine Sieblinie der GAK erstellt. Eine signifikante Veränderung der Korngrößenverteilung ergab sich, wie bereits bei den halbtechnischen Versuchen ermittelt, nicht. Anhand der Sieblinien kann kein relevanter GAK-Abrieb im Filter festgestellt werden. Geringfügige Abweichungen zwischen den einzelnen Rückstandssummenlinien lassen sich durch die Probenahme nicht verhindern. Wäre ein kontinuierlicher Abrieb aufgetreten, hätte sich dieser mit zunehmender Laufzeit in den ermittelten Sieblinien gezeigt.“<sup>3</sup>*

#### 4.2.6.3 Kohleauswahl in Weißenburg

Um GAK in einem kontinuierlich betriebenen Filter einsetzen zu können, müssen neben einer hohen Adsorptionskapazität für Spurenstoffe auch folgende weitere Aspekte und Kriterien berücksichtigt werden:

- Wirtschaftlichkeit,
- Abriebfestigkeit,
- Rücklöseverhalten,
- Korngrößenverteilung (Schwere der Partikel bzw. Sinkgeschwindigkeit),
- Porengrößenverteilung/Porenstruktur,
- Herstellungsart.

Auch der Anteil der verschiedenen Porenarten hat Einfluss auf die Adsorptionseigenschaften der Kohle. Makroporen (> 25 nm) spielen für den eigentlichen Adsorptionsvorgang nur eine untergeordnete Rolle, da sie aufgrund ihrer Größe nur einen vergleichsweise geringen Anteil an Adsorptionsfläche zur Verfügung stellen. Für den Zutritt der zu adsorbierenden Moleküle ins Korninnere und damit zu den Mikroporen (0,4 bis 1,0 nm) und Submikroporen (< 0,4 nm) sind sie jedoch von immenser Bedeutung. Mesoporen (1,0 bis 25 nm) und Makroporen werden daher auch als „Zugangsporen“ bezeichnet (Benstöm, 2017).

Für die Auswahl einer geeigneten Kohle für Weißenburg wurden zwei Herstellerfirmen (Jacobi und Chemviron) eingeladen. Im Vorfeld zu den Gesprächen wurde ein Fragenkatalog an die Hersteller verschickt (z.B. über Adsorptionsprozesse, Herstellungsprozess, Aus-

---

<sup>2</sup> S. 41 in Locher et al. (2015).

<sup>3</sup> S. 67 in Locher et al. (2015).

gangsmaterial, Aktivierungsart, Einflussgrößen auf Adsorption, chemisch-physikalische Eigenschaften, Effekt der Vorozonung und Wirtschaftlichkeit/Kostenbetrachtung). Diese Fragen dienen zur Feinabstimmung der für die Planung, spätere Versuchsdurchführung und den Betrieb erforderlichen Auswahl einer geeigneten Kohle. Die wichtigsten Merkmale und Kenndaten der beiden Kohletypen, welche zur Auswahl standen, sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

**Tabelle 12: Eigenschaften von Aquasorb 2000 und Filtrasorb**

| Parameter                  | Aquasorb 2000 (Jacobi) | Filtrasorb 300 (Chemviron) |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Körnung                    | 8 x 30 US Mesh         | 8 x 30 US Mesh             |
| Rohstoff                   | Steinkohle             | Steinkohle                 |
| Ursprung                   | China                  | USA, eigene Werke          |
| Herstellung                | Direktaktivat          | Agglomeration              |
| Iodzahl                    | 950                    | 930                        |
| BET-Oberfläche             | 950                    | 950                        |
| Härte nach ASTM:           | 95                     | 96                         |
| Aschegehalt                | < 15 %                 | < 10 %                     |
| aufschwimbare Anteile      | k. A.                  | < 0,1 %                    |
| Feuchtigkeit bei Abpackung | max. 5%                | max. 3 %                   |

Bei der Auswahl von Aktivkohleprodukten haben sich sogenannte Adsorptionskennzahlen (Iodzahl; Nitrobenzolzahl etc.) bewährt, um den Herstellungs- und Reaktivierungsprozess standardisiert zu überwachen und so bei gleichem Rohstoff und gleichen Prozessbedingungen eine gleichbleibende Qualität des Endprodukts sicherzustellen (Benstöm, 2017). Für den Anwender können laut Benstöm (2017) die Kennzahlen dazu dienen, eine Einordnung oder Vorauswahl der vorliegenden GAK hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung für einen bestimmten Anwendungsfall zu ermöglichen. Naturgemäß können Adsorptionskennzahlen zumeist aus bestimmten Gründen konkrete Anwendungsfälle mit GAK nur bedingt abbilden (Benstöm, 2017):

- „Das Adsorptiv (z.B. Jod bei der Bestimmung der Jodzahl) liegt in einer viel höheren Konzentration vor, als im konkreten Anwendungsfall, um die Detektion des Adsorptivs zu vereinfachen und damit in der Laborpraxis nutzbar zu machen.
- Es liegt keine „organische Hintergrundmatrix“ vor, die die Adsorption durch konkurrierende Adsorption oder „Poreblocking“ be- oder verhindert.
- Die Testlösung weist aufgrund der standardisierten Methodik zwangsläufig in der Regel einen anderen pH-Wert, eine andere Leitfähigkeit, eine andere Temperatur etc. als die reale Matrix auf.
- Die Kontaktzeit bei der Bestimmung der standardisierten Kennzahl ist i. d. R. nicht identisch mit der im realen Prozess zur Verfügung stehenden Kontaktzeit.“<sup>4</sup>

<sup>4</sup> S. 19 bis 20 in Benstöm (2017).

Neben den Kennzahlen zur Charakterisierung des Adsorptionsverhaltens von Aktivkohlen werden auch physikalische Kennzahlen wie z.B. Schüttdichte, Körnung, mittlere Korngröße mechanische Stabilität etc. verwendet.

Die wichtigsten Kriterien bei Auswahl der Kohle in Weißenburg waren Wirtschaftlichkeit, breite Eliminationsleistung und Abriebfestigkeit sowie besondere Eignung für den Einsatz in kontinuierlich gespülten Filtern.

Aufbauend auf den zusammengetragenen Fakten und den wenigen Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. Montag et al., 2015; Locher et al., 2015; Hertel et al., 2014) konnte festgestellt werden, dass die Aktivkohleprodukte unter Berücksichtigung der Einsatzzwecke in Weißenburg nur durch geringfügige Qualitätsunterschiede gekennzeichnet sind (z.B. bei Iodzahl, Härte bzw. Abriebfestigkeit). Aus den bisherigen Erkenntnissen kann unter Berücksichtigung der Randbedingungen zudem vermutet werden, dass sich Aktivkohleprodukte mit einer engen Korngrößenverteilung (mit Körnungen > 1 mm) und hoher mechanische Stabilität (Steinkohlebasis) für den Einsatz in kontinuierlich betriebenen Filtern eignen (Hertel et al., 2014; Locher et al., 2015; Montag et al., 2015).

Dennoch gibt es bei den Parametern Adsorptionskinetik und Benetzbarkeit kleine Unterschiede zwischen Direktaktivat und agglomerierter Kohle. Bei der Aquasorb 2000 handelt es sich um keine agglomerierte Kornaktivkohle, sondern um ein Direktaktivat. Die Adsorptionskinetik, die Härte und die Benetzbarkeit sind somit etwas schlechter als bei Filtratorb 300. Zusätzliche Vorbehandlungen der Kohle (Kohle mit CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung zur Vorneutralisation) waren mit Mehrkosten bei beiden Firmen verbunden. Daher wurde das wesentlich günstigere Produkt ausgewählt. Eine entsprechende Qualitätskontrolle vor Inbetriebnahme (also bei Anlieferung) muss unbedingt durchgeführt werden. In Weißenburg wurden Aktivkohleproben (Frischkohle und nach einem Jahr Betrieb) auf Standard-Parameter (Jodadsorption, Wassergehalt, Aschegehalt, flüchtige Bestandteile, Schüttdichte, Kornverteilung) gemäß *American Society for Testing and Materials* (ASTM) untersucht. Der Vergleich der beiden Kohleproben ist in Kapitel 6.15 dargestellt.

#### 4.2.6.4 Wissenschaftliche Erkenntnisse beim Einsatz von GAK als BAK

Unmittelbar nach Inbetriebnahme zeichnet sich ein GAK-Filter durch eine hohe Reinigungsleistung hinsichtlich organischer Verbindungen aus. Zurückzuführen ist dies auf die stattfindenden physikalischen Adsorptionsvorgänge. Die Adsorptionsleistung des Filters gegenüber organischer Substanz wird im Laufe der Zeit geringer, da fortlaufend freie Adsorptionsstellen besetzt werden (Simpson, 2008). Nach und nach beginnen Bakterien damit, die Aktivkohle zu besiedeln. Die Entfernung organischer Substanzen beruht mit fortschreitender Betriebsdauer in zunehmendem Maße auf bakteriellen Abbauprozessen (vgl. Dussert und Tramposch, 1996; Jin et al., 2013; DWA, 2018). Wird der Filter nicht ausgetauscht und dominieren biologische Abbauprozesse spricht man von einem biologisch aktivierten Aktivkohlefilter oder BAK-Filter (Abegglen und Siegrist, 2012).

Beim BAK-Prozess kann zurzeit nicht mit Sicherheit bewiesen werden, wann welcher Wirkungsmechanismus (physikalische Adsorption; biologischer Abbau; Bioregeneration) im Filter organische Verbindungen entfernt bzw. eliminiert. Charakteristisch für biologisch aktive Filter mit GAK ist die Etablierung eines Biofilms in der Schüttung der Aktivkohle und somit die Möglichkeit des biologischen Abbaus von adsorptiv gebundenen organischen Substanzen. Neben dem Effekt der biologischen Elimination der adsorptiv gebundenen or-

ganischen Verbindungen, welcher die Gesamteliminationsleistung der eingesetzten granulierten Aktivkohle erhöht, kann zudem wahrscheinlich einer Blockierung der freien Adsorptionsplätze bzw. Poren an den Oberflächen der Aktivkohle vorgebeugt werden (DWA, 2018). Ein Blockieren der Adsorptionsplätze hemmt den Stofftransport in das Korninnere und verringert somit die Adsorptionskapazität der Aktivkohle (ebd.).

Sowohl für die Adsorption als auch für den biologischen Abbau und die Bioregeneration ist die Oberflächenstruktur und Porosität der Aktivkohle entscheidend. Bei der Etablierung eines Biofilms sind Mikroporen vermutlich zu klein für die Mikroorganismen, weshalb eine Aktivkohle mit einem hohen Anteil an Makroporen vermutlich tendenziell besser als biologisch aktivierbare Aktivkohle (BAK) geeignet ist (vgl. Urfer et al., 1997). Da aber Mikroporen die Adsorption begünstigen und diese wiederum durch Anlagerung langsam bioverfügbarer Substanzen den biologischen Abbau verbessern, kann man festhalten, dass Mikroporen sowohl die Adsorption, wie auch den biologischen Abbau begünstigen (Yapsaklı et al., 2009; Yapsaklı und Çeçen, 2010). Ein Aktivkohletyp mit einem hohen Anteil an Mikroporen scheint für die Elimination von organischen Spurenstoffen von Vorteil zu sein. Der biologische Abbau adsorptiv gebundener Substanzen und die teilweise Wiederherstellung von Adsorptionsplätzen (durch Bioregeneration) wird wahrscheinlich durch eine Konzentrierung der organischen Verbindungen auf der großen inneren Oberfläche der Aktivkohle begünstigt und erlaubt somit das Einwachsen von spezialisierten Bakterien in den Biofilm (DWA, 2018). Zudem konnten Klimenko et al. (2009) nachweisen, dass eine vorgeschaltete Ozonung einen positiven Effekt auf den Prozess der Bioregeneration (Wiederherstellung von Adsorptionskapazität durch biologische Abbauprozesse und Konzentrationsgradienten zwischen Biofilm und Korninneren) hat. Eberhardt et al. (1974) vermuten weiterhin, dass die biologischen Vorgänge auf der Aktivkohle nicht nur zu einer Regeneration der aktiven Zentren durch vollständige Oxidation zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  führen, sondern darüber hinaus in einer zur Zeit noch nicht voll verständlichen Weise die organische Substanz so umwandeln, dass eine weitergehende Beladung der Kohle möglich ist. Die einfachste, aber bisher nicht bewiesene Erklärung kann in einer teilweisen Überführung adsorbierter organischer Substanz in körpereigene Bakterienmasse gesehen werden (Eberhardt et al., 1974).

Neben der Porosität hat laut Yapsaklı et al. (2009) die Oberflächenladung der Aktivkohle einen entscheidenden Einfluss auf die Entfernung organischer Stoffe. Der „point of zero charge“ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) ist der pH-Wert, bei dem die Aktivkohleoberfläche keine Ladung aufweist. Ist nun der pH-Wert des Wassers größer als der  $\text{pH}_{\text{PZC}}$ , ist die Oberflächenladung der Aktivkohle negativ. Ist der pH-Wert kleiner, ist die Oberflächenladung positiv. Bedingt durch das Aktivierungsverfahren scheinen thermisch aktivierte Kohlen eine positiver geladene Oberfläche zu besitzen als chemisch aktivierte Kohlen. Mit Hinblick auf die Oberflächenladung scheint thermisch aktivierte Kohle zur Adsorption besser geeignet zu sein als chemisch aktivierte (Yapsaklı et al., 2009).

Wesentlich für den BAK-Prozess ist die Bioregeneration, welche durch die Umkehr des Adsorptionsprozesses (Desorption) bzw. durch das Desorptionsverhalten der Aktivkohle beeinflusst wird. Die desorptiven Eigenschaften waren in den Untersuchungen von Yapsaklı et al. (2009) in chemisch aktivierten Kohlen mit eher offenen Porenstrukturen (Meso- und Makroporen) wesentlich effektiver als bei thermisch aktivierten Kohlen mit einem hohen Anteil an Mikroporen (Yapsaklı et al., 2009; Yapsaklı und Çeçen, 2010). Wenn die Adsorption mit dem biologischen Abbau wie in einem BAK-Prozess gekoppelt werden soll, dann

muss berücksichtigt werden, dass eine gewisse Desorption von adsorbierten biologisch abbaubaren Stoffen durch ein geeignetes Aktivkohleprodukt ermöglicht werden sollte.

Grundsätzliche Hinweise oder Empfehlungen sowie bestimmte Kennzahlen zur Auswahl geeigneter Aktivkohleprodukte für den großtechnischen Einsatz in kontinuierlich betriebenen Aktivkohlefiltern zur Spurenstoffelimination liegen bisher nicht vor.

#### 4.2.6.5 Hinweise bei Inbetriebnahme und beim Einbau von GAK

Die Problematiken Staubentwicklung bzw. Rücklösung sowie Ascheausschwemmung und pH-Wert-Anstieg bei der Inbetriebnahme sind momentan noch nicht eindeutig geklärt, da noch nicht abgeschätzt werden kann, wieviel Bettvolumina (BVT = bed volumes treated) behandelt werden müssen bzw. wie lange der Spülprozess dauern soll, um die Kohle „frei zu spülen“. Z.B. könnte das Spülwasser regelmäßig beobachtet/dokumentiert werden (z.B. AFS). Weiterhin müsste der Spülvorgang- und Beschickungsprozess des Filters evtl. kurzfristig angepasst bzw. modifiziert werden, um eine pH-Wert-Erhöhung im Gewässer zu vermeiden. Daher sind grundsätzlich folgende Aspekte beim Einbau der GAK in den Filter und bei der sich anschließenden Wässerung sowie Inbetriebnahmespülung zu berücksichtigen (Benstöm, 2017; Jacobi, 2017):

- *„Bei der Anfrage und Bestellung von GAK ist das **Maß (Mg oder m<sup>3</sup>)** im Vorfeld zu definieren. Beide Vorgehensweisen sind üblich. Sofern eine Masse bestellt wird, kann der Nachweis des Lieferanten über einen Wiegeschein erfolgen. Bei einem Volumen muss naturgemäß eine Umrechnung über die (im Labor des Lieferanten bestimmte) Dichte erfolgen, was aufgrund der verschiedenen Methoden und dem Verfahrensprinzip fehlerbehaftet ist. In der Praxis hat es sich in vielen Fällen bewährt, ein Volumen anzufordern bzw. zu bestellen und dieses per Aufmaß der Filterbetthöhe nach erfolgter Inbetriebnahmespülung vor Ort nachzuweisen. Das hat den Vorteil, dass nach erfolgter Inbetriebnahmespülung die erforderliche Betthöhe im Filter tatsächlich zur Verfügung steht und zur Abrechnung kommt.*
- *Generell wird zwischen **Nass- und Trockeneinbau von GAK** unterschieden. Beim Trockeneinbau, der in der Praxis bei geringen GAK Mengen erfolgt, wird die GAK aus Säcken händisch (20 oder 25 kg) oder in seltenen Fällen aus BigBags (1 oder 2 m<sup>3</sup>) mittels eines Krans in die Filter eingefüllt. Dieses Verfahren ist üblich bei halbertechnischen Anlagen oder in Sonderfällen bei großtechnischen Anlagen. Das Einspülen von GAK mittels eines Silofahrzeugs ist der praxisübliche Fall. Hierbei wird die GAK mit einem Silofahrzeug angeliefert und in den Filter eingespült. Hierzu ist dem GAK-Lieferanten üblicherweise ein Zugang zum Hydranten zur Verfügung zu stellen. Das Einspülen der GAK hat ferner den Vorteil, dass es weniger personalintensiv ist (keine Begehung des Filters erforderlich) und die GAK zumindest oberflächlich schon mit Wasser benetzt wird.*
- **Benetzung:** *Nach dem Einbau der GAK muss diese im Überstau gewässert werden, um die Poren mit Wasser zu füllen und damit die Dichte zu erhöhen. Praxisüblich ist eine Wässerung von 1 - 2 Tagen. Oftmals bietet es sich an, die GAK freitags einzubauen, im Überstau zu wässern und am folgenden Montag die Inbetriebnahmespülung durchzuführen.*

- **Rückspülung / Inbetriebnahmespülung:** Die sich der Wässerung anschließende unverzichtbare Inbetriebnahmespülung dient dem definierten Austrag von Feinstkorn und der nicht benetzbaren Anteile, die den Filterprozess stören würden. Die Inbetriebnahmespülung erfolgt durch Wasserspülung mit sukzessiv zu steigender Geschwindigkeit (vom Lockerungspunkt, an dem sich die GAK-Körner voneinander trennen, bis mindestens zum Punkt, der während des Betriebs gewünschten maximalen Bettausdehnung).<sup>5</sup>
- „Bei kontinuierlich betriebenen Filtern: **Spülgeschwindigkeit** von 5 - 10 m/h bis auf 15 - 20 m/h. Die Spülgeschwindigkeit von 15 m/h soll solange beibehalten werden, bis keine größeren Luftblasen mehr aufsteigen. Dies erreicht man im Allgemeinen während einer Spülzeit von 5 - 15 Minuten. Danach erhöht man die Spülgeschwindigkeit auf den vollen Durchsatz, wie in den Merkblättern oder der Betriebsvorschrift vorgegeben. In der Regel sind dies 20 - 25 m/h. Um Abrieb und Feinanteile weitestgehend auszutragen, sollte eine **Betttausdehnung** von 20 - 25 % erreicht werden.“<sup>6</sup>

Für die Inbetriebnahme der Filter in Weißenburg wurde in Abstimmung zwischen Filterhersteller und Kläranlagenbetreiber diskutiert wie ein pH-Wert-Anstieg im Gewässer beim Einsatz von nicht vorbehandelter Kohle während der Inbetriebnahmespülung zu vermeiden ist (bis zu 30 % Abwasseranteil aus der GAK-Filterstraße im Vorfluter bei Trockenwetter möglich). Ausgehend von den anfallenden Spülwassermengen und der Verdünnung wurde davon ausgegangen, dass eine drastische/signifikante pH-Wert-Erhöhung an der Einleitstelle des Gesamtablaufs eher auszuschließen ist. Eine standardmäßige Überwachung des pH-Wertes an der Einleitstelle ist gewährleistet (Einleitungswert bis max. pH 9) und wurde als ausreichend betrachtet. Für die Inbetriebnahme und fachgerechte Spülung des Filters dient als Orientierung auch die Betriebsanleitung von Aktivkohlefiltern der Herstellerfirmen. Eine pH-Wert-Kontrolle im Filterablauf wird hier empfohlen, da dieser bedingt durch den natürlichen Alkaligehalt der Aktivkohle, in Abhängigkeit von der Pufferkapazität des jeweiligen Wassers, ansteigen kann. Hier wird darauf hingewiesen, dass der Filterablauf solange zu verwerfen ist, bis der pH-Wert auf eine akzeptable Größe gesunken ist (vgl. mit dem geforderten Einleitungswert). Die Inbetriebnahmespülung in Weißenburg führte zu keiner signifikanten pH-Wert-Erhöhung.

---

<sup>5</sup> S. 128 bis 129 in Benstöm (2017).

<sup>6</sup> S. 2 in Jacobi (2017).

## 5 Auswahl, Bemessung und Beschreibung des Verfahrenskonzepts in Weißenburg

In den Voruntersuchungen von Rödel et al. (2014) wurden die bereits national und international großtechnisch umgesetzten Technologien zur Entfernung von Spurenstoffen bewertet und Empfehlungen für die anzuwendenden Technologien für ein bayerisches Pilotprojekt erarbeitet. Im Ergebnis sollte bevorzugt eine Ozonungsanlage mit nachgeschalteter Reinigungsstufe, bestehend aus einem Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK) oder einer biologischen Stufe zum Abbau der bei der Ozonung entstehenden Transformationsprodukte, eingesetzt werden. Diese Empfehlung wurde im weiteren Planungsprozess mit Modifikationen näher betrachtet.

### 5.1 VERFAHRENSEMPFEHLUNG UND VARIANTENVERGLEICH

Die Vorteile der Verfahrenskombination Ozonung mit einer Aktivkohleadsorption oder einer biologisch aktiven Filterstufe wurden unter anderem für die Trinkwasseraufbereitung bereits von Eberhardt et al. (1974), Sontheimer et al. (1978), Sontheimer (1979) und Boere (1992) erkannt. Für die Abwasserbehandlung wird unter anderem in Abegglen und Siegrist (2012) der Einsatz einer der Ozonung nachgeschalteten Stufe (Sandfilter oder GAK-Stufe) zum Abbau von entstehenden Transformationsprodukten empfohlen. Diese Kombination hat sich auch in einigen internationalen Studien und halbtechnischen Untersuchungen als geeignetes Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen aus dem Abwasser erwiesen (vgl. Austermann-Haun et al., 2017; Böhler et al., 2017b; Reungoat et al., 2012a; Triebskorn, 2017; Kreuzinger et al., 2015; Knopp und Cornel, 2015; Jekel und Ruhl, 2016; Wieland und Stapel, 2015; Reaume, 2012; Jin et al., 2013; Locher, 2016). Hier konnten geringfügige bis verbesserte bzw. höhere Spurenstoffentfernungen (abhängig von den betrachteten Zielsubstanzen) sowie höhere Eliminationsraten für Toxizitäten beobachtet werden als im Vergleich zur alleinigen Ozonung oder Filterstufe. Neben klassischen Sandfiltern wird dabei auch der Einsatz granulierter Aktivkohle und biologisch aktivierte Aktivkohlefilter (BAK-Filter) diskutiert. Auch hier liegen einige Erfahrungen aus der Trinkwasseraufbereitung und der Wasserwiederverwendung vor (vgl. Zhu et al., 2015; Gerrity et al., 2014; Selvy, 2015; van Leeuwen et al., 1983; Macova et al., 2010; Urfer et al., 1997; Simpson, 2008). Bezüglich der Ozonung möglichen nachgeschalteten Behandlungsstufen wurde in einer Studie des Kompetenzzentrums Wasser Berlin festgestellt, dass bei den bisher untersuchten biologischen Nachbehandlungsstufen sich ein klarer Trend für Raumfilter (9 x konventionell (Sandfilter), 5 x mit Aktivkohle) abzeichnet, während das Wirbelbett nur an drei Standorten und das Festbett ausschließlich auf der Kläranlage Neugut in Dübendorf untersucht wurde (Miehe et al., 2017). Auch erste Ergebnisse aus den Untersuchungen auf der Kläranlage Bülach (vgl. Wunderlin et al., 2017a) zeigen den Trend, dass der Betrieb einer Ozonung in Kombination mit der GAK-Filtration wirtschaftlich vorteilhaft sein kann, insbesondere wenn die Ozondosen sehr niedrig sind ( $< 0,2 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$ ). Die hier verwendeten Ozondosen im Bereich von  $0,2$  bis  $0,25 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$  in Kombination mit einer GAK-Filterstufe reichten aus, um das Schweizer Qualitätsziel mit  $80 \%$  Elimination der Leitsubstanzen zu erreichen und führten zu einer verminderten Bildung von Reaktionsprodukten der Ozonung (DWA, 2018).

### 5.1.1 Synergieeffekte bei der Verfahrenskombination Ozonung mit Aktivkohlestufe

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen in der weitergehenden Abwasserbehandlung und den Erfahrungen zur Verfahrenskombination Ozonung und Nachbehandlung mittels Filtration aus der Trinkwasserversorgung sind folgende Vorteile durch die Synergieeffekte aus Ozonung (Oxidation), Adsorption und biologischem Abbau von Abwasserinhaltsstoffen möglich (ergänzt nach Strauß (2017), Rödel (2017a), Metzger und Mieke (2018)):

- breitere Eliminationswirkung (bei Spurenstoffen) bei gleichzeitigen Synergievorteilen (z.B. wirtschaftlich) im Vergleich zu den Einzelverfahren (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016; Böhler et al., 2017b),
- Verringerung der Ozondosis (Reduzierung der Betriebskosten) und des Reaktorvolumens der Ozonungsstufe bei der Auslegung (kürzere Aufenthaltszeiten von < 10 Minuten) denkbar (Austermann-Haun et al., 2017),
- durch Ozonung gebildete Transformations- und Oxidationsnebenprodukte mit potentieller Schadwirkung können in einer nachgeschalteten Filtration abgebaut (oder in einem Aktivkohlefilter auch adsorptiv gebunden) werden,
- Verlängerung der Standzeit des Aktivkohlefilters (Einsparung bei Regenerationsmaßnahmen bzw. Reaktivierung der Kohle) (Kassandra et al., 2013; Kim et al., 1997; van der Hoek et al., 2000; Janssens et al., 1985),
- weitergehende CSB- und Phosphorelimination (Austermann-Haun et al., 2017; Rödel, 2017b),
- Ozonung verringert die Adsorbierbarkeit der organischen Hintergrundorganik, womit die Adsorbierbarkeit der Spurenstoffe verbessert wird (Orlandini et al., 1997; Zietzschmann et al., 2015a),
- Ozonung fördert die biologische Aktivität im Filter (Erhöhung der Bioverfügbarkeit der DOC-Fraktionen (biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) und assimilable organic carbon (AOC)) (Waters und DiGiano, 1990; van der Kooij et al., 1989; Volk et al., 1993; Böhler et al., 2017b),
- die untersuchten Nachbehandlungsverfahren in Böhler et al. (2017a) entfernen zusätzlich auch organische Stoffe (DOC, AOC) wie auch Feststoffe, wobei die Sand- und GAK-Filter deutlich besser abschneiden als offene Systeme (Fest-, Wirbelbett),
- Förderung des Phänomens der Bioregeneration bei dem der Abbau adsorbierter Substanzen durch mikrobiologische Prozesse stattfindet und fortlaufend besetzte Adsorptionsplätze wieder verfügbar werden (Klimenko et al., 2009),
- bessere Eliminationsraten bezüglich Spurenstoffe bei der Kombination Ozonung mit Aktivkohlefilter (adsorptive Wirkung) als bei Ozonung mit Sandfiltration (Rödel et al., 2019). Die Eliminationsleistung eines biologisch aktivierten Aktivkohlefilters (BAK-Filter) konnte in Weißenburg noch nicht belegt werden.

Da viele Untersuchungen bislang vor allem im halbtechnischen Maßstab erfolgten, fehlen zurzeit noch weitgehende Erfahrungen aus großtechnischen Anlagen. Aus diesem Grund und aufgrund o.g. Synergieeffekte entschloss man sich eine Anlage zur Spurenstoffelimination zu planen, welche eine Ozonung mit einer nachgeschalteten biologischen Filterstufe kombiniert.

### 5.1.2 Variantenvergleich

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Literatur und der Grundlagenermittlung wurde in der Vorplanung des Ingenieurbüros Dr. Resch + Partner eine Variantenuntersuchung mit Kostenvergleichsrechnung nach LAWA (DWA, 2012) durchgeführt. Dabei wurden folgende Varianten erarbeitet, bewertet und miteinander verglichen (siehe Abbildung 41 bis Abbildung 43):

- Variante 1: Ozonung mit BAK-Filter (Betriebsweise zunächst als GAK-Stufe),
- Variante 2: Ozonung mit BAK-Filter (Betriebsweise zunächst als GAK-Stufe) und Sandfilter (zweistraßige Filterstufe),
- Variante 3: Ozonung mit biologischem Festbett (belüftet).

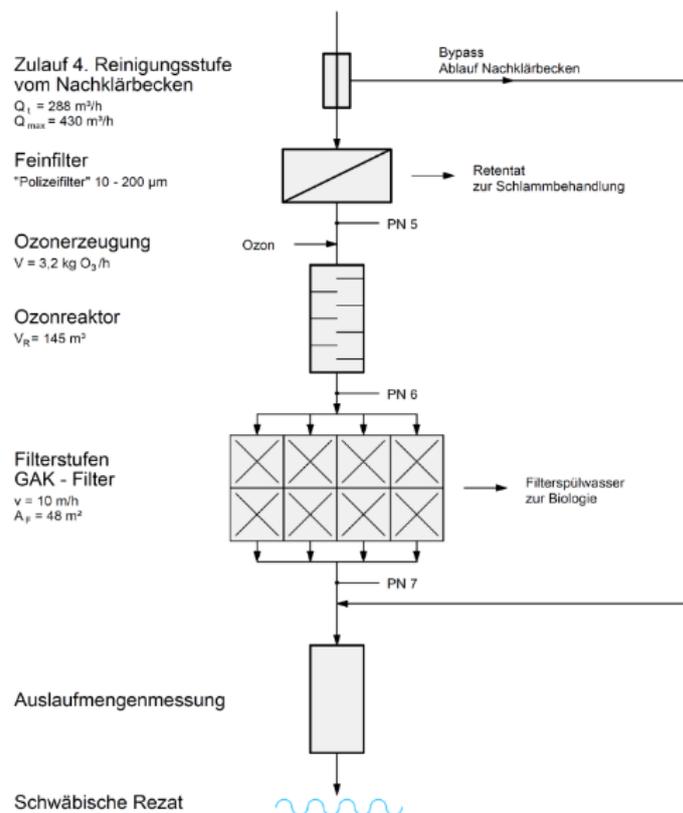
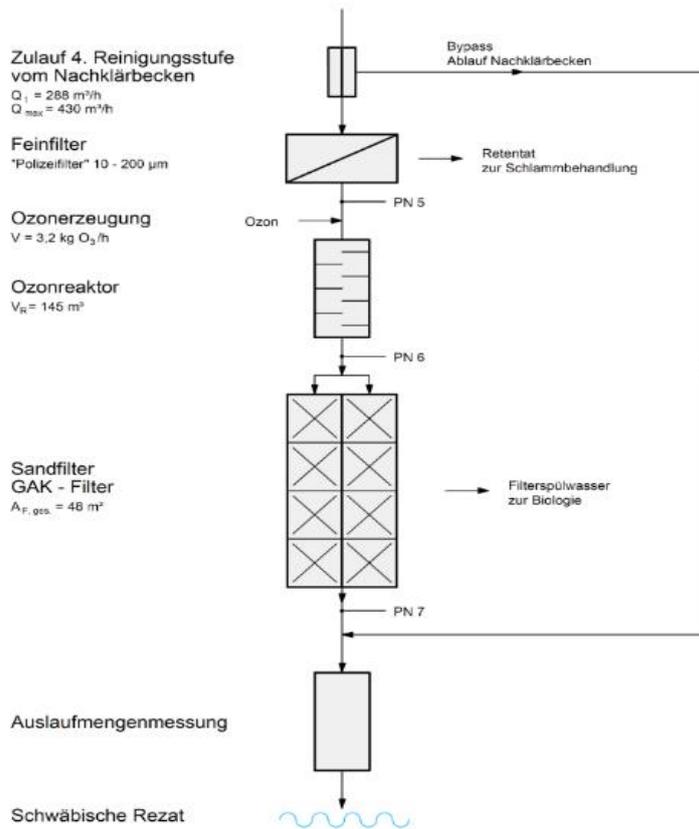
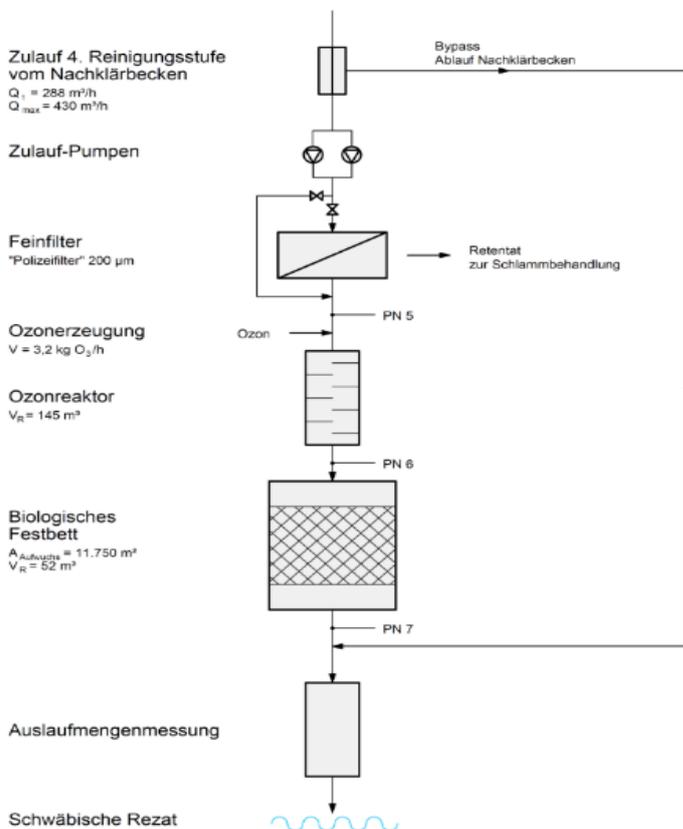


Abbildung 41: Variante 1 - Ozonung mit BAK-Filter, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)



**Abbildung 42: Variante 2 - Ozonung und zweistraßige Filter, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)**



**Abbildung 43: Variante 3 - Ozonung und biologisches Festbett, Zeichnung: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)**

Für die Filterstufen in Variante 1 und Variante 2 wurden kontinuierlich betriebene Filter vorgesehen. Dabei erfolgt eine automatische Reinigung über diskontinuierliche Umwälzung des Filterbettes mit Mammutpumpen. Für die Variante 3 wurde überlegt ein aerobes biologisches Festbett in ein Betonbecken mit untenliegenden Belüftern zu integrieren.

Die in der Vorplanung geschätzten Investitionskosten lagen bei allen betrachteten Verfahren bei ca. 2 bis 2,3 Millionen Euro. In Tabelle 13 sind die geschätzten Gesamtkosten der einzelnen Varianten aufgeführt. Die Kostenschätzung basiert auf den damaligen Erfahrungswerten und Ausschreibungsergebnissen der letzten Jahre sowie auf Richtpreisangeboten.

**Tabelle 13: Kostenschätzungen für die erarbeiteten Varianten im Vorentwurf (Zech und Schatz, 2015)**

| Position  | Variante 1            | Variante 2            | Variante 3            |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Kosten der Erschließung (netto)</b>          | <b>25.000 Euro</b>    | <b>25.000 Euro</b>    | <b>25.000 Euro</b>    |
| Vorbehandlung                                   | 138.000 Euro          | 138.000 Euro          | 138.000 Euro          |
| Ozonung   | 808.000 Euro          | 808.000 Euro          | 808.000 Euro          |
| Nachbehandlung                                  | 665.00 Euro           | 640.000 Euro          | 432.000 Euro          |
| <b>Baukosten (netto)</b>                        | <b>1.611.000 Euro</b> | <b>1.586.000 Euro</b> | <b>1.375.000 Euro</b> |
| 19 % MwSt.                                      | 309.000 Euro          | 304.000 Euro          | 265.00 Euro           |
| Baunebenkosten (brutto)                         | 1.920.000 Euro        | 1.890.000 Euro        | 1.640.000 Euro        |
| <b>Gesamtkosten (brutto)</b>                    | <b>2.266.000 Euro</b> | <b>2.230.000 Euro</b> | <b>1.935.000 Euro</b> |
| <b>Gesamtkosten inkl. Erschließung (brutto)</b> | <b>2.296.000 Euro</b> | <b>2.265.000 Euro</b> | <b>1.965.000 Euro</b> |

Die Betriebskosten der Variante 1 und Variante 2 wurden ähnlich hoch eingestuft. Während in der Variante 1 die Kosten für Aktivkohle etwas höher werden als in Variante 2, werden die Stromkosten für die Filtration in der Variante 2 leicht erhöht sein gegenüber der Variante 1, da die Umwälzung von Sand etwas mehr Energie erfordert, als von der leichteren Aktivkohle. Der wesentliche Anteil der Betriebskosten der vierten Reinigungsstufe wird in allen drei Varianten von der Ozonerzeugung generiert. Die Betriebskosten der Nachbehandlung der Variante 3 werden im Wesentlichen von der Belüftung erzeugt. Die Kosten für die Sauerstoffversorgung sind den Betriebskosten zuzuordnen, da der Sauerstofftank und die -verteilung von den Gaslieferanten vermietet werden.

Ergänzend zur wirtschaftlichen Betrachtung der drei Varianten wurde auch eine qualitative Bewertung durchgeführt. Grundsätzlich wurde davon ausgegangen, dass mit allen drei Varianten eine Reduktion der Spurenstoffe, insbesondere der definierten Indikatorsubstanzen um 80 % in der vierten Reinigungsstufe erzielt werden kann.

Aufbauend auf der wirtschaftlichen Betrachtung und qualitativen Bewertung wurde die Ozonung mit zweistraßiger Nachbehandlung, bestehend aus je einem Aktivkohlefilter und einem Sandfilter, favorisiert (große Breitbandwirkung). Mit dieser Variante können drei verschiedene Verfahrensmöglichkeiten der nachgeschalteten Stufe erprobt und analysiert werden (GAK-Adsorptionsfilter, BAK- und Sandfilter). Aus wissenschaftlicher Sicht war mit der Variante 2 die höchste Variabilität bei den Betriebs- und Versuchseinstellungen gegeben. Zudem wurde gegenüber der Variante 3 mit einem nachgeschalteten, biologischen Festbett eine deutlich höhere Elimination von Spurenstoffen erwartet (Böhler et al., 2017a).

## 5.2 AUSLEGUNG DER VIERTEN REINIGUNGSSTUFE IN WEIßENBURG

In Metzger (2010) wurde gezeigt, dass die Gesamteliminationsrate bei Spurenstoffen für eine Teilstrombehandlung bzw. bei einer Auslegung auf den maximalen Trockenwetterzufluss nur geringfügig kleiner ist als bei einer Vollstrombehandlung (Auslegung auf den Mischwasserabfluss). Abbildung 44 veranschaulicht den Einfluss auf den Wirkungsgrad der Spurenstoffelimination bei einer Teilstrom- und Vollstrombehandlung. Abbildung 45 zeigt den Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad der Spurenstoffelimination in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad in der vierten Reinigungsstufe und der in dieser Stufe behandelten Abwassermenge.

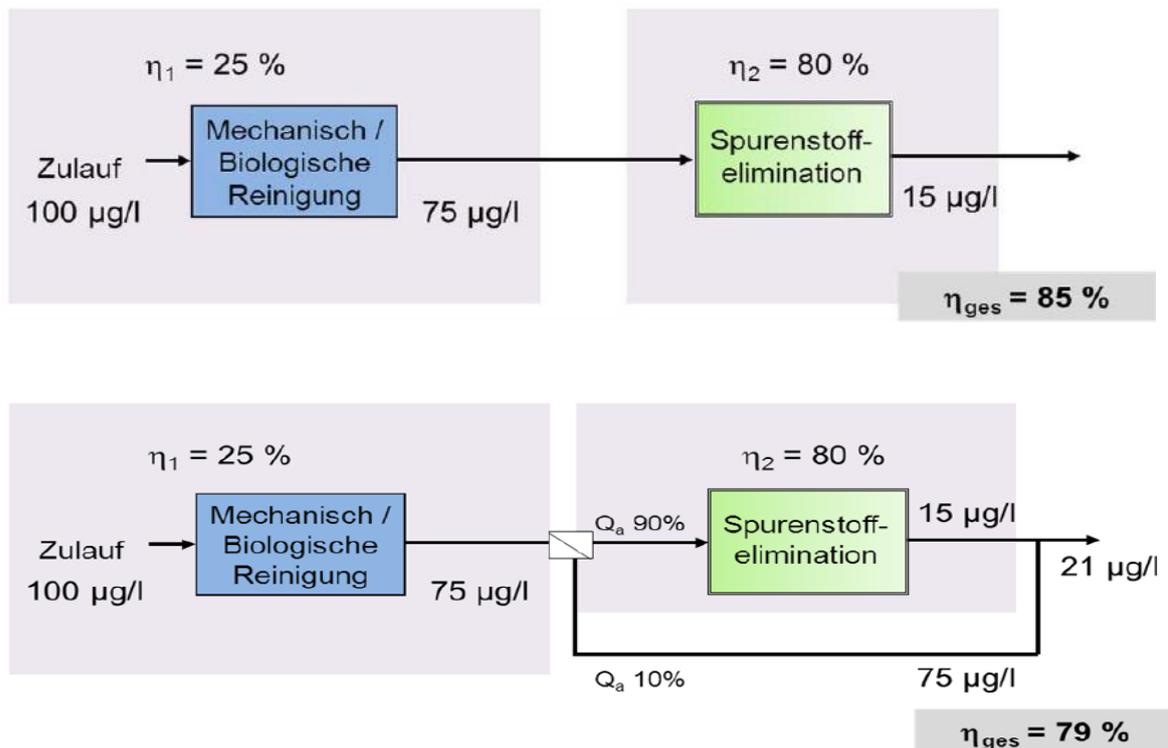
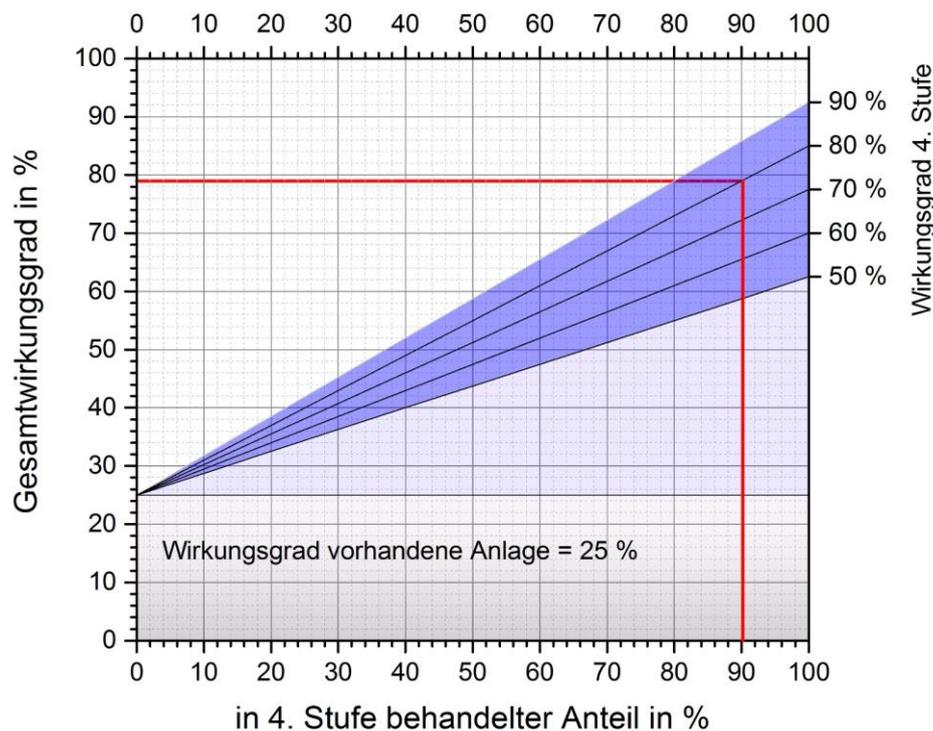


Abbildung 44: Spurenstoffelimination bei Teil- und Vollstrombehandlung (Kaub et al., 2014)



**Abbildung 45:** Einfluss von Wirkungsgrad und Abwassermenge der vierten Reinigungsstufe auf den Gesamtwirkungsgrad der Spurenstoffelimination in der Kläranlage

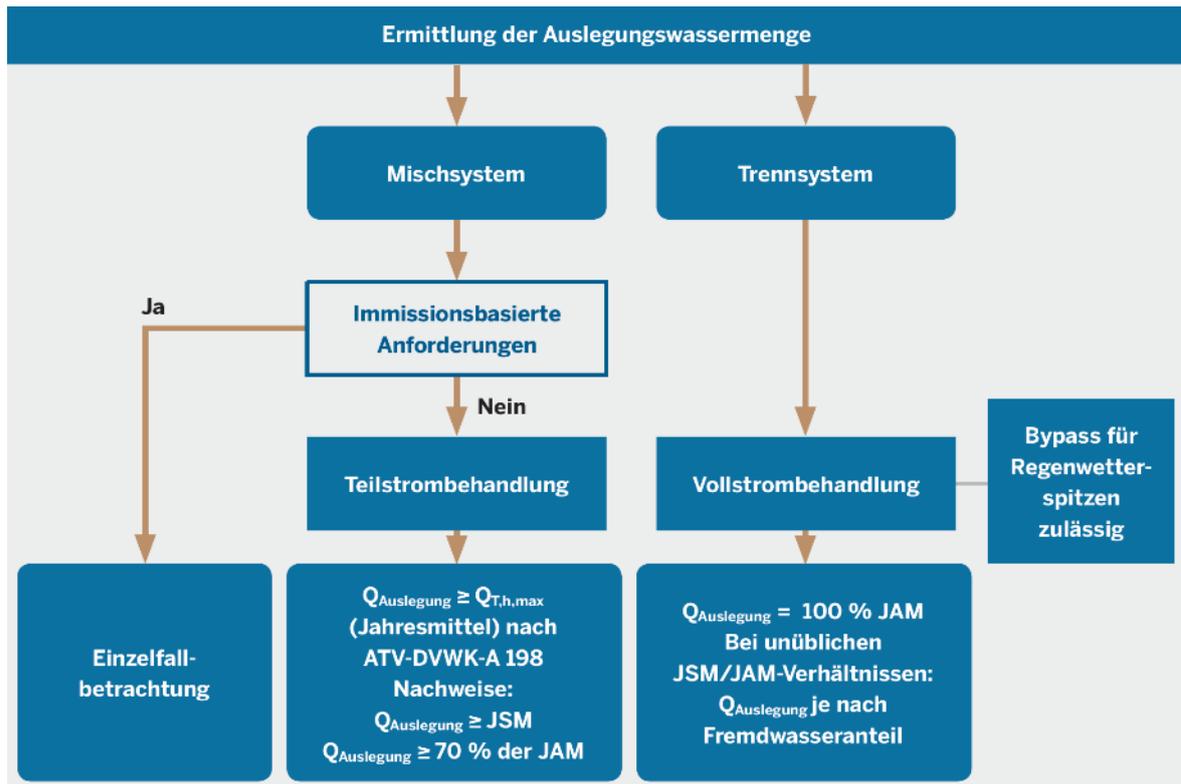
Die erforderlichen hydraulisch zu dimensionierenden Anlagen werden bei einer Teilstrombehandlung erheblich kleiner und die Investitionskosten sinken entsprechend. Aus diesem Grund wurde eine Teilstrombehandlung für Weißenburg als ausreichend betrachtet. Die folgenden Unterkapitel beschreiben das Vorgehen bei der Auslegung der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg und enthalten Hinweise für die Planung.

### 5.2.1 Ermittlung Bemessungszufluss

Für die Bemessung des Zuflusses für die vierte Reinigungsstufe werden in der Praxis verschiedene Ansätze gewählt. Dabei sind vor allem die Randbedingungen (Trenn oder Mischsystem) und die Zielstellung (Reinigungsziel, Teilstrom, CSB-Reduktion etc.) zu beachten. Grundsätzlich kann der Bemessungszufluss nach folgenden Ansätzen bestimmt werden:

- nach Trockenwetterzufluss ( $Q_{4,RS} = Q_{TW}$ ): max. Trockenwetterzufluss im Mittel (stündlich/täglich),
- nach Mischwasserzufluss ( $Q_{4,RS} = Q_{MW}$ ),
- als ein Anteil des maximalen Gesamtabflusses zur Erreichung eines festgelegten Gesamtwirkungsgrad bzw. Reduktionszieles (gegenüber ausgewählten Stoffen/Substanzen).

Für die Auslegung der vierten Reinigungsstufe wurden die 2 h-Mittelwerte (Auslaufmessung Nachklärung) für die Jahre 2011 bis 2013 herangezogen. Eine genaue Vorgehensweise zur Ermittlung der Bemessungswassermenge wird in Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2016) und KOMS-BW (2018) beschrieben (vgl. Abbildung 46).

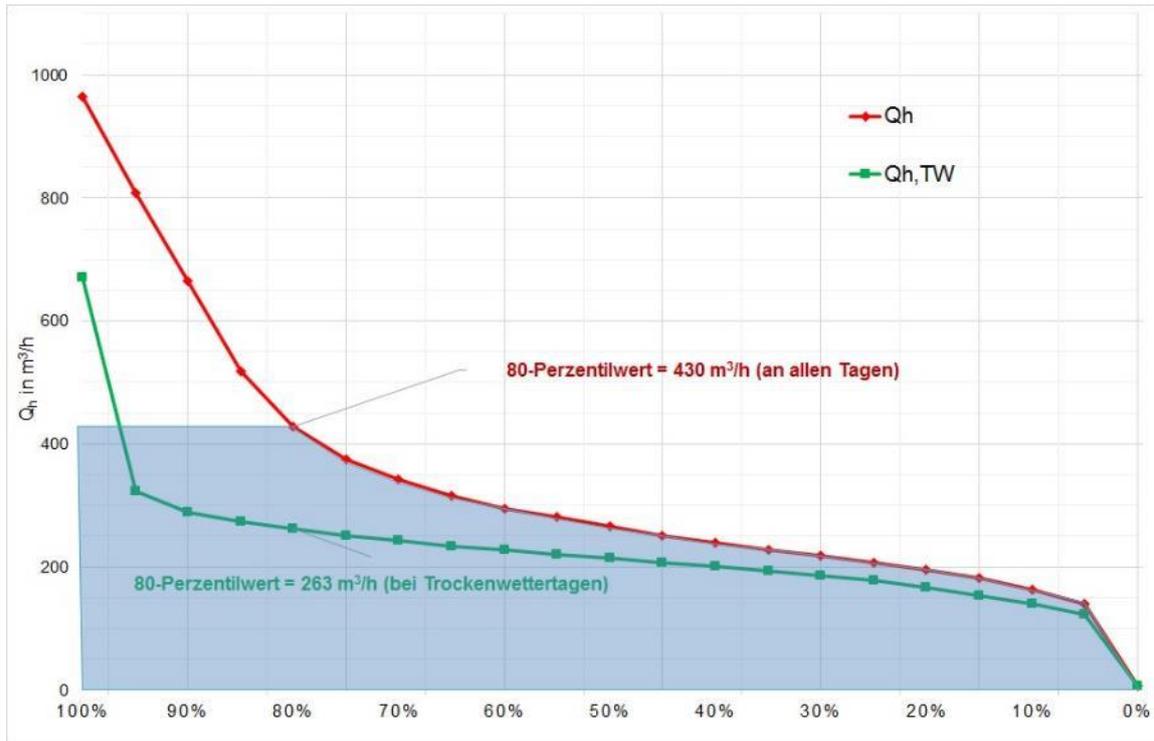


**Abbildung 46: Vorgehensweise zur Ermittlung der Auslegungswassermenge (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016)**

Anhand der Auswertung der hydraulischen Daten wurde ein Bemessungszufluss von 430 m<sup>3</sup>/h ermittelt. Dieser Wert entspricht dem 80-Perzentil des Abflusses über alle Tage der Jahre 2011 bis 2013. Die behandelte Jahresabwassermenge für den Zeitraum 2011 bis 2013 betrug im Mittel rund 2,9 Millionen m<sup>3</sup>/a. Mit dem gewählten Bemessungszufluss können rund 86 % der Jahresabwassermenge (ca. 2,5 Millionen m<sup>3</sup>/a) in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden. Abbildung 47 zeigt anhand des blau gekennzeichneten Bereichs die behandelte Abwassermenge für den festgelegten Bemessungswert (430 m<sup>3</sup>/h) für alle Tage (Q<sub>h</sub>) und für Trockenwettertage (Q<sub>h,TW</sub>). Auch die Auswertungen der Jahresabwassermengen (JAM) sowie die Jahresschmutzwassermengen (JSM) von 2011 bis 2015 im Rahmen der Entwurfsplanung hatten sich gegenüber der Auswertung in der Grundlagenermittlung nicht nennenswert verändert (vgl. Tabelle 14). Die Abweichungen lagen im Bereich der normalen Streuung.

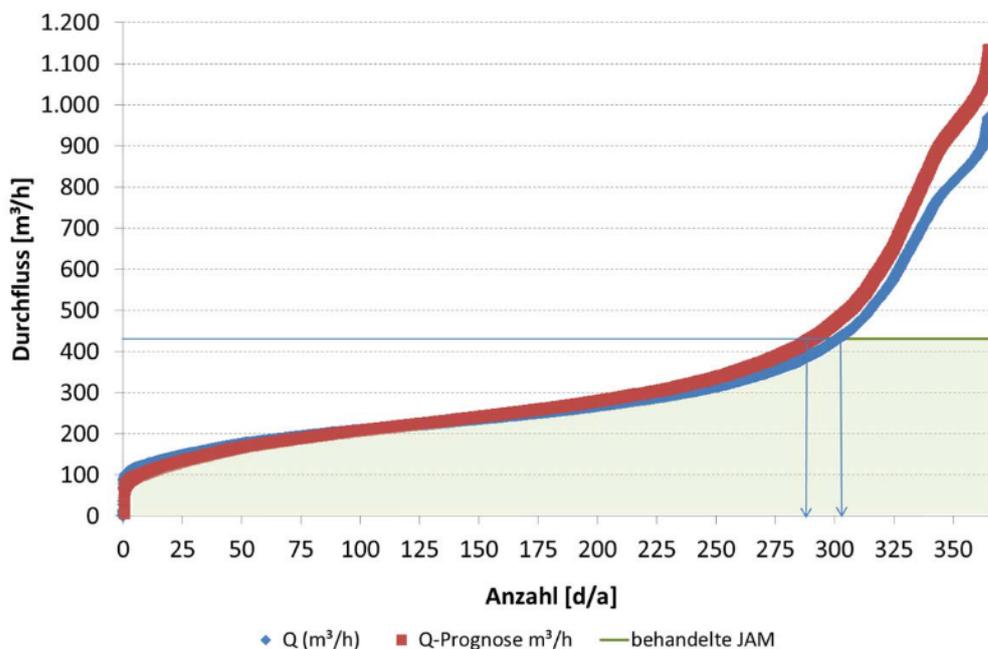
**Tabelle 14: Abwassermengen KA Weißenburg von 2011 bis 2015 (Zech und Schatz, 2016)**

| Jahr | JAM in m <sup>3</sup> /a | JSM in m <sup>3</sup> /a |
|------|--------------------------|--------------------------|
| 2011 | 2.728.453                | 1.843.923                |
| 2012 | 2.674.280                | 1.845.797                |
| 2013 | 3.276.123                | 2.094.028                |
| 2014 | 2.574.100                | 1.929.273                |
| 2015 | 2.602.129                | 1.811.927                |



**Abbildung 47: Behandelte Abwassermenge für den festgelegten Bemessungswert (430 m<sup>3</sup>/h); Basis: 2 h-Mittel des Abflusses (Rödel et al., 2017)**

Abbildung 7 zeigt zudem die jährliche Verteilung der 2 h-Zuflüsse zur Kläranlage Weißenburg. In weniger als 25 % der Zeit wird die Umfahrung der vierten Reinigungsstufe in Anspruch genommen.



**Abbildung 48: Jährliche Verteilung der 2 h-Zuflüsse zur Kläranlage Weißenburg (Zech und Schatz, 2016)**

### 5.2.2 Hinweise zum Reaktorvolumen und zur hydraulischen Aufenthaltszeit

Das Reaktorvolumen muss ausreichend groß sein, um die erforderliche Reaktionszeit der Inhaltsstoffe im Abwasser mit Ozon und die Zehrung des Restozons (Abklingvolumen) abzudecken, sowie einem Austrag von im Wasser gelöstem Ozon entgegenzuwirken. Um auch langsam reagierende Stoffe zu oxidieren, sind daher eine ausreichend lange Reaktionszeit und eine ausreichende Ozonmenge erforderlich. Bei der Ermittlung des Volumens des Ozonreaktors ist eine Festsetzung auf Basis der hydraulischen bzw. der mittleren Verweilzeit (HRT) nicht hinreichend, da aufgrund von molekularer und turbulenter Diffusion, durch Scherkräfte und erzwungene Konvektion, sich sehr kleine Teile des strömenden Mediums (gelöste oder dispergierte Teilchen) unterschiedlich lange in dem durchströmten Reaktor aufhalten. Im Zusammenhang mit der Abwasserozonung können mit Ozon angereicherte Wasserteilchen bzw. Volumenanteile den Reaktor zum Zeitpunkt  $t < \text{HRT}$  verlassen. Dies kann dazu führen, dass im Ablauf des Reaktors im Wasser gelöstes Ozon vorhanden ist (Arge, 2013). Dabei beeinflussen Reaktorgeometrie und die Strömungsführung die reale Aufenthaltszeit einzelner Wasserteilchen im Reaktor (hydraulischer Wirkungsgrad). Ziel bei der Festlegung der hydraulischen Aufenthaltszeit ist eine ausreichende Kontaktzeit, sodass möglichst viele Spurenstoffe oxidiert werden.

Die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) in einem Ozonreaktor berechnet sich aus dem Quotienten von Reaktorvolumen und Durchfluss und entspricht der theoretischen mittleren Verweilzeit eines Wasserteilchens im Ozonreaktor. Um die Aufenthaltszeit bzw. Kontaktzeit genauer zu bestimmen, müssen Ozonzehrungsversuche durchgeführt werden. Damit kann die Zeit bis zur vollständigen Abreaktion des Ozons  $t_{\text{Zehrung}}$  ermittelt werden. Dies erfolgt in der Regel durch Laborversuche (Wunderlin, 2017; Wunderlin et al., 2015). Mit Ozonzehrungsversuchen kann das Ozonzehrungspotenzial des zu behandelnden Abwassers der Kläranlage bestimmt werden. Die Zeit für die Ozonzehrung ( $t_{\text{Zehrung}}$ ) wird dabei durch die Zugabe einer ozonangereicherten Stammlösung in die Klarlaufprobe des zu untersuchenden Abwassers ermittelt. Die ermittelten Ozonzehrungsprofile zeigen die Abnahme der Ozonkonzentration nach einer einmaligen Ozondosierung über die Zeit an. Auf Basis dieser Versuche kann die Aufenthaltszeit ( $t_{\text{HRT}}$ ) im Ozonreaktor abgeschätzt werden (Herbst et al., 2014):

$$t_{\text{HRT}} [\text{min}] = \frac{t_{\text{Zehrung}} [\text{min}]}{f}$$

Zur Ermittlung der minimalen Aufenthaltszeit  $t_{\text{HRT}}$  im Ozonreaktor sollte aufgrund der realen Verweilzeitverteilung im Reaktor (Annahme: keine ideale Durchströmung im Reaktor) ein Sicherheitsfaktor  $f$  (Reziprokfaktor  $< 1$ ) berücksichtigt werden. Die tatsächlich benötigte Aufenthaltszeit im Reaktor wird immer höher sein als die im Labor ermittelte  $t_{\text{Zehrung}}$ . Für die Ozonung auf der Kläranlage in Duisburg-Vierlinden wurde  $t_{\text{Zehrung}}$  um das 2,9-fache (mit  $f = 0,35$ ) höher angenommen (Herbst et al., 2014).

Neben der Berücksichtigung der Einflussfaktoren Wassertemperatur (Einfluss auf Reaktionsgeschwindigkeit) und pH-Wert (Einfluss auf Ozonstabilität) bei den Ozonzehrungsversuchen sind Strömungssimulationen der Gas- und Wasserphase im Ozonreaktor (Ermittlung Verweilzeitverteilung, Durchmischungsverhältnisse etc.) zu empfehlen (Miehe et al., 2017). Damit kann auch das Reaktordesign optimiert werden.

Grundsätzlich ist aufgrund der Reaktionskinetik eine möglichst längsdurchströmte Hydraulik (Pfropfenströmung) anzustreben, ggf. sollte der Ozonreaktor durch Umlenkände in

mehrere, nacheinander durchströmte Kompartimente aufgeteilt werden, da dadurch eine bessere Durchströmung gewährleistet werden kann. Kurzschlussströmungen und Totzonen sind unbedingt zu vermeiden, da sie die Leistung des Verfahrens negativ beeinflussen. Eine Ausführung des Eintrags- und Ausgasungsbeckens als mehrstufige Kaskade oder als Strömungsröhr/Röhrreaktor ermöglicht, bei gleichbleibendem Volumen durch Variation der Kaskadenstufen (Einbau von Trennwänden), die Verweilzeitverteilung entsprechend der Anzahl der Kaskaden anzupassen (Levenspiel, 1999). Entsprechende Untersuchungen zur Verweilzeitverteilung und zum Strömungsverhalten in Abhängigkeit von der Reaktorgeometrie und der Anzahl sowie Anordnung von Trenn- und Leitwänden im Ozonreaktor wurden auch in Weißenburg durchgeführt (siehe Kapitel 4.2.3 sowie Hunze (2016) oder Rödel et al. (2017)).

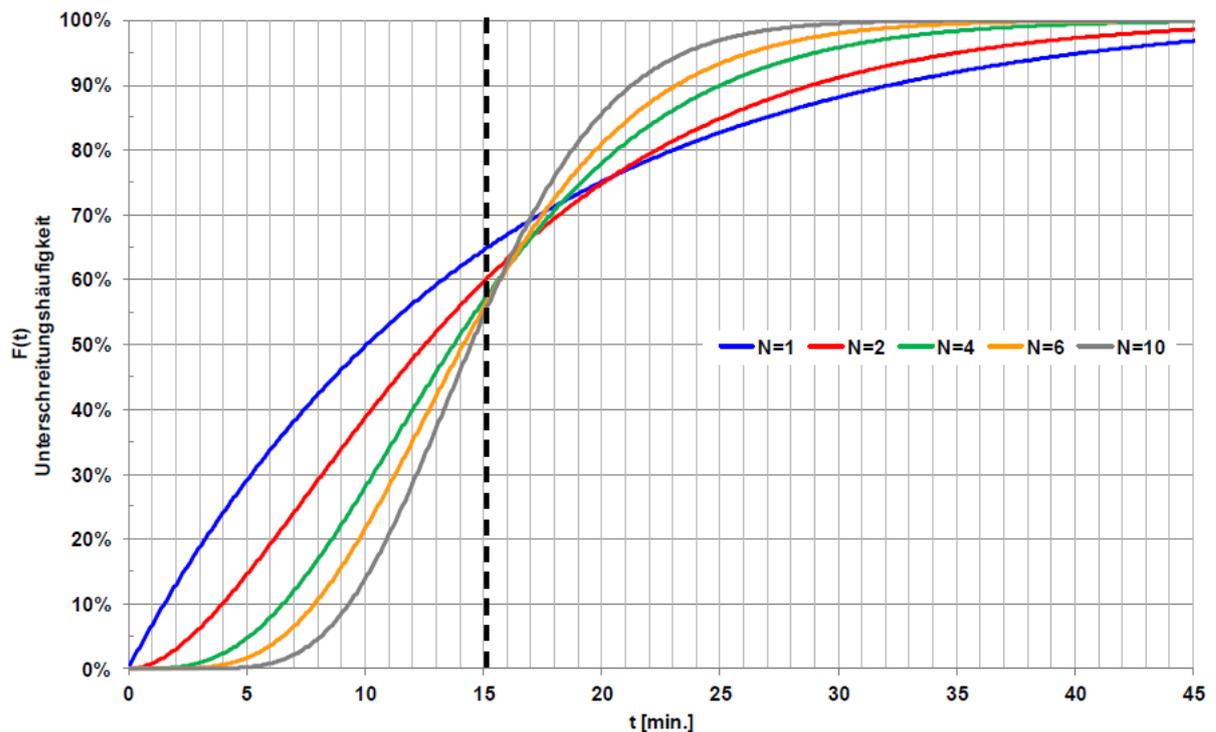
Folgende Designs entsprechen grundsätzlich den Anforderungen an das Durchströmungsverhalten (Herbst et al., 2014):

- kaskadiertes Beckenvolumen (CSTR-Kaskade, continuous stirred-tank reactor),
- Schlaufenreaktor,
- Röhrreaktor (Pfdropfenströmung).

Zu beachten ist, dass außer der Reaktorgeometrie der Eintrag des gasförmigen Ozon-/Sauerstoff-Gemischs die Strömung beeinflusst. Durch eine gezielte Anordnung des Ozon-eintragsystems können zum Beispiel die zwangsläufig sich bildenden Strömungswalzen zur Kaskadierung des Beckenvolumens genutzt werden. Das erforderliche Reaktionsvolumen  $V$  ergibt sich aus der Bemessungswassermenge  $Q_{Bem}$ , der Zeit bis zur vollständigen Ozonzehrung ( $t_{Zehrung}$ ) und dem vorgeschlagenen Faktor ( $f$ ) zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung im Reaktor zu (Herbst et al., 2014; Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016):

$$V = \frac{Q_{Bem} \times t_{Zehrung}}{f}$$

Die Verweilzeitverteilung (Residence Time Distribution, RTD) besagt, wie viel Zeit die einzelnen Moleküle im Reaktor verbringen. Wie bereits vorher beschrieben kann unter Zuhilfenahme von Ozonzehrungskurven anhand von festzusetzenden zulässigen Unterschreitungshäufigkeiten der Verweilzeitsummenfunktion das Reaktorvolumen festgesetzt werden (Arge, 2013). Eine entsprechende theoretische Verweilzeit-Summenfunktion ist in Abbildung 49 aufgeführt. Sie gibt den Anteil der eingebrachten Moleküle im Reaktoraustritt wieder, der eine Zeit kleiner als  $t$  im Reaktor verbracht hat (Unterschreitungshäufigkeit). Demnach ist ersichtlich, dass ca. 65 % der Teilchen den Reaktor (für einen idealen Rührkessel) mit einer Verweilzeit verlassen, die kleiner gleich der mittleren Verweilzeit ist. Bei einer sechsstufigen Kaskade (sechs hintereinander geschaltete Rührkessel) haben rund 55 % aller Teile den Reaktor in einer Zeit verlassen, die kleiner als die mittlere Verweilzeit ist (ebd.).



**Abbildung 49:** Verweilzeit-Summenfunktion  $F(t)$  bei einer mittleren Verweilzeit (HRT) von 15 min. für unterschiedliche Stufenanzahlen idealer Reaktoren (Arge, 2013)

### 5.2.3 Vorschlag zum Reaktorvolumen und zur hydraulischen Aufenthaltszeit in Weißenburg

In der Praxis und Literatur werden Aufenthaltszeiten im Ozonreaktor im Bereich von 15 bis 30 Minuten angegeben (Miehe et al., 2017). Kurze hydraulische Aufenthaltszeiten ( $< 20$  min) im Regenwetterfall oder bei einer Vollstrombehandlung sind möglich und haben den Vorteil, dass bei gleichem Reaktorvolumen mehr Abwasser behandelt werden kann. Die minimale hydraulische Verweilzeit einer Ozonanlage wurde in Klaer et al. (2017) auf 13 Minuten festgelegt. Für Mischwasserzuflüsse (Vollstrombehandlung) und Regenwetterbedingungen werden in der Literatur Werte von 5 bis 15 min angegeben (Abegglen und Siegrist, 2012; Klaer et al., 2017). Zudem wurde in einigen Studien festgestellt, dass die Aufenthaltszeit im Ozonreaktor die Spurenstoffelimination für bestimmte Substanzen nur geringfügig beeinflusst, sofern Kurzschlussströmungen vermieden werden (Klaer et al., 2017; Knopp und Cornel, 2015; Kreuzinger et al., 2015). Die Festlegung der minimalen hydraulischen Aufenthaltszeit sollte jedoch unter Berücksichtigung der lokalen Abwasser-eigenschaften und der ermittelten Reaktionszeiten aus den Ozonzehrungsversuchen erfolgen.

Auf Basis der Vorversuche (Ozonzehrungsversuche, vgl. mit Kapitel 4.2.2) und der in der Literatur bekannten Richtwerte wurde eine ausreichende minimale hydraulische Aufenthaltszeit (Zufluss =  $430 \text{ m}^3/\text{h}$ ) für die Ozonung in Weißenburg von 20 min festgelegt. Dabei wurde auch der Unterschied zwischen der realen Verweilzeit im Reaktor (Annahme: keine ideale Durchströmung im Reaktor) und der im Labor ermittelten Zeit bis zur vollständigen Abreaktion des Ozons berücksichtigt. Bei maximalen Trockenwetterzufluss ( $Q_{\text{TWmax}} = 288 \text{ m}^3/\text{h}$ ) beträgt die hydraulische Aufenthaltszeit 30 min. Demnach würde das

Reaktorvolumen für die Ozonung  $144 \text{ m}^3$  betragen. Bei Unterschreitung des Trockenwetterzuflusses wird die Aufenthaltszeit dementsprechend höher. Abbildung 50 zeigt die Häufigkeitsverteilung der hydraulischen Verweilzeit für das gewählte Reaktorvolumen und dem gewählten hydraulischen Bemessungszufluss von maximal  $430 \text{ m}^3/\text{h}$ . Beim gewählten Reaktorvolumen von  $144 \text{ m}^3$  wird bei 27 % aller Zuflüsse (Betrachtungszeitraum 2011 - 2013) eine Aufenthaltszeit von 24 min nicht überschritten. In ca. 6 % der Fälle ist die Aufenthaltszeit größer 60 min. Anders ausgedrückt wird bei der gewählten Dimensionierung die Verweilzeit von 20 min nie unterschritten und in ca. 60 % aller Fälle wird eine Verweilzeit von 30 min und mehr erzielt. Bei Mischwasserzuflüssen über  $430 \text{ m}^3/\text{h}$  ist davon auszugehen, dass die zusätzlichen Wassermengen abgeschlagen werden und die vierte Reinigungsstufe nicht passieren. Das vorgeschlagene Reaktorvolumen von  $144 \text{ m}^3$  basiert auf der Festlegung der hydraulischen Mindestverweilzeit beim maximalen Trockenwetterzufluss. Der Ozonreaktor wurde mit den Abmessungen (L x B x H)  $7,10 \times 3,3 \times 6,7 \text{ m}$  errichtet. Die Wasserspiegelhöhe beträgt  $5,90\text{--}5,99 \text{ m}$ .

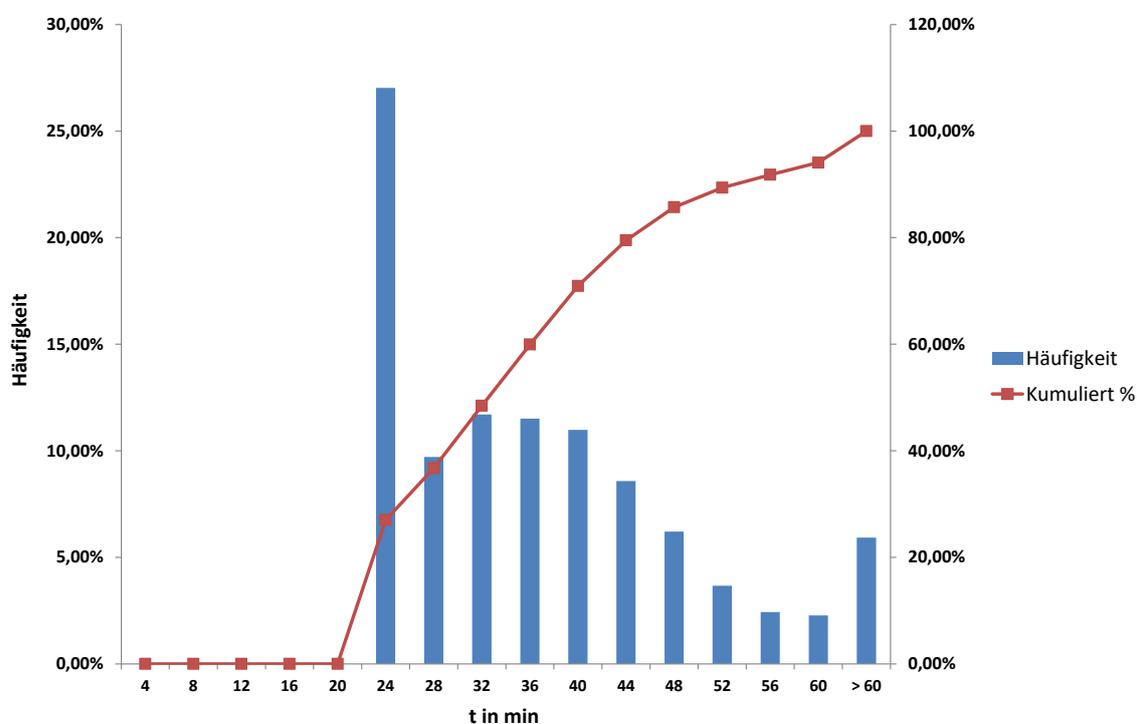


Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der hydraulischen Verweilzeit

#### 5.2.4 Hinweise zur baulichen Gestaltung

Grundsätzlich muss die Abwasserbehandlung auf dem Klärwerk für eine Ozonbehandlung um folgende wesentliche Komponenten erweitert werden:

- Ozongenerator,
- Ozonreaktor (Begasungsreaktor),
- Ozoneintragssystem,
- Prozesssteuerungseinheit (z.B.: Steuerung/Regelung der Ozondosis),
- Maschinen- und Bautechnik,
- EMSR-Technik,
- Offgassystem, Abluftbehandlung/Restozonvernichtung.

Vorteilhaft ist die Errichtung der Ozonanlage in der Nähe des Kläranlagenablaufs, um die Anlage auf kürzestem Weg mit dem Ablauf der Kläranlage beschicken zu können. Um den Energiebedarf bzw. Stromverbrauch zu minimieren, ist eine Beschickung der Ozonanlage im Freigefälle anzustreben. Hierbei sind wie bei anderen Beckenbauwerken auch die Energiekosten für die Beschickung gegenüber ggf. höheren Baukosten infolge z.B. einer tieferen Gründung zu prüfen.

Alle eingesetzten Materialien müssen gegenüber Ozon beständig sein. Für den Ozonungsreaktor hat sich Beton (ohne organische Beschichtungen) bewährt. Weitere bauliche und verfahrenstechnische Aspekte, die bei der Planung und Auslegung berücksichtigt werden müssen, sind:

- Geometrie/Reaktordesign und Einblastiefe,
- Eintragungssystem (Diffusor oder Injektor),
- Kühlung (bei Wasserkreislauf auf Partikel/Feststofffreiheit achten).

Von enormer Bedeutung ist auch die Wahl des Eintragungssystems. Wie bereits in Kapitel 4.2.4 beschrieben wurde das Injektorsystem bevorzugt, da es den Vorteil einer frei wählbaren Gasbeaufschlagung hat, so dass im Schwachlastbetrieb nur die für die Spurenstoffelimination erforderliche Gasmenge benötigt wird. Weiterhin befinden sich die wesentlichen Anlagenbestandteile des Eintragungssystems außerhalb des Reaktorraums und sind für Wartungsarbeiten somit einfach zugänglich.

Ein weiterer kostenbeeinflussender baulicher Aspekt ist die Errichtung bzw. Integrierung von Probenahmestellen. Die Ausführung bzw. Unterbringung der Probenahmestellen sowie dazugehörige Peripherie im Betriebsgebäude sollte unter bautechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Probenahmestellen im Ozonreaktor waren in Weißenburg nicht vorgesehen. Grundsätzlich ist die Ausführung und bauliche Integration (z.B. Dichtheit der Leitungsdurchführungen, Frostschutz, Abwärme, Zugänglichkeit etc.) sämtlicher Probenahmemöglichkeiten und der Online-Sensorik zwischen Anlagenbauer und Planungsbüro zu prüfen.

### 5.2.5 Hinweise und Bemessung bezüglich Ozonproduktion

Ein wesentlicher kostenbeeinflussender Faktor bei der Ozonung ist die Erzeugung von Ozon, welche relativ viel Energie in Form von Elektrizität benötigt. Die Leistungsaufnahme eines Ozonsystems für eine Anlage zur Spurenstoffelimination ähnlich wie in Weißenburg liegt zwischen 30 und 50 kW (Wieland, 2015).

Voraussetzung ist eine genügend große elektrische Anschlussleistung. Von der genutzten Energie werden rund 90% in Wärme umgewandelt, die abgeführt, resp. genutzt werden muss. Die Auswahl eines Ozongenerators ist abhängig von der benötigten maximalen Ozonmenge, welche wiederum vom Abwasseranfall und der Abwasserqualität, wie zum Beispiel der Konzentration an DOC und Nitrit, abhängt. Um die notwendige Ozondosis zu berechnen, müssen die DOC- und Ozonfrachten bekannt sein. Die zu applizierende Ozondosis würde beispielsweise bei einer DOC-Konzentration im Mittel von 5,8 mg und bei einer spezifischen Zehrung von 0,7 mg O<sub>3</sub>/mg DOC (Annahme) mit (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016):

$$c_{O_3} = z_{spez} \times c_{DOC}$$

4,06 mg O<sub>3</sub>/l betragen. Dabei ist die Zehrung von Nitrit bzw. die Oxidation von Nitrit zu Nitrat nicht mitberücksichtigt. Auf Grundlage der Festlegung der applizierten Ozonkonzentration

kann die benötigte Produktionskapazität der Ozonerzeuger mit (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016):

$$B_{O_3,max} = Q_{Bem} \times C_{O_3}$$

ermittelt werden. Bei einer Ozondosis von 4,06 mg O<sub>3</sub>/l wäre demnach ein Ozonmassenstrom von rund 1,75 kg O<sub>3</sub>/h erforderlich. Zur Auslegung des Eintragungssystems sollte ferner die minimal notwendige Ozonerzeugung ermittelt werden (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016):

$$B_{O_3,min} = Q_{T,2h,min} \times C_{O_3}$$

Für die Ozondosierung ist neben dem Gehalt an organischen Stoffen (DOC) vor allem Nitrit relevant. Nitrit wird durch Ozon sehr schnell in Nitrat oxidiert. Dadurch wird, wenn Nitrit im mg/l-Bereich vorhanden ist, Ozon aufgezehrt und ist für die Oxidation von Spurenstoffen nicht mehr verfügbar. Daher ist bei der Ermittlung der Ozondosis mit Hilfe von Untersuchungen zur spezifischen Zehrung eine Nitritkompensation zu empfehlen (Böhler et al., 2013).

Die Ozondosis mit Nitritkompensation kann anhand der folgenden Formel in ermittelt werden. Zur Oxidation von Nitrit zu Nitrat werden 3,43 g O<sub>3</sub>/g NO<sub>2</sub>-N verbraucht (stöchiometrisch). Um zu ermitteln, wie viel Ozon durch das im Abwasser vorhandene Nitrit verbraucht wird, wird die Differenz der Nitritkonzentration im Zulauf und Ablauf benötigt.

$$OD_{mit\ Nitrit} = \frac{(C_{O_3,Zu} - C_{O_3,Ab}) * Q_{Luft} - (C_{NO_2-N,ZU} - C_{NO_2-N,Ab}) * Q_W * f}{C_{DOC} * Q_W} \quad [g\ O_3/g\ DOC]$$

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| OD <sub>mit Nitrit</sub> :         | Ozondosis mit Nitritkompensation [g O <sub>3</sub> /g DOC]                          |
| C <sub>O<sub>3</sub>,Zu</sub> :    | Ozonkonzentration in der Zuluft [g O <sub>3</sub> /Nm <sup>3</sup> ]                |
| C <sub>O<sub>3</sub>,Ab</sub> :    | Ozonkonzentration in der Abluft [g O <sub>3</sub> /Nm <sup>3</sup> ]                |
| Q <sub>Luft</sub> :                | Luftstrom [l/min]   |
| C <sub>DOC</sub> :                 | DOC-Konzentration im Abwasser [mg DOC/l]  |
| Q <sub>W</sub> :                   | Durchfluss durch die Kolonne [l/min]  |
| C <sub>NO<sub>2</sub>-N,ZU</sub> : | Nitrit Konzentration im Zulauf [mg NO <sub>2</sub> -N/l]                            |
| C <sub>NO<sub>2</sub>-N,AB</sub> : | Nitrit Konzentration im Ablauf [mg NO <sub>2</sub> -N/l]                            |
| f:                                 | Ozonverbrauch zur Oxidation von Nitrit: 3.43 g O <sub>3</sub> /g NO <sub>2</sub> -N |

#### Abbildung 51: Berechnung Ozondosis mit Nitritkompensation (Böhler et al., 2013)

Der Ozondosis-Regelbereich wird in der Literatur mit 2 bis 15 mg/l angegeben (Barjenbruch et al., 2014). Bezogen auf die spez. Ozondosis werden 0,5 – 1 g O<sub>3</sub>/g DOC angegeben. Die überschlägige Ermittlung des Ozonbedarfs erfolgt anhand der DOC-Zulaufkonzentration, der spezifischen Ozondosis (bzw. z<sub>spez</sub> als spezifischer Ozoneintrag) und der zu behandelnden Wassermenge. Für die Ermittlung der notwendigen Ozondosis müssen die Ergebnisse von Ozonzehrungsversuchen unbedingt berücksichtigt werden.

Für die Feststellung der grundsätzlichen Eignung des Kläranlagenablaufs für eine Ozonung wurde im November 2014 ein erster Ozonzehrungsversuch durch die Fa. Xylem durchgeführt. Die benötigte Ozonmenge wurde hierbei inklusive einer Reserve auf 3,2 kg O<sub>3</sub>/h abgeschätzt. Dies entspricht einer maximalen Dosierung von 7,5 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> bei maximalem Zufluss und 1,5 g O<sub>3</sub>/g DOC. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben wurde ein weiterer Laborversuch für die Validierung der Bemessungsparameter durchgeführt. Darauf aufbauend und unter der Annahme, dass mit 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC die Indikatorsubstanzen in der Ozonung

um 90 % reduziert werden können, wurde festgestellt, dass die benötigte Ozonmenge bei niedrigstem Nachtzufluss von 80 m<sup>3</sup>/h und mittlerem DOC-Gehalt (von bis zu 8 mg/l) lediglich 320 g O<sub>3</sub>/h beträgt. Bei Trockenwetterzufluss werden im Mittel 1,2 kg O<sub>3</sub>/h benötigt. Bei maximalem Zufluss zur Ozonung von 430 m<sup>3</sup>/h werden mit der mittleren Konzentration für CSB von 20 mg/l (einem CSB/DOC-Verhältnis von 3,0 und einer Ozondosis von 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC) 1,43 kg O<sub>3</sub>/h benötigt. Die maximale Ozondosis von 2,69 kg O<sub>3</sub>/h wird bei einer maximalen CSB-Ablaufkonzentration von 56 mg/l und einem Trockenwetterzufluss von 288 m<sup>3</sup>/h benötigt (siehe Tabelle 15) und der Bemessung zugrunde gelegt.

**Tabelle 15: Ermittlung der erforderlichen Ozondosis (Zech und Schatz, 2016)**

| Wassermenge            |                       | CSB-Konzentration | Erforderliche Ozonproduktion   |
|------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|
| Q <sub>NZ</sub>        | 80 m <sup>3</sup> /h  | 25 mg/l           | 0,32 kg O <sub>3</sub> /h      |
| Q <sub>TW, i.M.</sub>  | 215 m <sup>3</sup> /h | 34 mg/l           | 1,20 kg O <sub>3</sub> /h      |
| Q <sub>TW, max</sub>   | 288 m <sup>3</sup> /h | <b>56 mg/l</b>    | <b>2,69 kg O<sub>3</sub>/h</b> |
| Q <sub>Bemessung</sub> | 430 m <sup>3</sup> /h | 20 mg/l           | 1,43 kg O <sub>3</sub> /h      |

### 5.2.6 Hinweise und Erkenntnisse zur Steuerung/Regelung der Ozondosierung sowie Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung

Der Stand der Technik erlaubt bis heute keine online-Messung für einzelne Spurenstoffe. Ein online messbarer Summenparameter, welcher die Dynamik der Spurenstoffe im Abwasser möglichst gut widerspiegelt und eine bedarfsgerechte Ozonzugabe erlaubt (abhängig vom Reinigungsziel), ist deshalb erforderlich. In den folgenden Unterkapiteln werden einige Ansätze und Methoden zur Steuerung/Regelung der Ozonzugabe und Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung vorgestellt.

#### 5.2.6.1 Allgemeines

Ausgehend von den bisher veröffentlichten Erfahrungen und Ergebnissen bezüglich einer bedarfsgerechten Ozonzugabe kann die Regelung des Ozoneintrags proportional zum Zufluss erfolgen. Weiterhin sind andere Steuer- und Regelkonzepte möglich, um den Ozoneintrag zu optimieren. Die Ozonzugabe wird grundsätzlich über Hilfsgrößen gesteuert (primär über die hydraulische Belastung). Frachtabhängige Konzepte sind derzeit in der Erprobung, wobei die Sensorik bzw. Messtechnik eine entscheidende Rolle spielt. Die Messkonzepte basieren in der Regel auf Messverfahren zur indirekten Berücksichtigung der Konzentrationsschwankungen der organischen Kohlenstoffverbindungen im Zulauf der Ozonanlage wie SAK-/UV/Vis- Sonden oder DOC- Messungen. Die Ozonkonzentration kann darüber hinaus auch im Off-Gas und in der gelösten Phase in ein Regelungskonzept eingebunden werden, um eine Ozon-Überdosierung zu vermeiden. Abegglen und Siegrist (2012) und Wittmer (2013) fassen die derzeit in der Forschung und Praxis angewandten Dosierstrategien sowie deren Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 17 und Tabelle 16) nachfolgend zusammen:

- **„Durchflussproportionale Dosierung:** Die Ozonmenge wird proportional zum Abwasserzufluss dosiert. Diese Variante bedingt den geringsten messtechnischen Aufwand, weist aber auch die größten Unsicherheiten bezüglich der Eliminationsleistung auf, da die Abwasserzusammensetzung nicht berücksichtigt wird und somit

Über- und Underdosierungen auftreten können. Diese Variante sollte eher bei kleineren Anlagen mit relativ konstanter Abwasserzusammensetzung eingesetzt werden.

- **Dosierung proportional zur DOC-Fracht:** Die Konzentration der Mikroverunreinigungen ist in der Regel proportional zur DOC-Konzentration, wobei diese Zusammensetzung jeweils von Kläranlage zu Kläranlage verschieden ist. Diese Variante wäre einfach implementierbar, die Online-Messung des DOC ist aber relativ aufwendig. Der Nachteil ist, dass Nitritspitzen zu einer verminderten Effektivität führen und daher eine zusätzliche Nitritmessung notwendig ist.
- **Dosierung in Abhängigkeit des gelösten Ozons:** Bei dieser Variante wird im hinteren Teil des Ozonreaktors das gelöste Ozon gemessen und das Ozon aufgrund dieses Signals dosiert. Damit wird sichergestellt, dass die Dosierung auf die Abwasserzusammensetzung abgestimmt ist (DOC, Nitrit, weitere). Der Nachteil ist, dass die Messgeräte eine Mindestkonzentration an Ozon benötigen, und insbesondere bei sehr niedrigen Durchflüssen aufgrund der Ozonzehrung eine Überdosierung erfolgt. Dieses Problem kann reduziert werden, indem der Messort in Abhängigkeit des Durchflusses variiert wird.
- **Dosierung anhand des UV-Signals:** Ozon reagiert selektiv mit bestimmten elektronenreichen Bindungen, die meist auch das UV-Licht absorbieren. Die Elimination von verschiedenen Mikroverunreinigungen korreliert mit der Abnahme der UV-Absorption bei 254 nm (SAK). Somit könnte grundsätzlich die Änderung des UV-Signals zwischen Zu- und Ablauf sowohl für die Ozondosierung, als auch als indirekte Kontrolle der Eliminationsleistung genutzt werden.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> S. 102 in Abegglen und Siegrist (2012).

**Tabelle 16: Charakteristika von Möglichkeiten der Ozondosierung (Abegglen und Siegrist, 2012)**

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

Tabelle 17: Steuerungs- und Regelungskonzepte zur Ozondosierung (Wittmer, 2013)

|   | Beschreibung  | Vorteile   | Nachteile  |
|---|---|--|--|
| <b>Durchfluss*</b>  | Die Dosierung des Ozons wird proportional zur Abwassermenge gesteuert   | + Relativ einfach  | - Nur geeignet bei stabiler Biologie → geringe Schwankungen des DOC im Ablauf<br>- Keine Aussage über das Ozon zu DOC Fracht Verhältnis und damit auch über die Eliminationsleistung möglich<br>- Es ist eine Anpassung des Steueralgorithmus bei Regenwetter notwendig um ein Überdosieren von Ozon zu vermeiden (wie bei allen Steuergrößen) |
| <b>DOC-Fracht*</b>  | Dies ist eine Kombination aus der Steuerung über die Abwassermenge und der DOC-Konzentration. Hier erfolgt die Ozondosierung proportional zur DOC Fracht.   | + Einfache Implementierung<br>+ Mit der Betrachtung der Ozondosis (g O <sub>3</sub> /g DOC) ist eine Schätzung der Eliminationsleistung möglich<br>+ Die dosierte Ozonmenge entspricht eher der erforderlichen Ozondosis als wenn nur über den Durchfluss gesteuert wird | - Quasi-Online DOC-Messung basierend auf einer thermischen Aufschlussmethode ist mit Wartungsaufwand und Messunsicherheiten verbunden und es werden zudem organische Verbindungen erfasst, die nicht mit Ozon reagieren, was zu einer zu hohen Ozondosis führt   |
| <b>SAK<sub>254</sub>*</b>   | Die Absorbanzmessung bei 254 nm kann als Steuerparameter ähnlich wie der DOC verwendet werden. Allerdings sollte hier, wie auch beim DOC der Durchfluss miteinbezogen werden.   | + Einfachere und weniger wartungsintensive Messtechnik als ein thermisches DOC Gerät   | - Da der SAK nicht genügend gut mit der DOC Konzentration korreliert sind grössere Schwankungen der Ozondosis zu erwarten.   |
| <b>Ozonkonzentration</b>  | Ein möglicher Ansatz zur Regelung der Ozondosierung bietet die Messung des gelösten Ozons im hinteren Teil des Ozonungsreaktors. Dabei wird die Restozonkonzentration nach einer gewissen Kontaktzeit gemessen und die Ozondosis angepasst. | + Dosierung auf Abwasserzusammensetzung abgestimmt (DOC, Nitrit, usw.)   | - Die Wahl des Messortes sehr entscheidend, da die Messgeräte eine Mindestkonzentration an Ozon benötigen<br>- Insbesondere bei sehr tiefen Durchflüssen kommt es aufgrund der Ozonzehrung zu einer Überdosierung an Ozon  |
| <b>Abs.-Abnahme</b>   | Während der Ozonung kommt es zu einer Reduktion der Absorbanz (Absorbanzabnahme) aufgrund dessen die Ozondosierung geregelt werden kann ( <i>siehe Kapitel 4.2</i> ).   | + Einfache Messung<br>+ Dosierung auf Abwasserzusammensetzung abgestimmt (DOC, Nitrit, usw.)<br>+ Gute Aussage über Effizienz der Reinigungsleistung   | - Zwei Messgeräte erforderlich, die aufeinander abgestimmt werden müssen.  |
| <p>*Nitritkompensierte Ozondosis: Die beschriebenen Steuerungskonzepte können zusätzlich mit einer Nitritkompensation erweitert werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Indem Nitrit im Zulauf gemessen wird, kann Ozon noch spezifischer auf die Eliminationsleistung dosiert werden</li> <li>- Mit einem zusätzlichen Nitrit Messgerät steigt der Wartungsaufwand</li> </ul> |   |  |  |

Eine sehr gute und vergleichende Übersicht über bisher bewährte und neue Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung und zur bedarfsgerechten Ozonzugabe finden sich in Wunderlin (2016) sowie im Eawag-Abschlussbericht zur großtechnischen Optimierung der Ozondosierung auf der Abwasserreinigungsanlage (ARA) Neugut (Fleiner et al., 2015). Bei diesen Betrachtungen werden die Messprinzipien, Erfahrungen, Anwendungsbereiche, Betriebshinweise (Zuverlässigkeit, Wartung, Handhabung), Optimierungspotentiale und der Einsatz als Steuer- und Regelparameter erläutert. Zusammenfassend kommt Wunderlin (2016) zu folgenden Schlussfolgerungen:

- **„ $\Delta$ UV-Absorbanzmessung:** Die  $\Delta$ UV-Absorbanzmessung (d.h. im Zu- und Ablauf des MV-Verfahrens) zur Überprüfung des Reinigungseffekts (sowie als möglicher Steuer-/Regelparameter für die Ozon- und PAK-Dosierung) hat sich als sehr vielversprechend erwiesen. Einerseits ist die Korrelation zwischen der Absorbanz- und Spurenstoffabnahme über die vierte Reinigungsstufe recht gut, und andererseits hat sich die Anwendung im großtechnischen Maßstab bewährt. Eine stabile online UV-Messung ist ohne Probleme möglich. Ein Augenmerk ist aber noch auf die Aufbereitung der Probe, wie beispielsweise eine Vorfiltration bei erhöhten GUS-Ablaufwerten (AFS), zu legen (v.a. bei PAK-Anlagen).
- **Electron Donating Capacity (EDC):** Das EDC-Verfahren birgt ein gewisses Potential, da angesichts der Erkenntnisse aus Chon et al. (2015) - in Kombination mit einer UV-Absorbanzmessung - für eine Ozonung eine Aussage über eine allfällige Bromatbildung gemacht werden kann. Das Konzept befindet sich aber noch im Forschungsstadium und die Messung ist noch nicht kommerziell verfügbar. Es lohnt sich, dieses Konzept im Auge zu behalten und allenfalls in kommenden Projekten mit zu berücksichtigen.
- **Fluoreszenz-Messung:** Die Fluoreszenzmessung verfolgt einen analogen Ansatz zur UV-Absorbanzmessung. Die Vor-/Nachteile der Methode sind aber noch wenig bekannt, da dieses Messprinzip noch nicht im Abwasserbereich (Pilot-/Vollmaßstab) eingesetzt wurde bzw. liegen die Erfahrung und Erkenntnisse noch nicht vor. Diese Methode müsste daher gewichtige Vorteile gegenüber der UV-Absorbanzmessung aufweisen, um für den Einsatz auf ARA interessant zu sein.
- **Organische Substanz (DOC / CSB):** Dieses Konzept weist lediglich für Aktivkohleverfahren ein gewisses Potential auf, da die DOC-/CSB-Elimination hier höher ist als bei der Behandlung mit Ozonung. Bei einer Ozonungsanlage könnte jedoch aufgrund der DOC-Konzentration im Zulauf der Ozoneintrag bedarfsgerecht gesteuert werden. Alternativ zu einer online Messung wären auch Labormessungen denkbar. Bei einem „Ulmer-Verfahren“ (mit nachgeschaltetem PAK-Kontaktreaktor und Sedimentation) könnte die Messung von 2-3 Sammelproben pro Woche ausreichend sein. Es sind aber noch weitere Daten notwendig, um hierzu eine gut abgestützte Aussage machen zu können. Die Korrelation der DOC-Abnahme zur Spurenstoffabnahme muss im Einzelfall bestimmt werden.
- **Ozonkonzentration im Ozonungsreaktor:** In der Trinkwasseraufbereitung kann die Ozonung anhand der online-Ozonzugabe gesteuert werden. Dieses neuartige Konzept wird aktuell in der Trinkwasserversorgung Zürich implementiert (Kaiser et al., 2013). Anhand einer Ozonkonzentrations-Messung im Ablauf, sowie einer kontinuierlichen Ermittlung der Ozonzerfallsrate (in externen Batch-Reaktoren) kann in Kombination mit weiteren Parametern auf den Abbau der Spurenstoffe sowie auf

die Desinfektionsleistung geschlossen werden. In der Abwasserreinigung ist, bedingt durch die Hintergrundmatrix, der Ozonzerfall aber einiges schneller als im Trinkwasser, was die Bestimmung der gelösten Ozonkonzentration im Reaktor erschwert. Zudem scheint die Messung der gelösten Ozonkonzentration technisch schwierig (Ozonzerfall in den Probenahmeleitungen). Aktuell ist es daher eher unwahrscheinlich, dass dieses Konzept in der Abwasserreinigung umgesetzt werden kann.

- **Ozonkonzentration in der Abluft:** Der Ozongehalt in der Abluft des Reaktors wird kontinuierlich erfasst. Da der Ozoneintrag nach einer Blasenanstiegshöhe von 5 - 6 Metern mehr oder weniger vollständig ist, sind die Abluftkonzentrationen im Normalfall sehr tief (im Bereich von zirka 0,8 - 6 ppm). Ein plötzlicher Anstieg der Abluftkonzentration wäre ein Indiz für eine notwendige „betriebliche Kontrolle“ (d.h. Abklären der möglichen Ursachen wie Regenwetter, Veränderte O<sub>3</sub>-Zehrung im Abwasser etc.). Es geht bei diesem Parameter hauptsächlich um die relativen Veränderungen, nicht um die absoluten Werte. Damit ist diese Messung ein möglicher Überwachungsparameter für den Betriebszustand. Die Information ist deutlich weniger sensitiv als beispielsweise die UV-Absorbanzmessung. Für die Betriebsüberwachung ist das Potential dieses Ansatzes daher als gering einzustufen. Ebenfalls eignet sich die Ozonkonzentrationsmessung in der Abluft nicht zur Regelung der Ozondosierung. Für sicherheitstechnische Aspekte ist die Ozonkonzentration in der Abluft aber eine wichtige Messung.
- **Ozonkonzentration im Ablauf:** Im hinteren Teil des Ozonreaktors kann die gelöste Ozonkonzentration online gemessen werden. Die Dosierung des Ozons könnte auf Grund dieses Signals geregelt werden. Problematisch ist die Detektion kleinster Ozonkonzentrationen (die Messgeräte benötigen eine Mindestkonzentration an Ozon), was zu einem hohen Wartungsaufwand führt. Weitere offene Punkte in diesem Zusammenhang sind: unklares Verhalten bei unterschiedlichen Durchflüssen (Wo wäre der geeignete Messpunkt im Reaktor? Könnte die Probenahmestelle variiert werden?). Die Kombination mit einer Durchflussmessung wäre zwingend. Das Potential für den Einsatz von Ozonkonzentrationsmessungen zur Betriebsüberwachung ist als eher gering einzustufen.
- **Ökotoxikologische Online-Messungen:** Anhand von gezielt ausgewählten ökotoxikologischen Tests kann der ARA-Ablauf online überwacht werden. Aktuell sind zwar einige Testsysteme verfügbar (als Online-Sonde: z.B. Einsatz von Gammariiden (Gerhardt et al., 2013), oder das „Watch-Frog-Konzept“, siehe [www.watch-frog.fr](http://www.watch-frog.fr)), jedoch befinden sich diese entweder noch im Forschungsstadium, deren Durchführung ist eher aufwändig, oder es ist (noch) unklar welche Stoffe/Stoffgruppen damit erfasst werden. Wann diese Art von Testverfahren für die kontinuierliche Messung im ARA-Ablauf verfügbar ist, ist gegenwärtig schwierig abschätzbar. Im Weiteren ist unklar, ob diese Konzepte effektiv Informationen über den aktuellen Betrieb liefern können oder eher über mittel- / langfristige Entwicklungen Auskunft geben (z.B. über Effekte in den Gewässern). Unter Berücksichtigung der Kosten und Nutzen ist die Eignung von ökotoxikologischen online-Sonden zum Einsatz in der Betriebsüberwachung im Moment fraglich.
- **Online-Spurenstoffanalytik:** In dem Artikel von Url et al. (2016) wird die Möglich-

*keit der Spurenstoff-online-Analytik diskutiert, und dabei verschiedene Messverfahren miteinander verglichen. Die online-Spurenstoffanalytik zur Überprüfung des Reinigungseffekts auf Kläranlagen muss jedoch sehr kritisch beurteilt werden, und wird gegenwärtig nicht als alternatives Konzept zur kontinuierlichen Überwachung des Reinigungseffekts betrachtet.“<sup>8</sup>*

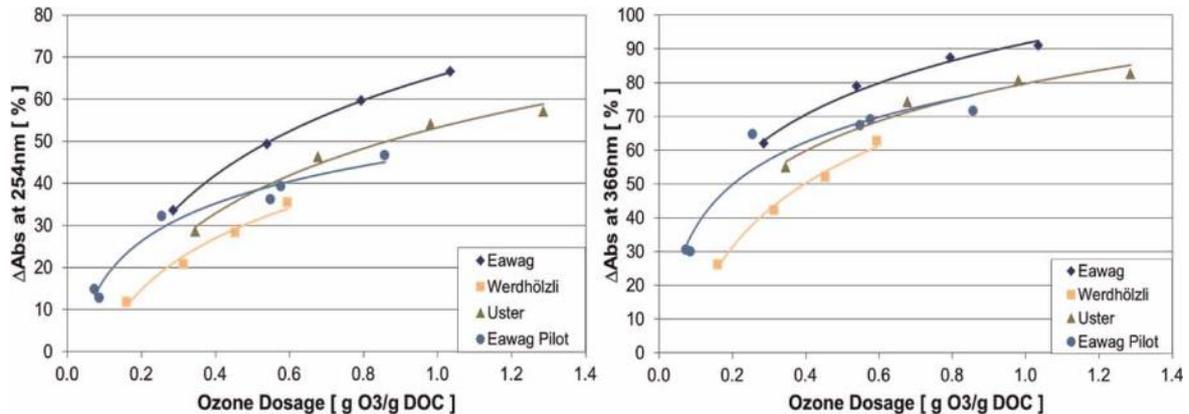
#### 5.2.6.2 Untersuchungen in Deutschland, der Schweiz und den USA

Bei den in Arge (2013) untersuchten Kläranlagen (Duisburg Vierlinden, Schwerte, Bad Sassendorf) wurde die Ozonzugabe in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration im Offgas und der Konzentration an gelöstem Ozon in der wässrigen Phase im Ablauf geregelt. Auf der Kläranlage Bad Sassendorf erfolgte zudem eine Regelung auf Basis des Ablauf-SAK oder anhand der SAK-Differenz des Zu- und Ablaufs. Auch in Schwerte besteht die Möglichkeit, die Ozonzugabe in Abhängigkeit des SAK im Zu- oder im Ablauf zu regeln. In Duisburg-Vierlinden kann die Ozonzugabe auf Basis der DOC-Konzentration im Zulauf erfolgen (Arge, 2013). Nach Grünebaum (2011) konnte keine signifikante Verbesserung des Spurenstoffabbaus (anhand von drei Leitsubstanzen: Diclofenac, Metoprolol, Amidotrizoesäure) bei SAK-gesteuerter O<sub>3</sub>-Dosierung gegenüber einer zuflussgesteuerten Zugabe festgestellt werden. Eine Zugabe des Ozons in Abhängigkeit des SAK-Wertes führte daher zu keiner verbesserten Oxidation der ausgewählten Leitsubstanzen. Als Gründe wurden neben den großtechnisch unvermeidlichen Schwankungen infolge der Probenahme und Abwasserzusammensetzung, vor allem Herausforderungen der Online-Messtechnik (SAK-Sonden) gesehen (Arge, 2013). Nur bei regelmäßiger Wartung der Sonden ist ein plausibles Messsignal zu erzielen, welches eine darauf aufbauende Ozonzugabe ermöglicht (ebd.). Real-Time-Monitoring-Versuche und eine SAK-basierte Ozonzugabe für eine großtechnische Kläranlage in NRW werden auch in Lyko et al. (2013) beschrieben. Hier konnte eine schwache Korrelation zwischen SAK<sub>254</sub> und DOC nachgewiesen werden (DOC = gesamte gelöste organische Komponenten; SAK<sub>254</sub> = aromatische Komponenten wie Huminstoffe). Grundsätzlich zeigt sich aber eine starke Korrelation zwischen Hintergrund-DOC sowie UV<sub>254</sub> mit dem Ozonverbrauch. Eine Korrelation zwischen UV<sub>254</sub>-Reduktion und applizierte Ozondosis konnte ebenfalls nachgewiesen werden, was für den DOC (DOC-Reduktion) jedoch nicht der Fall war. Diese Zusammenhänge wurden auch in Wittmer et al. (2015) bestätigt (vgl. Abbildung 52).

Bei den Versuchen in Bad Sassendorf zeigte sich unabhängig von der Zugabe des Ozons das bereits bekannte dosisabhängige Verhalten für die unterschiedlichen Leitsubstanzen. Es ist außerdem unabhängig, ob das Regelungskonzept auf einer Steuerung oder Regelung auf Basis der Zulauf- oder Ablauf SAK-Messung erfolgt. Ähnliche Ergebnisse wurden mit einer Zugabe auf Basis der Ozonkonzentration im Offgas bestimmt (Arge, 2013).

---

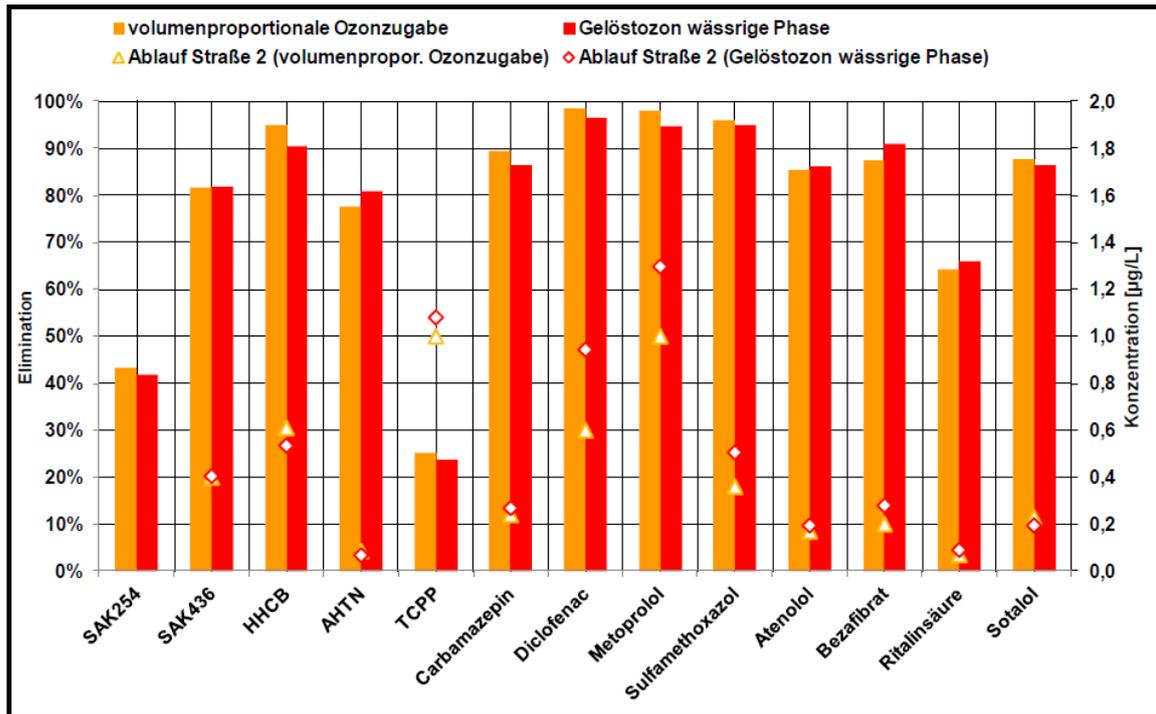
<sup>8</sup> S. 6 bis 13 in Wunderlin (2016).



**Abbildung 52: Korrelation zwischen Absorbanzabnahme und Ozondosis für drei verschiedene Abwässer (Wittmer et al., 2015)**

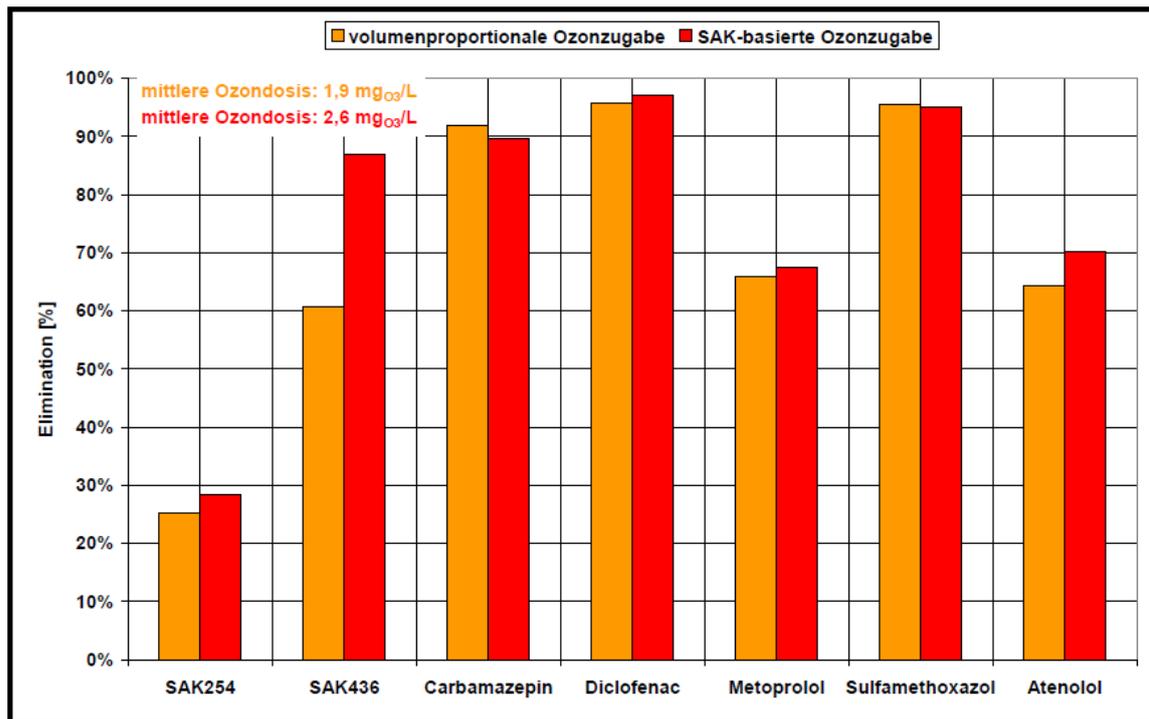
Bezüglich Offgas-basierter und mengenproportionaler Ozonzugabe wurden daher keine signifikanten Unterschiede in der Oxidation der Leitsubstanzen festgestellt. Eine Zugabe auf Basis der Gelöstozon-Messung (Messung des Ozons im Wasser) in Bad Sassendorf war aufgrund der geringen Konzentrationen an gelöstem Ozon im Ablauf des Reaktors nicht praktikabel. Hier war auch bei hohen Ozondosen das Messsignal nicht ausreichend belastbar, um darauf ein Regelungskonzept aufzubauen (Arge, 2013).

Die Möglichkeiten einer angepassten Ozonzugabe in Abhängigkeit der Restkonzentration an Ozon im Offgas in Schwerte kann auf Basis der dortigen Untersuchungen aufgrund der konstruktiven Ausführung der Ozonungsstufe nicht abschließend bewertet werden (Arge, 2013). Bei der Ozonzugabe in Abhängigkeit der Ozonkonzentration der wässrigen Phase zeigt sich im Laufe der Untersuchungen in Schwerte, dass die kontinuierliche Messung des Ozons in der wässrigen Phase sehr anspruchsvoll ist (optimale Anströmung der Messelektrode). Demnach ist die praktische Einsatzfähigkeit einer Regelung des Ozoneintrags in Abhängigkeit der Ozonkonzentration in der wässrigen Phase für die Anlagenkonfiguration in Schwerte nur bedingt gegeben (ebd.). Nach den Untersuchungen in Arge (2013) konnte aufgrund der Unsicherheit der amperometrischen Messung nur qualitatives Regelungsverhalten beobachtet werden. Die auf Basis dieser Versuche erreichte Reinigungsleistung und eine vergleichende Darstellung mit den Werten der volumenproportionalen Ozonzugabe in Höhe von 5 mgO<sub>3</sub>/L sind in Abbildung 53 für einen Tag exemplarisch aufgeführt. Der Vergleich zeigt, dass eine signifikant effizientere Elimination (gleiche Elimination bei geringerer Ozonzugabe) für die Dosierung nach der Restozonkonzentration nicht nachweisbar ist.



**Abbildung 53:** Gegenüberstellung der erreichbaren Elimination und Ablaufkonzentrationen der mengenproportionalen ( $dO_3 = 5,0 \text{ mgO}_3/\text{L}$ ) und der Ozonzugabe in Abhängigkeit der Ozonkonzentration in der wässrigen Phase ( $dO_3 = 4,6 \text{ mgO}_3/\text{L}$ ) (Arge, 2013)

Untersuchungen in Schwerte zur SAK-basierten Ozonzugabe zeigen, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Spurenstoffelimination und der Absorbanzabnahme vorliegt, sodass die Möglichkeit besteht die Reinigungsleistung der Ozonung auf Basis des  $\Delta SAK_{254}$  beurteilen zu können. Weiterhin wurde zur Überprüfung des Regelungsverhaltens ein Vergleich der  $SAK_{254}$ -abhängigen berechneten Soll-Dosis mit der applizierten Ist-Dosis aufgeführt. Beim Vergleich der Einzelwerte wird deutlich, dass hier geringe Abweichungen zwischen der Ist- und Soll-Dosis vorliegen, insbesondere im Dosisbereich von 3,0 bis 3,5  $\text{mgO}_3/\text{L}$ . Ursächlich für die Abweichungen sind die schwankenden Zuflüsse infolge der Pumpensteuerung und die daraus resultierenden kurzen Zeitintervalle (30 Sekunden) zur Berechnung des erforderlichen Ozonmassenstroms (Arge, 2013). Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse in Arge (2013), dass in Schwerte eine  $SAK_{254}$ -basierte und an die Hintergrundbelastung angepasste Ozonzugabe erfolgen kann. Aus dem Vergleich zwischen mengenproportionaler und  $SAK_{254}$ -basierter Zugabe wird ersichtlich, dass kein nennenswerter Unterschied bei den stoffspezifischen Eliminationsgraden vorliegt (vgl. Abbildung 54). Der Betrachtungszeitraum ist jedoch zu kurz um repräsentative Aussagen über die Eliminationsleistung bei schwankenden Belastungen treffen zu können.



**Abbildung 54:** Gegenüberstellung der erreichbaren Elimination der Ozonungsstufe der mengenproportionalen und der SAK-basierten Ozonzugabe bei gleicher applizierter spezifischer Ozondosis in Höhe von  $0,38 \pm 0,01$  mg O<sub>3</sub>/mg DOC (Arge, 2013)

Bei den Untersuchungen in Schwerte wurde auch der Einfluss von im Wasser gelöstem Ozon auf die Messung des SAK<sub>254</sub> betrachtet. Aufgrund der Überlagerung des Absorptionsmaximums von Ozon mit dem UV-Spektrum der SAK<sub>254</sub>-Messung erfordert jede SAK<sub>254</sub>-basierte Ozonzugabe eine Kompensation des Einflusses von im Wasser gelöstem Ozon (Differenzierung zwischen der Strahlungsabsorption der Abwasserinhaltsstoffe und des Ozons notwendig) (Arge, 2013). Aufgrund der sich ändernden Abwasserzusammensetzung wäre eine kontinuierliche Differenzierung in der Praxis nur begrenzt möglich. Theoretisch kann durch eine weitere Messung des im Wasser gelösten Ozons eine Kompensation des gelösten Ozons bei der SAK<sub>254</sub>-basierten Ozonzugabe erfolgen. Oder es wird sichergestellt, dass am Messort der SAK<sub>254</sub>-Messung kein Ozon mehr in der wässrigen Phase vorhanden ist (ebd.). Mit einer zusätzlichen Messung des in Wasser gelösten Ozons kann, wenn es zu einem Anstieg des SAK<sub>254</sub> und auch zu einem Anstieg der Konzentration an gelösten Ozon in der Ozonungsstufe kommt, die Ozonzugabe abgesenkt werden, bis kein Gelöstozon im Wasser mehr detektiert werden kann.

Ein Vergleich zwischen mengenproportionaler und DOC-proportionaler Steuerung der O<sub>3</sub>-Dosierung wurde in Duisburg-Vierlinden durchgeführt. Ein direkter Vergleich der erzielten Elimination der Spurenstoffe bei einer mengenproportionalen und DOC-proportionalen Steuerung der Ozondosierung war jedoch nicht ohne weiteres möglich, da die Abwassermatrix bei den Versuchen nicht gleich war. Bei einigen Versuchseinstellungen konnte aber nachgewiesen werden, dass eine konstant hohe Effizienz des Ozoneintrags mit dem Injektoreintragssystem bei einer DOC-proportionalen Steuerung erzielt werden konnte. Bei einer mengenproportionalen Steuerung kam es mit dem Injektoreintragssystem in wenigen Fäl-

len zu einer deutlichen Minderung der Effizienz des Ozoneintrags von unter 90 %, bei hohen Ozondosen von über 6 mgO<sub>3</sub>/l (Arge, 2013). Zusammenfassend zeigt sich jedoch, dass der Nutzen einer DOC-proportionalen Steuerung anhand der vorliegenden Messdaten für die Ozonanlage Duisburg-Vierlinden nicht eindeutig belegt werden kann (ebd.). Aufbauend auf den Ergebnissen in Duisburg wird in Arge (2013) darauf hingewiesen, dass zwischen dem erzielbaren Nutzen der Online-DOC-Messung und den höheren Personal- sowie Geräteaufwand für die DOC-Messung abgewogen werden muss. Insgesamt fallen die Kosten der DOC-Messung bei einer relativ kleinen Anlage wie in Duisburg-Vierlinden gegenüber möglichen Einsparungen für den Bedarf an Reinsauerstoff und Energie zur Ozonerzeugung stärker ins Gewicht als bei größeren Anlagen (ebd.).

Die Überwachung der Spurenstoffentfernung anhand von UVA<sub>254</sub>-Messungen zeigte sich in Altmann et al. (2015) und Altmann et al. (2016) als vielversprechende Option zur Kontrolle der Adsorptionsleistung einer PAK-Stufe. Für eine gezielte Spurenstoffentfernung können dadurch einfach zu überwachende Schwellwerte für die UVA<sub>254</sub>-Reduktion definiert werden. Weiterhin wäre eine Anpassung der PAK-Dosierung an veränderte Abwasserbedingungen mittels online-UVA<sub>254</sub>-Messungen denkbar.

Für die Ozonung ist der Einsatz von Onlinesonden des SAK<sub>254</sub> im Zulauf und Ablauf sehr hilfreich, da die so kalkulierbare und damit online erfassbare SAK-Elimination zumindest für schnell und moderat reagierende Substanzen wie Diclofenac und Metoprolol belastbare Korrelationen erlaubt (Gerrity et al., 2012). Der eindeutige Zusammenhang zwischen der Absorbanzabnahme (bei 254 nm) und der Spurenstoffelimination wird u.a. in Lyko et al. (2013), Wittmer et al. (2015) sowie Nanaboina und Korshin (2010) (vgl. Tabelle 18) bestätigt. Wittmer (2013) bewies weiterhin, dass die Nitritzehrung bei der Absorbanzmessung berücksichtigt wird, d.h. die Absorbanzabnahme kompensiert den Einfluss von Nitrit. Eine separate Nitritmessung ist somit nicht notwendig. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse in Wittmer (2013) ließ sich eine Regelungsstrategie für die Ozondosierung anhand der Absorbanzabnahme herleiten. Am Beispiel Benzotriazol konnte dies exemplarisch aufgezeigt werden (abhängig vom definierten Qualitätsziel und dem vorliegenden Abwasser). Benzotriazol wird in der biologischen Stufe zu etwa 20-40 % entfernt, d.h. für eine 80 %-Elimination bezogen auf den Zulauf zur Kläranlage müsste es in der Ozonung zu 50-80 % entfernt werden. Dies entspricht einer Absorbanzabnahme von rund 45 % bei 254 nm, resp. 70 % bei 366 nm. Für die Ozondosierung müsste die entsprechende Absorbanzabnahme als Sollwert für die Regelung verwendet werden. Der Vorteil der vorgestellten Methode ist, dass neben der Regelung auch eine Aussage über die Reinigungsleistung möglich ist (Wittmer, 2013). Nach Durchführung der Optimierungen der in Neugut (ARA Neugut in der Schweiz) verwendeten UV-Sonden und durch eine regelmäßige Qualitätssicherung erwies sich die UV-Messtechnik für die Steuerung und Regelung der Ozonzugabe als geeignet und dies bei geringem Aufwand (Schachtler und Hubaux, 2016).

Betriebliche Erfahrungen zum Umgang mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffentfernung werden in Meier (2018) beschrieben. Wichtige Voraussetzungen für die Funktionsfähigkeit der SAK- bzw. UV/VIS-Sonden und die Plausibilität der Messwerte im Betrieb werden u.a. in Rödel et al. (2019), Schachtler und Hubaux (2016) und Brandenburg et al. (2018) beschrieben:

- richtige Größe des Messspaltes bei den SAK-Sonden in Abhängigkeit von den Abwassereigenschaften festlegen,

- Verhindern von Luftblasen in der Probenahmeverrichtung (bei der Konstruktion der Probenahmeverrichtung beachten),
- automatisierte regelmäßige Reinigung der Messzellen (Druckluft, Säureeindüsung etc.),
- richtiges Anströmen der Messzelle (von unten) und Vermeidung eines zu geringen Durchflusses,
- Trübungskompensation bei der Messwertausgabe berücksichtigen,
- Qualitätssicherung durch Überprüfung der Online-Messwerte mit Labormesswerten (Abdriften der Messwerte erkennen).

**Tabelle 18: Relative Absorbanzabnahme bei 254 nm für eine 50 % und 80 % Elimination von ausgewählten Spurenstoffen in verschiedenen Abwässern (Wittmer et al., 2015)**

|                     | $\Delta$ Abs at 254 nm for 50% MP elimination |    |    |           |                     |                                  | $\Delta$ Abs at 254 nm for 80% MP elimination |    |    |           |                     |
|---------------------|---|----|----|-----------|---------------------|----------------------------------|---|----|----|-----------|---------------------|
|                     | Lab-exp                                       |    |    | Pilot-exp | Literature          |                                  | Lab-exp                                       |    |    | Pilot-exp | Literature          |
|                     | A   | B  | C  | A         | Gerity <sup>a</sup> | Nanoboina & Korshin <sup>b</sup> | A   | B  | C  | Eawag     | Gerity <sup>a</sup> |
|                     | $\Delta$ Abs (%)                              |    |    |           |                     |                                  |   |    |    |           |                     |
| Atenolol            | 24  | -  | 42 | 25        | 20                  | 25                               | 39  | -  | 52 | 34        | 38                  |
| Atenolol acid       | 26  | -  | 47 | 24        | x                   | x                                | 40  | -  | 55 | 35        | x                   |
| Benotriazole        | 41  | -  | -  | 41        | x                   | x                                | 49  | -  | -  | 45        | x                   |
| Bezafibrate         | 37  | -  | -  | x         | x                   | x                                | 60  | -  | -  | x         | x                   |
| Carbamazepine       | 17  | 17 | 16 | 20        | 12                  | 13                               | 27  | 33 | 27 | 28        | 20                  |
| Clarithromycin      | 18  | 15 | 16 | 8         | x                   | x                                | 30  | 33 | 28 | 13        | x                   |
| Diclofenac          | 17  | 13 | 15 | 13        | 10                  | 12                               | 27  | 30 | 25 | 23        | 20                  |
| Fluconazole         | x   | x  | x  | 44        | x                   | x                                | x   | x  | x  | -         | x                   |
| Gabapentin          | 49  | -  | -  | 40        | x                   | x                                | 60  | -  | -  | 45        | x                   |
| Hydrochlorothiazide | 16  | -  | 33 | x         | x                   | x                                | 27  | -  | 45 | x         | x                   |
| Levetiracetam       | 57  | -  | -  | 44        | x                   | x                                | 67  | -  | -  | -         | x                   |
| Mefenamic acid      | 17  | 8  | 15 | 8         | x                   | x                                | 28  | 24 | 25 | 13        | x                   |
| Methylbenotriazole  | 30  | -  | 44 | 28        | x                   | x                                | 56  | -  | -  | 42        | x                   |
| Metoprolol          | 22  | -  | 42 | 24        | x                   | x                                | 37  | -  | 52 | 33        | x                   |
| Metronidazole       | x   | x  | x  | 40        | x                   | x                                | x   | x  | x  | 45        | x                   |
| Oxazepam            | x   | x  | x  | 32        | x                   | x                                | x   | x  | x  | 45        | x                   |
| Primidone           | 44  | -  | 54 | 40        | 38                  | x                                | -   | -  | -  | 45        | 42                  |
| Propranolol         | 17  | 13 | 16 | 14        | x                   | 13                               | 28  | 20 | 27 | 27        | x                   |
| Ritalinic acid      | x   | x  | x  | 31        | x                   | x                                | x   | x  | x  | 46        | x                   |
| Sucralose           | x   | x  | x  | 47        | x                   | x                                | x   | x  | x  | -         | x                   |
| Sulfamethoxazole    | 24  | 20 | 23 | 25        | 15                  | 12                               | 40  | -  | 47 | 44        | 21                  |
| Trimethoprim        | 16  | 14 | 17 | 18        | 10                  | 12                               | 27  | 25 | 29 | 28        | 20                  |
| Valsartan           | 45  | -  | 45 | 32        | x                   | x                                | 58  | -  | -  | 45        | x                   |
| Venlafaxin          | 17  | 32 | 33 | 20        | x                   | x                                | 27  | -  | 46 | 28        | x                   |

Literature values from <sup>a</sup>Gerity *et al.* (2012) and <sup>b</sup>Nanoboina & Korshin (2010). (x) no measurement for this substance available; (-) the planned degree of elimination was not reached with the applied ozone dosages and therefore no value for  $\Delta$ Abs is available.

Aufgrund der Erkenntnisse in der Schweiz wurde eine neue Strategie zur bedarfsgerechten Ozonproduktion entwickelt, welche einen  $\Delta$ UV-Wert (oder auch  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>) vorgibt und diesen auch stabil hält. Aufgrund einer nachweisbaren Korrelation zwischen  $\Delta$ UV-Wert und der geforderten Eliminationsleistung ist es daher möglich, dass einerseits eine den Abwasserinhaltsstoffen angepasste Ozonmenge produziert wird und andererseits die Kontrolle der Erreichung der geforderten Eliminationsleistung mittels UV-Messtechnik erfolgt. Folglich könnte der Kläranlagenbetreiber mit dem  $\Delta$ UV-Wert die Eliminationsleistung selber überwachen (Schachtler und Hubaux, 2016). Die sogenannte BEAR-Strategie (Best Elimination, Analysis and MonitoRing) enthält sowohl Elemente einer Steuerung als auch einer Regelung und zeigte in den Laborversuchen, dass diese robust und zuverlässig funktioniert.

Bei den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass sich mit der BEAR-Strategie der  $\Delta UV$ -Wert im Tagesgang innerhalb von  $\pm 2\%$  halten lässt. Dadurch ist bedarfsgerechte Ozonzugabe möglich. Aus den Laboruntersuchungen konnte für einen  $\Delta UV$ -Wert von  $42 \pm 2\%$  eine Elimination der zwölf Schweizer Leitsubstanzen von  $82 \pm 2\%$  erzielt werden. In weiteren Untersuchungen wurde die BEAR-Strategie bei der Variation der Vorgaben für den  $\Delta UV$ -Wert getestet. Auch hier konnte belegt werden, dass die Vorgabe des  $\Delta UV$ -Wertes möglich ist und der  $\Delta UV$ -Wert mit der geforderten Eliminationsleistung korreliert (ebd.). Weiterhin wurden auf der ARA Neugut verschiedene Steuer- und Regelstrategien zur Ozonproduktion untersucht. Dabei wurden die Q- und  $UV_{IN}$ -Steuerstrategien mit der BEAR-Strategie verglichen. Nach Schachtler und Hubaux (2016) arbeiten die Q- und  $UV_{IN}$ -Steuerstrategien unter Verwendung einer volumenstrom- bzw. UV-proportionalen Ozonkonzentration, ergänzt mit diversen Abfangroutinen und Begrenzungen. Bei der Q- und der  $UV_{IN}$ -Steuerung ist weiterhin ein  $NO_2$ -Analyzer im Zulauf der Ozonung notwendig, damit die  $NO_2$ -N-Spitzen berücksichtigt werden können. Schachtler und Hubaux (2016) geben weiter an, dass im Gegensatz zu BEAR beide reine Steuerungen sind und keine Regelungselemente enthalten. Ein weiterer Nachteil dieser Strategien ist die stark schwankende Eliminationsleistung, weil die Wasserzusammensetzung nicht ausreichend berücksichtigt wird. Um nach Schachtler und Hubaux (2016) eine möglichst sichere Eliminationsleistung von  $> 80\%$  (bezogen auf die gesamte Kläranlage) zu erreichen, müssen daher bei diesen Strategien die Soll-Ozondosen mit ausreichend hoher Sicherheit (d.h. 25 bis 30 % höher als bei BEAR) festgelegt werden, was zu einer regelmäßigen Überdosierung und zur Bildung unerwünschter Oxidationsnebenprodukte führen kann. Tabelle 19 veranschaulicht einen Vergleich der verschiedenen auf der ARA Neugut getesteten Strategien. Da in der Praxis stabile  $\Delta UV$ -Werte zuverlässig erreicht und der Bedarf an Ozon gering gehalten werden konnte, ist die entwickelte BEAR-Strategie unter Nutzung des  $\Delta UV$  auf der ARA Neugut signifikant besser als die bisherigen Strategien.

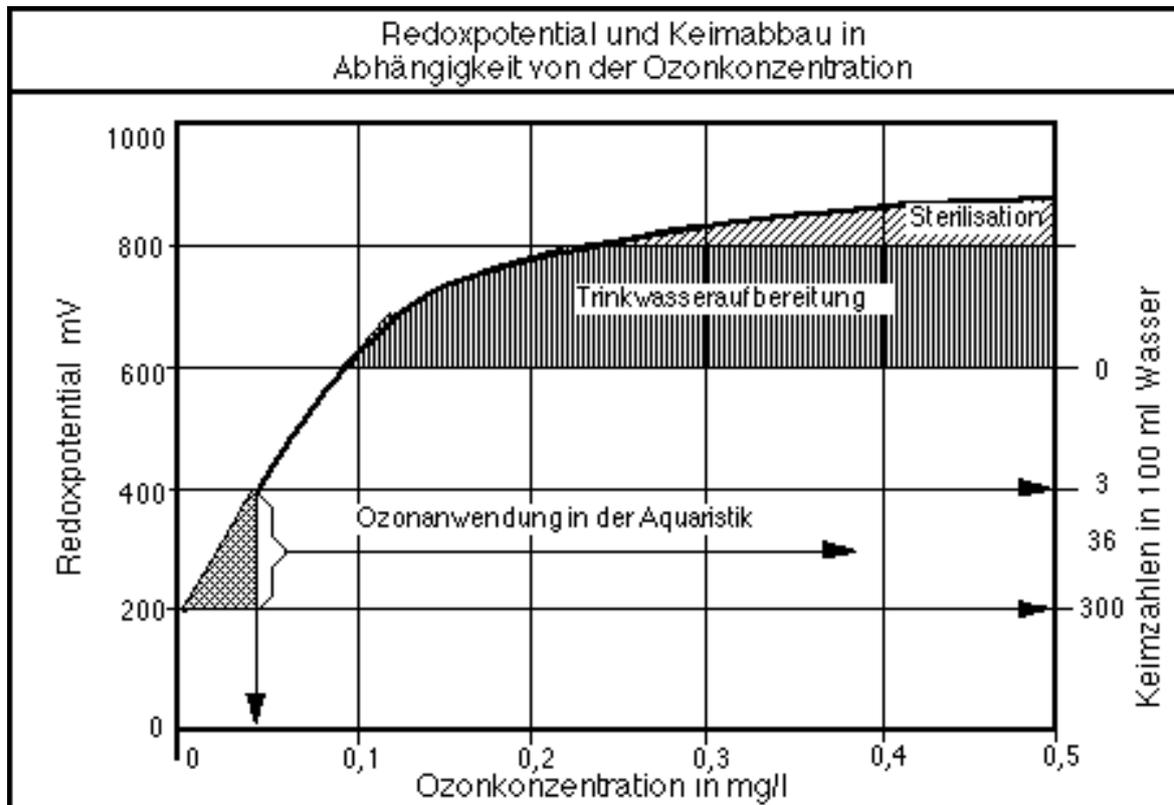
**Tabelle 19: Ergebnisse der verschiedenen auf der ARA Neugut getesteten Strategien (Schachtler und Hubaux, 2016)**

| Strategie                     | BEAR                       | Q          | $UV_{IN}$   |
|-------------------------------|----------------------------|------------|-------------|
| Ozondosis<br>[g $O_3$ /g DOC] | 0,33 – 0,50<br>Mittel 0,42 | 0,55       | 0,44        |
| $\Delta UV$ [%]               | $42 \pm 2$                 | $48 \pm 8$ | $40 \pm 6$  |
| EMV [%]                       | $82 \pm 2$                 | $88 \pm 8$ | $78 \pm 12$ |

### 5.2.6.3 Das Redox-Signal für eine bedarfsgerechte Ozondosierung

Ein für die Ozonzugabe bisher nicht relevanter Kontrollparameter zur Spurenstoffelimination ist das das Redox-Signal, welches Auskunft über das Oxidations- bzw. Reduktionsverhalten von Wässern gibt. Bekannt ist dieser Parameter aus der Trinkwasserversorgung und der Aquaristik zur Überwachung der Keimbildung (siehe Abbildung 55). Nach Wunderlin (2016) haben Anwendungen gezeigt, dass die Sensitivität zu gering ist. Die Eignung zum Einsatz für die Betriebsüberwachung ist daher vorerst als gering einzustufen. Zur Detektion eines möglichen Ozonverlusts im Ablauf des Ozonreaktors scheint das Redox-Signal aber sehr gut geeignet zu sein. Denn bei dieser Anwendung ist nicht ein genauer absoluter Messwert notwendig, sondern eine relative Veränderung des Signals ausreichend. Eine kontinuierliche Zunahme des Redox-Signals würde beispielsweise auf eine zunehmende

Ozonkonzentration im Ablauf hindeuten (Wunderlin, 2016). Auf der ARA Neugut wird das Redox-Signal zur Überwachung des Ablaufs eingesetzt (ebd.).



**Abbildung 55: Redoxpotential und Keimabbau in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration (Sander Elektroapparatbau GmbH, 2016)**

#### 5.2.6.4 Empfehlung einer geeigneten Steuer- und Regelstrategie in Weißenburg

Mit Bezug auf die zusammengefassten Erkenntnisse in den vorangegangenen Kapiteln wurden Steuer- und Regelstrategien zur bedarfsgerechten Ozondosierung formuliert. Für eine geeignete Führungsgröße zur Steuerung bzw. Regelung der Ozonzugabe müssen folgende grundlegenden Voraussetzungen gelten:

- der zu betrachtende Parameter repräsentiert die Zielgröße (Korrelation zur Spurenstoffentfernung),
- der Parameter lässt sich online reproduzierbar messen (kein Abdriften der Messwerte),
- eine ausreichende Datenbasis ist vorhanden.

Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen laufender und abgeschlossener Vorhaben eignet sich die Absorbanzmessung ( $SAK_{254}$ ) als Kontrollparameter und Steuergröße für eine bedarfsgerechte Ozonzugabe. Durch die Dosierung von Ozonung wird eine Abnahme der UV-Absorbanz generiert. Mit der Messung des  $SAK_{254}$ -Wertes im Zu- bzw. Ablauf des Ozonreaktors kann die relative Absorbanzabnahme berechnet werden, sodass eine Regelung nach relativer Absorbanzabnahme ( $\Delta UV$ -Regelung) möglich ist. Die o.g. Untersuchungen konnten bereits zeigen, dass eine direkte (empirische) Korrelation der eingebrachten Ozonmenge bzw. der Absorbanzabnahme mit der Elimination von Mikroverunreinigungen besteht. Die Einstellung der Sollozondosis erfolgt indirekt durch Vorgabe der angestrebten relativen Absorbanzabnahme (Fleiner et al., 2015).

Im Gegensatz zur aufwendigen instrumentellen Analytik (GC-MS und HPLC-MS/MS) organischer Spurenstoffe erlaubt die einfach bestimmbare UV-Absorption eine praktikable Überwachung des Betriebes großtechnischer Ozonanlagen zur Behandlung kommunaler Kläranlagenabläufe (Arge, 2013).

Darüber hinaus kann für den allgemeinen Kläranlagenbetrieb die zulaufmengenproportionale Ozondosierung als Standardverfahren für kleine Anlagen unter 100.000 EW und ohne starke Schwankungen des DOC angesehen werden (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016). Eine allgemeingültige Empfehlung für die Berücksichtigung zusätzlicher Regelgrößen kann nicht gegeben werden und muss im Einzelfall geprüft werden.

#### 5.2.6.5 Umsetzung des Steuer- und Regelkonzepts in Weißenburg

In Abstimmung mit Planer und Betreiber wurde festgelegt, dass die Steuerung/Regelung der Ozonzugabe in Anlehnung an die Untersuchungen auf der ARA Neugut in Dübendorf erfolgen soll. Hier wurde nach Fleiner et al. (2015) unter anderem:

- eine frachtproportionale Steuerung nach UV-Signal ( $SAK_{254}$ ),
- die Regelung nach relativer Absorbanzabnahme ( $\Delta UV$ -Regelung aus  $\Delta SAK_{254}$ ) und
- die volumenproportionale Steuerung (Q-Steuerung)

erfolgreich erprobt.

Für das Weißenburger Konzept wurden zunächst vier Steuer- bzw. Regelparameter berücksichtigt:

- Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm ( $\Delta SAK_{254}$ ),
- Spektraler Absorptionskoeffizient bei 436 nm ( $\Delta SAK_{436}$ ),
- Redoxpotential,
- Durchfluss/Zufluss (Q).

Für die Steuerung und Regelung der Ozonzugabe war im Zuge der Planungsphase folgende Vorgehensweise angedacht: Neben der Messung von Q (Zufluss) werden der Spektrale Absorptionskoeffizient bei 254 bzw. 436 nm sowie das Redoxpotential jeweils im Zu- und Ablauf des Ozonreaktors zur Erfassung der Differenzwerte ( $\Delta SAK$ ) gemessen. Je Parameter werden über das Prozessleitsystem eine Soll-Bandbreite und ein Zielwert vorgegeben. Die gewählte Regelstrategie kann über das Prozessleitsystem (PLS) beeinflusst werden. Durch den Vergleich der Istwerte mit den Sollwerten ergibt sich die erforderliche Ozonkonzentration, um den Zielwert  $\Delta SAK$  erreichen (Regelung der Ozonkonzentration nach Zielwert). Über die erforderliche Ozonkonzentration und die Wassermenge (Q) wird der Sollwert der Ozonmenge für die Ozonanlage vorgegeben. Zusätzliche Sicherheit bietet die Vorgabe eines Max-Wertes der Ozonkonzentration. Wird der Wert überschritten, erfolgt die Regelung über einen fest eingestellten Wert. Die Wassermenge wird nach der Berufsgenossenschaftlichen Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit ZH 1/474 „Richtlinien für die Verwendung von Ozon zur Wasseraufbereitung“ in die Überwachung einbezogen. Über Messungen der Ozonkonzentration im Ozonreaktor und im Off-Gas wird die Ozonerzeugung im Ozongenerator zusätzlich überwacht. Die Vorgabe des Sollwertes erfolgt wie oben beschrieben.

Im Wesentlichen werden somit die Parameter  $SAK_{254}$ ,  $SAK_{436}$ , Redox, die jeweils im Zu- u. Ablauf des Ozonreaktors zur Erfassung der Differenzwerte (Delta-Werte) gemessen wer-

den, die Ozonfracht im Restozon-Vernichter sowie die Ozonfracht im Auslauf des Ozonreaktors berücksichtigt. Grundsätzlich sind in das Steuer- und Regelkonzept in Weißenburg zwei Steuerstrategien und zwei Regelstrategien hinterlegt:

**Q-Proportionale Steuerung:** Die Dosierung erfolgt proportional zur anfallenden Abwassermenge (Zuflussstrom).

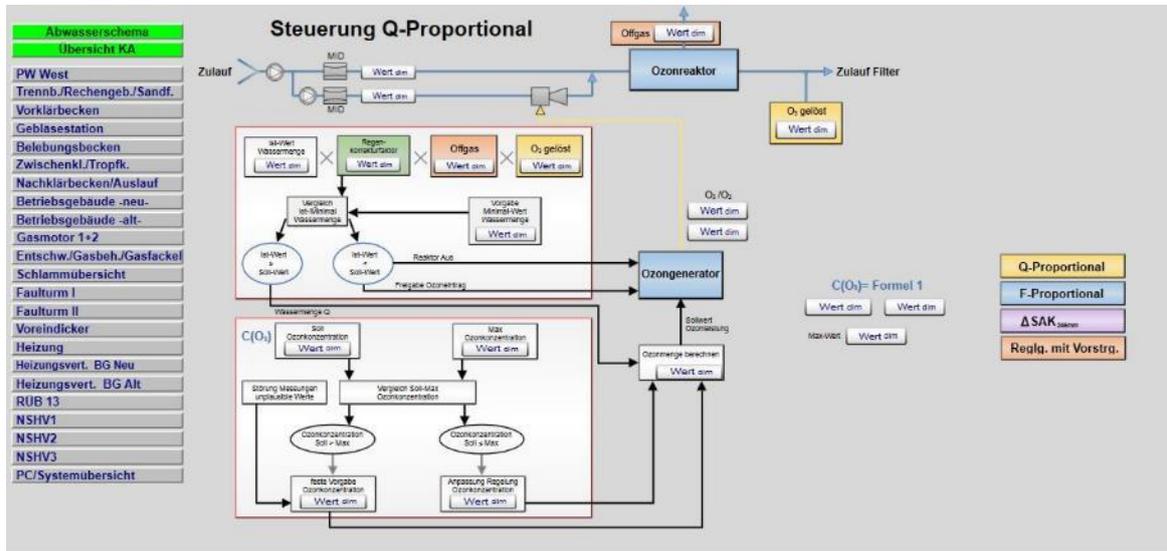


Abbildung 56: Q-Proportionale Steuerung

**Frachtproportionale (via DOC) Steuerung nach UV-Messung (UV<sub>in</sub>):** Die Dosierung erfolgt in Abhängigkeit der anfallenden Abwassermenge (Zuflussstrom) sowie in Abhängigkeit vom SAK<sub>254</sub> im Zulauf zur Ozonung.

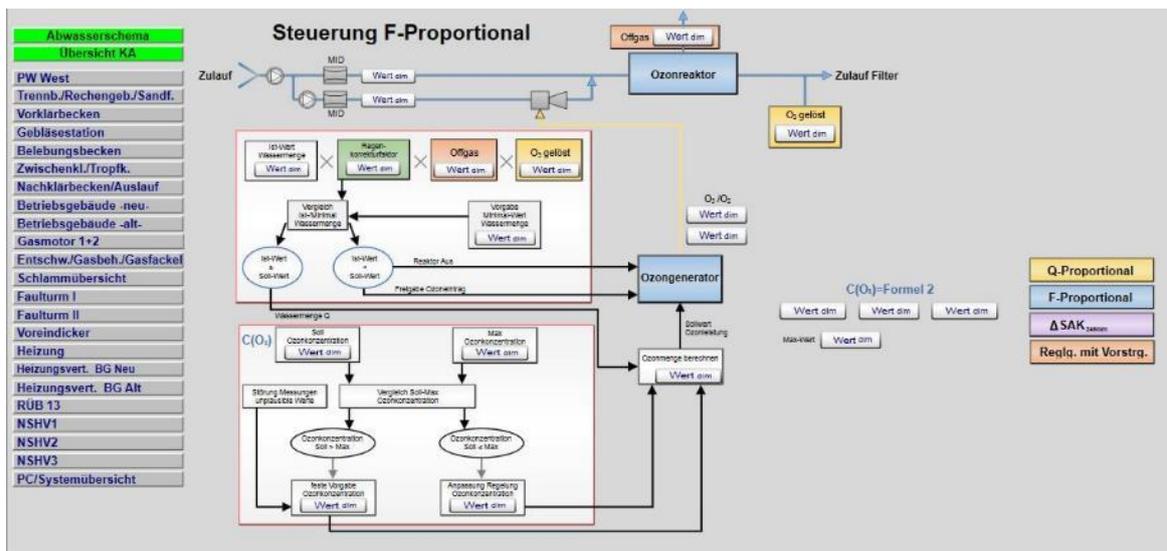


Abbildung 57: Frachtproportionale Steuerung nach UV-Messung

**Regelung nach  $\Delta SAK_{254}$ :** Die Absorbanzabnahme zwischen Zu- und Ablauf Ozonreaktor ( $\Delta SAK_{254}$ ) korreliert positiv mit der eingetragenen Ozonfracht. Zusätzlich kann getestet werden, ob diese Korrelation auch für den  $SAK_{436}$  und die Abnahme des Redoxpotentials zutrifft.

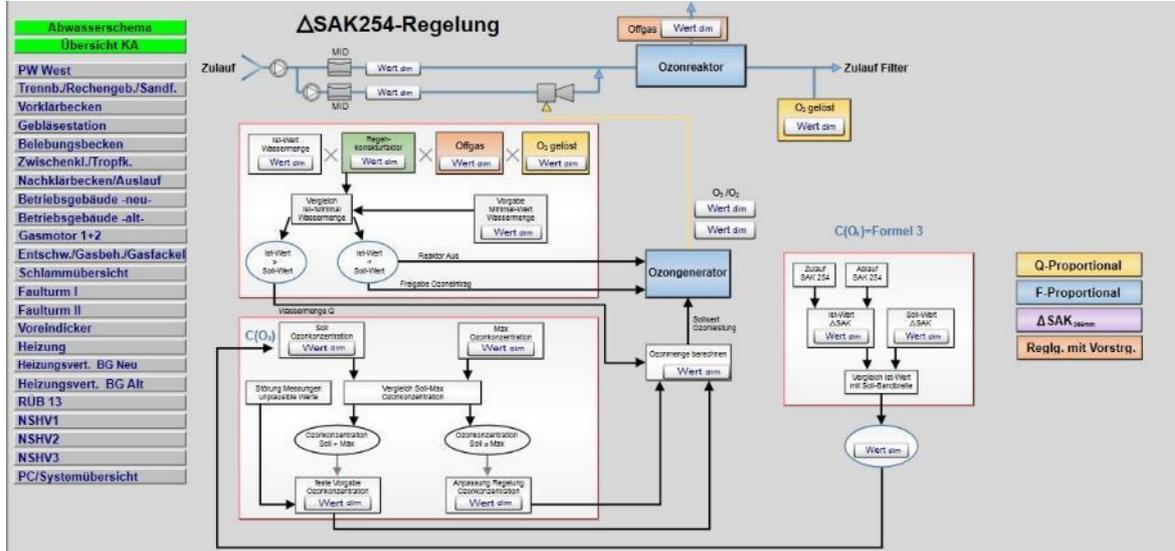


Abbildung 58: Regelung nach  $\Delta SAK$

**$\Delta SAK$  Regelung mit Vorsteuerung:** Die Regelung mit Vorsteuerung verknüpft die Frachtproportionale Steuerung mit der  $\Delta SAK$ -Regelung.

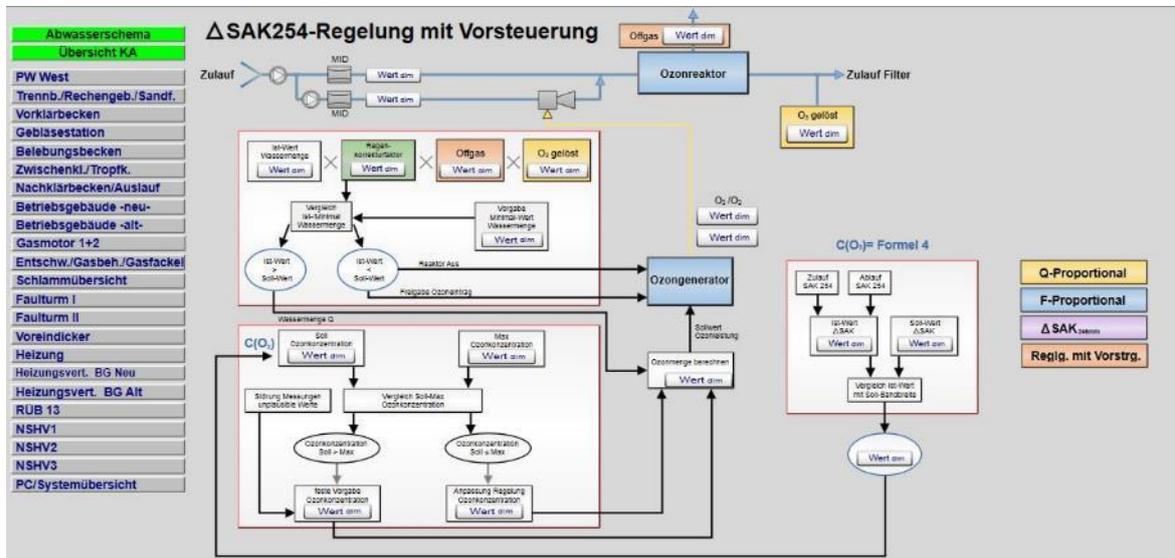


Abbildung 59:  $\Delta SAK$  Regelung mit Vorsteuerung

Die Regelung nach Änderung des Redoxpotentials in der Ozonung wurde aufgrund schwankender und nicht verwertbarer bzw. unplausibler Messwerte sowie der geringen Sensitivität in Weißenburg nicht weiterverfolgt. Während der Optimierungsphase wurde entschieden den Schwerpunkt auf die **Q-proportionale Steuerung sowie die  $\Delta SAK_{254}$ -basierte Regelung** zu legen. Da der  $SAK_{436}$  weniger gut mit der Spurenstoffelimination als der  $SAK_{254}$  korreliert und stärker durch die Trübung im Abwasser beeinflusst wird ( $SAK_{436}$  eher ein Maß für die Färbung), wurde dieser Parameter für die Regelung der Ozonzugabe als unzuverlässig und nicht stabil eingestuft und daher ebenfalls nicht weiter berücksichtigt.

### 5.2.7 Hinweise zur Auslegung und zum Betrieb der Filterstufe

Allgemeingültige Bemessungsansätze oder Hinweise zur Auslegung einer biologischen Nachbehandlung für mit Ozon behandeltes Abwasser sind derzeit nicht vorhanden. In Duisburg-Vierlinden wurde die Beckenkammer für die biologische Nachbehandlung auf eine Aufenthaltszeit von 10 min dimensioniert. Das eingesetzte Trägermaterial aus Kunststoff für die Biomasse wird mit einer grobblasigen Belüftung in Schwebelage gehalten und umgewälzt (Herbst et al., 2014).

Für die Auslegung kontinuierlich betriebener Aktivkohlefilter zur Spurenstoffentfernung existiert bisher auch kein Regelwerk. Die Aktivkohlestufe in Weißenburg soll nicht als reine Adsorptionsstufe (GAK-Stufe) betrieben werden, sondern als biologisch aktivierter Aktivkohlefilter (BAK-Filter). Die biologische Aktivität im Filtermedium mit granulierter Aktivkohle wird gegenüber konventionellen Filtermedien wie z.B. Quarzsand oder Hydroanthrazit höher eingeschätzt. Dadurch steht potentiell mehr Aufwuchsfläche zur Verfügung. Die Struktur und Oberfläche bietet eine geschützte Umgebung für die Kolonisation von Mikroorganismen und deren Schutz vor Scherkräften. In diesem Zusammenhang wird auch von biologisch aktiver GAK-Filtration gesprochen. Dabei ist es möglich sowohl gelöste als auch durch Adsorption gebundene organische Substanzen biologisch abzubauen bzw. zu transformieren (DWA, 2018). Die Gesamteliminationsleistung mit granulierter Aktivkohle wird daher höher eingestuft als nur durch reine Adsorption. Im Englischen wird Begriff der „biological activated carbon (BAC) filtration“ verwendet. Beim biologisch aktivierten Aktivkohlefilter (BAK-Filter) wird die Kohle nicht ausgetauscht, wenn die Adsorptionskapazität erschöpft ist, sondern der Filter wird bis zu zehn Jahre betrieben. Dadurch soll sich im Filter ein Biofilm ausbilden, der die adsorbierten biologisch abbaubaren Substanzen abbaut und so Adsorptionskapazitäten wieder freigibt (Bioregeneration). Die Vorteile eines biologisch aktivierten Kohlefilters in Kombination mit einer Vorozonung wurden bereits in Kapitel 5.1 beschrieben. Die Prozesse, welche vorwiegend an einem biologisch aktivierten Kohlefilter stattfinden, sind die Adsorption und der biologische Abbau. Bei der Auslegung des biologischen aktivierten Filters ist auch der Prozess des biologischen Abbaus zu berücksichtigen. Voraussetzung hierfür ist die Aktivierung des Metabolismus von Bakterien, welche die Restorganik und die verbliebenen Transformationsprodukte aus der Ozonung abbauen können (Adaption des Metabolismus für die Transformationsprodukte). Die Effektivität bzw. die Leistungsfähigkeit des biologischen Abbaus sind dabei abhängig von (Rattier et al., 2012b; Reungoat et al., 2012b):

- der Kontaktzeit im Filter (Empty Bed Contact Time (EBCT)),
- Eigenschaften des ozonierten Abwassers,
- Eigenschaften der Kohle (Korngrößenverteilung, Inhaltsstoffe und Zusammensetzung (Sauerstoffanteil, Schwefel, Stickstoff),
- Bioregeneration am Filtermaterial,
- Metabolismus der Bakterien.

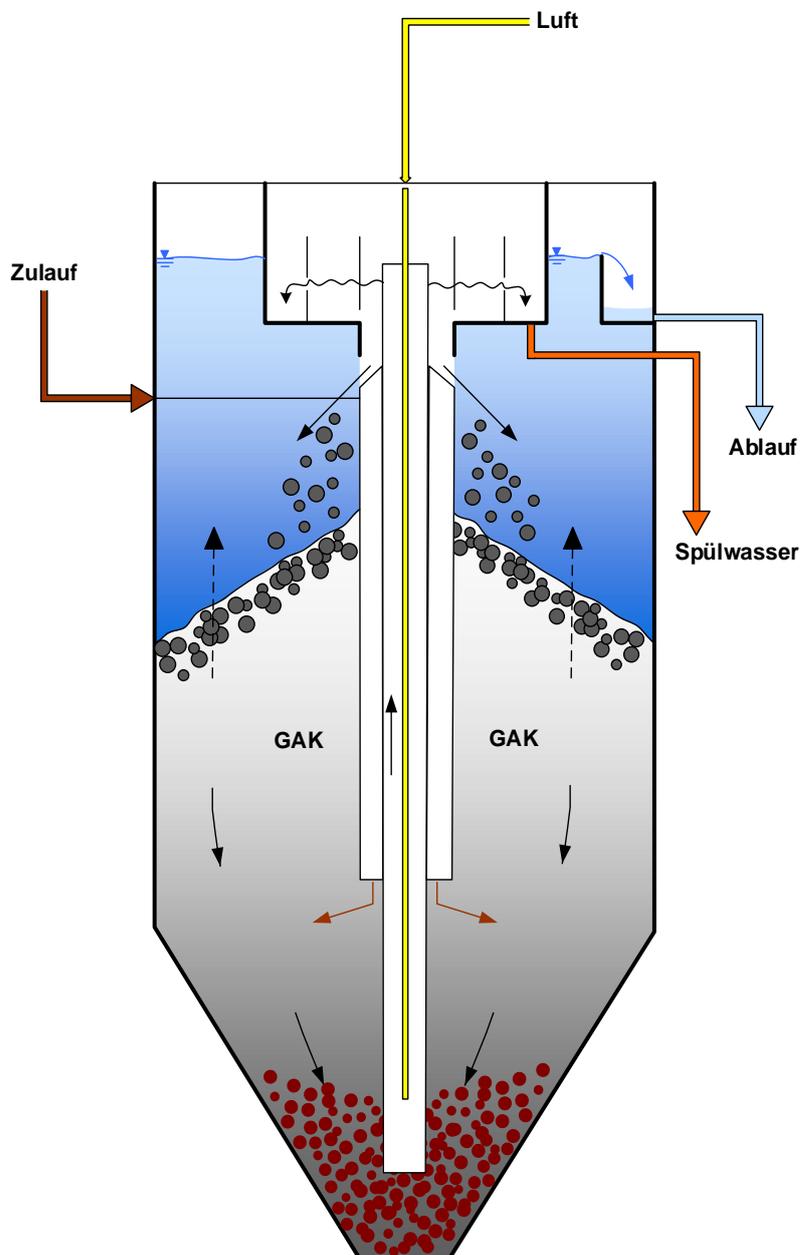
Grundsätzlich sollte ein biologisch aktivierter Filter wie ein konventioneller Abwasserfilter betrieben werden. Während des Betriebs sollte aber die Etablierung eines Biofilms gegeben sein. Dabei sind der Feststoffrückhalt (Partikelfrachten, Restorganik) und der damit verbundene Druckanstieg zu berücksichtigen. Diese werden durch die Wahl des Filtermediums und der Filtergeschwindigkeit beeinflusst. Zur Charakterisierung des GAK-Filtrationspro-

zesses und zur Auslegung können daher die Höhe der GAK-Schicht [m] und die Filtergeschwindigkeit [m/h] (Quotient aus zugeführten Volumenstroms und der Filterfläche) herangezogen werden. In DWA (2018) wird beschrieben, dass der Quotient aus Filtergeschwindigkeit und Höhe der GAK-Schicht den Adsorptionsprozess hinreichend charakterisiert, so dass oftmals auf die alleinige Größe der Leerbettverweilzeit (engl. Empty Bed Contact Time, EBCT [min]) zurückgegriffen wird. Die EBCT entspricht der Aufenthaltszeit, die das Wasser als zu behandelndes Medium benötigt, um das vom GAK-Bett beanspruchte Volumen als leeres Volumen zu durchströmen (DWA, 2018). Nach Li et al. (2006) wird eine optimale EBCT von 15 min für den Ozon-BAC-Prozess angegeben. Bei Untersuchungen in Australien (vgl. Reungoat et al., 2012b) wurden für drei verschiedene großtechnische Anlagen mit vergleichbarer Abwasserzusammensetzung 9, 18 und 45 Minuten für die EBCT angesetzt. Dabei hat sich gezeigt, dass bei einer EBCT von 18 Minuten der Wirkungsgrad zur Elimination von Spurenstoffen durch den biologischen Abbau deutlich höher ist als bei 9 min. Eine EBCT von 45 min bewirkte zwar eine weitere Reduktion von DOC, aber keine weitere signifikante Reduktion von Spurenstoffen (Reungoat et al., 2012b). Eine relativ lange Kontaktzeit erlaubt es, dass Bakterien sich etablieren können, um Spurenstoffe über den biologischen Abbau zu eliminieren. Untersuchungen aus Australien, China und der Schweiz (vgl. Reungoat et al., 2012b; Rattier et al., 2012b; Böhler et al., 2013; Reungoat et al., 2012a; Reungoat et al., 2010; Li et al., 2006; Liang et al., 2007) deuten darauf hin, dass eine minimale EBCT von  $> 15$  min für einen weitergehende Spurenstoffreduktion auszeichnend ist. In den Untersuchungen auf der Kläranlage Emmingen-Liptingen betrug die mittlere gemessene EBCT (abhängig vom Zufluss) bei einem kontinuierlich betriebenen GAK-Filter 30 min (DWA, 2018; Locher et al., 2015).

Auch die zuvor eingesetzte Ozondosis spielt eine entscheidende Rolle. Je nach Abwasserzusammensetzung ist die Ozonzehrung bzw. das Oxidationspotenzial der Inhaltsstoffe maßgeblich für das Vorhandensein von DOC (organische Restfracht) und biologisch abbaubaren Oxidationsprodukten in der Nachbehandlungsstufe. Dabei fördert die Ozonung die biologische Aktivität im Filter (Erhöhung der Bioverfügbarkeit der DOC-Fractionen, vgl. Kapitel 5.1). Der Wirkungsgrad der biologischen Nachbehandlungsstufe wird neben der Adsorptionsfähigkeit somit auch von der biologischen Abbaubarkeit der vorhandenen Abwasserinhaltsstoffe beeinflusst. Biologischer Abbau kann nur stattfinden, wenn genügend organische Substanz bzw. organische Spurenstoffe/Oxidationsnebenprodukte vorhanden sind. Es ist davon auszugehen, dass der Adsorptionsprozess in der Anfangsphase dominieren wird. Die Bildung eines Biofilms und die darin ablaufenden Diffusionsprozesse werden vermutlich erst eintreten, wenn die Adsorptionskapazität des Filters erschöpft ist (Simpson, 2008).

Biologisch aktivierte Aktivkohlefilter als kontinuierlich betriebene Systeme (vgl. Abbildung 60) befinden sich noch im Forschungsstadium (vgl. Locher et al., 2015; Montag et al., 2015; Hertel et al., 2014; Diel und Sack, 2018). Auch hier ist ein in der Praxis üblicher Auslegungsparameter die Filtergeschwindigkeit. Die maximal zulässige Filtergeschwindigkeit ist bei der GAK Anwendung geringer als beim klassischen Sandfilter. Sie sollte in Abhängigkeit der verwendeten Korngrößenverteilung festgelegt werden. Zu hohe Filtergeschwindigkeiten können auch hier zu einer Fluidisierung der GAK-Schüttung führen und den Feststoffrückhalt beeinträchtigen. In Diel und Sack (2018) werden Filtergeschwindigkeiten bei der Spu-

renstoffelimination mit einem kontinuierlich betriebenen GAK-Filter von 7 bis 10 m/h empfohlen. Zur Auslegung eines Sandfilters können Filtergeschwindigkeiten auch bis zu 15 m/h gewählt werden.



**Abbildung 60: Schema kontinuierlich betriebener Filter (DWA, 2018)**

In Weißenburg wurde die Filtergeschwindigkeit bei einem maximalen Zufluss von 60 l/s je Filter auf 8 m/h für den Aktivkohlefilter und Sandfilter festgelegt. Beide Filter sind baugleich, damit der Sandfilter ggf. zukünftig oder für weitere Untersuchungen auf GAK umgerüstet werden kann.

Die Kontaktzeit liegt bei maximalen Zufluss bei rund 15 min. Werden die Zuflüsse geringer, vergrößert sich dementsprechend die EBCT. Tabelle 20 fasst die wesentlichen Auslegungsdaten und Kenngrößen (gemäß Leistungsverzeichnis (LV)) zusammen.

**Tabelle 20: Auslegungsdaten und Kenngrößen Filterstufe in Weißenburg**

| Allgemeine Parameter/Kenngrößen                                    | Werte                                      |
|--|--|
| Filterbetthöhe bei Aktivkohlefilter und Sandfilter                 | 2 m  |
| Maximaler Zufluss  | 60 l/s                                     |
| Minimaler Zufluss  | 20 l/s                                     |
| AFS im Zulauf zur Filtration (maximal)                             | 20 mg/l                                    |
| AFS im Zulauf zur Filtration (im Mittel)                           | < 5 mg/l                                   |
| Parameter/Kenngrößen Aktivkohlefilter                              | Werte                                      |
| Oberflächenbelastung Aktivkohlefilter (maximal)                    | 8 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> •h        |
| Volumen Filtermaterial Aktivkohlefilter                            | 62 m <sup>3</sup> (rund 30 Tonnen)         |
| Schüttdichte Filtermaterial Aktivkohlefilter                       | 460 kg/m <sup>3</sup>                      |
| Körnung Aktivkohle   | 8 x 30 Mesh                                |
| Spülabwassermenge je Wäscher bei Dauerbetrieb bei Aktivkohlefilter | 1,2 - 2 m <sup>3</sup> /h/Filter (laut LV) |
| Gesamtluftbedarf bei Aktivkohlefilter                              | 12,8 Nm <sup>3</sup> /h (laut LV)          |
| Parameter/Kenngrößen Sandfilter                                    | Werte                                      |
| Oberflächenbelastung Sandfilter (maximal)                          | 8 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> •h        |
| Volumen Filtermaterial Sandfilter                                  | 64 m <sup>3</sup> (96 Tonnen)              |
| Schüttdichte Filtermaterial Sandfilter                             | 1.500 kg/m <sup>3</sup>                    |
| Körnung Sand   | 1 - 2 mm                                   |
| Spülabwassermenge je Wäscher bei Dauerbetrieb bei Sandfilter       | 4 - 5 m <sup>3</sup> /h/Filter (laut LV)   |
| Gesamtluftbedarf bei Sandfilter                                    | 44 Nm <sup>3</sup> /h (laut LV)            |

Für einen sicheren und effektiven Filterbetrieb sind im Zuge der Planungsphase folgende Betriebsparameter unter Berücksichtigung der Eigenschaften des einzusetzenden Filtermediums (Korngröße, Dichte etc.) mit den Herstellerfirmen zu definieren (DWA, 2018):

- Filtergeschwindigkeit,
- Sandsinkgeschwindigkeit,
- Spülzeiten/Spüleinstellungen,
- Waschwassermenge.

### 5.2.8 Verfahrensschema und Anlagenbestandteile der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg

Die Planung der Vorzugsvariante wurde nach EU-weiter Ausschreibung der Planungsleistung (VOF-Verfahren) an das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner vergeben. Ein Grundfließbild der in Weißenburg errichteten Verfahrenskombination bestehend aus Ozonung mit einer nachgeschalteten zweistraßigen Filtration ist in Abbildung 62 dargestellt.

Die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg wurde zwischen dem Ablauf der beiden bestehenden Nachklärbecken und dem bestehenden Auslaufmessschacht der Kläranlage angeordnet (siehe Abbildung 61). Die Zuleitung des Ablaufs der beiden Nachklärbecken zur vierten Reinigungsstufe erfolgt über eine Dükerleitung vom Nachklärbecken 2 sowie eine Freigefälleleitung vom Nachklärbecken 1, welche in einem Schacht vor dem Maschinengebäude zusammengeführt werden. Die nachfolgende Sammelleitung DN 600 führt in den Pumpensumpf für Zulaufpumpen im Maschinenkeller. Die Zulaufpumpen werden über ein MID und den Füllstand im Pumpenvorschacht geregelt. Der maximale Zufluss von 430 m<sup>3</sup>/h wird dabei nicht überschritten. Zuflüsse von über 430 m<sup>3</sup>/h werden im Bypass über die bestehenden Leitungen an der Anlage vorbei geleitet. Dabei wird bei höheren Zuflüssen das Abwasser in den beiden Zulaufleitungen zurück gestaut und über eingebauten Schwellen

über die bestehenden Ablaufleitungen dem Auslauf der Kläranlage unbehandelt zugeführt. Der Ablauf der vierten Reinigungsstufe wird von einem Sammelschacht im Osten des Maschinengebäudes im freien Gefälle der bestehenden Ablaufleitung des Nachklärbeckens 2 zugeführt und somit ebenfalls über das bestehende Auslaufbauwerk dem Gewässer zugeführt. Eine Umfahrung der Ozonung ist über eine Dükerleitung DN 400 aus dem Zulaufschacht in den Ablaufschacht Ozonung möglich. Bei einer Verlusthöhe in der Filtration von mehr als 60 cm kann die Ozonung über eine separate Leitung vom Zulaufpumpwerk aus umgangen werden. Eine Umgehungsleitung der Filtration war nicht vorgesehen, damit ist ausgeschlossen, dass ozoniertes Abwasser ohne Nachbehandlung in das Gewässer gelangen kann. Der Ablauf aus dem Ozonreaktor wird über eine in der Mitte geteilte Schwelle in nachfolgenden Schächte abgeleitet. Dabei unterläuft die Zulaufleitung zum zweiten Filter (Aktivkohlefilter) den Ablaufschacht der Ozonung zum ersten Filter (Sandfilter) als Dükerleitung. Die Verteilung der Wassermengen wird über die Halbierung der Schwellenlängen gesteuert. Die Ableitung aus der vierten Reinigungsstufe erfolgt über einen geteilten Ablaufschacht, der das behandelte Abwasser aus beiden Filtern parallel oder nur aus der zweiten Filterstufe im freien Gefälle zur vorhandenen Ablaufleitung des Nachklärbeckens 2 ableitet.

Die Anlage zur Spurenstoffelimination in Weißenburg besteht aus den Anlagenteilen:

- Zulaufpumpwerk mit drei trocken aufgestellten, FU-geregelten Pumpen mit 20 - 60 l/s (eine Pumpe dient als Reserve),
- Sauerstofftank (Durchmesser ca. 2 m, Höhe ca. 7 m) mit Kaltvergaser und Verdampfer,
- Ozonerzeuger mit maximaler Produktionskapazität von 2,7 kg Ozon pro Stunde,
- Kontaktbecken mit 144 m<sup>3</sup> und den Abmessungen (L x B x H) 7,10 x 3,3 x 6,7 m,
- Wärmetauscher und Kühlung des Ozongenerators mit gereinigtem Wasser aus dem Sandfilter,
- Eintragungssystem (Pumpe-Injektorsystem),
- katalytischer Restozonvernichter sowie
- nachgeschaltete kontinuierlich betriebene Filtrationsstufen mit automatischer Reinigung zur diskontinuierlichen Umwälzung des Filterbettes durch Mammutpumpen.

Der Ozonreaktor wird über ein Zulaufrohr DN 250 mit Öffnungen nahe des Reaktorbodens mit dem Ozonwassergemisch beschickt. Die Ozonzugabe erfolgt vor dem Reaktor über das Pumpe-Injektorsystem. Die Strömung im Reaktor wird über Leitwände gesteuert (s. Kapitel 4.2.3). Die Zugänglichkeit zum Reaktor ist über eine Drucktür im Maschinenkeller und zwei Öffnungen im Reaktordach gesichert. Diese sind jeweils wasser- und gasdicht ausgeführt.

Die der Ozonung nachgeschaltete Filterstufe wird zweistraßig mit einer Aktivkohlefilter-Straße mit vier Filterzellen sowie einer Sandfilter-Straße mit vier Filterzellen ausgeführt. Die Filteranlagen werden als kontinuierlich betriebene Filter ausgeführt (Betonbauweise). Bei dieser Bauweise werden je vier Filterzellen in ein gemeinsames Betonbecken eingesetzt und bilden ein zusammenhängendes Filterbett. Am Beckenboden angebrachte Edelstahlkonen stellen die gleichmäßige Verteilung des Filterbettes sicher. Über ein Zuflussrohr und einen Einlaufverteiler wird jede Filterkammer mit dem zu filtrierenden Wasser beschickt. Durch die Aufwärtsströmung im Filterbett erfolgt die Reinigung des Wassers. Verunreinigungen werden im Filterbett gehalten. Das filtrierte Wasser verlässt die Filter über eine seitlich angeordnete Ablaufrinne. Das Wasser wird über die Überlaufrinnen abgeleitet, in

einem Schacht gesammelt und gemeinsam mit dem Bypass vom Nachklärbecken 1 über den Auslaufmessschacht der Schwäbische Rezat zugeführt. Eine zentrisch, innerhalb des Einlaufrohres angebrachte Mammutpumpe befördert den verschmutzten Sand bzw. die Aktivkohle vom Konus jedes Filters nach oben in den Wäscher. Im Wäscher wird das verschmutzte Filtermaterial durch einen kleinen Teilstrom des Filtrats gewaschen. Das so gereinigte Filtermaterial rieselt auf das Filterbett zurück. Das anfallende Filterspülwasser wird in einem südlich am Maschinengebäude angehängten Schacht gesammelt und mittels einer Pumpe dem Zwischenklärbecken mit einer ca. 90 m langen Druckleitung zugeführt. Dort können sich Feststoffe absetzen und das Wasser wird in den internen Kläranlagenkreislauf zurückgeführt. Ein kontinuierlich betriebener Filter hat den Vorteil, dass die Filtration zum Zwecke der Spülung nicht unterbrochen werden muss (DWA, 2018). Beide Filterstraßen werden baugleich ausgeführt, um eine spätere Umrüstung auf Aktivkohle zu ermöglichen. Für zukünftige Untersuchungen im Rahmen des Pilotprojekts ist die Möglichkeit der Reihenschaltung des Sandfilters vor dem Aktivkohlefilter vorgesehen. Dafür werden die beiden Ablaufschächte der Ozonung durch Öffnen des Zwischenschiebers verbunden und der gesamte Ablauf Ozonreaktor über den Sandfilter geschickt. Der Zulauf wird dabei in der Steuerung auf maximal 60 l/s begrenzt. Die Überleitung vom Sandfilter in den Aktivkohlefilter erfolgt über eine Pumpe, die im Maschinenkeller trocken aufgestellt ist.

Die Ausschreibung und Vergabe der Bauleistungen erfolgte im Sommer 2016. Der Bau der vierten Reinigungsstufe startete im September 2016. Die Anlage ging Anfang Oktober 2017 in Betrieb.



**Abbildung 61:** Geplanter Standort der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG (Zech und Schatz, 2015)

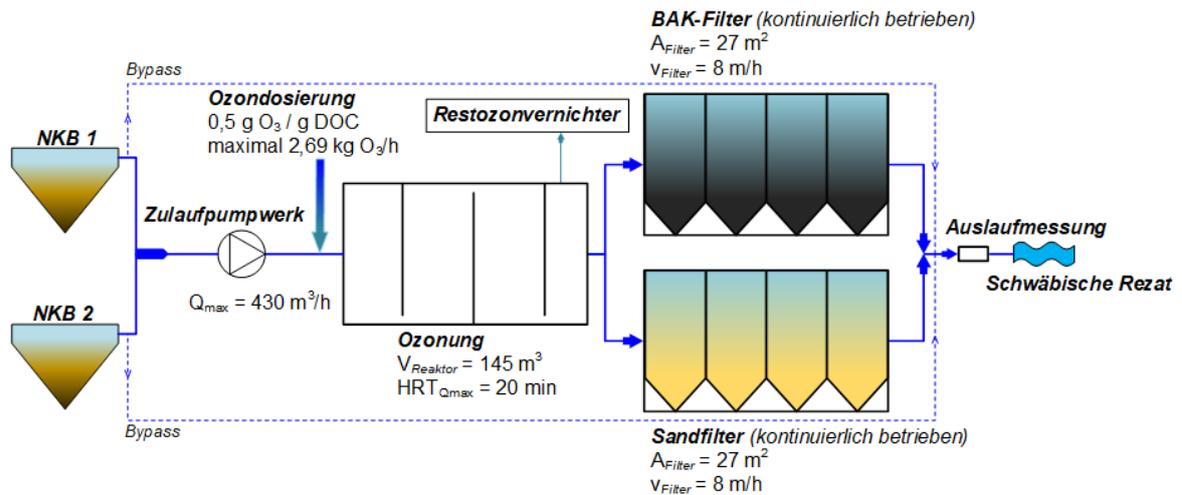


Abbildung 62: Grundfließschema der vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg (Rödel et al., 2017)

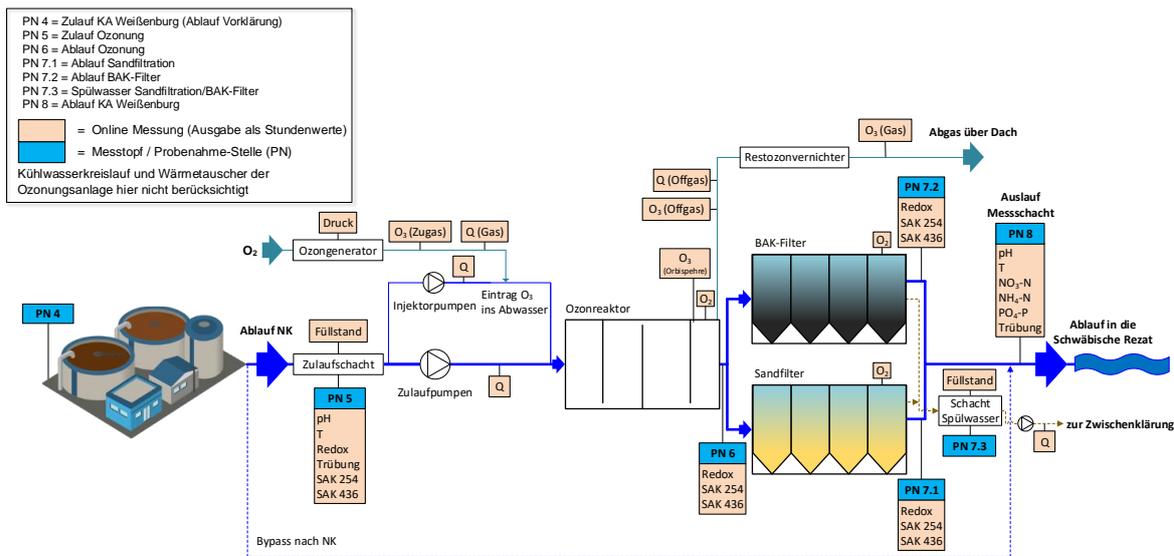
## 6 Untersuchungen und Ergebnisse im Pilotprojekt

In diesem Kapitel werden das Untersuchungsprogramm mit den gewählten Probenahme- und Messstellen, das angestrebte Reinigungsziel sowie die in der vierten Reinigungsstufe verbaute Messtechnik vorgestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse zu den Spurenstoffuntersuchungen vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe und die Ergebnisse zu den Spurenstoffuntersuchungen aus der Versuchsphase 1 mit vierter Reinigungsstufe präsentiert. In Versuchsphase 1 (Oktober/November 2017 bis August/September 2018) sollte u.a. der Wirkungsgrad der Ozonung, des Sandfilters und des Aktivkohlefilters untersucht werden. Für die Steuerung der Ozondosierung wurde die volumenproportionale Steuerung gewählt. Die Menge an Ozon wird dementsprechend proportional zum Zufluss der vierten Reinigungsstufe dosiert und mit einem fixen Sollwert berechnet. Für die Berechnung der Soll-dosis wird ein DOC Wert bestimmt, welcher auf der Kläranlage regelmäßig gemessen wird. Schlussendlich wird eine vom DOC abhängige spezifische Ozondosis vorgegeben. Für Versuchsphase 1 wurde eine spezifische Ozondosis bis Juni 2018 von 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC gewählt. Um den Einfluss einer höheren Ozondosis auf die Spurenstoffelimination und Absorbanzabnahme zu untersuchen, wurde die Ozonanlage ab dem 13.06.2018 mit einer spezifischen Ozondosis von 0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC gefahren.

Anschließend werden in diesem Kapitel auch die Methoden und Ergebnisse bezüglich Fisch- und Muschelmonitoring, mikrobiologisch-hygienischer Parameter und endokrin aktiver Substanzen behandelt.

### 6.1 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM IN WEIßENBURG

Um die Leistungsfähigkeit der vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage und den Zustand des aufnehmenden Gewässers nach Inbetriebnahme beurteilen zu können, wurde in Abstimmung mit dem LfU ein Untersuchungsprogramm konzipiert und der Umfang für die erforderliche Probenahme und Analytik festgelegt. Die Probenahmen im Gewässer und auf der Kläranlagen sowie die Analysen erfolgten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt. Weiterhin wurde eine Reihe von Online-Messgrößen festgelegt, welche u.a. in Echtzeit den Betriebszustand der Anlagenkomponenten erfassen und für die Steuer- und Regelstrategie und Überwachung der Anlagenprozesse eine Rolle spielen. Die Ausgabe der Online-Messdaten erfolgt in einem Datenreport als Stunden- und Tageswerte. In Abbildung 63 sind die wichtigsten Probenahmestellen (PN) sowie Online-Messstellen auf der Kläranlage aufgeführt.



**Abbildung 63: Übersicht über die Probenahme- und Messstellen**

Ergänzend zu den auf der Kläranlage errichteten Probenahmestellen (vgl. Abbildung 64) wurden auch Probenahmestellen zur Untersuchung des Gewässers (Schwäbische Rezat) und für das Fisch- und Muschelmonitoring ausgewählt (siehe Tabelle 21).



**Abbildung 64: Probenahmesystem auf der Kläranlage**

**Tabelle 21: Probenahmestellen im Gewässer**

| Probenahmestellen-Nr.  | Details  | Bild  |
|--|--|---|
| <b>PN 1:</b> Schwäbische Rezat oberhalb Kläranlage Dettenheim                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewässer parallel zur Straße (Abstand ca. 1 m),</li> <li>• sehr geringe Tiefe, sehr geringer Abfluss und kein Stromanschluss verfügbar,</li> </ul>  |    |
| <b>PN 2:</b> Schwäbische Rezat oberhalb Kläranlage Weißenburg                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ca. 50 m nach der Einmündung des Stadtgrabens (Stadtgraben kann bei Niederschlägen relevante Wassermengen aus dem Stadtgebiet Weißenburg eintragen!),</li> <li>• ca. 250 m vor der Einleitung der KA Weißenburg,</li> <li>• Nutzung des Geländes der Spedition Wüst; Stromanschluss über Spedition möglich,</li> <li>• Standort für Fisch- und Muschelmonitoring</li> </ul> |   |
| <b>PN 3:</b> Schwäbische Rezat unterhalb der Kläranlage Weißenburg (Silbermühle) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ca. 200 m oberhalb der Brücke, da gereinigtes Abwasser der Silbermühle vor der Brücke noch eingeleitet wird!</li> <li>• Stromanschluss über Silbermühle möglich,</li> <li>• Standort für Fisch- und Muschelmonitoring</li> </ul>  |  |

### 6.1.1 Zielsetzung

Im Vorhaben wird eine Eliminationsrate von mindestens 80 % (bezogen auf Gesamtablauf zu Ablauf Vorklämung der Kläranlage) angestrebt. Das Eliminationsziel beinhaltet eine 80 %-tige Elimination bzgl. der Summe von zwölf ausgewählten Indikatorsubstanzen (Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Tolytriazol, Venlafaxin). Die Spurenstoffentnahme von 80 % in der gesamten Kläranlage (mit vierter Reinigungsstufe) soll bei einem Zufluss von  $\leq 430 \text{ m}^3/\text{h}$  zur Kläranlage (ohne Umfahrung) sicher erreicht werden (Gesamteliminationsrate in der Kläranlage in Abhängigkeit vom Zufluss zur Kläranlage, siehe dazu Kapitel 6.7). Dabei soll die Gesamtreduktion in der Kläranlage rund 80 % im Jahresdurchschnitt betragen (da Teilstrombehandlung mit 86 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe).

Die ermittelte Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe ergibt sich aus dem Mittelwert der Summe der einzelnen Eliminationsraten der Einzelstoffe. Die Messungen erfolgen mo-

natlich. Tabelle 22 fasst die wichtigsten Merkmale der Probenahme und die Ziele der Erfolgskontrolle für Weißenburg im Vergleich zu anderen Ländern/Bundesländern zusammen.

**Tabelle 22: Merkmale der Probenahme und Ziele der Erfolgskontrolle (Eßlinger, 2017)**

|  | BaWü (KOMS Handlungsempf.)        | NRW (ARGE Komp. Zentr.)                                   | Schweiz (UVEK Vorgaben)  | Weißenburg (abgest. Vorschlag)                              |
|--|-----------------------------------|---|--|---|
| <i>Probeninformation</i>   | 24 h Mischproben                  | 24 h Mischproben  | 2x24 h Mischproben   | 24 h Mischproben  |
|  | volumenproportional               | volumenproportional                                       | im Verhältnis der Q-Mengen gemischt  | volumenproportional   |
| <i>Probenahmeintervall Indikatoren</i>                           | Beprobung<br>1 x pro Messkampagne | Beprobung mind. 5x pro<br>Messkampagne für red.<br>Umfang | 24 Proben im 1. Betriebsjahr<br>12 Proben im 2. Betriebsjahr<br>zusätzlich 4 Proben/Jahr durch<br>Kanton | 1x wöchentlich<br>(für Versuchsbetrieb)                     |
| <i>Probenahmestellen (zur Berechnung des Eliminationsgrades)</i> | Rohzulauf od. Ablauf VK           | Ablauf VK   | Rohzulauf (i.d. Praxis Ablauf VK)  | Ablauf VK   |
|  | Gesamtablauf KA                   | Gesamtablauf KA   | Gesamtablauf KA  | Ablauf Sandfilter<br>Ablauf BAK-Filter<br>(Gesamtablauf KA) |
| <i>Probenaufbereitung</i>  | 0,45 µm membranfiltriert          | k.A.  | k.A.   | zentrifugiert 20.000 rpm                                    |
| <i>Wetterlage</i>  | vorrangig Trockenwetter           | Trockenwetter   | Trockenwetter oder leichtes Regenwetter  | keine Vorgabe   |
| <i>Eliminationsziel</i>  | 80% bzgl. Summe aller Indikatoren | 80% bzgl. Jahresmittel aller Indikatoren                  | 80% bzgl. Jahresmittel v. mind. 6 ausgew. Indikatoren  | 80% bzgl. Summe d. Indikatoren                              |

Ursprünglich war eine Probenahme und Analytik des Gesamtablaufs der Kläranlage (PN 8) auf Spurenstoffe nicht vorgesehen. Stattdessen war geplant, die Abläufe der beiden Filterstraßen zu beproben (Sandfilter = PN 7.1; Aktivkohlefilter = PN 7.2). Daher bezieht sich der Nachweis der erwünschten Eliminationsrate (80 %) auf die Eliminationsrate bezüglich Ablauf der Vorklärung zum Ablauf der vierten Reinigungsstufe (Sandfilter bzw. Aktivkohlefilter). Wenn die entsprechenden Volumenströme und die Spurenstoffkonzentrationen im Ablauf der Vorklärung bekannt sind, kann über eine Mischungsrechnung die Gesamteliminationsleistung der Kläranlage ermittelt werden:

*Berechnung der Eliminationsrate bei Volumenströmen zur vierten Reinigungsstufe  $\leq 430 \text{ m}^3/\text{h}$  (Bypass springt nicht an; Volumenstrom Ablauf Nachklärung = Zuflussstrom Ozonung) und vorläufiger Nicht-Beprobung des Gesamtablaufs der Kläranlage (PN 8):*

$$\text{Eliminationsrate KA [\%]} = 100 \times \left(1 - \frac{c_{SF+BAK}}{c_{VK}}\right)$$

$$c_{SF} Q_{SF} + c_{BAK} Q_{BAK} = c_{SF+BAK} Q_{Ozon}$$

$$Q_{Ozon} = Q_{SF} + Q_{BAK}$$

$$c_{SF+BAK} = \frac{c_{SF} Q_{SF} + c_{BAK} Q_{BAK}}{Q_{Ozon}}$$

mit  $c_{VK}$  = Konzentration Ablauf Vorklärung (PN 4);  $c_{SF}$  = Konzentration Ablauf Sandfilter (PN 7.1);  $c_{BAK}$  = Konzentration Ablauf Aktivkohlefilter (PN 7.2);  $Q_{Ozon}$  = Zuflussstrom Zulauf Ozonung;  $Q_{SF}$  = Zuflussstrom Sandfilter;  $Q_{BAK}$  = Zuflussstrom Aktivkohlefilter;

Berechnung der Eliminationsrate bei Volumenströmen zur vierten Reinigungsstufe  $\geq 430 \text{ m}^3/\text{h}$  (Bypass springt an; Volumenstrom Ablauf Nachklärung > Zuflussstrom Ozonung) und vorläufiger Nicht-Beprobung des Gesamtablaufs der Kläranlage (PN 8):

$$\text{Eliminationsrate KA [\%]} = 100 \times \left(1 - \frac{c_{\text{Ablauf}}}{c_{\text{VK}}}\right)$$

$$c_{\text{SF+BAK}} Q_{\text{Ozon}} + c_{\text{Ozon}} Q_{\text{Bypass}} = c_{\text{Ablauf}} Q_{\text{Ablauf}}$$

$$Q_{\text{Ablauf}} = Q_{\text{Ozon}} + Q_{\text{Bypass}}$$

$$c_{\text{Ablauf}} = \frac{c_{\text{SF+BAK}} Q_{\text{Ozon}} + c_{\text{Ozon}} Q_{\text{Bypass}}}{Q_{\text{Ablauf}}}$$

mit  $c_{\text{Ablauf}}$  = Konzentration Gesamtablauf Kläranlage (PN 8);  $c_{\text{VK}}$  = Konzentration Ablauf Vorklärung (PN 4);  $c_{\text{Ozon}}$  = Konzentration im Zulauf der Ozonung (PN 5);  $Q_{\text{Bypass}}$  = Zuflussstrom Bypass;  $Q_{\text{Ablauf}}$  = Volumenstrom Ablauf.

### 6.1.2 Umfang Probenahme und Analytik

Der Untersuchungsumfang zur Bestimmung der Spurenstoffe und der chemischen Basisparameter während des Betriebs der vierten Reinigungsstufe wurde wie folgt festgelegt:

- Bestimmung der Indikatorsubstanzen (Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Tolyltriazol, Venlafaxin) durch wöchentliche mengenproportionale 24 h-Mischprobe oder korrespondierende Stichprobe (z.B. bei Stillstandszeiten bzw. Abschaltungen der Anlage) an folgenden Probenahmestellen: PN 5, PN 6, PN 7.1 und PN 7.2,
- Bestimmung von CSB (chemischer Sauerstoffbedarf),  $\text{SAK}_{254}$ , DOC (dissolved organic carbon) und Nitrit mit Schnelltests durch wöchentliche mengenproportionale 24 h-Mischprobe oder korrespondierende Stichprobe an folgenden Probenahmestellen: PN 5, PN 6, PN 7.1 und PN 7.2.

Das Untersuchungsprogramm während des Betriebs der vierten Reinigungsstufe umfasst weiterhin Messkampagnen des LfU zu Spurenstoffen an PN 4 und PN 8, die Bestimmung von Schwermetallen, abfiltrierbaren Stoffen (AFS), Bromat/Chlorat sowie hygienischen und mikrobiologischen Parametern (z.B. Enterokokken) und von endokrin aktiven Substanzen. Zusätzlich finden auch Probenahmen und Untersuchungen zu Spurenstoffen sowie zu biologischen Parametern (z.B. Makrozoobenthos, Makrophyten, Phytobenthos) im Fließgewässer statt.

Die Untersuchungen auf der Kläranlage und im Gewässer vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe (Ist-Zustand) werden in Kapitel 6 vorgestellt. Auch hier wurden neben einem monatlichen Spurenstoffscreening auf der Kläranlage (Indikatorsubstanzen, 24 h-Mischproben) und im Gewässer auch hygienische und biologische Parameter untersucht.

Ein Vergleich der estrogenen Wirkung in Fischen vor und nach Inbetriebnahme der Anlage zur Spurenstoffelimination ist Ende 2019 vorgesehen. In Kapitel 6.10 werden sowohl Methodik als auch die Ergebnisse vor Inbetriebnahme bezüglich des Fisch- und Muschelmonitorings vorgestellt.

### 6.1.3 Messtechnik und Online-Sonden

Die erforderlichen Sonden zur Erfassung der wichtigsten Messgrößen wurden in fünf Messtöpfen untergebracht. Über Probenahmepumpen werden die verschiedenen Abwässer in diese Messtöpfen (vgl. Abbildung 65/Abbildung 66) gepumpt. Dabei werden in den einzelnen Messtöpfen folgende Parameter erfasst:

- Messtopf Zulauf Ozonreaktor (PN 5): SAK<sub>254</sub> (1/m), SAK<sub>436</sub> (1/m), pH, Temperatur (°C), Redox (mV), Trübung (NTU),
- Messtopf Ablauf Ozonreaktor (PN 6): SAK<sub>254</sub> (1/m), SAK<sub>436</sub> (1/m), Redox (mV),
- Messtopf Ablauf Sandfilter (PN 7.1): SAK<sub>254</sub> (1/m), SAK<sub>436</sub> (1/m), Redox (mV),
- Messtopf Ablauf Aktivkohlefilter (PN 7.2): SAK<sub>254</sub> (1/m), SAK<sub>436</sub> (1/m), Redox (mV),
- Messtopf Ablauf Kläranlage (PN 8): pH, Temperatur (°C), Trübung (FNU), Nitrat- und Ammoniumstickstoff (mg/l) und Ortho-Phosphatmessung (mg/l).

Die Absorbanzabnahme ( $\Delta\text{SAK}_{254}$ ) als Regelgröße für die Ozonzugabe soll auch in Weissenburg untersucht werden (vgl. mit Kapitel 5.2.6.2). Zur Erfassung des SAK<sub>254</sub> werden Sonden verwendet, welche photometrisch die Absorption des gesamten UV-Vis-Spektrums von 220 nm bis 720 nm messen. Die Reinigung der Sonden erfolgt mit Druckluft. Im Juli 2018 wurde die Sonde im Zulauf zur Ozonung auf Bürstenreinigung umgestellt. Der Messspalt aller Sonden wurde im Projektverlauf von 15 mm auf 35 mm angepasst.

Weiterhin werden u.a. folgende Messgrößen an den jeweiligen Verfahrensstufen erfasst und im Prozessleitsystem (PLS) angezeigt und dokumentiert (vgl. mit Abbildung 67):

- Sauerstofftank: Füllstand (%), Druck (bar), Taupunkt (°C),
- Zulaufschacht nach Nachklärung bzw. vor Ozonung: Füllstand (m),
- Ozonanlage: Zufluss zum Ozonreaktor (l/s), Zufluss Teilstrom Injektorsystem (l/s), Gasstrom nach Ozongenerator (Nm<sup>3</sup>/h) und Druck im Gasstrom im Ozongeneratorraum (bar), Ozonkonzentration (Orbisphere) im hinteren Reaktorkompartiment (mg/l), Ozonkonzentration (Gasphase) im Offgas vor Restozonvernichter (g/Nm<sup>3</sup>), Gasstrom vor Restozonvernichter (m<sup>3</sup>/h), Ozonkonzentration (Gasphase) nach Restozonvernichter (ppm), Kühlwasserstrom (l/s), Sauerstoff (mg/l) im Ablauf der Ozonung (nach der Schwelle im Überlaufbauwerk),
- Filteranlage: Druck (mbar), Spülwasserstrom (l/s), Füllstand Spülwasserschacht (m),
- Ablauf Sandfilter und Aktivkohlefilter: Sauerstoff mit optischer Sauerstoffsonde (mg/l),
- Stromverbräuche (kWh) einzelner Anlagenkomponenten (z.B. Ozongenerator, Zulaufpumpen, Injektorpumpe, Kompressor Filter etc.).

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit und zur Betriebsüberwachung werden zusätzlich folgende Größen berechnet und im PLS dokumentiert:

- Ozondosis (mg/l) und spezifischer Ozoneintrag (mg O<sub>3</sub>/mg DOC),
- Ozoneintrag (g/m<sup>3</sup>), Ozonzehrung (g/m<sup>3</sup>), Ozoneinbringungsgrad (%), Ozonproduktion (g/h),
- Hydraulische Verweilzeit (Hydraulic retention time, HRT) in der Ozonung (min),
- Filtergeschwindigkeit (v) im Sandfilter und Aktivkohlefilter (m/h),
- Empty Bed Contact Time (EBCT) (min) im Sandfilter und Aktivkohlefilter,

- Absorbanzabnahme  $\Delta\text{SAK}_{254}$  (%) und  $\Delta\text{SAK}_{436}$  (%) in der Ozonung, im Sandfilter, im Aktivkohlefilter sowie errechnet aus Zulauf Ozonung zu Ablauf Sandfilter bzw. Aktivkohlefilter ( $\Delta\text{SAK}_{254} = ((\text{SAK}_{254,\text{Zulauf}} - \text{SAK}_{254,\text{Ablauf}}) / \text{SAK}_{254,\text{Zulauf}}) \cdot 100\%$ ),
- $\Delta\text{Sauerstoff}$  (%) im Sandfilter und Aktivkohlefilter.



Abbildung 65: Messtöpfe mit Sonden (Zulauf & Ablauf Ozonung, Ablauf Sandfilter/Aktivkohlefilter)

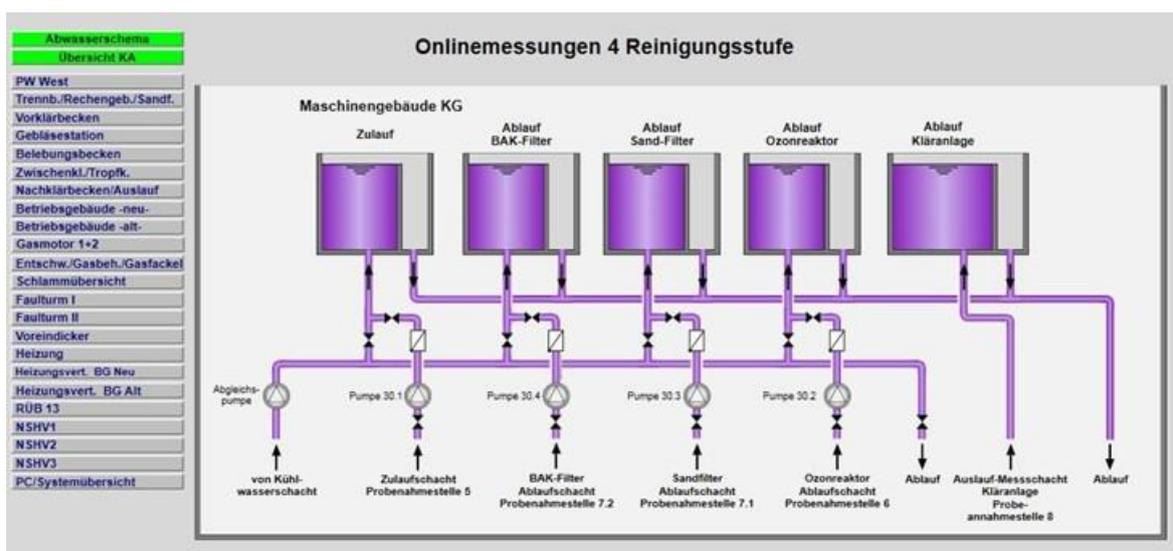


Abbildung 66: Messtöpfe für die Onlinemessungen

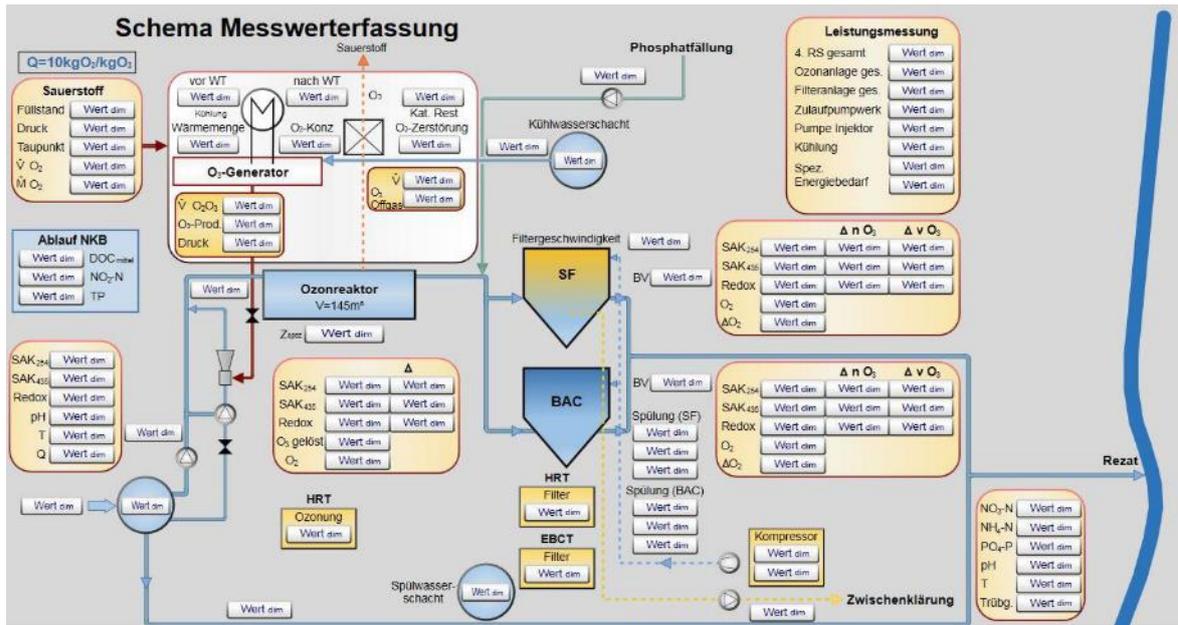


Abbildung 67: Schema der Messwerterfassung im PLS in Weißenburg

## 6.2 UNTERSUCHUNGEN ZU SPURENSTOFFEN 2013 UND 2014

Untersuchungen zu Spurenstoffen fanden bereits im Jahr 2013 statt. Die Probenahmen wurden am Ablauf der Kläranlage Weißenburg und am Vorfluter Schwäbische Rezat, Standort Silbermühle, durchgeführt. Diese Stellen wurden zweimal im Abstand von rund vier Wochen im Mai und im Juni (28.05.2013 und 26.06.2013) beprobt. Bei den Kläranlagenabläufen wurde eine qualifizierte Stichprobe, bei den Oberflächengewässern eine Stichprobe gezogen. Die Untersuchung umfasste 39 Einzelstoffe, darunter 27 Arzneimittel, 9 Transformationsprodukte (TP), Acesulfam, Coffein, Benzotriazol und Tolyltriazol.

Die 2013 gemessenen Konzentrationen im Kläranlagenablauf (siehe Anhang A) sind typische Werte für kommunale Kläranlagen, viele Stoffe sind im unteren µg/l-Bereich vorhanden. Bei den untersuchten Wirkstoffen sind keine Extremwerte zu erkennen. Lokal wurden demnach keine speziellen Belastungen festgestellt. Die vergleichsweise hohen Konzentrationen im Gewässer nach vollständiger Durchmischung zeigen, dass die Schwäbische Rezat extrem abflussschwach ist. Die Verdünnung bei den betrachteten Proben beträgt nur Faktor 2-3. Die Konzentrationen von Diclofenac liegen in der Schwäbischen Rezat mit 0,30 bzw. 0,55 µg/l deutlich über dem Vorschlag für eine Umweltqualitätsnorm für Oberflächengewässer von 0,1 µg/l. Die vergleichsweise geringen Konzentrationen von Coffein (sehr gut biologisch abbaubarer Stoff) im Kläranlagenablauf zeigen, dass die Kläranlage Weißenburg gut funktioniert.

Auch im Untersuchungszeitraum 2014 wurde festgestellt, dass die gemessenen Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage Weißenburg sich in einer durchschnittlichen Größenordnung, wie sie bei Kläranlagenabläufen aus vielen Untersuchungen bekannt sind, bewegen. Aus dem Vergleich der Werte von Ablauf Vorklämung und Ablauf Kläranlage wurden durchschnittliche Eliminationsgrade berechnet, diese stimmen i.d.R. gut mit Vergleichswerten z.B. aus dem „Spurenstoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg“ in Sacher et al. (2014) überein (siehe Abbildung 68). Auch die in Götz et al. (2015) und Johanna et

al. (2014) vorgeschlagenen „Schweizer“ Leit- bzw. Indikatorsubstanzen konnten im Rahmen der Messkampagne nachgewiesen werden. Auch der Vergleich der Messergebnisse mit den Literaturwerten (vgl. Grünebaum et al., 2014; Luo et al., 2014; Herbst und Maus, 2013) zeigt, dass im Bereich der Arzneimittelwirkstoffe keine signifikanten Unterschiede zu anderen Kläranlagen zu erkennen sind.

Die 2014 gemessenen Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Kläranlage sowie unterhalb oder oberhalb der Kläranlage Weißenburg sind im Anhang B des Berichts beigefügt.

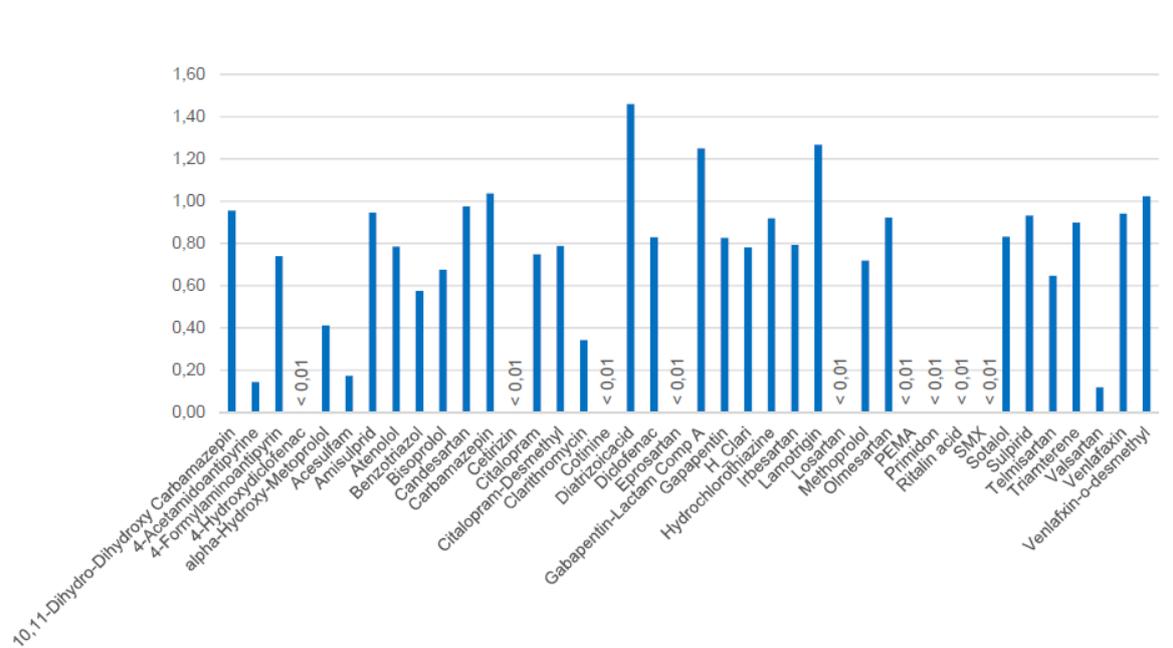


Abbildung 68: Eliminationsleistung – Vergleich der Durchschnittswerte, Verhältnis von Zu- / Ablauf

Tabelle 23: Konzentration Indikatorsubstanzen Kategorie 1 Ablauf Kläranlage (µg/l)

|            | Amisulprid | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Metoprolol | Venlafaxin |
|------------|------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|------------|------------|
| KW 44/45   | <0,5       | 0,91         | <0,5       | <0,5           | 2,7        | n.a.               | 1,2        | <0,5       |
| KW 45/46   | 0,56       | 0,99         | <0,5       | <0,5           | 2,8        | n.a.               | 1,3        | <0,5       |
| KW 46/47   | 5,9        | 0,74         | 2,8        | 0,75           | 2,0        | 2,1                | 5,5        | 2,4        |
| KW 47/48   | 3,3        | 1,3          | 1,3        | 0,55           | 2,4        | n.a.               | 4,0        | 1,4        |
| Ø Ba-Wü    | -          | 0,53         | -          | 0,16           | 1,0        | 2,7                | 1,5        | -          |
| KA X in BY | 1,2        | 0,62         | <0,5       | 2,3            | 2,7        | 4,2                | 1,6        | 1,2        |

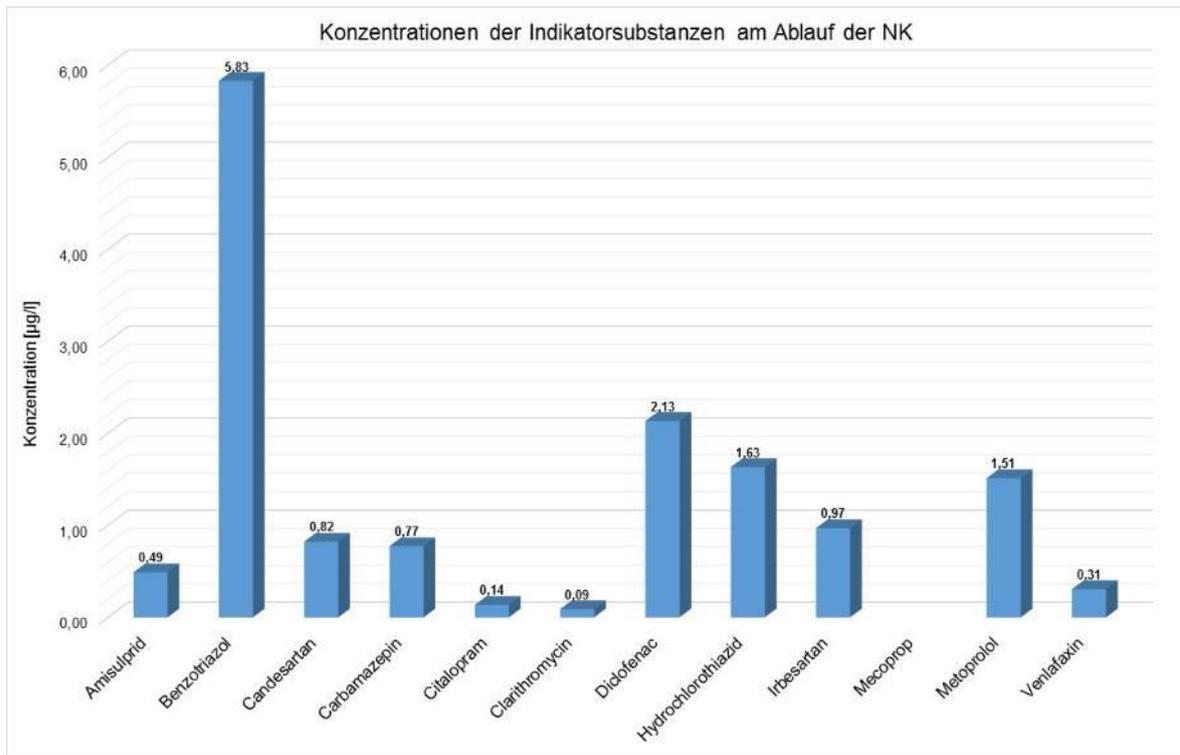
**Tabelle 24: Konzentration Indikatorsubstanzen Kategorie 2 Ablauf Kläranlage und Gabapentin ( $\mu\text{g/l}$ )**

|            | Benzotriazol | Candesartan | Irbesartan |  | Amidotrizoesäure | Iohexol | Iomeprol | Iopamidol | Iopromid | Gabapentin |
|------------|--------------|-------------|------------|--|------------------|---------|----------|-----------|----------|------------|
| KW 44/45   | n.a.         | 1,0         | 0,98       |  | n.a.             | -       | -        | -         | -        | 3,9        |
| KW 45/46   | n.a.         | 1,2         | 1,0        |  | n.a.             | -       | -        | -         | -        | 4,3        |
| KW 46/47   | 3,7          | 0,67        | 0,97       |  | 1,5              | -       | -        | -         | -        | 4,4        |
| KW 47/48   | n.a.         | 0,91        | 0,97       |  | n.a.             | -       | -        | -         | -        | 5,2        |
|            |              |             |            |  |                  |         |          |           |          |            |
| Ø Ba-Wü    | 12           | -           | -          |  | 1,8              | -       | 2,2      | 1,5       | 0,16     | 3,4        |
|            |              |             |            |  |                  |         |          |           |          |            |
| KA X in BY | 13           | 1,0         | <0,5       |  | 4,7              | 3,1     | 18       | 3,6       | 2,4      | 7,2        |

### 6.3 SPURENSTOFFSCREENING KLÄRANLAGE 2015/2016

Zur Charakterisierung der Abwasserzusammensetzung wurde ab 2015 parallel zum Planungsablauf ein erweitertes Monitoring der anthropogenen Spurenstoffe durchgeführt, das auf die standortspezifischen Bedingungen (zum Beispiel Indirekteinleiter und Vorbelastung des Gewässers) sowie die geplante Anlage zur Spurenstoffelimination abgestimmt wurde. Im Rahmen des Spurenstoffscreenings wurden unter anderem der Gesamtablauf der Kläranlage Weißenburg (nach der Nachklärung) sowie der Ablauf der Vorklärung (VK) beprobt (zeitproportionale 24 h-Mischproben).

Die gemessenen Konzentrationen bewegen sich in einer durchschnittlichen Größenordnung, wie sie bei Kläranlagenabläufen aus vielen Untersuchungen bekannt sind (vgl. Luo et al., 2014; Grünebaum et al., 2014; DWA, 2015). Die in Götz et al. (2015) erarbeiteten „Schweizer“ Indikatorsubstanzen konnten erneut nachgewiesen werden, wobei das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol eine auffällig hohe Konzentration im Ablauf der Kläranlage Weißenburg aufweist und Mecoprop in drei Frühjahrsproben nicht nachweisbar war (vgl. Abbildung 69).



**Abbildung 69: Konzentration Indikatorsubstanzen Ablauf KA – Jahresmittel 2015 - 2016 (n = 15, außer für Mecoprop n = 3)**

Abbildung 70 (nur Indikatorsubstanzen) und Abbildung 71 (weitere Spurenstoffe) zeigen den Vergleich der gemessenen Konzentrationen auf der Kläranlage Weißenburg (nach NK) mit Literaturdaten (vgl. Herbst und Maus, 2013; Sacher et al., 2014) sowie gemessenen Werten auf einer anderen bayerischen Kläranlage. Auch hier zeigt sich, dass die Werte in Weißenburg vergleichbar mit anderen Kläranlagenabläufen sind. Lediglich die Röntgenkontrastmittel Iopromid und Amidotrizoesäure sind erhöht (vermutlich bedingt durch das Klinikum Altmühlfranken Weißenburg und Diagnosticum Bayern Mitte – Standort Weißenburg). Abbildung 72 veranschaulicht den Jahresverlauf der Spurenstoffkonzentrationen und die Abwassermengen am Ablauf der Kläranlage (Tagesmittelwert der 2 h-Werte). Im Jahresverlauf ist zu erkennen, dass die Spurenstoffkonzentrationen im Mai 2015 und Januar/Februar 2016 im Vergleich zu den anderen Monatswerten niedriger sind. Dies ist vermutlich auf einen durch starke Niederschläge verursachten Verdünnungseffekt zurückzuführen. Bei höheren Abwassermengen sind tendenziell niedrigere Spurenstoffkonzentrationen zu verzeichnen.

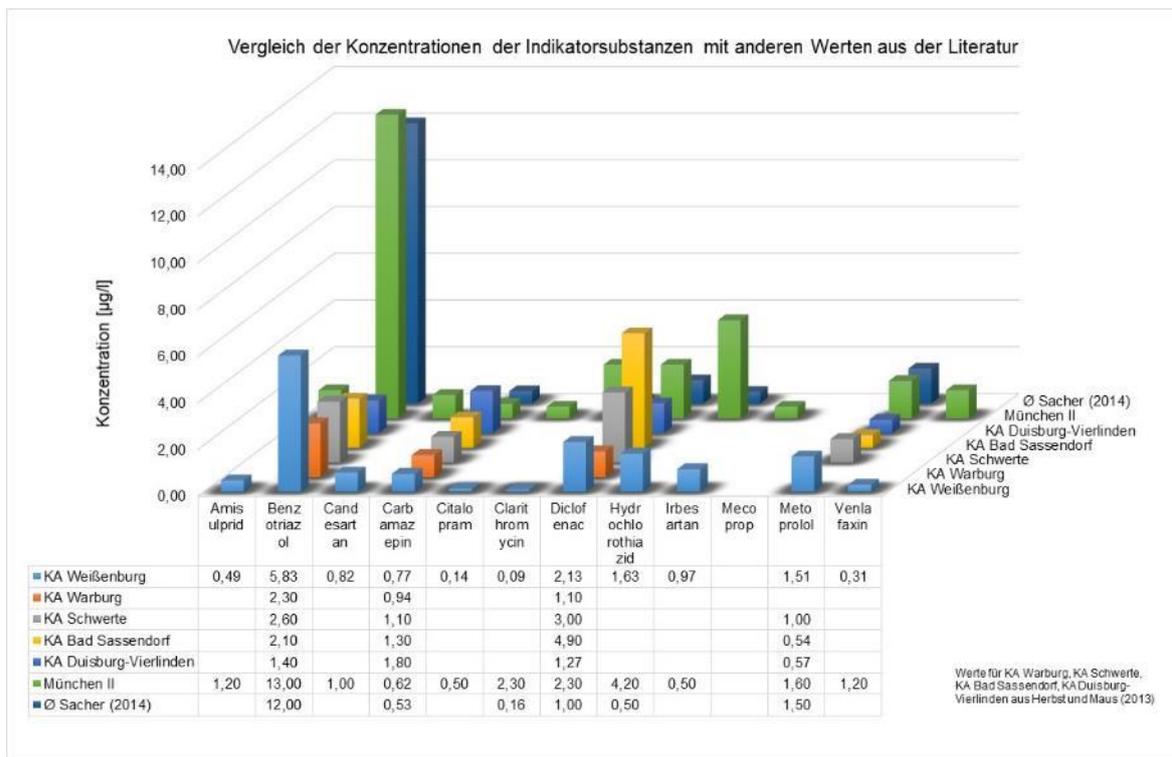


Abbildung 70: Konzentrationen der Indikatorsubstanzen im Vergleich mit Literaturangaben (Rödel et al., 2017)

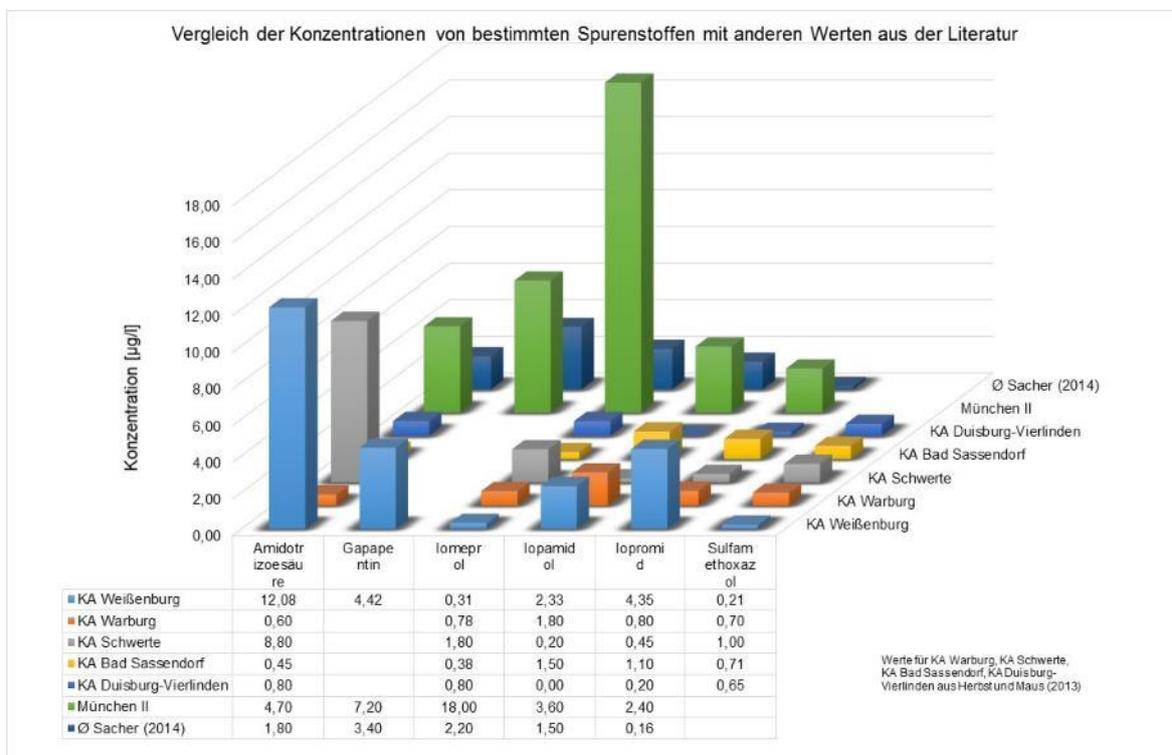
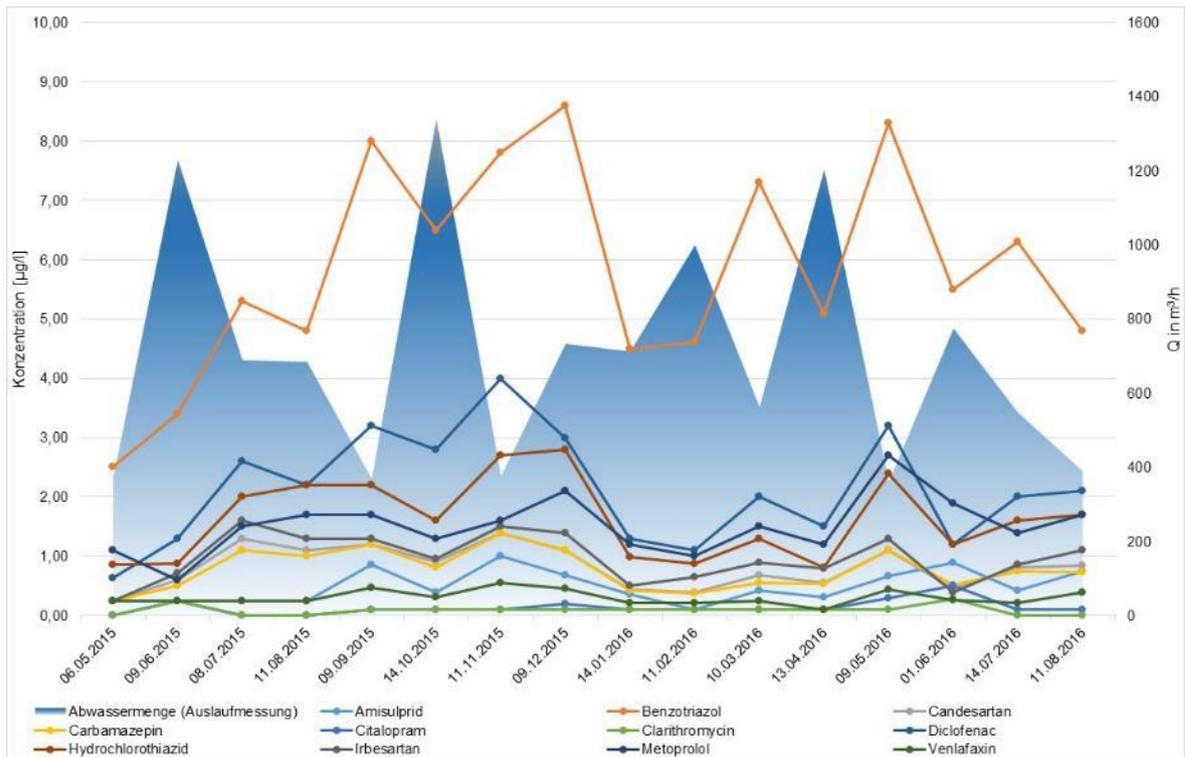


Abbildung 71: Konzentrationen von weiteren Spurenstoffen im Vergleich mit Literaturangaben



**Abbildung 72: Konzentrationen der Indikatorsubstanzen und Abwassermengen am Ablauf der KA Weißenburg – Jahresprofil (Rödel et al., 2017)**

Vergleicht man die Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage mit den Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage, so ist zu erkennen, dass Spurenstoffe durch die Kläranlage unterschiedlich stark eliminiert werden (Abbildung 73). Ein Vergleich mit Literaturwerten (vgl. Sacher et al., 2014; Abegglen und Siegrist, 2012; Margot et al., 2013) verdeutlicht eine teilweise signifikante Varianz der Eliminationsgrade bei den betrachteten Stoffen. Die verschiedenen Eliminationsleistungen in den Kläranlagen ergeben sich aufgrund der Unterschiede bei den Temperaturen, den Verweilzeiten in der Anlage, der angewandten Technologie, der biologischen Aktivität des belebten Schlammes, den Niederschlagsereignissen, der Beprobungsart und dem Beprobungsumfang. Die Röntgenkontrastmittel Iopromid (76 %) und Iomeprol (67 %) werden in der Kläranlage Weißenburg im Vergleich zur Literatur deutlich besser reduziert, während die Eliminationsleistungen für Diclofenac und Carbamazepin mit den Literaturangaben vergleichbar sind. Vor allem bei 4-Acetylaminoantipyrin (75 %), Acesulfam (67 %) und Iopromid (76 %) muss allerdings beachtet werden, dass dort die Zulaufkonzentrationen bereits so hoch sind, dass auch im Ablauf noch hohe Konzentrationen nachgewiesen werden können. Bei den Indikatorsubstanzen liegt die mittlere Elimination der elf untersuchten Substanzen (Mecoprop nicht nachweisbar) bei 23 % (Clarithromycin mit maximal 69 % und Carbamazepin und Venlafaxin mit nahezu 0 %). Daher sind diese Substanzen sehr gut für eine spätere Einschätzung der Leistung der vierten Reinigungsstufe geeignet. Die Belastung mit anderen Substanzen wie 4-Acetylaminoantipyrin, Acesulfam, Levetiracetam und Pregabalin kann durch die bestehenden Reinigungsverfahren der Kläranlage Weißenburg bereits zu über 70 % reduziert werden (Daten zu diesen Stoffen sind in Abbildung 73 nicht dargestellt).

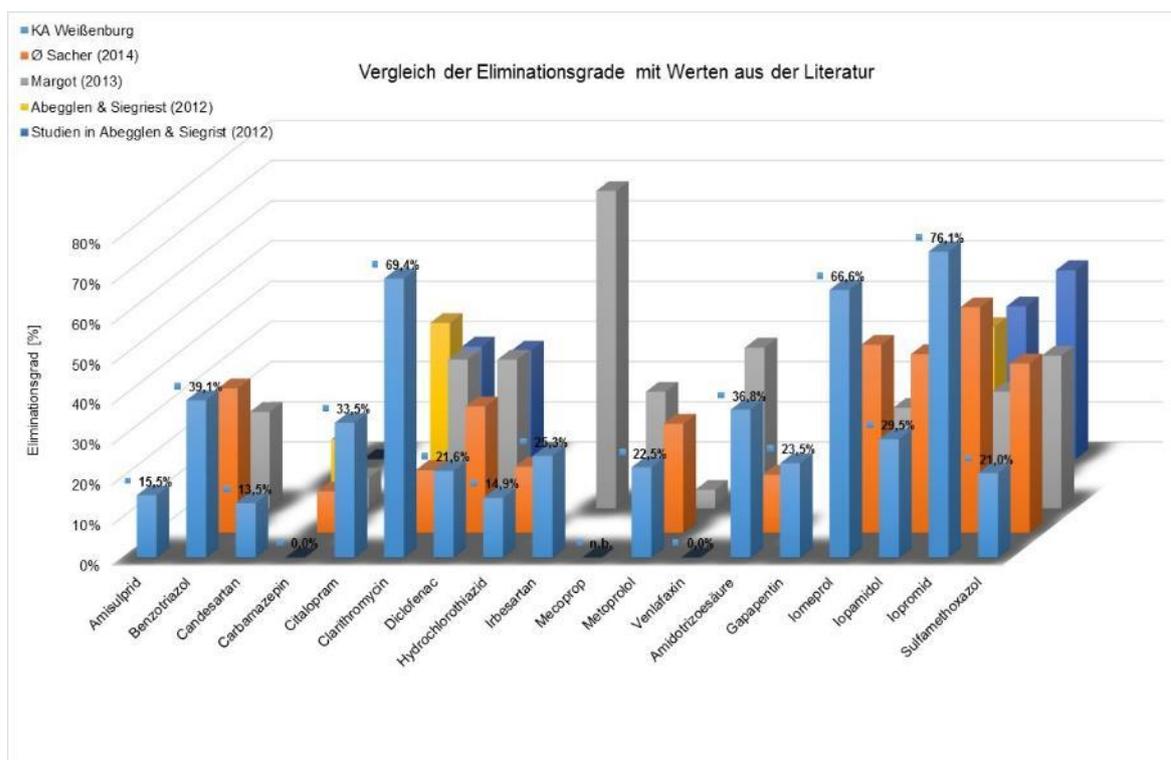


Abbildung 73: Vergleich der Eliminationsgrade der KA Weißenburg mit Literaturangaben

#### 6.4 REINIGUNGSLEISTUNG INDIKATORSUBSTANZEN MIT VIERTER REINIGUNGSSTUFE

In Versuchsphase 1 wurden im betrachteten Untersuchungszeitraum von November 2017 bis Anfang September 2018 zwei verschiedene spezifische Ozondosen gewählt. Bis Juni 2018 lief die Ozonung mit 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC und ab dem 13.06.2018 mit 0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC. In Abbildung 74 sind die gemittelten Eliminationsraten für die zwölf Indikatorsubstanzen (Mittelwert aus den Eliminationsraten der zwölf untersuchten Indikatorsubstanzen) an allen 32 untersuchten Probenahmetagen in den verschiedenen Verfahrensstufen dargestellt. Dabei fallen für einige Tage deutliche Abnahmen bei den Eliminationsleistungen insbesondere bei der Ozonung auf. Die Ursachen für die starke Abnahme der Eliminationsleistung (z.B. im Januar, Februar, Juni, Juli und August 2018) sind hauptsächlich durch Stillstandszeiten bzw. Abschaltungen bei der Ozonung zu begründen (siehe dazu Kapitel 8.1). Zudem konnten für die Monate Januar bis März 2018 hohe Nitritkonzentrationen von bis zu 0,7 mg/l im Zulauf zur Ozonung gemessen werden (vgl. Abbildung 75). Dadurch wurde die Oxidationskraft für die Spurenstoffelimination aufgrund der starken Ozonzehrung durch Nitrit (wird zu Nitrat oxidiert) vermindert. Bis dahin war noch keine Nitritkorrektur für die Ozondosierung hinterlegt. Ein Vorschlag zur Anpassung der Ozondosierung mit Nitritkorrektur wurde im Frühjahr 2018 erarbeitet und für die Ozonsteuerung berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 8.1.3).

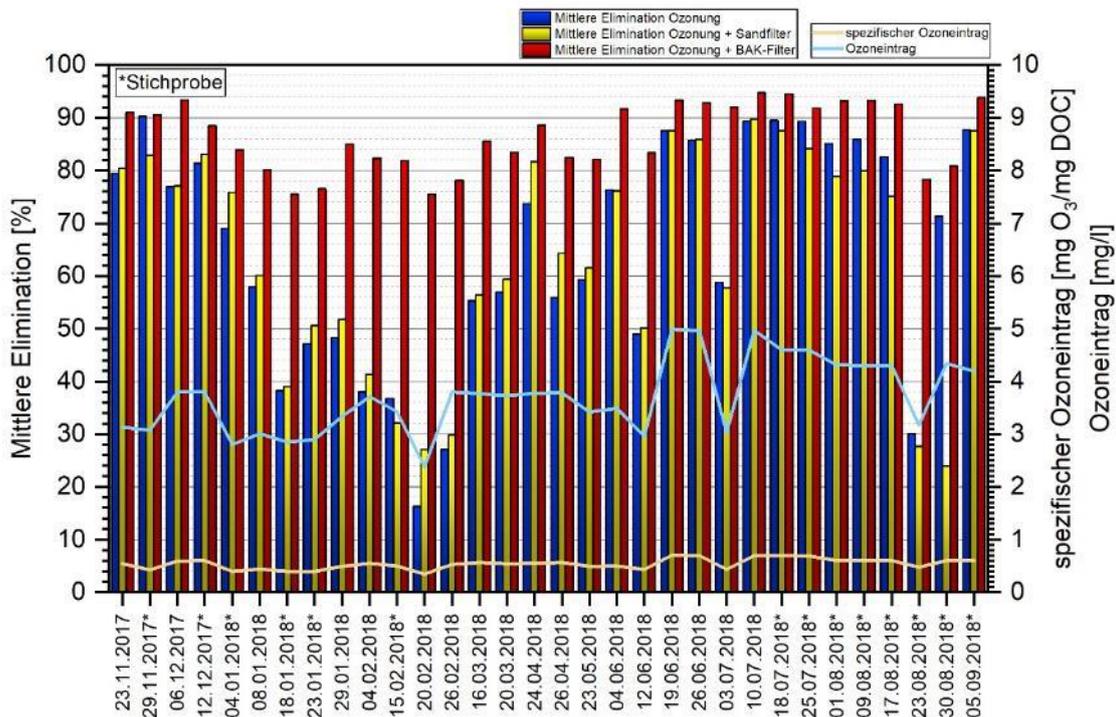


Abbildung 74: Mittlere Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen und Ozoneintrag

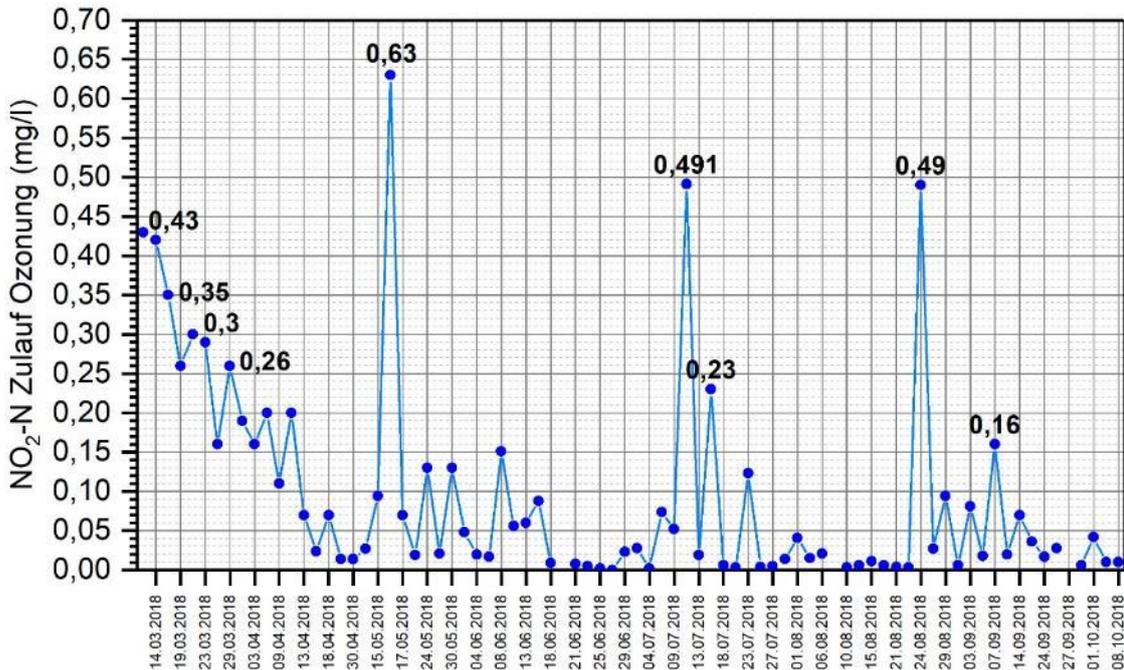
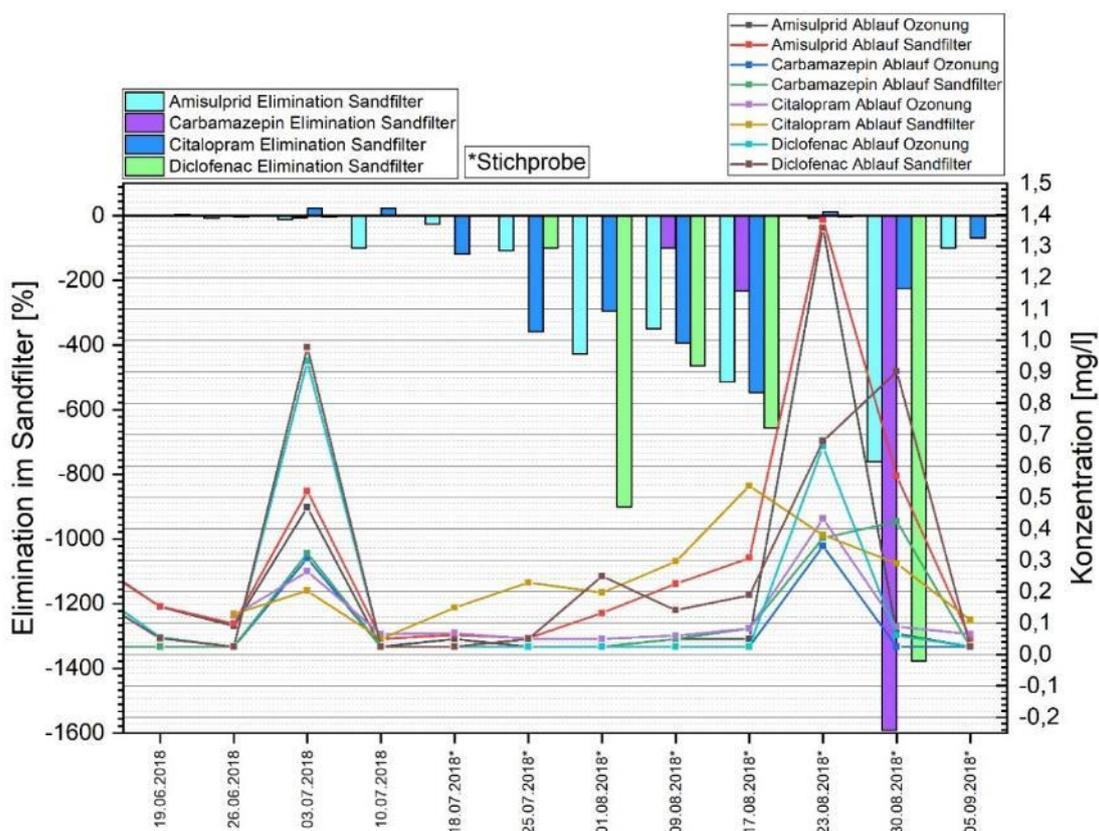


Abbildung 75: Nitritkonzentrationen im Zulauf zur Ozonung

Mitte Juli 2018 wurde beschlossen, von 24 h-Mischproben auf Stichproben umzustellen, um während der Probenahme Stillstandszeiten beim Anlagenbetrieb ausschließen zu können. Damit sollte auch der Aufwand für die Probenahme reduziert werden. Der Schwankungsbereich der gemessenen Konzentrationen nahm in der Folge zu. Die gemessenen Konzentrationen bei den Stichproben waren für viele Stoffe im Ablauf des Sandfilters oft

deutlich höher als im Ablauf der Ozonung. Dies ist vermutlich auch wegen der nicht möglichen exakten Berücksichtigung der Durchflusszeiten bei der Probenahme erklärbar.

Abbildung 76 zeigt den Stichprobeneffekt für die Stoffe Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram und Diclofenac. Im Diagramm wird deutlich, dass damit auch die Eliminationsleistungen für den Sandfilter negativ werden und eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der gesamten vierten Reinigungsstufe nicht zielführend ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Stichproben zur Beurteilung der Reinigungsleistung der vierten Reinigungsstufe als ungeeignet eingeschätzt. Insgesamt konnten an acht Probenahmetagen (sieben davon sind 24 h-Mischproben) die Eliminationsraten für die zwölf Indikatorsubstanzen bei ungestörtem Anlagenbetrieb ermittelt werden (siehe Abbildung 77). Die hier ermittelten Eliminationsraten entsprechen der Reduktion von Spurenstoffen in der vierten Reinigungsstufe bei Trockenwetter.



**Abbildung 76: Mittlere Eliminationsraten und Konzentrationen einzelner Indikatorsubstanzen in den einzelnen Filterstraßen**

In Abbildung 77 ist deutlich zu erkennen, dass der höhere Ozoneintrag im Juni 2018 zu einer verbesserten Eliminationsleistung in der Ozonung führt. Für fast alle betrachteten Substanzen ist eine deutliche Reduktion der Konzentrationen der Indikatorsubstanzen vom Zulauf Ozonung bis zum Ablauf Aktivkohlefilter zu verzeichnen. Insgesamt schneidet die Verfahrenskombination Ozonung mit Aktivkohlefilter mit einer durchschnittlichen Eliminationsrate von rund 92 % am wirksamsten ab (92 %  $\cong$  Mittelwert aus den gemittelten Eliminationsraten über die acht Probenahmetage). Hier konnte im Vergleich zur Ozonung mit Sandfilter und zur alleinigen Ozonung die höchste Spurenstoffentnahme erzielt werden. Damit ergibt sich auch eine höhere Breitbandwirkung bei den verschiedenen Spurenstoffen,

da nicht alle Substanzen gleich gut oxidierbar bzw. adsorbierbar sind (abhängig von den Stoffeigenschaften).

Die gemittelte Eliminationsrate bezüglich der zwölf Indikatorsubstanzen für die Ozonung mit anschließender Sandfiltration liegt für die betrachteten acht Probenahmetage zwischen 76,1 und 89,8 % (siehe Abbildung 77). Die gemittelte Eliminationsrate der Ozonung liegt im Bereich von 73,7 % bis 89,5 % (siehe Abbildung 77). Insbesondere für Carbamazepin und Diclofenac weist die Ozonung als alleinige Verfahrensstufe hohe Eliminationsraten im Mittel von mehr als 95 % auf. Für Benzotriazol beträgt die Elimination in der Ozonung im Mittel 67,2 %. Der nachgeschaltete Sandfilter bewirkt für Benzotriazol keine zusätzliche Konzentrationsverringerung. Ein Abbau dieser Substanz durch die biologische Aktivität des Sandfilters findet demnach nicht statt. Ein Vergleich zwischen alleiniger Ozonung mit der Ozonung und nachgeschaltetem Sandfilter zeigt für die betrachteten acht Probenahmetage kaum Unterschiede. Eine signifikante zusätzliche Entnahmewirkung durch den Sandfilter ist nicht zu erkennen. Eine zusätzliche minimale Reduktion von Spurenstoffen im Sandfilter ist jedoch nicht grundlegend auszuschließen (z.B. am 24.04.2018), wenn die nach der Ozonung umgewandelten Spurenstoffe biologisch verfügbar sind und durch die biologische Aktivität im Sandfilter abgebaut werden können.

Die zusätzliche Eliminationsleistung im Aktivkohlefilter ist erwartungsgemäß deutlich besser als im Sandfilter. Dies ist vor allem auf die starke adsorptive Wirkung des Aktivkohlefilters zurückzuführen. Abbildung 78 zeigt die Eliminationsraten und die durchgesetzten Bettvolumina in den beiden Filterstraßen für die acht betrachteten Probenahmetage.

Die Konzentrationen der zwölf ausgewählten Indikatorsubstanzen werden im Sandfilter nicht weiter reduziert. Die zusätzliche Eliminationswirkung des Aktivkohlefilters nach der Ozonung bringt für die acht betrachteten Probenahmetage hingegen im Mittel für alle Indikatorsubstanzen nochmal eine Reduktion von ca. 47 %. Unterschiede bei der Spurenstoffentnahme im Aktivkohlefilter bei gleicher Ozondosis sind durch die schwankenden Zulaufkonzentrationen von DOC, Nitrit und den Spurenstoffen sowie den Einfluss der Ozonung zu erklären. Je schlechter bzw. ineffektiver die Oxidationswirkung in der Ozonung ist (ozonzehrende Stoffe oder verringerte Ozondosis), umso größer ist die adsorptive Entnahmewirkung im Aktivkohlefilter.

Vor allem Benzotriazol, Metoprolol und Tolyltriazol werden allein im Aktivkohlefilter nach der Ozonung im Mittel nochmal bis zu mehr als 85 % eliminiert. Eine deutliche zusätzliche Reduktion im GAK-Filter konnte auch für die Stoffe Irbesartan (im Mittel um 71 %) und Candesartan (im Mittel um 48 %) beobachtet werden. Clarithromycin wird in der vierten Reinigungsstufe am geringsten eliminiert. Die Eliminationsrate für Clarithromycin beträgt für die acht betrachteten Probenahmetage bei der Ozonung mit Sandfilter und bei der Ozonung mit Aktivkohlefilter im Mittel zwischen 64 % und 65 %. Eine zusätzliche Reduktion in den beiden Filtern konnte nicht nachgewiesen werden. In der Ozonung wird Venlafaxin im Mittel um 82 % reduziert. Nur im nachgeschalteten Aktivkohlefilter wird diese Substanz nochmal um 33 % im Mittel reduziert. Der Sandfilter bewirkt hier keine weitere Reduktion.

Die mittleren, minimalen und maximalen Eliminationsraten der untersuchten Indikatorsubstanzen in den einzelnen Verfahrensstufen sind, bezogen auf die acht betrachteten Probenahmetage, in Tabelle 25 zusammengefasst.

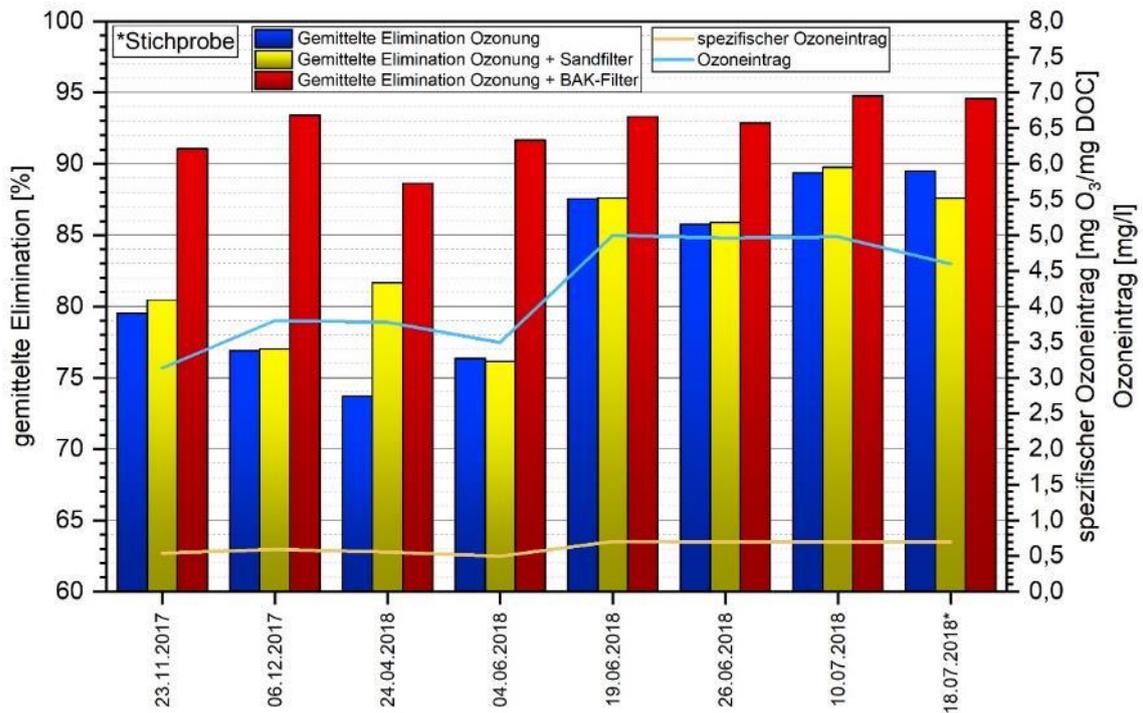


Abbildung 77: Gemittelte Eliminationsraten der zwölf Indikatorsubstanzen für die verschiedenen Verfahrensstufen und berechneter spezifischer Ozoneintrag und Ozonintrag vom 23.11.2017 bis 18.07.2018 bei stabilem Anlagenbetrieb

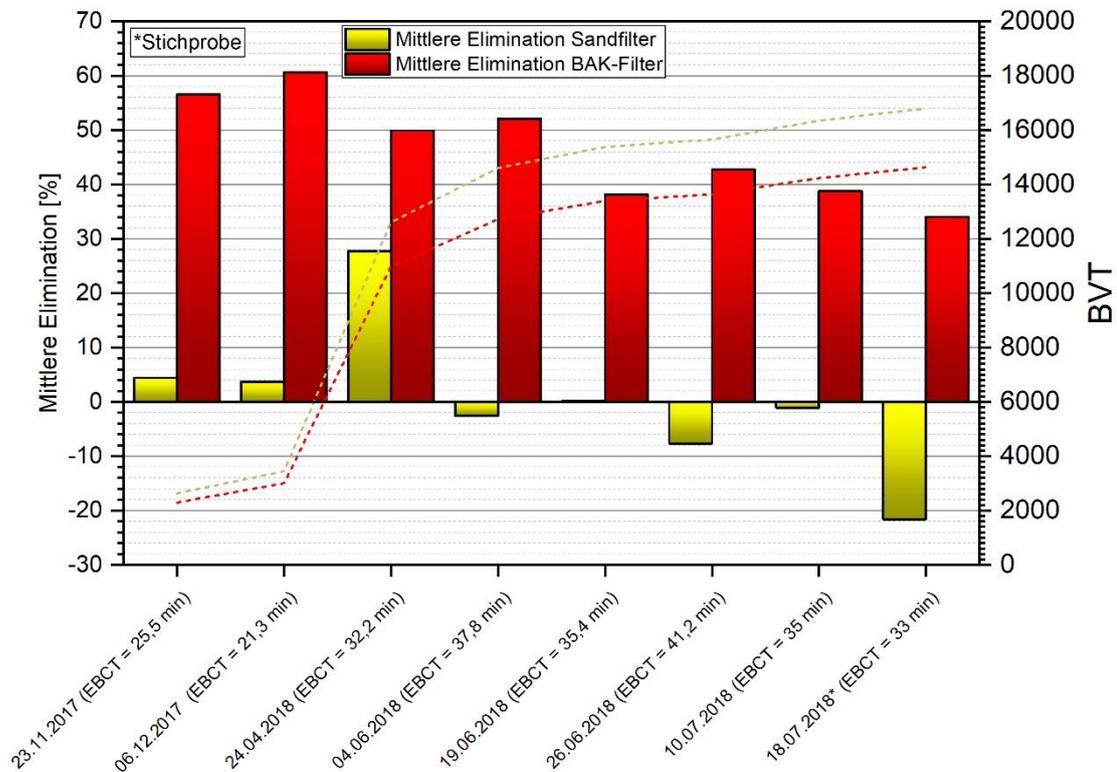


Abbildung 78: Mittlere Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen in den einzelnen Filterstraßen und durchgesetzte Bettvolumina und EBCT vom 23.11.2017 bis 18.07.2018

**Tabelle 25: Eliminationsraten der Indikatorsubstanzen in den Verfahrensstufen**

| Substanz                       | Mittlere Eliminationsraten in den Verfahrensstufen in [%] |            |                  |                       |                             |
|--------------------------------|---|------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                                | Ozonung   | Sandfilter | Aktivkohlefilter | Ozonung u. Sandfilter | Ozonung u. Aktivkohlefilter |
| MW = Mittelwert                |   |            |                  |                       |                             |
| <b>Amisulprid (MW)</b>         | 90,45   | -19,47     | 13,53            | 89,91                 | 91,51                       |
| MIN                            | 76,65   | -100,00    | 0,00             | 76,35                 | 77,40                       |
| MAX                            | 98,08   | 0,00       | 58,33            | 96,15                 | 98,08                       |
| <b>Benzotriazol (MW)</b>       | 67,20   | 7,86       | 95,38            | 69,99                 | 98,63                       |
| MIN                            | 55,26   | -5,88      | 91,26            | 52,63                 | 97,81                       |
| MAX                            | 76,07   | 45,67      | 99,07            | 77,57                 | 99,68                       |
| <b>Candesartan (MW)</b>        | 80,92   | 1,18       | 48,26            | 81,21                 | 90,40                       |
| MIN                            | 66,67   | -3,39      | 25,00            | 66,67                 | 82,05                       |
| MAX                            | 93,88   | 6,25       | 70,50            | 93,67                 | 97,41                       |
| <b>Carbamazepin (MW)</b>       | 95,57   | 0,00       | 6,25             | 95,57                 | 96,16                       |
| MIN                            | 90,57   | 0,00       | 0,00             | 90,57                 | 94,90                       |
| MAX                            | 98,16   | 0,00       | 50,00            | 98,16                 | 98,16                       |
| <b>Citalopram (MW)</b>         | 81,89   | -15,92     | 30,02            | 80,15                 | 87,80                       |
| MIN                            | 65,07   | -119,12    | 0,00             | 66,67                 | 70,29                       |
| MAX                            | 92,86   | 23,08      | 77,27            | 92,86                 | 95,37                       |
| <b>Clarithromycin (MW)</b>     | 65,84   | -5,13      | -9,25            | 64,81                 | 64,18                       |
| MIN                            | 37,50   | -15,49     | -30,99           | 37,50                 | 37,50                       |
| MAX                            | 86,35   | 1,34       | 0,34             | 84,23                 | 82,12                       |
| <b>Diclofenac (MW)</b>         | 98,12   | 4,30       | 18,55            | 98,33                 | 98,48                       |
| MIN                            | 95,71   | -15,52     | -5,17            | 97,22                 | 97,22                       |
| MAX                            | 99,45   | 44,44      | 100,00           | 99,45                 | 100,00                      |
| <b>Hydrochlorothiazid (MW)</b> | 95,25   | -7,29      | 50,00            | 95,18                 | 98,76                       |
| MIN                            | 89,50   | -100,00    | 0,00             | 89,00                 | 98,44                       |
| MAX                            | 98,96   | 50,00      | 88,10            | 98,96                 | 98,96                       |
| <b>Irbesartan (MW)</b>         | 71,60   | 12,35      | 71,06            | 74,48                 | 91,88                       |
| MIN                            | 60,30   | -2,27      | 62,25            | 62,77                 | 88,18                       |
| MAX                            | 80,22   | 80,77      | 90,38            | 95,83                 | 97,91                       |
| <b>Metoprolol (MW)</b>         | 82,30   | 2,78       | 84,68            | 83,70                 | 97,84                       |
| MIN                            | 70,78   | -26,14     | 56,05            | 70,87                 | 95,32                       |
| MAX                            | 91,36   | 44,35      | 95,17            | 91,69                 | 99,40                       |
| <b>Tolytriazol (MW)</b>        | 78,19   | 13,19      | 95,64            | 81,41                 | 99,16                       |
| MIN                            | 62,96   | 1,87       | 93,54            | 64,81                 | 98,35                       |
| MAX                            | 89,28   | 45,69      | 98,57            | 89,86                 | 99,67                       |
| <b>Venlafaxin (MW)</b>         | 82,33   | -7,44      | 33,06            | 82,55                 | 89,25                       |
| MIN                            | 66,14   | -75,00     | 0,00             | 65,31                 | 73,69                       |
| MAX                            | 95,45   | 27,22      | 83,33            | 95,09                 | 96,27                       |

Alle an den 32 Probenahmetagen gemessenen Konzentrationen und ermittelten Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe sind im Anhang C beigefügt. Insgesamt zeigt diese erste Auswertung der Spurenstoffmessungen bei stabilem Anlagenbetrieb, dass die Kombination von Ozonung mit einer nachgeschalteten Adsorptionsstufe im Vergleich zur alleinigen Ozonung und zur Kombination aus Ozonung mit Sandfilter am wirksamsten ist. Damit werden die Ergebnisse der Untersuchungen in Peschke et al. (2018), Meier et al. (2016) und Böhler et al. (2017b) bestätigt. Zudem wird aus den Messungen auch ersichtlich, dass nach fast einem Jahr Betrieb die Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters noch nicht erschöpft ist. Insbesondere bei Stillstandszeiten/Abschaltungen der Ozonanlage wirkt die Filterstraße mit der Aktivkohle besonders effektiv und wirksam. Ein ähnlich lange Entnahmewirkung in einem kontinuierlich betriebenen Filter konnte bisher nur in den Untersuchungen in Emmingen-Liptingen beobachtet werden (Locher et al., 2015). Für die Entnahmewirkung in den Filtern konnte für den Parameter EBCT hinsichtlich der acht betrachteten Probenahmetage (siehe Abbildung 78) kein nachweisbarer Einfluss dokumentiert werden. Die hier ermittelten Kontaktzeiten (z.B. Mittelwert aus 24 h-Mischprobe) lagen zwischen 21 und 41 min.

## 6.5 BILDUNG VON TRANSFORMATIONSPRODUKTEN

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war die analytische Bestimmung von in der Ozonung gebildeten Transformationsprodukten. Hierzu wurden beispielhaft anhand einer 24 h-Mischprobe (05.12 bis 06.12.2017) die Konzentrationen der Substanz Clarithromycin (Makrolidantibiotikum) und dessen Transformationsprodukt Clarithromycin N-Oxid in der vierten Reinigungsstufe bestimmt. Der spezifische Ozoneintrag lag im Beprobungszeitraum im Mittel bei 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC. In Abbildung 79 wird ersichtlich, dass Clarithromycin insbesondere durch die Oxidation in der Ozonung transformiert wird. Auch die biologische Reinigung der Kläranlage scheint einen minimalen Effekt beim Abbau und bei der Transformation der Ausgangssubstanz Clarithromycin zu haben. Weiterhin ist bei dieser Untersuchung zu erkennen, dass das in der Ozonung gebildete Clarithromycin N-Oxid vorwiegend durch die Adsorption im nachgeschalteten Aktivkohlefilter reduziert wird. Im Sandfilter findet hingegen nur eine geringe Reduktion vermutlich durch biologischen Abbau statt. Ergänzend zu der Untersuchung von Clarithromycin wurde die Bildung weiterer Transformationsprodukte in der Ozonung im Dezember 2017 und Februar 2018 untersucht. Der spezifische Ozoneintrag bei der 24 h-Mischprobe am 12.12.2017 betrug 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC (gemittelter Stundenwert bezogen auf 24 h) und bei der 24 h-Mischprobe am 06.02.2018 ca. 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC (gemittelter Stundenwert bezogen auf 24 h, kurzzeitige Abnahme des Wertes auf 0,38 mg O<sub>3</sub>/mg DOC zwischen 12 und 13 Uhr). Folgende Arzneimittel wurden analysiert: Fexofenadin (Antihistaminikum), Lidocain (Antiarrhythmikum), Sulpirid (Neuroleptika) und Tiaprid (Antihyperkinetikum). Aus Abbildung 80 wird deutlich, dass für jede untersuchte Substanz Transformationsprodukte entstehen. Inwieweit die gebildeten Transformationsprodukte in den nachgeschalteten Filterstufen reduziert werden können, soll zukünftig noch ausgewertet werden.

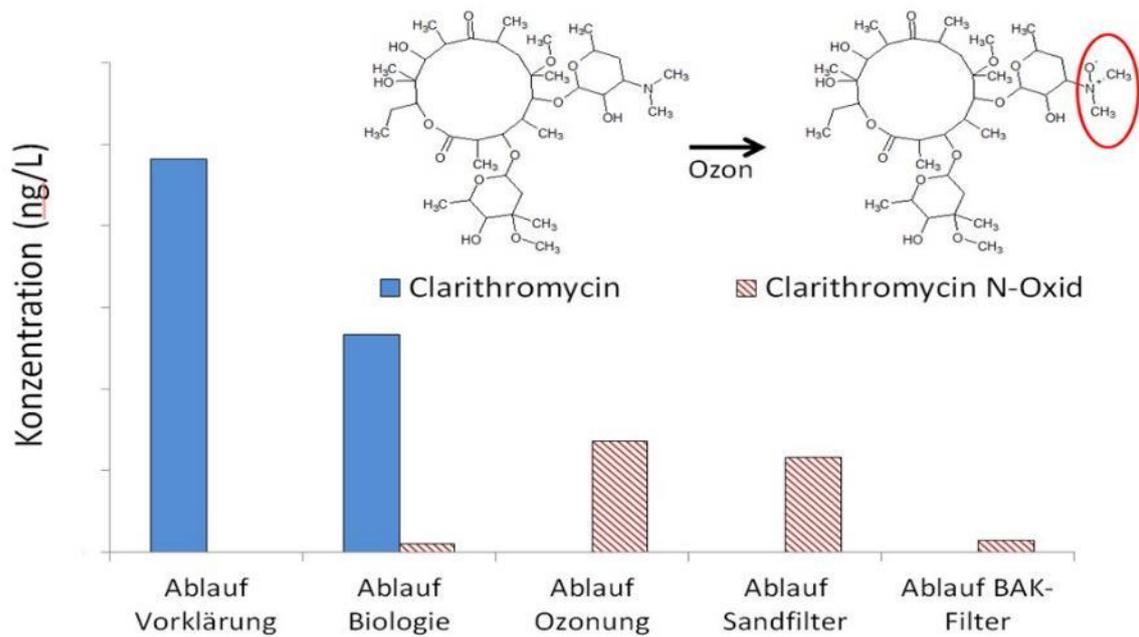


Abbildung 79: Nachweis von Clarithromycin und Clarithromycin N-Oxid in der vierten Reinigungsstufe

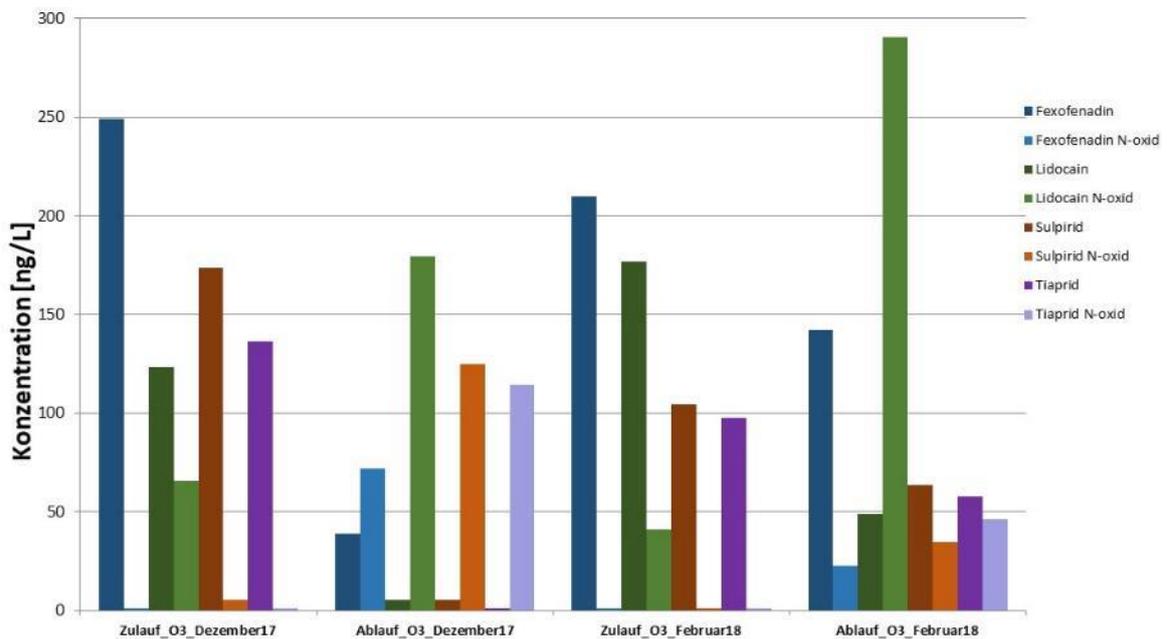
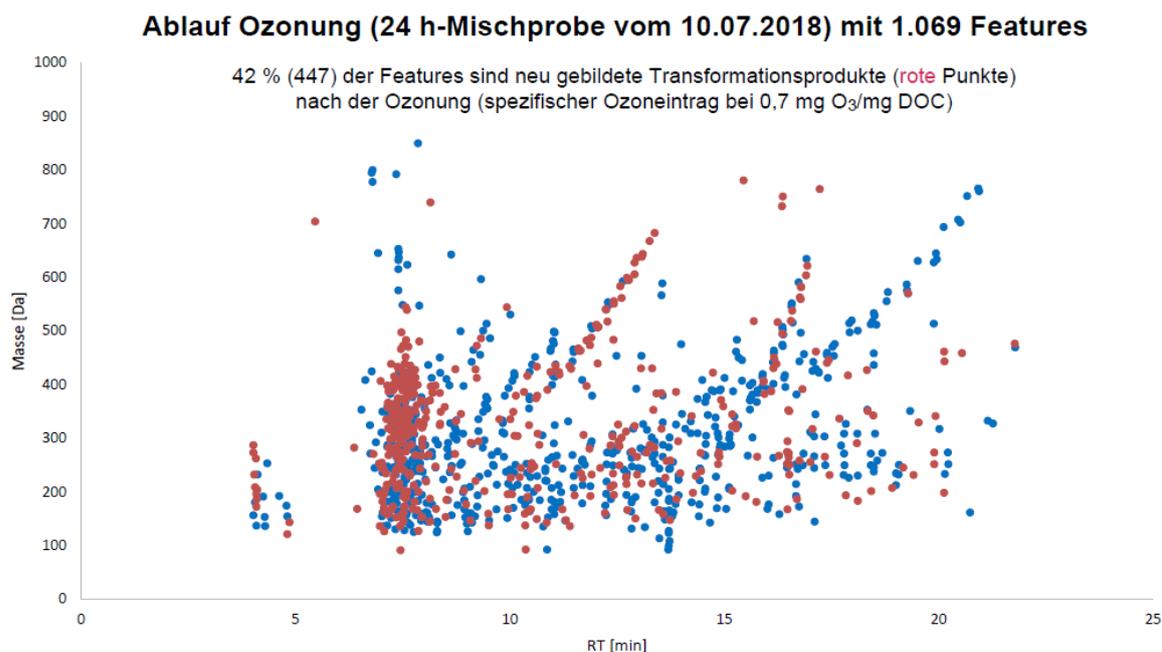


Abbildung 80: Bildung von Transformationsprodukten in der Ozonung

## 6.6 NON-TARGET-ANALYTIK

Im Zuge der sogenannten „Non-Target-Analytik“ wurden zudem vor und nach der Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe Proben (jeweils Tagesmischproben im Kläranlagenablauf, Schwäbische Rezat oberhalb und unterhalb der Kläranlage und im Zu- und Ablauf Ozonung, Ablauf Sand- und Aktivkohlefilter) mit der Kombination HPLC und hochauflösenden

der Massenspektrometrie vermessen. Diese Daten können jederzeit retrospektiv auf bestimmte Spurenstoffe geprüft oder für eine ausführliche Identifizierung unbekannter Stoffe verwendet werden. Eine detaillierte Auswertung der Daten nach Inbetriebnahme der Ozonung findet derzeit im Rahmen einer Masterarbeit am LfU statt (Kraus, 2018). Dabei erfolgt u.a. eine semiquantitative Analyse der Effizienz von Ozonung und den beiden Filtern (Suspect- und Non-Target-Screening mittels Flüssigkeitschromatographie gekoppelt mit hochauflösender Massenspektrometrie). Dabei kann auch die Bildung von Transformationsprodukten in der Ozonung genauer betrachtet werden. Bei der Untersuchung von Proben können im Zuge der Non-Target-Analytik mit Hilfe eines sogenannten Peakfinding-Algorithmus Features aus den Rohdaten extrahiert werden (exakte Masse und Retentionszeit). Diese können als Masse-Retentionszeit-Diagramm („Punktwolke“ bzw. Datenpunkte/Features, vgl. Abbildung 81) dargestellt werden. Die Identifizierung eines Signals einer unbekannt Substanz anhand der exakten Masse und der Retentionszeit in Verbindung mit einer Stoffdatenbank ermöglicht die Generierung von Summenformel- und Strukturformelvorschlägen. Es können Rückschlüsse auf das Verhalten der Verbindungen nach der Ozonung (auch in Abhängigkeit von der Ozondosis) bzw. nach den beiden Filtern gezogen werden (z.B. Reduktionsraten und ob und in welchem Maße Transformationsprodukte unter bestimmten Betriebsbedingungen gebildet werden).



**Abbildung 81:** Gebildete Transformationsprodukte (Abwasserprobe vom 10.07.2018 aus dem Ablauf der Ozonung) nach der Ozonung, dargestellt als Features (Datenpunkte) in einem Masse-Retentionszeit-Diagramm (Kraus, 2018)

## 6.7 GESAMTELIMINATIONSRATE DER KLÄRANLAGE WEIßENBURG

Zur Bestimmung der Gesamteliminationsrate in der Kläranlage wird an dieser Stelle ein rechnerischer Ansatz auf Grundlage der gemessenen Eliminationsraten der vierten Reinigungsstufe und der im Rahmen der Bestandsaufnahme ermittelten Eliminationsrate der Biologie gewählt (vgl. Kapitel 6.3). Die direkte und analytische Ermittlung der Gesamtelimination in der Kläranlage Weißenburg unter Berücksichtigung der vorhandenen Randbedin-

gungen (vgl. auch Kapitel 8.1) war nur bedingt möglich. Es fanden nur vereinzelt Messkampagnen (Stichproben) an den Probenahmestellen Vorklärung (PN 4) und Kläranlagengesamtablauf (PN 8) statt. Die ermittelten Eliminationsraten wurden als unplausibel eingestuft (im Bericht nicht dargestellt), sodass ein rechnerischer Ansatz gewählt wurde, um die Reinigungsleistung der gesamten Kläranlage theoretisch bestimmen zu können. Um die Gesamtreduktion in der Kläranlage analytisch zu ermitteln, werden zukünftig Messungen (z.B. 24 h-Mischproben) bei gesicherten Zuflüssen<sup>9</sup> und stabilem Anlagenbetrieb (ohne Stillstandszeiten) an den Probenahmestellen Vorklärung (PN 4) und Kläranlagengesamtablauf (PN 8) durchgeführt.

Bei störungsfreiem Betrieb erzielte die Verfahrenskombination aus Ozonung und Aktivkohlefilter (adsorptiv) insgesamt eine durchschnittliche Eliminationsrate von 92 % bezogen auf die gewählten Indikatorsubstanzen (bei acht Messungen, vgl. Kapitel 6.4). Die gemittelte Eliminationsrate bezüglich Ozonung mit anschließender Sandfiltration liegt dagegen deutlich niedriger im Bereich von 76,1 bis 89,8 % bzw. durchschnittlich bei 83,3 %.

Tabelle 26 zeigt die rechnerische Gesamtreduktion in der Kläranlage Weißenburg (**rot**) bei unterschiedlichen Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe und verschiedenen Zuflüssen zur Kläranlage. Dabei wird angenommen, dass die Reinigungsleistung in der Biologie der Kläranlage rund 20 %<sup>10</sup> beträgt, die Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe bei 80 % (dies entspräche etwa einer Ozonung + Sandfiltration in beiden Straßen) bzw. 90 % (Ozonung + Aktivkohle in beiden Filterstraßen) liegt.

Bei Zuflüssen zur vierten Reinigungsstufe  $\leq Q_{\text{Bem}}$  bzw. 430 m<sup>3</sup>/h (z.B. bei Trockenwetterbedingungen) hängt die Gesamteliminationsrate in der Kläranlage wesentlich von der Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe ab. Durch die Biologie wird die Gesamtelimination noch um etwa 2-4 Prozente gesteigert.

Da die vierte Reinigungsstufe als Teilstrombehandlung (Behandlung von ca. 86 % der Jahresabwassermenge) ausgelegt wurde, kann eine Spurenstoffentnahme von 80 % (bezogen auf die gesamte Kläranlage) nicht bei jedem Zufluss erreicht werden. Hierzu wäre eine Vollstrombehandlung erforderlich. Zudem ist die Gesamtreduktion in der Kläranlage abhängig von der erzielten Reinigungsleistung in der vierten Reinigungsstufe. Diese wird unter anderem durch die Anlageneinstellungen (Ozondosis, Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters) und den Abwassereigenschaften (z.B. Nitritkonzentration und DOC-Konzentration im Zulauf der Ozonung) beeinflusst.

In Weißenburg ergibt sich eine rechnerische Gesamtreduktion von 80 % in der Kläranlage bei einer Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe von 80 % bzw. 90 % und einem Zufluss zur Kläranlage von bis zu 458 m<sup>3</sup>/h bzw. 516 m<sup>3</sup>/h.

---

<sup>9</sup> Hydraulische Messwerte Anfang 2018 waren zeitweise unplausibel (Messgerät Zulauf Kläranlage ungenau).

<sup>10</sup> abhängig von den absoluten Konzentrationen der gemessenen Spurenstoffe; Wert vgl. mit den Messungen aus Bestandsaufnahme in Kapitel 6.3.

Die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg ist so ausgelegt, dass etwa 86 % der Jahresabwassermenge behandelt werden können. Bei einer Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe von 80 % bzw. 90 % ergibt sich eine rechnerische Gesamtreduktion von 75 % bzw. 82 % im Jahresdurchschnitt (Annahme: Fracht ist proportional zur Abwassermenge).

**Tabelle 26: Rechnerische Gesamtreduktion in der Kläranlage**

| Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe und berechnete Reinigungsleistungen in der Kläranlage im Jahresdurchschnitt <sup>*)</sup> | $Q < Q_{Bem}$ |             | $Q < Q_{Bem}$ |             | $Q_{max}$               | $Q$                     | $Q$                     |
|--|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|  | ohne Bypass   | ohne Bypass | ohne Bypass   | ohne Bypass | 970 (m <sup>3</sup> /h) | 458 (m <sup>3</sup> /h) | 516 (m <sup>3</sup> /h) |
| Reinigungsleistung konventionell (Biologie)  | 20%           | 20%         | 20%           | 20%         | 20%                     | 20%                     | 20%                     |
| Reinigungsleistung vierte Reinigungsstufe (Ozonung + beide Filter)   | 80%           | 90%         | 80%           | 90%         | 80%                     | 80%                     | 90%                     |
| Anteil Abwasser unbehandelt (Bypass/Umfahrung)   | 14%           | 14%         | 0%            | 0%          | 56%                     | 6%                      | 17%                     |
| Zulauf fracht Kläranlage   | 100%          | 100%        | 100%          | 100%        | 100%                    | 100%                    | 100%                    |
| Ablauf fracht Kläranlage konventionell (Biologie)  | 80%           | 80%         | 80%           | 80%         | 80%                     | 80%                     | 80%                     |
| Ablauf fracht Bypass (unbehandelt)   | 11%           | 11%         | 0%            | 0%          | 45%                     | 5%                      | 13%                     |
| Ablauf fracht Ozonung/Filter   | 14%           | 7%          | 16%           | 8%          | 7%                      | 15%                     | 7%                      |
| Ablauf fracht Kläranlage (gesamt)  | 25%           | 18%         | 16%           | 8%          | 52%                     | 20%                     | 20%                     |
| <b>Reduktion Kläranlage (gesamt)</b>   | <b>75%</b>    | <b>82%</b>  | <b>84%</b>    | <b>92%</b>  | <b>48%</b>              | <b>80,09%</b>           | <b>80,00%</b>           |

<sup>\*)</sup> 86 % der Jahresabwassermenge kann durch die vierte Reinigungsstufe behandelt werden; Annahme: Fracht ist proportional zur Abwassermenge und Reinigungsleistung in der Biologie beträgt ca. 20 %,  $Q$  = Zufluss,  $Q_{Bem}$  = Bemessungszufluss für die vierte Reinigungsstufe (= 430 m<sup>3</sup>/h),  $Q_{max}$  = maximaler Zufluss (bei Regenwetter).

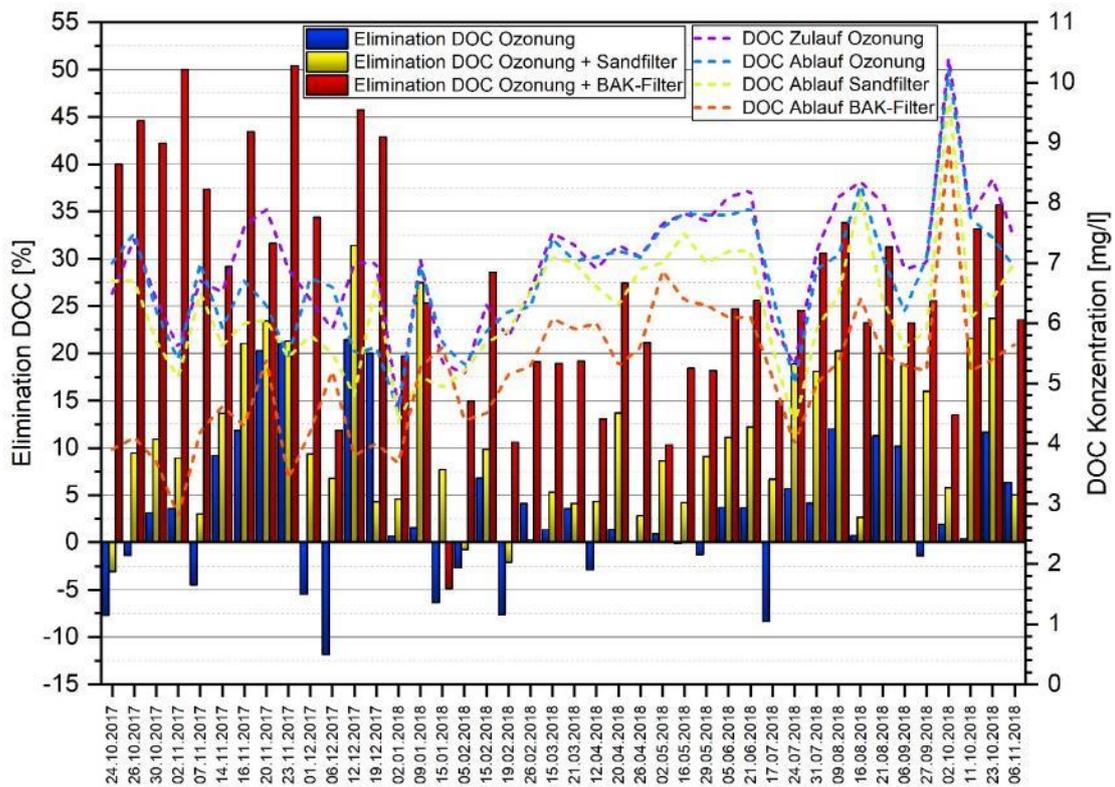
## 6.8 REINIGUNGSLEISTUNG DOC UND CSB IN DER VIERTEN REINIGUNGSSTUFE

Die Bestimmung des DOC (membranfiltriert (0,45 µm), TOC-Küvettest) und CSB (homogenisiert) wurde im Labor der Kläranlage Weißenburg durchgeführt (vorwiegend zeitlich korrespondierende Stichproben). Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Konzentrationsverläufe des DOC und CSB sowie deren Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe von Oktober 2017 bis November 2018. Für die im Diagramm dargestellten Probenahmetage kann davon ausgegangen werden, dass der Anlagenbetrieb bei der Ozonung zum Zeitpunkt der Stichprobe stabil war. Für die betrachteten Probenahmetage lag der spezifische Ozoneintrag in der Ozonung zwischen 0,4 und 0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC (im Mittel bei 0,59 mg O<sub>3</sub>/mg DOC).

Im Zulauf der Ozonung schwankt der DOC zwischen 4,6 und 10,4 mg/l und der CSB zwischen 14 und 44 mg/l. Eine deutliche Reduktion des DOC in der Ozonung wurde nicht beobachtet. Auch die Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter scheint nur eine geringfügige Entfernung des DOC im betrachteten Untersuchungszeitraum zu bewirken (im Mittel rund 11 %). Eine deutliche Reduktion des organischen Kohlenstoffs (maximal bis zu 50 %, im Mittel bei rund 27 %) wird mit Ozonung und nachgeschaltetem Aktivkohlefilter aufgrund seiner anfänglichen Adsorptionskapazität erzielt.

Unterschiede bei den Reduktionsraten für DOC und CSB ergeben sich vermutlich auch in Abhängigkeit der Kontaktzeit des Abwassers im Filterbett (bei beiden Filterstraßen). Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass bei einer höheren EBCT eine verbesserte Reinigungsleistung für Spurenstoffe und organische Substanzen (insbesondere für langsam biologisch abbaubare Substanzen) zu erwarten ist. Je länger die Aufenthaltszeit, umso mehr Zeit haben die Mikroorganismen Substrat zu metabolisieren. Für schnell biologisch abbaubare Substanzen sind kurze EBCT ausreichend. Für schwer abbaubare Substanzen sind höhere EBCT erforderlich. In den meisten Studien wird von einer optimalen EBCT bei Schnellfiltern zwischen 15-30 min ausgegangen. Weitere bekannte Einflussparameter auf die Reinigungsleistung von biologisch aktiven Filtern sind die Temperatur und das Spülregime. Ein Nachweis dieser Zusammenhänge (Einfluss von EBCT, Temperatur und Spülregime) konnte im Rahmen des Pilotvorhabens nicht gezeigt werden. Unterschiede bei der DOC und CSB Reduktion im Aktivkohlefilter sind auch durch die schwankenden Zulaufkonzentrationen von DOC und CSB sowie den Einfluss der Ozonung möglich (je geringer der Umfang der Spurenstoffreduktion in der Ozonung, z.B. durch geringere Ozondosis, umso mehr Reduktionspotential besteht im Aktivkohlefilter).

In Abbildung 83 ist zu erkennen, dass sowohl im Sandfilter als auch im Aktivkohlefilter der CSB weiter reduziert wird. Die größte Reduktion wurde wie erwartet mit der Verfahrenskombination Ozonung und Aktivkohlefilter erzielt. Im betrachteten Untersuchungszeitraum liegt diese im Mittel bei rund 42 %. Während der ersten Wochen der Inbetriebnahmephase wurde sogar eine CSB-Reduktion von 65 % erzielt. Auch in der Ozonung wird der CSB bis zu maximal 52 % reduziert (im Mittel bei 13 %). Für die Kombination aus Ozonung und Sandfilter beträgt die CSB-Reduktion im Mittel 29 % (maximal ca. 59 %). Da bei diesen Messungen der homogenisierte Gesamt-CSB bestimmt wurde, kann durchaus vermutet werden, dass die Reduktion im Sandfilter größtenteils durch partikulären Rückhalt erfolgt. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass auch zusätzlich ein biochemischer Abbau des gelösten CSB stattfindet.



**Abbildung 82: DOC-Konzentrationen und Elimination in den einzelnen Verfahrensstufen**

Hohe Konzentrationen an DOC oder CSB (organische Hintergrundmatrix) beeinflussen die Leistungsfähigkeit der Ozonung erheblich. Für den Zeitraum Oktober 2017 bis Juni 2018 ist erkennbar, dass die CSB-Konzentrationen im Ablauf der Ozonung sowie in den Filterabläufen leicht ansteigen und dadurch die Eliminationsraten für den CSB gegen März/April 2018 etwas sinken.

Eine Verringerung der CSB-Eliminationsleistung in der Ozonung geht einher mit der signifikanten Abnahme der Eliminationsleistung bei den Indikatorsubstanzen (z.B. im Februar 2018 mit häufigeren Abschaltungen der Ozonanlage, siehe dazu auch Kapitel 6.4 und 8.1.3). Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass neben hohen Nitritkonzentrationen im Februar 2018 auch die organische Hintergrundmatrix (DOC, CSB) ozonzehrend ist und dadurch eine Konkurrenzsituation bezüglich des Ozons vorliegt, welche die Eliminationswirkung bei den Spurenstoffen negativ beeinflussen kann.

Insgesamt konnte bis Anfang November 2018 für den DOC und CSB noch keine stark signifikante Verminderung der Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters beobachtet werden. Über den betrachteten Zeitraum ist beim DOC zu erkennen, dass die Adsorptionswirkung des Aktivkohlefilters im Sommer/Herbst 2018 im Vergleich zur ursprünglichen Adsorptionswirkung mit unbeladener Frischkohle etwas geringer ist (siehe Abbildung 84). Bis zum Herbst 2018 und einem durchgesetzten Bettvolumen von mehr als 18.000 BVT betrug die DOC-Reduktion im Aktivkohlefilter zwischen 10 und 30 %, im Mittel 20,5 %. Auch bei der CSB-Reduktion ist die Entnahmewirkung im Aktivkohlefilter zu Beginn des Filterbetriebs am höchsten. Auch hier pegelt sich die CSB-Reduktion im Aktivkohlefilter bis zum Herbst 2018 auf ein gleichbleibendes Niveau zwischen 20 und 40 % (im Mittel bei 30 %) ein. Der extrem niedrige Wert am 19.04.2018 bei der CSB-Reduktion (6,25 % bei ca. 10.780 BVT) und der extrem niedrige Wert am 15.01.2018 bei der DOC-Reduktion (1,4 % bei ca. 5.500 BVT)

können bisher nicht erklärt werden. Ursachen hierfür sind vermutlich Einflüsse bei der Probenahme (nicht exakte zeitlich korrespondierende Probenahme oder lange Probenlagerung) in Verbindung mit relativ niedrigen Eingangskonzentrationen (DOC im Ablauf der Ozonung am 15.01.2018 bei ca. 5,6 mg/l und CSB am 19.04.2018 bei 16 mg/l).

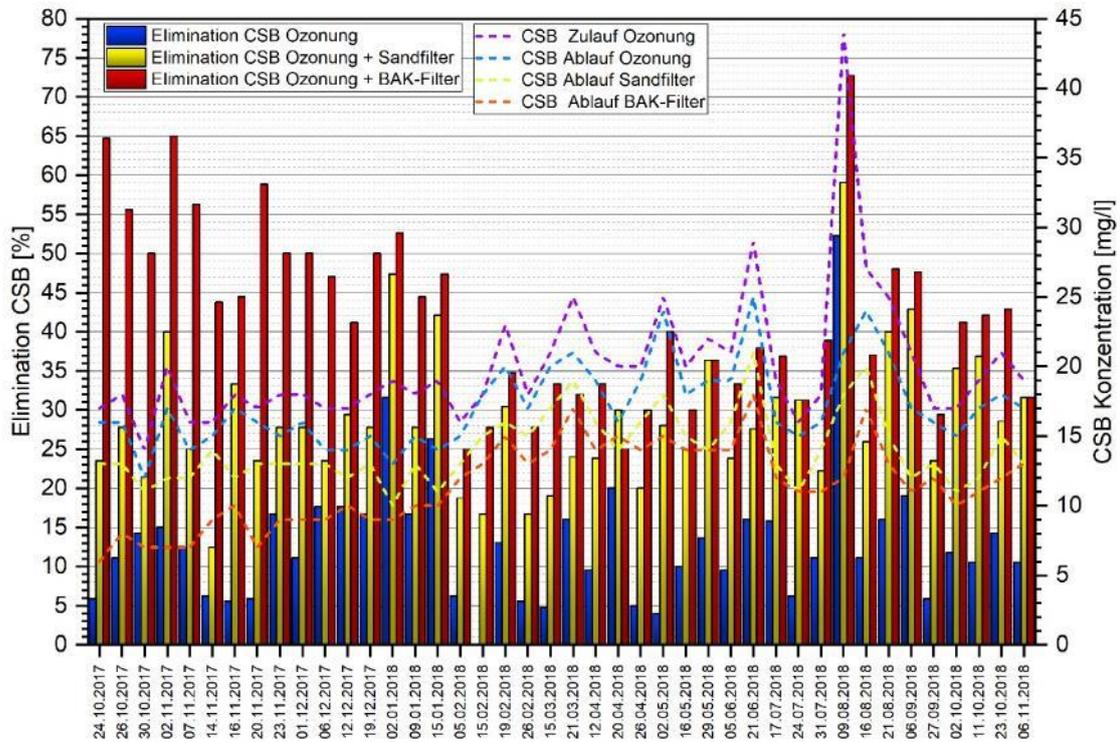


Abbildung 83: CSB-Konzentrationen und Elimination in den einzelnen Verfahrensstufen

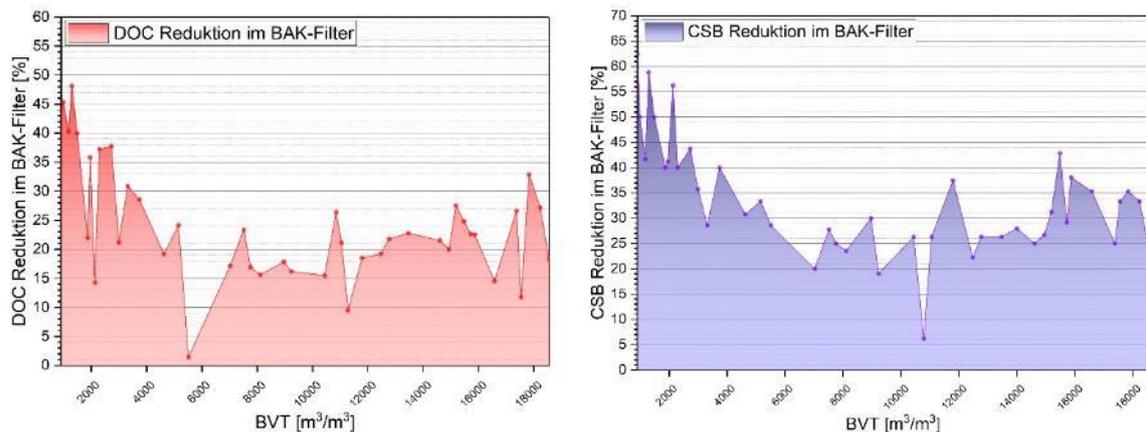


Abbildung 84: DOC und CSB Reduktion im Aktivkohlefilter in Abhängigkeit vom durchgesetzten Bettvolumina (BVT)

## 6.9 UNTERSUCHUNGEN ZUR ANORGANIK

Bei den Untersuchungen zu den anorganischen Parametern konnten im Abwasser der vierten Reinigungsstufe (Zulauf/Ablauf Ozonung, Ablauf Filter) bisher keine entscheidenden Auffälligkeiten festgestellt werden. Insbesondere Bromid lag im Zulauf der Ozonung meistens bei  $< 0,10$  mg/l. Damit kann die Bildung von Bromat bei den verwendeten Ozondosen in Weißenburg ausgeschlossen werden.

Eine Interpretation der basischemischen Parameter aus Sicht der Gewässergüte wird in Kapitel 6.14.2 gegeben.

## 6.10 MONITORING ZUR ERMITTLUNG ESTROGENER UND TOXISCHER WIRKUNGEN AUF FISCH UND MUSCHELN IM KLÄRANLAGENABLAUF DER KLÄRANLAGE WEIßENBURG SOWIE IN DER SCHWÄBISCHEN REZAT UNTERHALB UND OBERHALB DER KLÄRANLAGE

*Text und Ergebnisse: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 73*

Vorgesehen war, vor und nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, ein Monitoring mit Fischen und Muscheln zur Ermittlung estrogener sowie toxischer Wirkungen durchzuführen. Die Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe hatte sich jedoch verzögert und ein dauerhafter stabiler Anlagenbetrieb war zwischen 2017 und 2018 noch nicht erreicht (vgl. Kapitel 3.3 und 8.1), so dass bis dato nur die Untersuchungen vor der Inbetriebnahme durchgeführt werden konnten. Nachdem im Sommer 2018 die Erprobungsphase der vierten Reinigungsstufe noch nicht abgeschlossen war, wurde die Exposition von Fischen und Muscheln auf 2019 verschoben.

Um die Situation vor Einführung der vierten Reinigungsstufe zu erheben, wurden 2014 und 2015 folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Fischmonitoring: Estrogene und toxische Wirkungen 04.11. – 04.12.2014,
- In vitro Assay: Estrogene Wirkung und begleitende Untersuchung von Wasser und Abwasserproben (GC/MS-Screening und Steroidanalytik) 15.11. – 26.11.2014,
- Abflussmessungen 05.11. – 03.12.2014,
- Muschelschadstoffmonitoring 10.11. – 10.12.2014 und 28.4. – 9.12.2015.

Eine fundierte Darstellung und Diskussion der Ergebnisse wird vorerst zurückgestellt bis die Untersuchungen unter Einbeziehung eines stabilen Betriebes der Reinigungsstufe wiederholt und ausgewertet werden können. Die durchgeführten Untersuchungen werden im Folgenden kurz dargestellt.

### 6.10.1 Ergebnisse aus dem Fischmonitoring estrogene Wirkung

Die Ergebnisse der Untersuchungen 2014 zeigten an allen drei Probenstellen (Schwäbische Rezat oberhalb und unterhalb der Kläranlage sowie Ablauf der Kläranlage) eine signifikante estrogene Wirkung des Wassers bzw. Abwassers auf Fische (siehe Abbildung 85). In der Schwäbischen Rezat oberhalb der Kläranlage Weißenburg war die estrogene Wirkung auf Fische bereits deutlich messbar und höher als an den meisten der bisher untersuchten Fließgewässer.

Die estrogene Wirkung im Kläranlagenablauf war höher als in der Schwäbischen Rezat. Die estrogene Wirkung in der Schwäbischen Rezat unterhalb der Kläranlage war höher als in der Schwäbischen Rezat oberhalb der Kläranlage. Zusätzlich zu den Einträgen von Arzneimittelwirkstoffen ist die Kläranlage Weißenburg somit auch als Eintragspfad für hormonell wirksame Substanzen in die Schwäbischen Rezat anzusehen. Die estrogene Wirkung des Kläranlagenablaufs Weißenburg war geringer als 50 % der bisher in Bayern untersuchten Kläranlagenabläufe. Aufgrund der ungünstigen Mischungsverhältnisse in der Schwäbischen Rezat war die estrogene Wirkung auf Fische unterhalb der Kläranlage höher als in nahezu allen anderen bisher untersuchten Gewässern.

Aufgrund der Verzögerungen und der in Kapitel 3.3 und 8.1 geschilderten Stillstandszeiten bei der Ozonanlage während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase war eine zweite Fischexposition nicht möglich. Vergleichsdaten während des Betriebes der vierten Reinigungsstufe konnten daher noch nicht erhoben werden. Eine weitergehende Ergebnisdarstellung und -interpretation wird daher hier nicht vorgenommen.

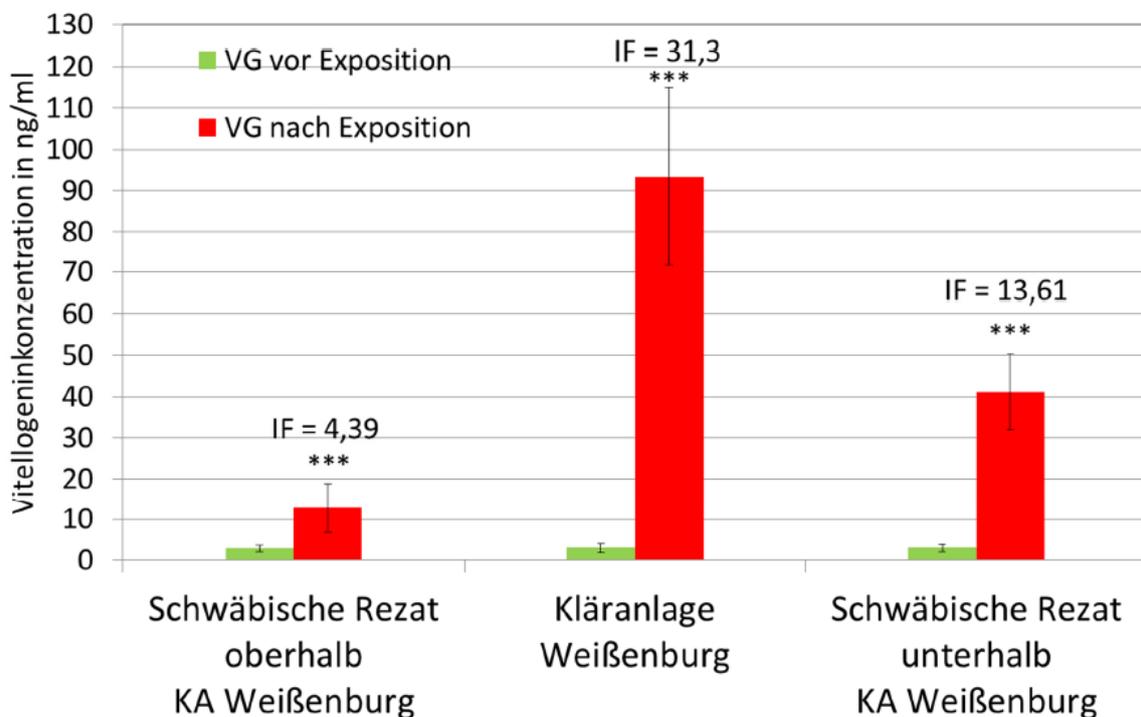


Abbildung 85: Vitellogeninkonzentration im Fischblut 2014

### 6.10.2 Methodik Fischmonitoring - Estrogene und toxische Wirkungen

Für das Wirkungsmonitoring wurden in der Zeit vom 04.11. bis 04.12.2014 jeweils 20 vierjährige, männliche Regenbogenforellen im Bypass verschiedenen Expositionssituationen ausgesetzt. Ein Fischkollektiv wurde in einer mit gereinigtem Abwasser der Kläranlage Weißenburg durchströmten Langstromrinne gehalten (Kläranlagenablauf). Zwei weitere Tiergruppen wurden in Langstromrinnen im Bypass dem Wasser aus der Schwäbischen Rezat ausgesetzt, welches oberhalb (Probennahmestelle 2, Höhe Spedition Wüst) bzw. unterhalb der Abwassereinleitung der Kläranlage Weißenburg (Probennahmestelle 3, Höhe Silbermühle) entnommen und durch die Rinnen gepumpt wurde. Ein Fischkollektiv wurde in der Teichanlage der LfU-Dienststelle Wielenbach als Kontrollgruppe in einer mit Quellwasser durchströmten Langstromrinne gehalten (Kontrolle Wielenbach).

Während des gesamten Versuchszeitraums erfolgte eine kontinuierliche Bestimmung der chemisch-physikalischen Wasserparameter Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Temperatur, Leitfähigkeit und Trübung, aber auch Ammonium und Nitrat in den Langstromrinnen mittels Online-Messsonden. Abbildung 86 zeigt eine Langstromrinne zur Fischexposition, die mit Probenehmern und Online-Messsonden ausgestattet ist.



**Abbildung 86: Langstromrinne zur Fischexposition mit Probenehmer und Online-Messsonden am Stand-ort Silbermühle im Herbst 2014**

Vor und nach der Exposition wurde den Fischen Blut entnommen, um die Konzentrationen verschiedener Biomarker und Hormone zu analysieren. Die Untersuchungen umfassten die Bestimmung von Vitellogenin (Vorstufe des Dotterproteins, wird unter Estrogeneinfluss auch von männlichen Tieren gebildet), Cytochrom P450-1A (CYP1A), Hitzeschockprotein (Hsp70), Prostaglandin E2 (PGE2), 17 $\beta$ -Estradiol sowie Testosteron.

Der Vitellogeningehalt im Blut der Fische wurde vor und nach der Exposition bestimmt, um einen möglichen Anstieg durch die estrogene Wirkung des Flusswassers bzw. Abwassers zu ermitteln. Der Nachweis von Vitellogenin (VG) in Blutproben männlicher Fische anhand eines ELISA (enzyme linked immunosorbent assay) stellt ein Indiz für eine Einwirkung estrogener Substanzen dar. Die Messung der VG-Ausschüttung ist dazu geeignet, estrogene Belastungen auch in sehr niedrigen Konzentrationsbereichen nachzuweisen.

CYP1A, Hsp 70, PGE2, 17 $\beta$ -Estradiol und Testosteron wurden nur nach der Exposition bestimmt. Die Bewertung dieser Biomarker erfolgt über einen Vergleich mit der Kontrollgruppe aus der Teichanlage Wielenbach.

Cytochrome katalysieren die Biotransformation verschiedener, insbesondere lipophiler Substanzen (planare aromatische und chlorierte Kohlenwasserstoffe, z.B. PAK, planare PCB's, Dioxine, Furane). Ihre Konzentration im Blutplasma steigt, wenn diese lipophilen Substanzen vermehrt in den Organismus gelangen. Daher stellen sie einen geeigneten Biomarker zur Beurteilung von Belastungen mit bestimmten Umweltchemikalien dar.

Stressproteine wie Hsp70 sind ubiquitär verbreitet und durch eine Vielzahl von Stressoren induzierbar. Seit Beginn der 1990er Jahre werden sie zur Erfassung von ökologischen und mikroevolutiven Veränderungen eingesetzt. Hsp70 ist hierbei die am besten untersuchte Familie, deren Induktionsmechanismen weitgehend bekannt sind. Durch Kurzzeitstudien an Fließgewässern bzw. Kläranlagen gelingt es über die Bestimmung des Hsp70-Levels, Stellen erhöhter Proteotoxizität zu detektieren.

PGE2 ist eines der Hauptprostaglandine, welches in das Entzündungsgeschehen involviert ist. Es erhöht die Gefäßpermeabilität (erhöhte Durchlässigkeit der Gefäßwände) und verstärkt den Schmerz. PGE2 kann als Indikator für nicht-stereoidale Analgetika wie z.B. Diclofenac eingesetzt werden. Da die Wirkung von Diclofenac auf einer nichtselektiven Hemmung der Cyclooxygenasen (COX) und in der Folge von Entzündungsmediatoren wie PGE2 beruht, kann eine Abnahme der Konzentration im Blut auf die Anwesenheit von Diclofenac hindeuten.

Die beiden Hormone 17 $\beta$ -Estradiol und Testosteron sind neben dem Biomarker Vitellogenin ebenfalls geeignete Marker, um hormonelle Wirkungen in Fließgewässern und Kläranlagenabläufen abzubilden.

### **6.10.3 Methodik In Vitro Assay - Estrogene Wirkung und begleitende Wasseranalytik (GC/MS-Screening und Steroidanalytik)**

Für die Untersuchung der estrogenen Aktivität von Abwasser und Wasserproben und der begleitenden chemischen Analytik wurden an sieben Terminen (15.11.2014, 16.11.2014, 17.11.2014; 19.11.2014; 21.11.2014; 24.11.2014; 26.11.2014) 24-h-Mischproben (je zwei Liter) des Kläranlagenablaufs sowie der Schwäbischen Rezat oberhalb (Probennahmestelle 2, Spedition Wüst) bzw. unterhalb der Abwassereinleitung der Kläranlage Weißenburg (Probennahmestelle 3, Silbermühle) entnommen. Die Proben wurden bei Wasserständen unterhalb des Mittelwassers, aber deutlich oberhalb des mittleren Niedrigwassers (MNQ) gezogen. Die Probennahmen starteten jeweils um 10 Uhr.

Diese Wasserproben wurden anhand eines in-vitro-Testsystems (E-Screen Assay) hinsichtlich estrogenen Wirkungen untersucht, um Informationen über die estrogenen Aktivität an verschiedenen Tagen zu erhalten. Mit der Durchführung des E-Screen Assay wurde das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Uni Stuttgart (ISWA) beauftragt. Zusätzlich erfolgte an Parallelproben ein GC/MS-Screening auf ein breites Spektrum an chemischen Verbindungen durch das ISWA, da auch verschiedene chemische Verbindungen estrogen wirksam sind. In weiteren Parallelproben wurde durch das Labor des Zweckverbands Landeswasserentsorgung in Langenau die Konzentrationen von estrogen wirksamen Steroidhormonen und deren Metabolite (17 $\alpha$ -Estradiol, 17 $\beta$ -Estradiol, Ethinylestradiol, Estron und Estriol) bestimmt.

### **6.10.4 Methodik - Abflussmessung**

Über den Zeitraum vom 05.11. bis 03.12.2014 wurde eine kontinuierliche Abflussmessung der Schwäbischen Rezat unterhalb der Kläranlage Weißenburg vorgenommen (GWU Raven-Eye Non-Contact-Flowmeter, siehe Abbildung 87), um über die Abflussmengen aus den Konzentrationen in der Wasserphase Frachten berechnen zu können.



**Abbildung 87:** Abflussmessung an der Schwäbischen Rezat unterhalb der KA Weißenburg

#### **6.10.5 Methodik - Muschelschadstoffmonitoring**

Im Rahmen des Muschelschadstoffmonitorings werden Muscheln als Schadstoffsammler für bioakkumulierende Substanzen eingesetzt. Die erste Exposition wurde zeitgleich mit der Fischexposition durchgeführt. In der Zeit vom 10.11. bis 10.12.2014 wurden für die Rückstandsanalytik jeweils zehn Flussmuscheln (*Unio tumidus*) in einem abgeteilten Abschnitt der drei Langstromrinnen, in denen auch die Forellen exponiert waren, gehältert (Kläranlagenablauf Weißenburg, Schwäbische Rezat oberhalb und unterhalb der Kläranlage).

Eine Exposition von Muscheln, die wesentlich über einen Monat hinausgeht, ist in diesem System (Abbildung 88) nicht möglich. Die zweite Exposition wurde daher in Schwimmkäfigen und Langstromrinnen (Abbildung 89 und Abbildung 90) durchgeführt. Die Schwimmkäfige waren in der Schwäbischen Rezat verankert (Probennahmestelle 2: oberhalb der Kläranlage, Höhe Spedition Wüst; Probennahmestelle 3: unterhalb der Kläranlage, Höhe Silbermühle), die Langstromrinne (Probennahmestelle 8: Kläranlagenablauf) stand wie 2014 in der Kläranlage Weißenburg und wurde mittels Pumpe mit Kläranlagenablaufwasser beschickt.

Für die Rückstandsanalytik wurden am 28.04.2015 an diesen Probennahmestellen jeweils 70 Flussmuscheln (*Unio tumidus*) in die Schwimmkäfige bzw. Langstromrinne eingesetzt. Bis einschließlich 09.12.2015 wurden jeweils nach vier Wochen je fünf Muscheln entnommen. Nach der Herstellung von homogenem Probenmaterial erfolgte die chemische Analytik dieser Proben.



**Abbildung 88:** Muschelkäfige in der Langstromrinne am Standort Kläranlage Weißenburg im Herbst 2014



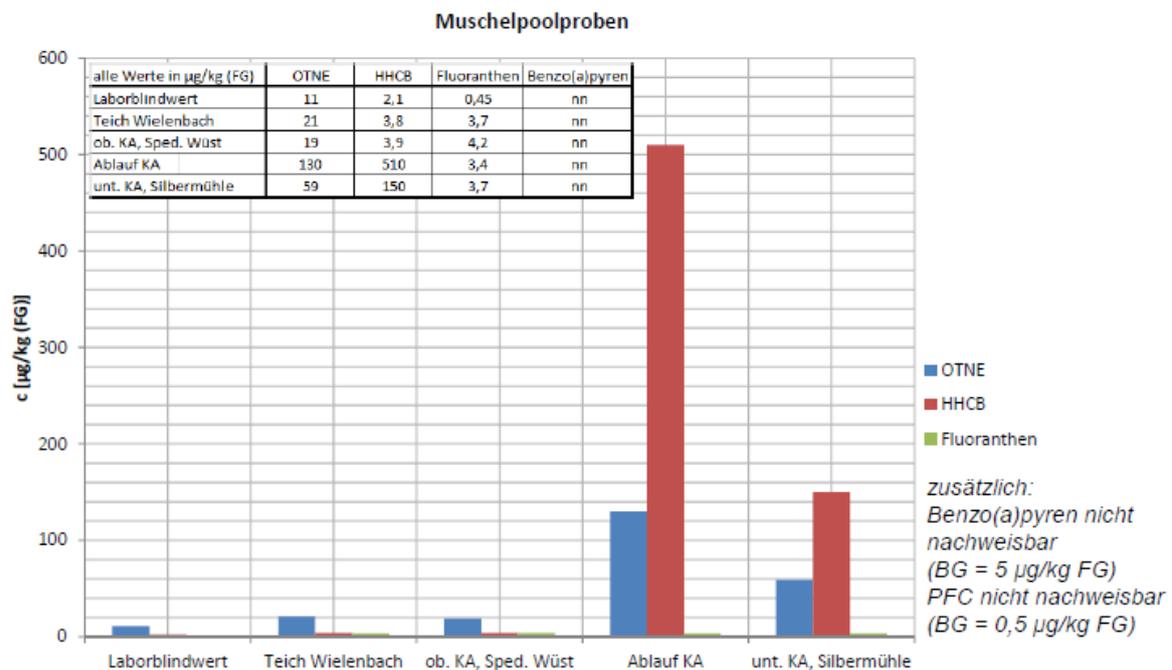
**Abbildung 89:** Muschelkäfig zur Langzeitexposition am Standort Silbermühle im Frühjahr 2015



**Abbildung 90:** Langstromrinne zur Muschelexposition mit Online-Messsonden am Standort Kläranlagenablauf im Frühjahr 2015

#### **6.10.6 Ergebnisse zum Akkumulationsmonitoring bei Muscheln**

Ausgewählte Ergebnisse der Rückstandsuntersuchungen in Muscheln für Fluoranthen und zwei Duftstoffe (HHCB (1,3,4,6,7,8-Hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethyl-cyclopenta(g)-2-benzopyran) und OTNE (Octahydro-tetramethyl-naphthalenyl-ethanone)) sind in Abbildung 91 dargestellt. Die Fluoranthenkonzentrationen in den Muscheln der verschiedenen Standorte unterschieden sich nicht. Die höchsten Duftstoffkonzentrationen wurden in den Muscheln aus dem Kläranlagenablauf nachgewiesen. Verglichen damit waren die Konzentrationen in Muscheln aus der Schwäbischen Rezat unterhalb der Kläranlage geringer, jedoch deutlich höher als in den Muscheln aus der Schwäbischen Rezat oberhalb der Kläranlage. Eine weitergehende Ergebnisdarstellung und -interpretation wird aufgrund der noch fehlenden Vergleichsdaten mit vierter Reinigungsstufe hier nicht vorgenommen. Eine zweite Muschelexposition mit vierter Reinigungsstufe ist für 2019 geplant.



**Abbildung 91: Analysenergebnisse Muschelpoolproben 2014 (Expositionszeit vier Wochen)**

## 6.11 MIKROBIOLOGISCH-HYGIENISCHE UND MOLEKULARBIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

*Text und Ergebnisse: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 77*

Die Kläranlage Weißenburg und die Schwäbische Rezat wurden sowohl vor als auch nach der Inbetriebnahme der Pilotanlage beprobt. Für die Untersuchungen wurden die Wasserproben als Schöpfproben an verschiedenen Stellen der Kläranlage und in der Schwäbischen Rezat gezogen.

### 6.11.1 Bestimmung der Fäkalindikatorbakterien

Der Nachweis der Fäkalindikatorbakterien *Escherichia coli* und Intestinale Enterokokken gibt einen Hinweis auf die fäkale Belastung eines Gewässers. Die Bestimmung erfolgte mit Hilfe des miniaturisierten MPN-Verfahrens in Mikrotiterplatten (Fa. Bio-Rad) gemäß DIN EN ISO 9308-3 (*E. coli*) bzw. DIN EN ISO 7899-1 (Intestinale Enterokokken).

Auch *Clostridium perfringens* ist ein Indikator für fäkale Verunreinigungen. *C. perfringens* bildet Sporen, die monatelang in der Umwelt überleben können, sehr viel länger als vegetative Zellen. Daher kann das Auftreten von *C. perfringens* Sporen ein Hinweis auf zurückliegende fäkale Verunreinigungen sein. *C. perfringens* wurde mittels Membranfiltrationsverfahren gemäß DIN EN ISO 14189 bestimmt.

### 6.11.2 Bestimmung fäkaler DNA-Marker mittels quantitativer PCR („Microbial Source Tracking“)

Der Nachweis der Fäkalindikatorbakterien gibt zwar einen Hinweis auf eine fäkale Belastung des Gewässers, erlaubt jedoch keinen Rückschluss auf deren Ursprung. Mit Hilfe sog.

„Source Tracking“-Methoden kann die Herkunft solcher Verunreinigungen ermittelt werden. Es wurde eine Methode eingesetzt, die eine Unterscheidung zwischen menschlichen und Wiederkäuerbürtigen fäkalen Verunreinigungen erlaubt. Mit dieser Methode werden mittels PCR genetische Marker direkt in der aus den Proben extrahierten DNA nachgewiesen. Ein zusätzlicher Kultivierungsschritt ist hierfür nicht erforderlich.

Die Proben wurden unmittelbar nach Probeneingang filtriert (0,2 µm Polycarbonat-Membranfilter) und die Filter bei -80 °C bis zur DNA-Extraktion gelagert. Die Extraktion der DNA erfolgte in Anlehnung an die Methode von Griffiths et al. (2000). Die Quantifizierung der genetischen Marker aus den Extrakten wurde mittels quantitativer PCR (qPCR) auf dem CFX96 Real-Time PCR System (Bio-Rad) durchgeführt. Untersucht wurden die Markergene BacHum (Kildare et al., 2007) und HF183 (Green et al., 2014) für humanbürtige fäkale Verunreinigungen sowie die Markergene BacR (Reischer et al., 2006) und RumBac (Mieszkin et al., 2010), die auf fäkale Verunreinigungen durch Wiederkäuer schließen lassen.

### 6.11.3 Nachweis der bakteriellen Biomasse und von Antibiotikaresistenzgenen (ARG) mittels quantitativer PCR

Direkt nach Probeneingang wurden die Wasserproben filtriert (20 bis 500 ml, 0,2 µm Polycarbonat-Membranfilter) und die Filter wurden bei -80 °C aufbewahrt. Die Extraktion der Zell-gebundenen DNA erfolgte nach der Methode von Griffiths et al. (2000). Der Nachweis von vier relevanten Antibiotikaresistenzgenen (ARG, siehe Tabelle 27) und der bakteriellen Biomasse im Abwasser und der Schwäbischen Rezat erfolgte mit Hilfe des CFX96 Real-Time PCR Systems von Bio-Rad. Zur Bestimmung der bakteriellen Biomasse wurde als DNA-Marker das 16S rRNA-Gen eingesetzt.

**Tabelle 27: 16S rRNA Gen zur Quantifizierung der bakteriellen Biomasse und vier verschiedene Antibiotikaresistenzgene (ARG)**

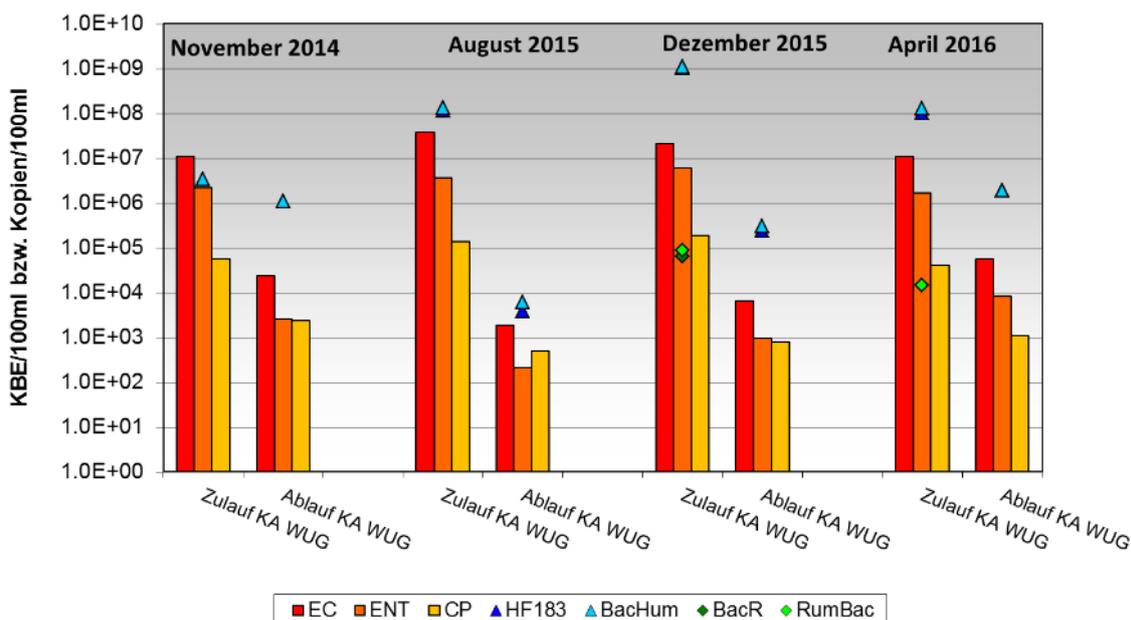
| Gen          | Gen kodiert für   | Resistenzmechanismus           | Referenz (Literatur)                            |
|--------------|---|--------------------------------|---|
| 16S rRNA-Gen | Ribosomale RNA, Taxonomischer Marker für Bakterien                                | -                              | modifiziert nach (López-Gutiérrez et al., 2004) |
| sul1-ARG     | Resistenz gegen Sulfonamide   | Alternatives DHPS Enzym        | (Pei et al., 2006)                              |
| ermB-ARG     | Resistenz gegen Makrolide: Erythromycin   | Erythromycin-Ribosom-Methylase | (Alexander et al., 2015)                        |
| blaVIM-ARG   | Resistenz gegen Beta-Laktame: Penicilline; Cephalosporine 3.+4. Gen.; Carbapeneme | Metallo-Beta Laktamase         | (Volkman et al., 2007)                          |
| ampC-ARG     | Resistenz gegen Beta-Laktame: Penicilline; Cephalosporine 3.+4. Gen.; Monobactame | AmpC-Beta-Laktamasen           | (Volkman et al., 2004)                          |

#### 6.11.4 Ergebnisse zu den Fäkalindikatorbakterien vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe

In den Jahren 2014 bis 2016 wurden insgesamt vier Untersuchungen im Zu- und Ablauf der Kläranlage Weißenburg sowie in der Schwäbischen Rezat durchgeführt.

Im Zulauf lag die Belastung mit *E. coli*, Enterokokken und *Clostridium perfringens* in einer für Kläranlagen üblichen Größenordnung und wies nur mäßige Unterschiede auf. Im Ablauf wurden wesentlich größere Konzentrationsschwankungen festgestellt, insbesondere für *E. coli* und Enterokokken (siehe Abbildung 92). Dies führte zu deutlichen Unterschieden in den Reduktionsraten während der konventionellen Abwasserreinigung, die für *E. coli* und Enterokokken zwischen 2 und 4 Zehnerpotenzen, für *Clostridium perfringens* zwischen 1,5 und 2,5 Zehnerpotenzen lagen.

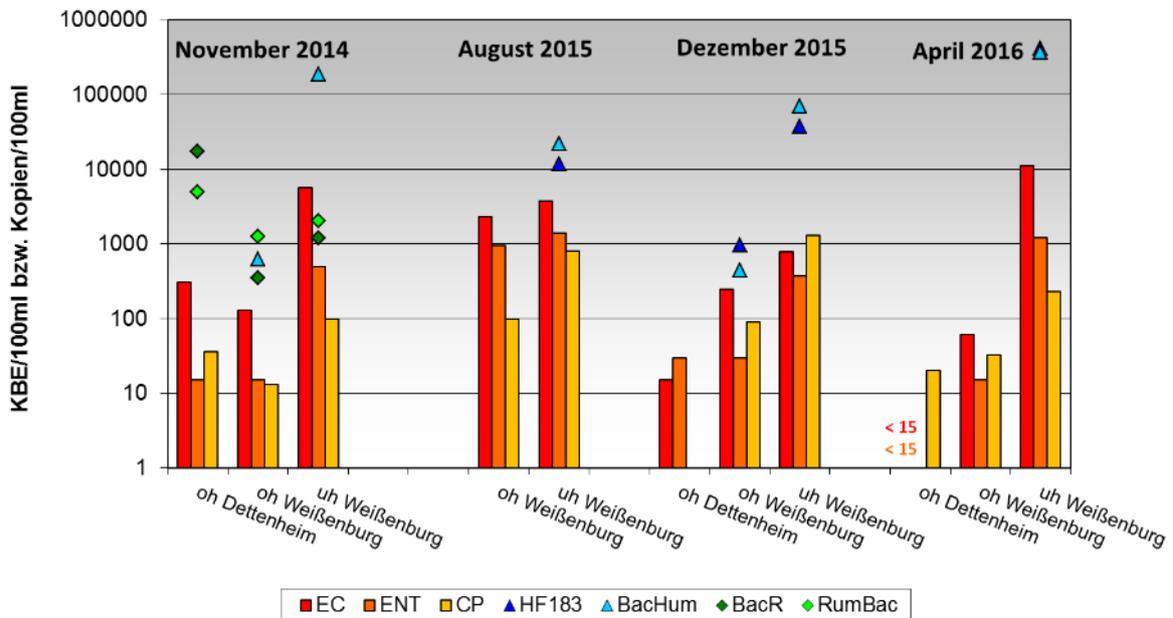
Im Zu- und Ablauf wurden wie erwartet hohe Konzentrationen an humanbürtigen fäkalen DNA-Markern nachgewiesen (BacHum und HF183). Wiederkäuerbürtige fäkale DNA-Marker (BacR, RumBac) wurden i.d.R. nicht gefunden. Gelegentlich wurden sehr geringe Mengen im Zulauf gemessen.



**Abbildung 92:** Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Zu- und Ablauf der Kläranlage Weißenburg (EC = *Escherichia coli*; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = *Clostridium perfringens*; HF183 und BacHum = humanbürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuerbürtige Fäkal-DNA-Marker)

In der Schwäbischen Rezat wurden oberhalb der Kläranlage Weißenburg deutliche Unterschiede in der Konzentration an Fäkalindikatorbakterien festgestellt. So schwankte die Konzentration von *E. coli* zwischen 60 – 2.000 MPN/100 ml. Unterhalb der Kläranlageneinleitung kam es immer zu einem Anstieg der Bakterienkonzentrationen, der z.T. sehr deutlich ausfiel (*E. coli*: 780 – 11.000 MPN/100 ml; siehe Abbildung 93). Dass dieser Anstieg auf die Einleitung der Kläranlage Weißenburg zurückzuführen war, konnte an der enormen Zunahme der Konzentration humanbürtiger DNA-Marker bestätigt werden. Wiederkäuerbürtige Fäkal-DNA-Marker wurden nur im November 2014 nachgewiesen. Die Konzentrationen

waren vor allem oberhalb der Kläranlage Dettenheim sehr hoch. Da an dieser Probenahmestelle keine humanbürtigen Fäkal-DNA-Marker nachgewiesen wurden, beruht die fäkale Belastung dort sehr wahrscheinlich auf Einträgen aus der Landwirtschaft. Möglicherweise wurde kurz zuvor im Einzugsgebiet Gülle ausgebracht.

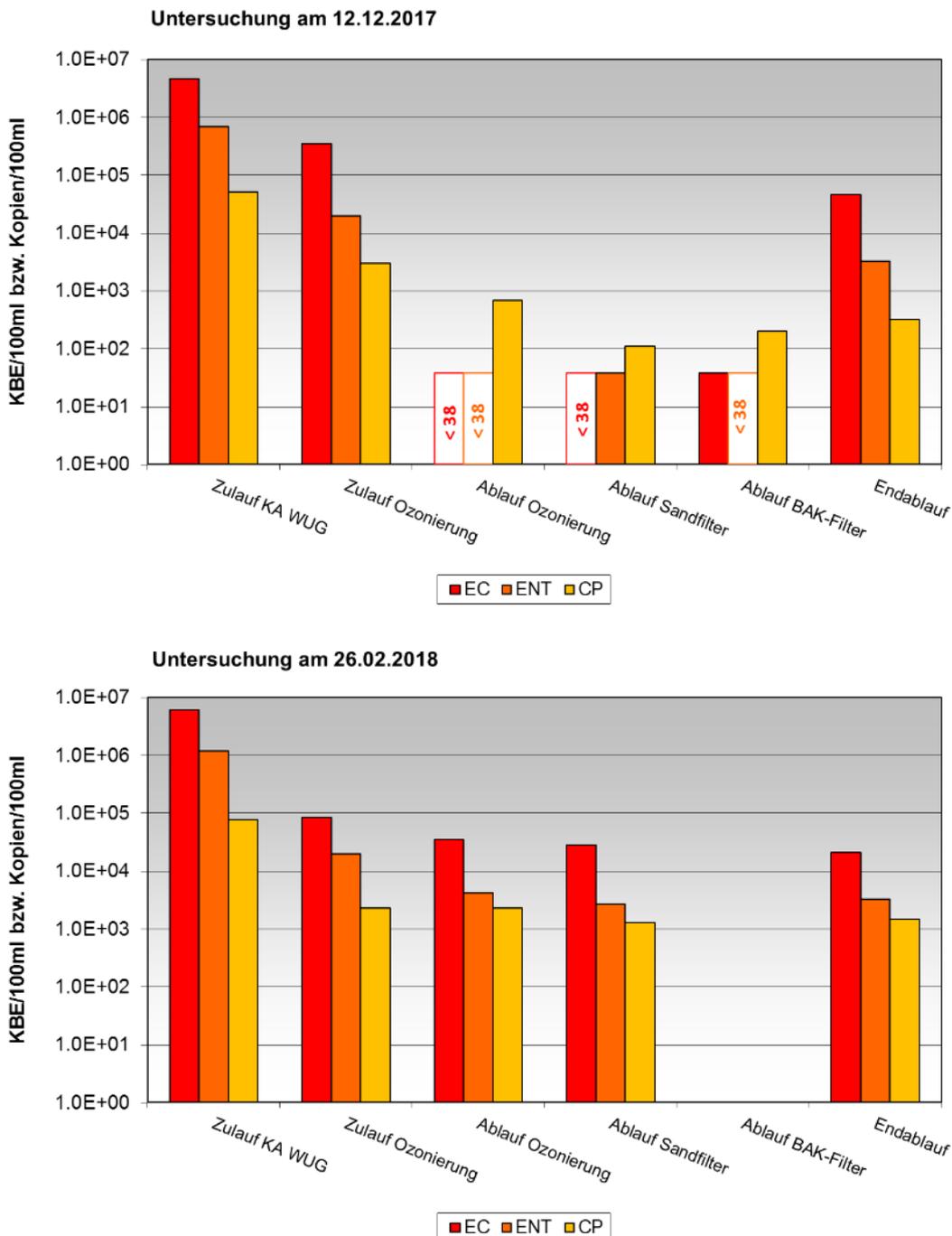


**Abbildung 93:** Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in der Schwäbischen Rezat (EC = *Escherichia coli*; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = *Clostridium perfringens*; HF183 und BacHum = human-bürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuer-bürtige Fäkal-DNA-Marker)

### 6.11.5 Ergebnisse zu den Fäkalindikatoren nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe

Es wurden zwei Untersuchungen zur Reduktion der Fäkalindikatorbakterien durch die vierte Reinigungsstufe durchgeführt (siehe Abbildung 94). Bei der Untersuchung am 12.12.2017 wurden die Parameter *E. coli* und Enterokokken durch die Ozonbehandlung ( $3,9 \text{ g O}_3/\text{m}^3$ ) auf Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (38 MPN/100 ml) reduziert. Die Werte blieben auch nach der Filtrationsstufe (Aktivkohlefilter bzw. Sandfilter) unterhalb bzw. an der Bestimmungsgrenze. Dies entspricht einer Reduktionsrate von etwa 4 log-Stufen für *E. coli* und 2,7 log-Stufen für Enterokokken. Welche Reduktionsrate bei der in der Untersuchung eingesetzten Ozondosis ( $3,9 \text{ g O}_3/\text{m}^3$ ) im Falle von höheren Keimzahlen im Zulauf erreicht werden könnte, kann aus diesem Einzelergebnis nicht abgeleitet werden. Auch Schrader (2007) beschreibt Untersuchungen, in denen *E. coli* und Enterokokken ab einer Ozondosis von  $3 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  auf Konzentrationen unterhalb von 36 KBE/100 ml reduziert wurden. Der Sporenbildner *Clostridium perfringens* wurde ebenfalls reduziert, allerdings nicht so effektiv wie *E. coli* und Enterokokken. Die Eliminationsrate betrug für die Ozonung mit Sandfilter 1,5 log-Stufen und für die Ozonung mit Aktivkohlefilter 1 log-Stufe (siehe Tabelle 28). Die deutlich geringere Reduktion beruht vermutlich auf der größeren Widerstandsfähigkeit der Sporen. Eine geringere Reduktionsleistung des Sporenbildners *Clostridium perfringens* im Vergleich zu nicht Sporenbildenden Bakterien wie *E. coli* und Enterokokken wurde auch für die UV-Desinfektion festgestellt (vgl. Popp et al., 2004).

Am 26.02.2018 stand kein Ozon zur Desinfektion durchgehend zur Verfügung. In der Folge konnte zwischen dem Zulauf zur Ozonung und dem Ablauf des Sandfilters keine bzw. nur eine geringe Reduktion beobachtet werden. Die Reduktionsraten lagen meist < 0,5 log-Stufen (siehe Tabelle 28). Da die Messunsicherheit mikrobiologischer Verfahren bei 0,5 log-Stufen liegt, sind diese Unterschiede als nicht signifikant zu bewerten.



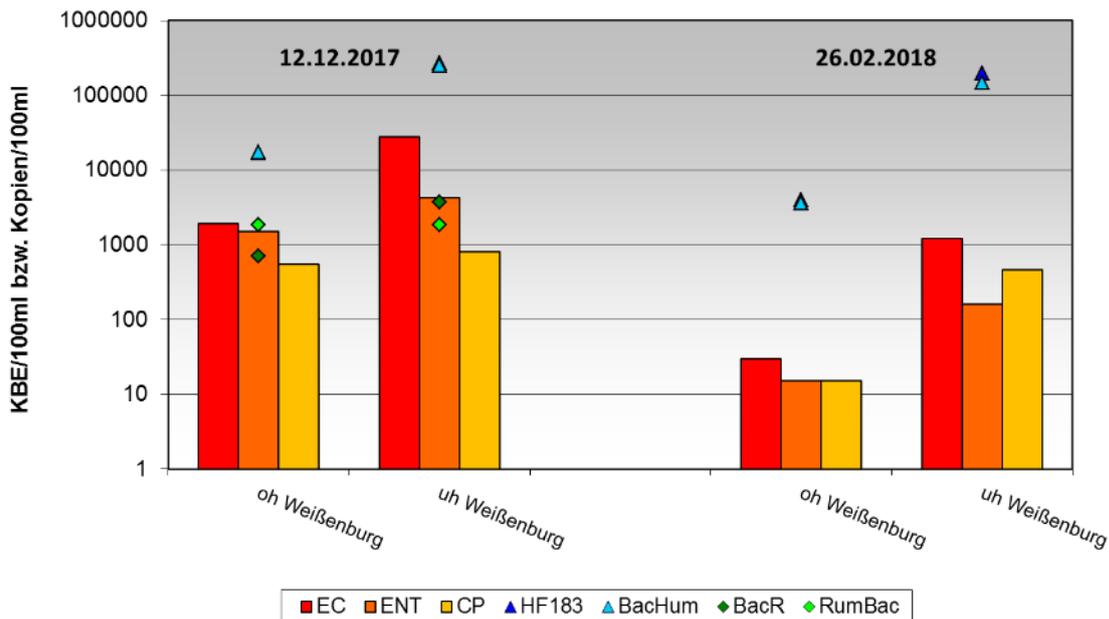
**Abbildung 94:** Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Zulauf der Kläranlage Weißenburg (Ablauf Vorklärung) und in den verschiedenen Zu- und Abläufen der vierten Reinigungsstufe (EC = *Escherichia coli*; ENT = Intestinale Entero kokken, CP = *Clostridium perfringens*)

Betrachtet man die Bakterienkonzentrationen im Endablauf an beiden Untersuchungsstagen, so stellt man – trotz der sehr guten Reduktionsraten am 12.12.2017 – keine großen Unterschiede fest (siehe Abbildung 94). Dies liegt daran, dass in der vierten Reinigungsstufe zu diesem Zeitpunkt nicht der gesamte Ablauf, sondern nur ein Teilstrom von ca. 80 % behandelt wurde (Wassermenge zur vierten Reinigungsstufe am 12.12.2017 > 430 m<sup>3</sup>/h). Der Endablauf enthielt daher ca. 20 % Abwasser (aus der Bypass-Umfahrung), das keiner weitergehenden Abwasserreinigung unterzogen wurde. Dies führte am 12.12.2017 zu einem starken Anstieg der Bakterienkonzentrationen im Endablauf auf Werte von 46.000 MPN/100 ml für *E. coli* bzw. 3.300 MPN/100 ml für Enterokokken. Die Gesamtreduktionsrate betrug dann nur noch etwa eine Zehnerpotenz. Für eine effektive Reduktion mikrobiologischer Parameter ist es also nicht ausreichend, nur einen Teilstrom zu behandeln, sondern es müsste das gesamte Abwasser der weitergehenden Reinigung unterzogen werden.

**Tabelle 28:** Reduktionsleistung (in log-Stufen) zwischen den verschiedenen Stufen der weitergehenden Abwasserbehandlung auf der Kläranlage Weißenburg (EC = *Escherichia coli*; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = *Clostridium perfringens*)

| Datum   | Probenahmestellen  | Reduktionsleistung (in log-Stufen) |       |      |
|---|--|------------------------------------|-------|------|
|   |  | EC                                 | ENT   | CP   |
| 12.12.2017  | Zulauf Ozonung (PN 5) - Ablauf Ozonung (PN 6)            | > 4,0                              | > 2,7 | 0,6  |
|   | Ablauf Ozonung (PN 6) - Ablauf Sandfilter (PN 7.1)       | -                                  | -     | 0,8  |
|   | Ablauf Ozonung (PN 6) - Ablauf Aktivkohlefilter (PN 7.2) | -                                  | -     | 0,5  |
|   | Zulauf Ozonung (PN 5) - Endablauf (PN 8)                 | 0,9                                | 0,8   | 1,0  |
| 26.02.2018<br>(Ozonproduktion teilweise abgeschaltet) | Zulauf Ozonung (PN 5) - Ablauf Ozonung (PN 6)            | 0,4                                | 0,7   | 0    |
|   | Ablauf Ozonung (PN 6) - Ablauf Sandfilter (PN 7.1)       | 0,1                                | 0,2   | 0,2  |
|   | Ablauf Ozonung (PN 6) - Ablauf Aktivkohlefilter (PN 7.2) | n.b.                               | n.b.  | n.b. |
|   | Zulauf Ozonung (PN 5) - Endablauf (PN 8)                 | 0,6                                | 0,8   | 0,2  |

Aufgrund der hohen fäkalen Belastung des Endablaufs (aus dem Bypass) führte die Einleitung in die Schwäbische Rezat auch bei funktionierendem Betrieb der vierten Reinigungsstufe (12.12.2017) zu einem Anstieg der fäkalen Belastung im Gewässer um mehr als das Zehnfache (siehe Abbildung 95). Die zeitgleich gemessene Zunahme der Konzentration humanbürtiger Fäkal-DNA-Marker bestätigt die Herkunft der Belastung durch die Kläranlageeinleitung. Die gemessenen Konzentrationen an Wiederkäuerbürtigen DNA-Markern oberhalb und unterhalb der Kläranlage blieben dagegen weitgehend unverändert. Die Ergebnisse zeigen, dass es für eine dauerhaft stabile Reduktion der fäkalen Belastung in der Schwäbischen Rezat nicht ausreichend wäre, nur einen Teilstrom des Abwassers einer weitergehenden Reinigung zu unterziehen.



**Abbildung 95:** Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in der Schwäbischen Rezat während des Betriebs der vierten Reinigungsstufe (EC = *Escherichia coli*; ENT = Intestinale Enterokokken, CP = *Clostridium perfringens*; HF183 und BacHum = human-bürtige Fäkal-DNA-Marker; BacR und RumBac = Wiederkäuer-bürtige Fäkal-DNA-Marker)

### 6.11.6 Ergebnisse Krankheitserreger

Im Rahmen des Projekts sollte auch untersucht werden, inwieweit abwasserrelevante Krankheitserreger durch eine vierte Reinigungsstufe reduziert werden. Nachgewiesen wurden Salmonellen und *Campylobacter* aus der Gruppe der Bakterien sowie somatische Coliphagen und F-spezifische RNA-Bakteriophagen, die als Modellorganismen für enteropathogene Viren dienen. Die Analytik erfolgte extern am Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit der Universität Bonn.

Es wurde eine Untersuchung am 26.02.2018 durchgeführt. Da sowohl die Ergebnisse der Fäkalindikatorreduktion als auch der Spurenstoffelimination zeigen, dass die Ozonung zu diesem Zeitpunkt teilweise abgeschaltet war (vgl. Kapitel 3 und 8.1), sind die Ergebnisse nur unter Vorbehalt zu betrachten. Weitere Untersuchungen wurden aufgrund des zeitweise nicht stabilen Anlagenbetriebs bei der Ozonanlage während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase nicht durchgeführt. Da die Ergebnisse zu den Krankheitserregern auf einer einmaligen Untersuchung bei nicht stabilem Anlagenbetrieb basieren und eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie eine Verwertbarkeit der Erkenntnisse nicht gegeben ist, werden die gemessenen Konzentrationen der abwasserrelevanten Krankheitserreger an dieser Stelle nicht vorgestellt. Im Anhang F des Berichts sind die Ergebnisse dieser Untersuchung als Zusatzinformationen beigefügt.

### 6.11.7 Molekularbiologische Untersuchungen von Antibiotikaresistenzgenen (ARG)

Das Ziel dieser Untersuchung war es zu zeigen, inwieweit die vierte Reinigungsstufe eine Elimination von Antibiotikaresistenzgenen bewirkt. Hierfür wurden vier relevante Antibio-

tikaresistenzgene (ARG) als Marker ausgewählt. *sul1*-ARG und *ermB*-ARG wurden untersucht, weil sie einen Resistenzmechanismus gegen die in der aquatischen Umwelt häufig detektierten Antibiotikagruppen Sulfonamide und Makrolide kodieren. Um Antibiotikaresistenzen gegen die im klinischen Alltag wichtigen Beta-Laktame zu erfassen, wurden zusätzlich die beiden ARG *ampC* und *blaVIM* analysiert. Außerdem wurde die gesamte bakterielle Biomasse in den Wasserproben indirekt mit den taxonomischen DNA-Markern für das 16S rRNA-Gen bestimmt. Die Ergebnisse werden als Gen-Kopien/ml in einer logarithmischen Skalierung dargestellt (Abbildung 96 und Abbildung 97).

Insgesamt wurden die Kläranlage Weißenburg und die Schwäbische Rezat dreimal vor Inbetriebnahme (Mai bis August 2017, Abbildung 96) und einmal nach Inbetriebnahme (Oktober 2017, Abbildung 97) der vierten Reinigungsstufe beprobt. In letzterem Fall wurden ca. 80 % des Kläranlagenzulaufs über die vierte Reinigungsstufe geführt (Zufluss > 430 m<sup>3</sup>/h), ca. 20 % liefen über den Bypass daran vorbei. Daher sind nur eingeschränkte Aussagen zur Eliminationswirkung möglich. Das unbehandelte Abwasser (Ablauf Vorklärung = PN 4) zeigt für die vier Probenahmetage eine relativ konstante Bakterienkonzentration von 10<sup>8</sup> bis 10<sup>9</sup> Gen-Kopien/ml. Alle vier ARG konnten im Kläranlagenzulauf nachgewiesen werden. Für die verschiedenen Untersuchungstermine wurde eine vergleichbare ARG-Belastung im Zulauf mit einem Schwankungsbereich von ≤ 0,5 log-Stufen, der im Bereich der Messunsicherheit des Verfahrens liegt, bestimmt. Das *sul1*-ARG wurde mit 10<sup>7</sup> Gen-Kopien/ml am häufigsten detektiert. Geringere Konzentrationen wurden für *ermB* (10<sup>6</sup> Gen-Kopien/ml), *blaVIM* (10<sup>5</sup> Gen-Kopien/ml) und *ampC* (10<sup>4</sup> Gen-Kopien/ml) gemessen. Die prozentualen ARG-Anteile an der bakteriellen Biomasse variieren im Kläranlagenzulauf für die vier Gene zwischen < 0,01 % und 2-3 % (*sul1*-ARG ≈ 2-3 %; *ermB*-ARG ≈ 0,1-0,3 %; *blaVIM* < 0,1 %; *ampC* < 0,01 %).

Vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe wurden nach der konventionellen Abwasserreinigung (mechanische und biologische Stufen, Ablauf Nachklärbecken) ca. 90 bis 99 % (1-2 log-Stufen) der bakteriellen Biomasse und ARG aus dem Abwasser entfernt. Vergleichbare Eliminationsraten während der konventionellen Abwasserreinigung wurden auch von anderen Arbeitsgruppen nachgewiesen (vgl. Caucci et al., 2016; Czekalski et al., 2012). Für alle vier ARG wurde keine vollständige Elimination erreicht und es wurden noch Konzentrationen im Bereich von 10<sup>2</sup> bis 10<sup>6</sup> Gen-Kopien/ml im Kläranlagenablauf quantifiziert (Ablauf NKB, Abbildung 96).

Nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe (Probennahme 23. Oktober 2017, Abbildung 97) erfolgte eine weitere ARG-Reduzierung durch die Ozonung (4,9 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>) um mindestens 1,5-2 log-Stufen, die den in der Literatur beschriebenen Größenordnungen entsprach (Alexander et al., 2016). Die beiden ARG *blaVIM* und *ampC* kamen bereits vor Behandlung in geringen Konzentrationen vor und wurden durch die Ozonstufe vollständig eliminiert. Eine höhere Überlebenschance von resistenten Bakterien im Vergleich zu nicht resistenten Mikroorganismen durch die Ozonbehandlung, was zu einer selektiven Anreicherung von ARG in der Biozönose führen würde, konnte bei dieser einmaligen Untersuchung nicht beobachtet werden. Um den Effekt der selektiven Anreicherung dokumentieren und bewerten zu können, sind weitere Untersuchungen bei längerem und stabilem Anlagenbetrieb erforderlich.

Die anschließende Filtration über einen Sandfilter bzw. Aktivkohlefilter hatte keinen weiteren Effekt auf das Vorkommen der Resistenzgene *sul1* und *ermB* im Ablauf. Allerdings kam

es zu einer Zunahme der gesamten Bakterienzahl (ca. 1 log-Stufe) nach dem Filtrations-schritt, was vermutlich auf einen Auswaschungsprozess von bakterieller Biomasse aus den Filtersystemen hinweisen könnte. Aufgrund der kurzen Laufzeit (10 d) der vierten Reinigungsstufe zum Zeitpunkt der Probenahme am 23. Oktober 2017 hatte sich noch kein stabiler Biofilm auf den Oberflächen des Filtermaterials entwickelt, welcher zwei gegensätzliche Effekte auf die ARG-Konzentrationen haben könnte. Durch das Rückhaltevermögen der bewachsenen Filteroberflächen könnte eine ARG-Elimination stattfinden. Zusätzlich könnten die optimalen Bedingungen im Biofilm einen horizontalen Gentransfer der ARG begünstigen und zu einer Ausbreitung der ARG innerhalb der bakteriellen Biozönose führen. Bei einer Auswaschung der Bakterien würden die ARG im Ablauf der Filtersysteme ansteigen. Diese vermuteten und in Weißenburg noch nicht nachgewiesenen potentiellen Wirkmechanismen der Filtersysteme auf die ARG zeigen auf, dass weitere Untersuchungen und Messungen notwendig sind, um diese Effekte genauer in den beiden parallel geschalteten und kontinuierlich betriebenen Filtern (Sandfilter und Aktivkohlefilter) gesichert zu analysieren. Der Gesamt-Kläranlagenablauf (= PN 8) nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe zeigte trotz der zusätzlichen ARG-Elimination nach der Ozonung keine effektive Reduktion der ARG im Vergleich zum Ablauf des Nachklärbeckens. Da nur ein Teilstrom des Abwassers von 80 % mit Ozon behandelt wurde und die verbleibenden 20 % Abwasser sehr hohe ARG-Konzentrationen von bis zu  $10^6$  Gen-Kopien/ml besitzen, steigen die ARG-Mengen bei Zusammenführung dieser Teilströme wieder stark an. Diese Beobachtungen bestätigen die Schlussfolgerungen der mikrobiologisch-hygienischen Untersuchungen, dass sobald ein Teilstrom im Bypass an der vierten Reinigungsstufe vorbeigeführt wird, eine weitgehende Reduktion der bakteriellen Belastung im Gesamtkläranlagenablauf nicht mehr möglich ist.

Die blau hinterlegten Bereiche in Abbildung 96 und Abbildung 97 kennzeichnen die Messergebnisse in der Schwäbischen Rezat. Eine Grundbelastung des sul1-ARG von  $10^2$  bis  $10^3$  Genkopien/ml, was einem prozentualen Anteil von 0,01 % - 0,05 % an der bakteriellen Biomasse entspricht, wurde bereits in der Schwäbischen Rezat ohne Kläranlageneinfluss nachgewiesen (Schwäbische Rezat vor Kläranlage Dettenheim = PN 1). Alle anderen ARG konnten in diesem Gewässerabschnitt nicht detektiert werden. Nach der Einleitung der Abwasserteichanlage Dettenheim (Kläranlage Dettenheim, 600 EW; Probenahmestelle Rezat vor Kläranlage Weißenburg = PN 2) wurden zusätzlich zum sul1-ARG im Untersuchungszeitraum von Mai bis August 2017 die beiden ARG ermB und ampC in geringen Konzentrationen ( $< 10$  Gen-Kopien pro ml) in der Schwäbischen Rezat nachgewiesen. Um ca. 2 log-Stufen höhere ARG-Konzentrationen wurden sowohl für sul1 als auch für ermB am 23. Oktober 2017 in dieser Flusstrecke gemessen. Diese beobachteten Schwankungen weisen darauf hin, dass für aussagkräftige Bewertungen von ARG-Belastungssituationen im Gewässer eine umfangreiche Datenbasis notwendig ist. Einen signifikanten Anstieg aller vier ARG in der Schwäbischen Rezat wurde für alle Probenahmetage nach der Einleitung der Kläranlage Weißenburg (PN 3) festgestellt. Dieser Gewässerabschnitt zeigte z.B. bei Trockenwetter (31. August 2017, Abbildung 96) aufgrund des ungünstigen Mischungsverhältnisses von Vorfluter und gereinigtem Abwasser (teilweise bis 80 % Abwasseranteil) vergleichbare ARG-Konzentrationen von  $10^2$  bis  $10^6$  Gen-Kopien/ml wie das gereinigte Abwasser der Kläranlage Weißenburg. Allerdings erfolgte nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe keine signifikante Verbesserung der ARG-Belastung in diesem Gewässerab-

schnitt (23. Oktober 2017, Abbildung 97). Wie bereits diskutiert wurde, zeigte der Gesamt-  
ablauf nach Inbetriebnahme der Pilotanlage erstens durch die hohe ARG-Belastung im Ab-  
lauf des Nachklärbeckens und zweitens durch die Ozon-Teilstrombehandlung keine effek-  
tive Reduzierung der ARG. Aus diesen Gründen wurden noch hohe ARG-Mengen ins Ge-  
wässer eingeleitet.

Um die Effektivität der vierten Reinigungsstufe zur Minimierung der ARG-Belastung in der  
Schwäbischen Rezat sicher bewerten zu können, sind weitere Untersuchungen und Daten-  
erhebungen unter Berücksichtigung von Trocken- und Regenwetterbedingungen (Zufluss  
zur vierten Reinigungsstufe  $<$  und  $>$   $430 \text{ m}^3/\text{h}$ ) und der Anlageneinstellungen (z.B. Ozon-  
dosis) über einen längeren Zeitraum erforderlich.

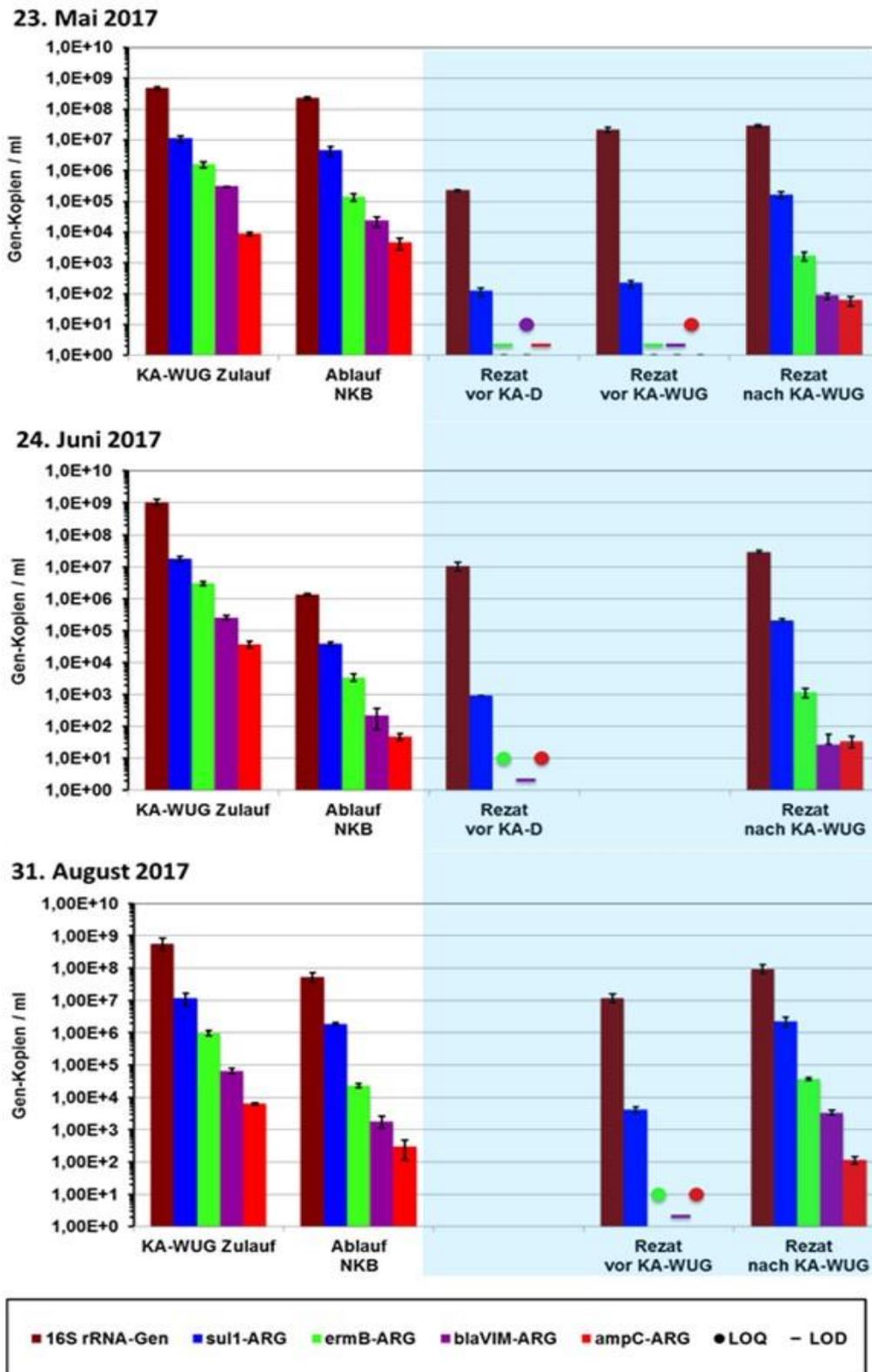
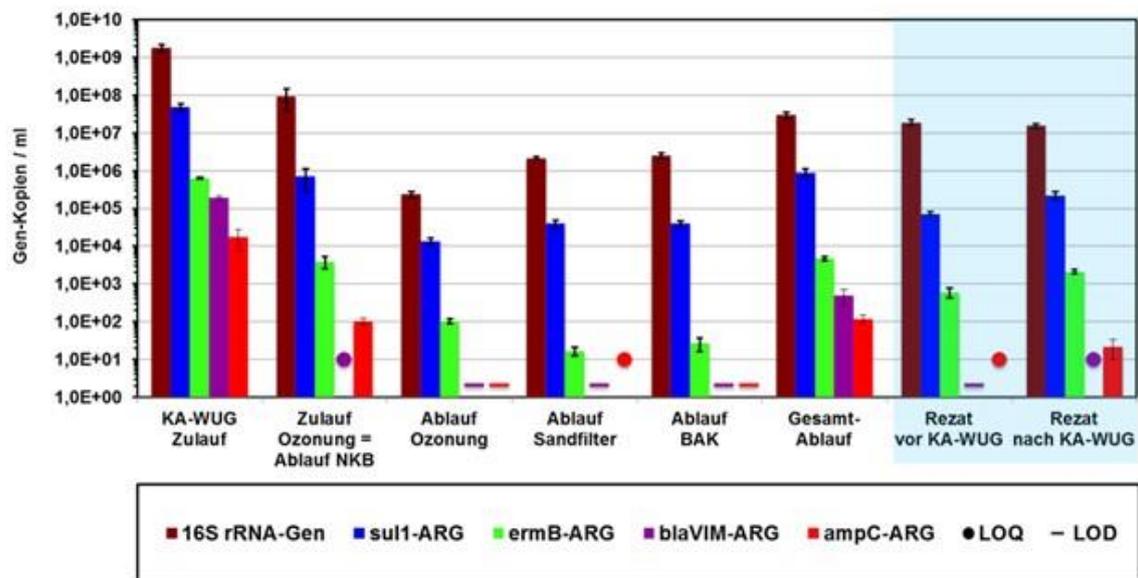


Abbildung 96: Bakterielle Biomasse (16S rRNA-Gen) und ARG im unbehandelten (Kläranlagenzulauf = Ablauf Vorklämung) und behandelten Abwasser (Ablauf Nachklämung) der KA-WUG vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe und in der Schwäbischen Rezat (KA-WUG = Kläranlage Weißenburg, KA-D = Kläranlage Dettenheim). LOQ = Limit of Quantification (Quantifizierungsgrenze), LOD = Limit of Detection (Nachweisgrenze)

23. Oktober 2017



**Abbildung 97:** Bakterielle Biomasse (16S rRNA-Gen) und ARG im unbehandelten (Kläranlagenzulauf = Ablauf Vorklärung) Abwasser der KA-WUG, im Abwasser in der vierten Reinigungsstufe (Zulauf Ozonung = Ablauf NKB, Ablauf Ozonung (4,9 g O<sub>3</sub> /m<sup>3</sup>), Ablauf Sandfilter, Ablauf Aktivkohlefilter und Gesamtablauf Kläranlage) sowie in der Schwäbischen Rezat (KA-WUG = Kläranlage Weißenburg, KA-D = Kläranlage Dettenheim). LOQ = Limit of Quantification (Quantifizierungsgrenze), LOD = Limit of Detection

## 6.12 ÜBERPRÜFUNG DES VORHANDENSEINS ANTIBIOTIKARESISTENTER BAKTERIEN IN DER KLÄRANLAGE WEIßENBURG

Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf wurde, ergänzend zu den Untersuchungen am LfU, das Vorhandensein von antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) auf der Kläranlage Weißenburg untersucht (Tran, 2018). Hierzu wurden Nährmedien mit unterschiedlichen Antibiotikarösungen hergestellt. Anschließend erfolgte am 09.04.2018 auf der Kläranlage Weißenburg (Trockenwetterbedingungen, keine Umfahrung der vierten Reinigungsstufe) eine doppelte Entnahme von Abwasserstichproben am Zulauf der Kläranlage, Zulauf der Ozonung, Ablauf der Ozonung sowie am Gesamtablauf der Kläranlage (nach beiden Filterstraßen). Der spezifische Ozoneintrag lag zum Probenahmezeitpunkt bei 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC und der Ozoneintrag bei 3,8 mg/l.

Die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit basieren lediglich auf einer einmaligen Untersuchung und haben daher nur orientierenden Charakter. Die Vorgehensweise zur Erfassung bestimmter ARB (Bakterien mit einer Resistenz gegen Chloramphenicol, Streptomycin und Tetracyclin) in den jeweiligen Abwasserproben (Quantifizierung in KBE/ml) wird in Tran (2018) beschrieben.

Mit der einmaligen Untersuchung (bei Trockenwetterbedingungen) konnte eine deutliche Reduktion der Lebendzellzahl der ARB (Bakterien mit einer Resistenz gegen Chloramphenicol, Streptomycin und Tetracyclin) sowohl in der mechanisch-biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage Weißenburg als auch in der Ozonung festgestellt werden. Eine signifi-

fikante Erhöhung oder Reduktion der Lebendzellzahl im Gesamtablauf der Kläranlage Weißenburg (nach den beiden Filtern) im Vergleich zum Ozonungsablauf konnte für die untersuchten Abwasserproben nicht nachgewiesen werden. Daten und entsprechende Abbildungen zu der Untersuchung sind im Anhang G beigefügt und können der Arbeit von Tran (2018) entnommen werden.

### 6.13 ERGEBNISSE YES-TEST ZU ENDOKRINEN WIRKUNGEN

#### *Text und Ergebnisse: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 77*

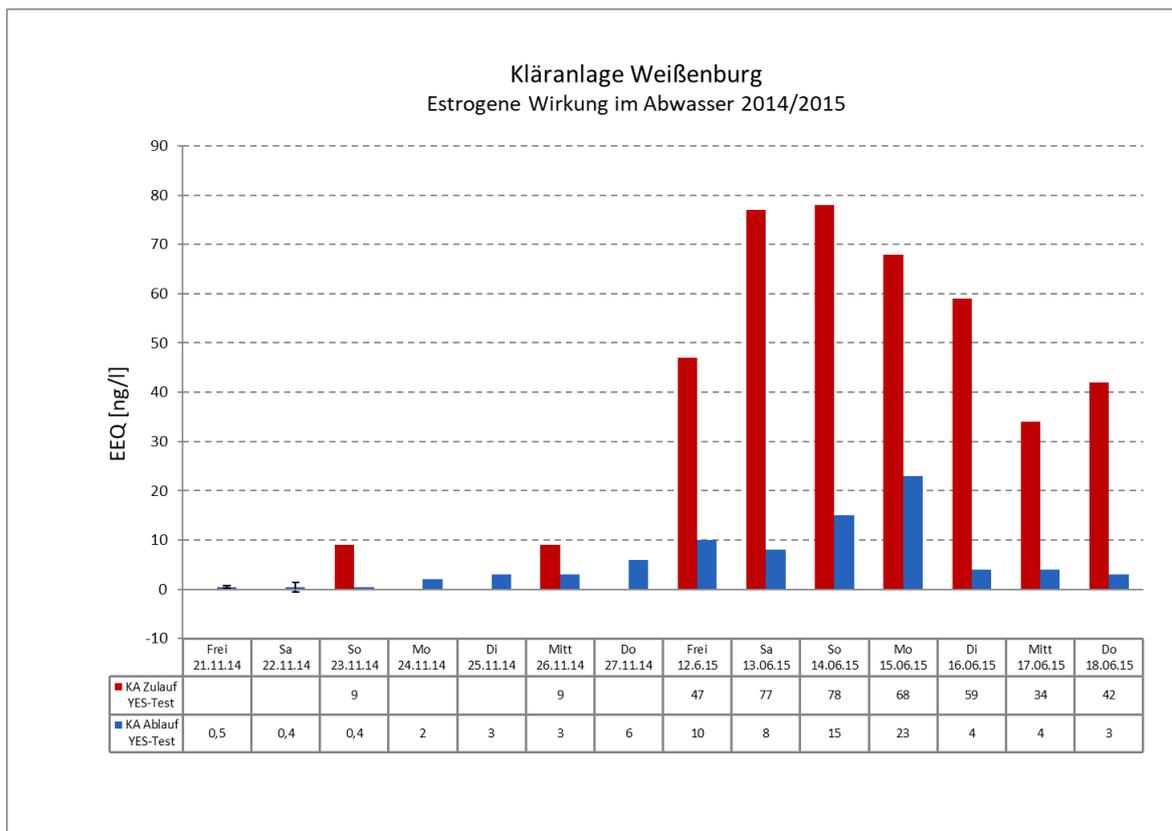
Vom Bayerischen Landesamt für Umwelt wurden auch Untersuchungen zu endokrinen Wirkungen im Abwasser vor und nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe durchgeführt. Fokus der Untersuchung war hierbei der sogenannte YES-Test (Yeast Estrogen Screen nach ISO CD 19040). Dieser ist eine bioanalytische Methode mit hoher Sensitivität zur Bestimmung der estrogenen Aktivität von Substanzen in Wasser und Abwasser:

- Messung via gentechnisch veränderter Bäckerhefe mit humanem Estrogenrezeptor (hER).
- Testprinzip „Reporter-Gen-Assay“: Die Bindung an den hER aktiviert ein Reporter-Gen. Die Genexpression führt zur Bildung einer roten Farbreaktion. Die Intensität des Farbstoffs ist proportional zur Aktivierung des hER.
- Die Bindung an den Estrogenrezeptor ist ein Wirkmechanismus (mode of action) und stellt per se noch keine Schädigung dar.
- Angabe in EEQ: 17 $\beta$ -Estradiol-Equivalente, Referenz mit diesem weiblichen Sexualhormon ermöglicht vergleichende Mengenangabe.

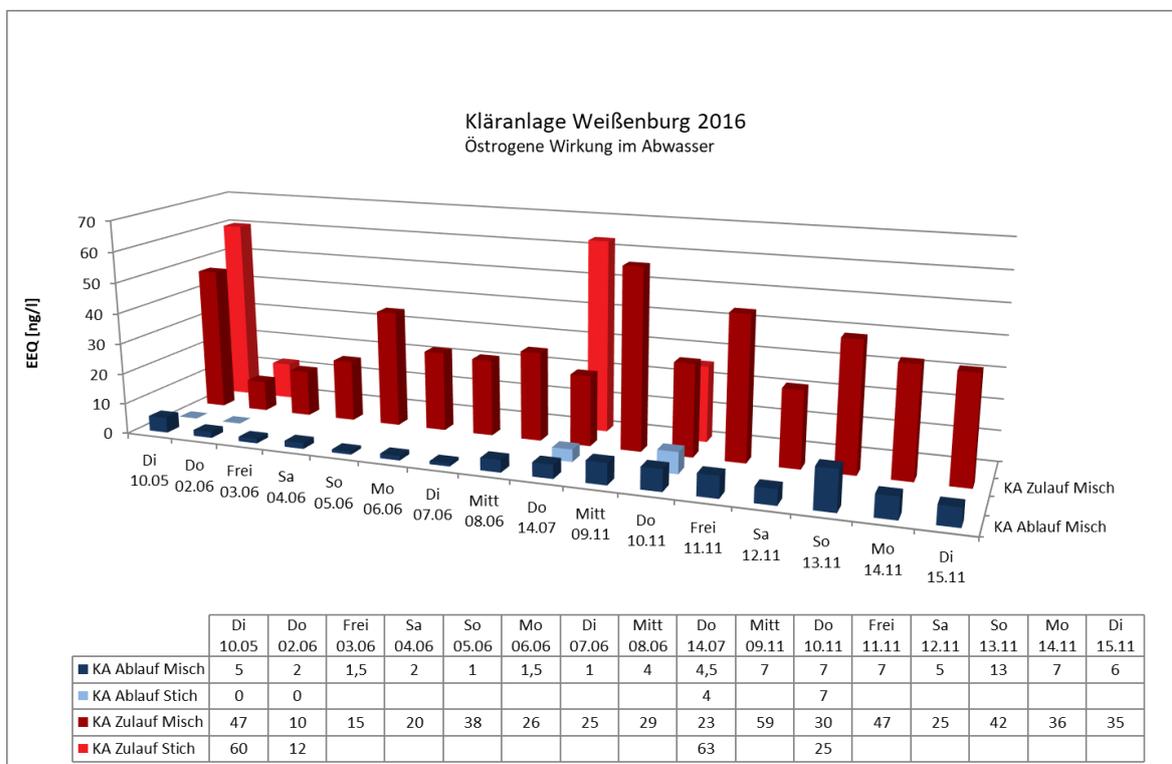
#### 6.13.1 Endokrine Belastungen vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe

Vor der Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe wurde 2014, 2015 und 2016 der Zulauf und Ablauf der Kläranlage Weißenburg auf endokrin aktive Substanzen untersucht (Misch- und Stichproben). Im Mittel liegt die Konzentration im kommunalen Abwasser in Bayern zwischen 10 und 20 ng/l EEQ im Zulauf und zwischen 0,5 und 5 ng/l EEQ im Ablauf einer Kläranlage. Im Zulauf der Kläranlage Weißenburg schwankt die Konzentration von endokrin aktiven Substanzen relativ stark im Bereich von 10 bis 80 ng/l EEQ (siehe Abbildung 98 und Abbildung 99). Im Vergleich mit anderen Kläranlagen ist die Belastung im Zulauf stark erhöht, im Ablauf hingegen mit Konzentrationen zwischen < 5 und 20 ng/l EEQ im Durchschnitt. Die Belastung im Ablauf der Kläranlage lag maximal bei 22,6 ng/l EEQ in 2015 bzw. bei 7,3 ng/l EEQ in 2016.

Im November 2014 wurde im Vergleich zum Juni 2015 eine deutlich geringere eher untypische Belastung festgestellt (siehe Abbildung 98). Im November lagen allerdings nur zwei Zulauf-Tagesmischproben vor. Im November 2016 ist die Belastung dagegen deutlich höher als im Juni 2016 (siehe Abbildung 99). Die schlechtere Abbaurate und höhere Belastung im November 2016 ist vermutlich durch die jahreszeitlich geprägten Temperaturänderungen zu begründen. Höhere Ablaufwerte können aufgrund der Verweildauer des Abwassers in der Kläranlage zudem nicht zwingend erhöhten Zulaufwerten zugeordnet werden. Insgesamt werden nach der konventionellen Reinigung die endokrinen Wirkungen im Kläranlagenablauf deutlich reduziert, sie werden aber nicht vollständig eliminiert.



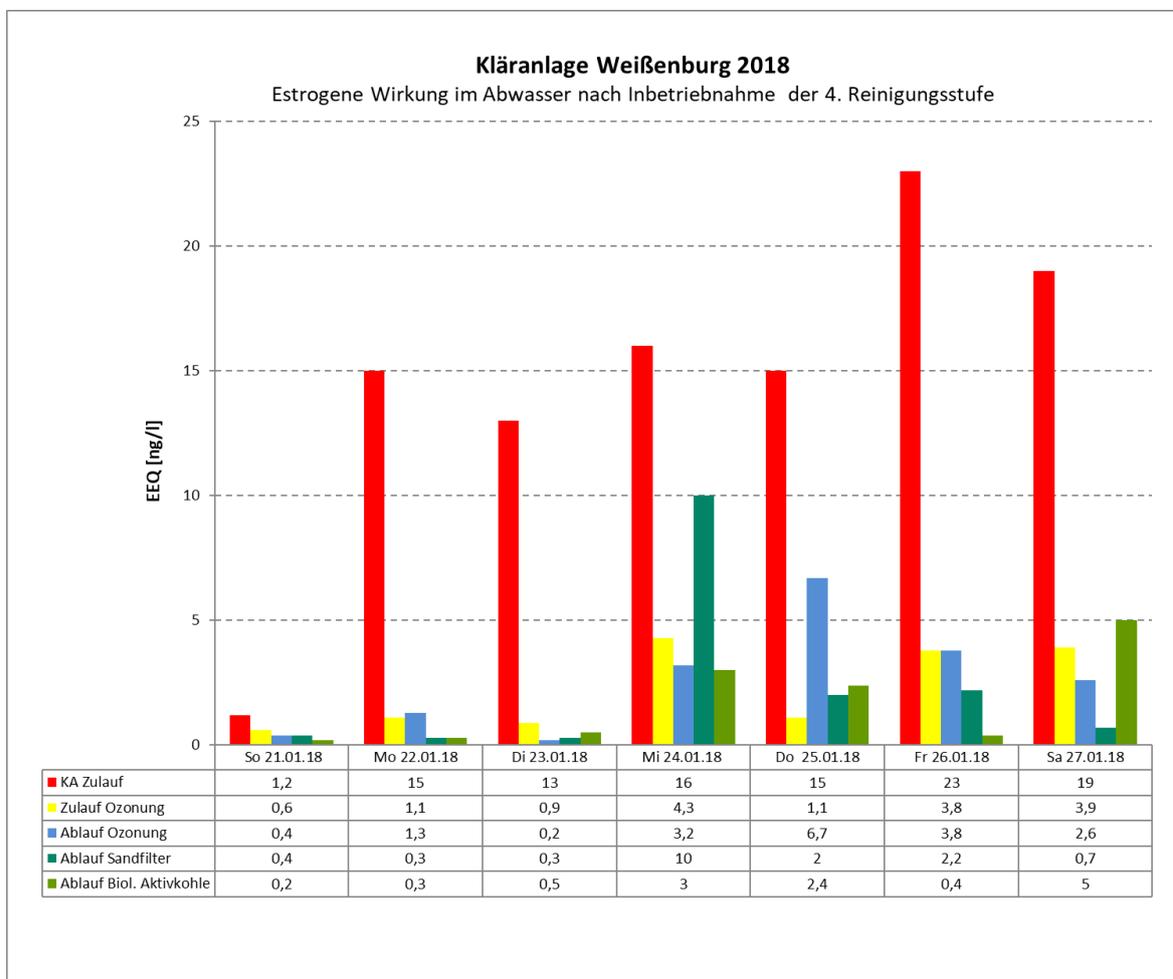
**Abbildung 98:** Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg, Wochengänge mit Tagesmischproben im November 2014 und Juni 2015



**Abbildung 99:** Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg, Stichproben und Wochengänge mit Tagesmischproben im Juni 2016 und November 2016

### 6.13.2 Endokrine Belastungen mit vierter Reinigungsstufe

Nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe wurde im Januar 2018 die Kläranlage an fünf Stellen innerhalb des Reinigungsprozesses auf endokrin aktive Substanzen untersucht (Wochengang mit Tagesmischproben). Beprobte wurden der Zulauf zur Kläranlage, der Zulauf zur Ozonung (= Ablauf Nachklärung), der Ablauf der Ozonung (= Zulauf Filter), der Ablauf des Sandfilters bzw. der Ablauf des Aktivkohlefilters (parallel zum Sandfilter). Die mit Abstand stärkste Reduktion der endokrinen Aktivität fand während der konventionellen biologischen Reinigung auf der Kläranlage statt (ca. 70-90 %; siehe Abbildung 100). Eine weitere Reduktion der endokrinen Aktivität durch die Ozonung und die Filtersysteme ist nur teilweise ersichtlich. Die zeitweise Zunahme der endokrinen Aktivität nach der Ozonung (z.B. am 25.01.2018) und nach den Filterstufen (z.B. am 24.01.2018 beim Sandfilter bzw. 27.01.2018 beim Aktivkohlefilter) deutet auf einen nicht stabilen Anlagenbetrieb während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase der vierten Reinigungsstufe hin (z.B. keine Ozonproduktion/Stillstandszeiten bei der Ozonung).



**Abbildung 100: Estrogene Wirkung im Abwasser der Kläranlage Weißenburg nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, Wochengang mit Tagesmischproben im Januar 2018**

## 6.14 ÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

### *Text und Ergebnisse: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 83*

Im Rahmen des Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe an der Kläranlage Weißenburg wurden Probenahmen für biologische (Makrozoobenthos und Makrophyten & Phytobenthos) sowie für chemische Untersuchungen (Basischemie und Arzneimittelstoffe) an ausgewählten Messstellen in der Schwäbischen Rezat durchgeführt. Dabei befinden sich jeweils zwei Messstellen oberhalb der Kläranlageneinleitung und weitere zwei Messstellen unterhalb. Ziel der Untersuchungen ist eine ökologische Bestandsaufnahme und ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse vor und nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe.

Da ein stabiler Anlagenbetrieb der vierten Reinigungsstufe zwischen 2017 und 2018 noch nicht erreicht werden konnte und somit die Untersuchungen aus dem Jahr 2018 nicht als Nachher-Untersuchungen gewertet werden können, ist eine Auswertung der biologischen und basischemischen Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zielführend. Die Untersuchungen sollen nach Sicherstellung eines stabilen Betriebs der vierten Reinigungsstufe über ein oder zwei Untersuchungsjahre fortgeführt und danach vergleichend ausgewertet werden.

#### 6.14.1 Biologie

In den Frühjahrs- und Sommermonaten 2015 bis 2018 erfolgte jeweils einmal jährlich eine Beprobung der Biokomponente Makrozoobenthos und der Biokomponente Makrophyten & Phytobenthos an zwei Messstellen oberhalb und zwei Messstellen unterhalb der Einleitung, welche vorschriftsgemäß nach den jeweiligen offiziell gültigen Untersuchungsverfahren der LAWA durchgeführt wurden. Die Beprobungen bis einschließlich 2017 stellen Vorher-Untersuchungen (vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe) dar.

Im Frühjahr / Sommer 2018 nach Inbetriebnahme (Oktober 2017) der vierten Reinigungsstufe wurden Untersuchungen zur Bewertung des Einflusses der zusätzlichen Reinigungsstufe auf die Fließgewässer-Ökologie durchgeführt. Diese sind jedoch aufgrund des nicht dauerhaften stabilen Anlagenbetriebs als „Nachher-Untersuchung“ nicht belastbar.

#### 6.14.2 Basischemie

Die Basischemie stellt eine unterstützende Komponente für die Bewertung des ökologischen Zustandes beziehungsweise Potenzials dar. Sie dient der Ergänzung und Unterstützung der Interpretation der Ergebnisse für die biologischen Qualitätskomponenten, als Beitrag zur Ursachenklärung im Falle eines „mäßigen“ oder schlechteren ökologischen Zustands/Potentials und kann für Maßnahmenplanungen und Erfolgskontrollen herangezogen werden.

Für diese physikalisch-chemischen Parameter wurden gewässertypspezifische Schwellenwerte für den Übergang vom „sehr guten“ zum „guten“ Zustand („Hintergrundwerte“) und für den Übergang vom „guten“ zum „mäßigen“ Zustand/Potenzial („Orientierungswerte“) definiert. Diese Hintergrund- und Orientierungswerte für Oberflächengewässer sind in Anlage 7 der Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) aufgelistet. Eine Nichteinhaltung dieser Orientierungswerte weist auf mögliche ökologisch wirksame Defizite hin.

Die basischemischen Parameter (siehe Tabelle 29) wurden jeweils zwölfmal jährlich an einer Messstelle oberhalb der Kläranlage, im Kläranlagenablauf und unterhalb der Kläranlage Weißenburg erhoben.

**Tabelle 29: Basischemische Parameter**

| Parameter                                    | Einheit |
|--|---------|
| Calcium, gelöst                              | mg/l    |
| Eisen gelöst                                 | mg/l    |
| Kalium gelöst                                | mg/l    |
| Magnesium gelöst                             | mg/l    |
| Mangan gelöst                                | mg/l    |
| Natrium gelöst                               | mg/l    |
| Phosphor-gesamt                              | mg/l    |
| Ammonium-N                                   | mg/l    |
| Nitrit-N                                     | mg/l    |
| Phosphat-P, o-                               | mg/l    |
| Chlorid                                      | mg/l    |
| Nitrat                                       | mg/l    |
| Nitrat-N                                     | mg/l    |
| Sulfat                                       | mg/l    |
| Säurekapazität (pH 4,3)                      | mmol/l  |
| Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C (vor Ort) | µS/cm   |
| pH-Wert (vor Ort)                            | -       |
| Sauerstoff, gelöst                           | mg/l    |
| Wassertemperatur (vor Ort)                   | °C      |
| DOC  | mg/l    |
| TOC  | mg/l    |
| Färbung                                      | -       |
| Geruch                                       | -       |
| Trübung                                      | -       |
| Abfiltrierbare Stoffe                        | mg/l    |
| BSB <sub>5</sub> (DIN EN 1899; ohne ATH)     | mg/l    |

Die Beprobungen 2015 bis 2017 charakterisieren das Gewässer und den Ablauf der Kläranlage vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe. Eine Auswertung der basischemischen Parameter hinsichtlich der Orientierungswerte (Tabelle 30) zeigt, dass bereits oberhalb des Kläranlagenablaufs für die Parameter Phosphor-gesamt, Ammonium-Stickstoff und Sauerstoff in den Jahren 2015 und 2016 Defizite vorliegen. In 2017 hingegen werden alle Orientierungswerte oberhalb der Kläranlage Weißenburg eingehalten.

Infolge der Kläranlageneinleitung wurde an der ca. 1 km unterhalb gelegenen Messstelle eine deutliche Überschreitung der Orientierungswerte für die Nährstoffparameter ortho-Phosphat, Phosphor-gesamt und Ammonium-Stickstoff ermittelt. Aufgrund sauerstoffzehrender Prozesse werden in den Sommermonaten auch die für einen guten Zustand geforderten Sauerstoffkonzentrationen unterschritten.

Eine Ergebnisinterpretation und Datenauswertung in Hinblick auf einen Vorher-Nachher-Vergleich ist aufgrund des bisherigen Anlagenbetriebs der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg (Optimierungsphase) noch nicht möglich.

**Tabelle 30: Basischemische Untersuchungsergebnisse 2015 bis 2017 (Rot: Unterschreitung und Überschreitung der Orientierungswerte in Fließgewässern (OGewV, 2016))**

| Parameter                    | Orientierungswert | Dimension / Einheit | 194726                                      |             |      | 143075                       |            |            | 194727  |             |             |
|------------------------------|-------------------|---------------------|---|-------------|------|------------------------------|------------|------------|---|-------------|-------------|
|                              |                   |                     | oberhalb Kläranlage Weißenburg (Sped. Wüst) |             |      | Ablauf Kläranlage Weißenburg |            |            | unterhalb Kläranlage Weißenburg (bei Silbermühle) |             |             |
|                              |                   |                     | 2015  | 2016        | 2017 | 2015                         | 2016       | 2017       | 2015  | 2016        | 2017        |
| Sauerstoff; gelöst (Minimum) | 7                 | mg/l                | <b>5,3</b>                                  | 7,6         | 7,3  | <b>6,2</b>                   | <b>6,8</b> | <b>6,9</b> | <b>5,6</b>  | <b>6,8</b>  | <b>6,7</b>  |
| pH-Wert (Min.)               | 7                 |                     | 7,3   | 7,9         | 7,8  | 7,2                          | 7,2        | 7,0        | 7,6   | 7,7         | 7,4         |
| pH-Wert (Max.)               | 8,5               |                     | 8,2   | 8,2         | 8,2  | 7,3                          | 7,5        | 7,7        | 7,9   | 8,1         | 8           |
| Leitfähigkeit                |                   | µS/cm               | 810   | 775         | 723  | 1060                         | 1200       | 1240       | 981   | 982         | 1100        |
| Chlorid                      | 200               | mg/l                | 53  | 43          | 46   | 116                          | 131        | 163        | 102   | 83          | 124         |
| TOC                          | 7                 | mg/l                | 6,6   | 4,6         | 4,2  | <b>7,7</b>                   | 6,3        | 6,5        | <b>11</b>   | 5,5         | 6,5         |
| DOC                          |                   | mg/l                | 4,1   | 3,4         | 3,1  | 6,7                          | 5,2        | 5,4        | 6,2   | 4,2         | 4,5         |
| Phosphat-P, o-               | 0,07              | mg/l                | 0,05  | 0,03        | 0,02 | <b>1,2</b>                   | <b>0,8</b> | <b>0,9</b> | <b>0,8</b>  | <b>0,4</b>  | <b>0,58</b> |
| Phosphor-gesamt              | 0,1               | mg/l                | <b>0,3</b>                                  | <b>0,13</b> | 0,07 | <b>1,5</b>                   | <b>1,1</b> | <b>1,2</b> | <b>1,9</b>  | <b>0,57</b> | <b>0,76</b> |
| Ammonium-N                   | 0,1               | mg/l                | <b>0,13</b>                                 | 0,09        | 0,05 | <b>1,9</b>                   | <b>1,7</b> | <b>1,1</b> | <b>1,7</b>  | <b>0,53</b> | <b>0,94</b> |
| Nitrat-N                     | 11,3              | mg/l                | 2,1   | 5,1         | 3,5  | 6,6                          | 8,4        | 8          | 5,3   | 7           | 6,6         |
| Sulfat                       | 220               | mg/l                | 51  | 62          | 51   | 157                          | 175        | 143        | 125   | 115         | 118         |

## 6.15 UNTERSUCHUNG DER KOHLEIGENSCHAFTEN

Beim kontinuierlich betriebenen Filter wird das Filterbett regelmäßig umgewälzt. Bedingt durch diese Bewegung und dabei erfolgende Reibungsvorgänge kann ein Kohleabrieb auftreten, welcher zu einer Verkleinerung der Korngröße führen kann. Um das Abriebverhalten und weitere chemisch-physikalische Eigenschaften der Kohle vor und nach einem Jahr Filterbetrieb einschätzen zu können, wurde der Filterhersteller beauftragt die Frischkohle (vor Inbetriebnahme des Aktivkohlefilters) und die Gebrauchtkohle (nach ca. ein Jahr Filterbetrieb) auf folgende Parameter zu untersuchen:

- Jodadsorption,
- Wassergehalt,
- Aschegehalt,
- Flüchtige Bestandteile,
- Schüttdichte,
- Kornverteilung.

Anhand der vorliegenden Daten (siehe Tabelle 31) ist eine geringe Beladung bei der Gebrauchtkohle zu erkennen. Dies bestätigt die auch nach einem Jahr andauernde sehr gute Adsorptionskapazität bezüglich der gemessenen Spurenstoffe. Die Jodadsorption, als Leitparameter für die Beladung der Aktivkohle ist auf 801 mg/g Aktivkohle gegenüber 918 mg/g Aktivkohle (Frischkohle) gesunken. Bei einer Test-Reaktivierung bei 850°C und 15 min unter Stickstoffatmosphäre wurde ein Anstieg der Jodadsorption auf 930 mg/g Aktivkohle erzielt. Der Ascheanteil von 13,3 % gegenüber 12,8 % (Frischkohle) bestätigt zudem, dass durch die Beladung der Kohle keine erhöhten anorganischen Beladungen zu ermitteln sind (Orawetz, 2018). Flüchtige Bestandteile mit 4,6 % repräsentieren summarisch organische Beladungen die mit < 10 % keine starke organische Beladung bestätigen.

**Tabelle 31: Vergleich der ASTM-Parameter aus Orawetz (2018)**

| Parameter              | Einheit | Frischkohle | Gebrauchtkohle |
|------------------------|---------|-------------|----------------|
| Jodadsorption          | mg/g    | 918         | 801            |
| Wassergehalt           | %       | 30,5        | 41,2           |
| Aschegehalt            | %       | 12,8        | 13,3           |
| Flüchtige Bestandteile | %       | -           | 4,6            |
| Schüttdichte           | g/l     | 497         | <              |
| <b>Kornverteilung</b>  |         |             |                |
| > 8 mesh               | %       | 1,4         | 2,2            |
| 8 x 10 mesh            | %       | 13,4        | 14,6           |
| 10 x 12 mesh           | %       | 21,6        | 22,4           |
| 12 x 16 mesh           | %       | 41,6        | 40,2           |
| 16 x 18 mesh           | %       | 9,4         | 9,8            |
| 16 x 20 mesh           | %       | 6,8         | 6,4            |
| 20 x 25 mesh           | %       | 3,8         | 3,1            |
| 25 x 30 mesh           | %       | 1,4         | 0,9            |
| 30 x 35 mesh           | %       | 0,4         | 0,2            |
| < 35 mesh              | %       | 0,2         | 0,2            |

Des Weiteren kann auch nach einem Jahr Filterbetrieb davon ausgegangen werden, dass die Umwälzungen im Filter keinen signifikanten Einfluss auf die Stabilität der Aktivkohle und die Korngrößenverteilung haben. Anhand der Kornanalysen konnte ermittelt werden, dass keine Erhöhung der Feinanteile < 20 mesh (0,85 mm) festzustellen sind. Eine Verschiebung des inneren Kornspektrums durch die Umwälzung der Aktivkohle ist nicht zu erkennen (siehe Abbildung 101 und Abbildung 102). Eine erhöhte Feuchte der Frischkohle ist durch die Lagerung im Filter nach Silobefüllung zu erklären (Orawetz, 2018).

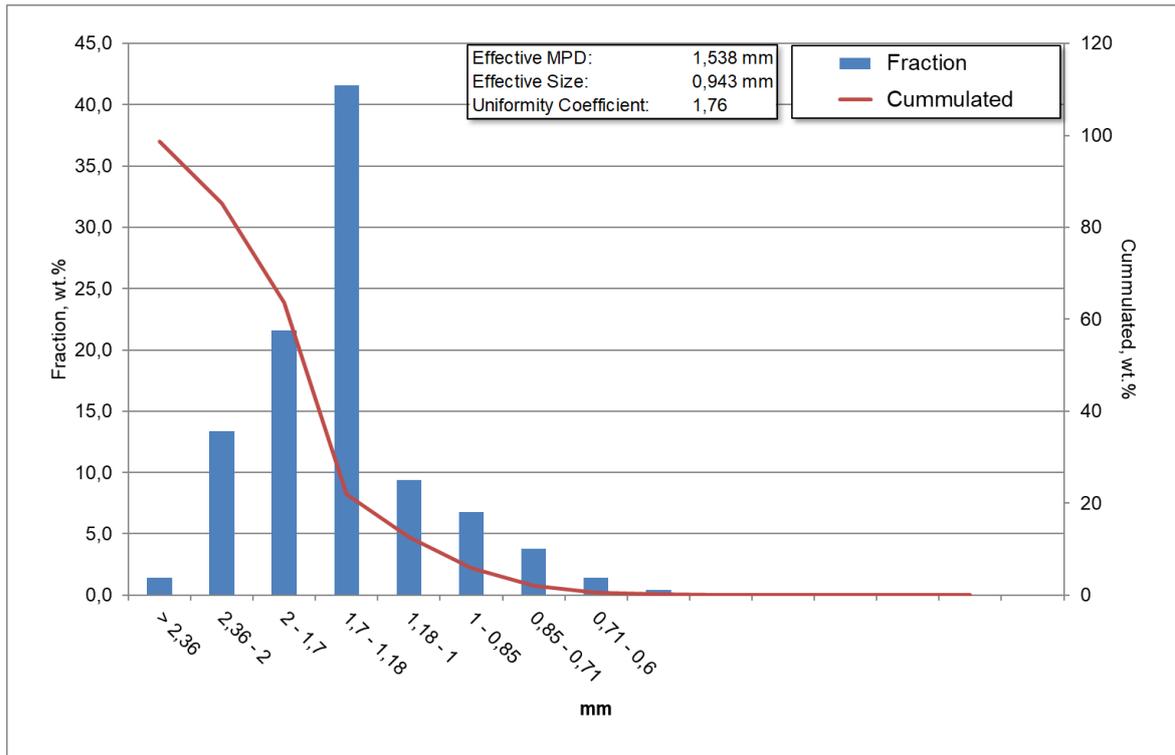


Abbildung 101: Partikelgrößenverteilung und Siebkurve der Frischkohle (8x30 mesh), erstellt durch Jacobi Carbons GmbH (Orawetz, 2018)

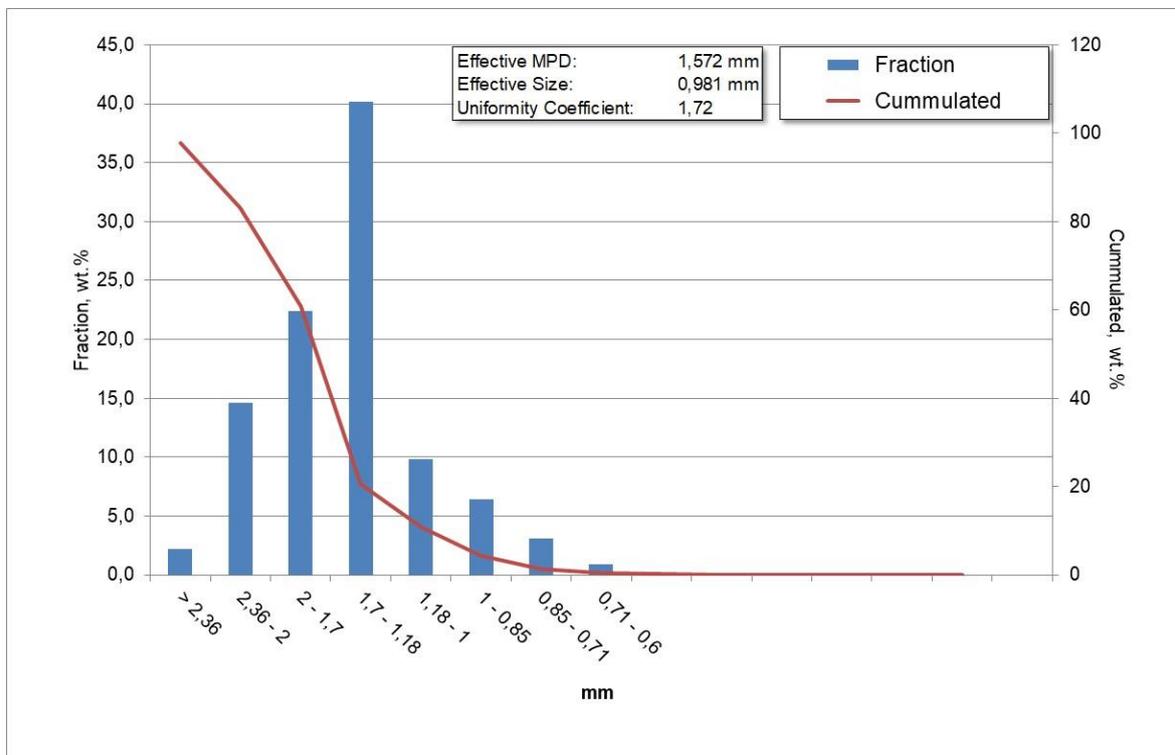


Abbildung 102: Partikelgrößenverteilung und Siebkurve der Gebrauchtkohle nach ca. einem Jahr Filterbetrieb, erstellt durch Jacobi Carbons GmbH (Orawetz, 2018)

## 7 Kosten und Stromverbrauch

Dieses Kapitel fasst die erhobenen Betriebs- und Investitionskosten der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg zusammen und liefert Erkenntnisse zum Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe. Weiterhin wird aufgeführt wie hoch die spezifischen Jahreskosten der Anlage zur Spurenstoffelimination in Weißenburg sind und wieviel Euro pro Einwohner und Jahr anfallen.

### 7.1 INVESTITIONSKOSTEN

Die Kostenkontrolle und Kostenverfolgung im Pilotvorhaben wurde durch das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner durchgeführt. Ende 2018 konnten die Investitionskosten (inkl. Nebenkosten) für die vierte Reinigungsstufe in Höhe von rund 3,7 Mio. Euro (brutto) ermittelt werden. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Kostenpositionen ist in Tabelle 32 zu finden.

**Tabelle 32: Investitionskosten der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg**

| Kostenposition                               | Kosten in Euro (brutto) |
|--|-------------------------|
| Bautechnik                                   | 1.143.785               |
| Maschinenteknik (inkl. Ozonung)              | 1.226.529               |
| EMSR Technik                                 | 444.038                 |
| Lüftungs-, Kälte-, und Sanitärtechnik (HKLS) | 98.052                  |
| Baunebenkosten*)                             | 775.000                 |
| <b>Summe Σ</b>                               | <b>3.687.404</b>        |

\*) geschätzte Annahme, da noch keine Schlussrechnung Ende 2018

### 7.2 BETRIEBSKOSTEN

Für den Zeitraum Oktober 2017 bis Oktober 2018 hat die Stadt Weißenburg jährliche Betriebskosten in Höhe von 61.209 Euro (brutto) ohne Energiekosten ermittelt. Seit der Inbetriebnahme im Oktober 2017 bis Oktober 2018 wurden rund 2,16 Millionen Kubikmeter Abwasser<sup>11</sup> (pro Jahr) in der vierten Reinigungsstufe behandelt. Ausgehend von einem Strompreis von 0,23 Cent pro kWh und einem ermittelten spezifischen Stromverbrauch von 0,12 kWh pro m<sup>3</sup> (siehe Kapitel 7.4) für die vierte Reinigungsstufe ergeben sich Stromkosten von 59.554 Euro. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Kostenpositionen ist in Tabelle 33 zu finden.

<sup>11</sup> Extrem trockener Sommer 2018 (zweitrockenste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen 1881) und damit sehr geringe Zuflüsse zur Kläranlage und zur vierten Reinigungsstufe; Annahme: behandelte Abwassermenge in der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg im langjährigen Mittel > 2,16 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Die angefallenen Betriebskosten beziehen sich dabei auf die Inbetriebnahme- und Optimierungsphase der vierten Reinigungsstufe (zwischen 2017 und 2018). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Betriebskosten nach Abschluss der Optimierungsphase und Sicherstellung eines dauerhaften stabilen Anlagenbetriebs weiter reduzieren (geringere Wartungskosten und Stromkosten möglich). Zudem ändern sich die jährlichen Betriebskosten aufgrund der unterschiedlich anfallenden Abwassermengen in der vierten Reinigungsstufe<sup>11</sup> (Stromverbrauch vor allem abhängig von den hydraulisch bemessenen Anlagenteilen).

**Tabelle 33: Ermittelte Betriebskosten pro Jahr für den Betrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase**

| Kostenposition                                       | Kosten in Euro pro Jahr (brutto) |
|--|----------------------------------|
| Miete Sauerstofftank + Sauerstoff als Betriebsmittel | 14.119                           |
| Personal   | 9.100                            |
| Stromkosten (Annahme mit 0,12 kWh/m <sup>3</sup> *)  | 59.554                           |
| Wartung Maschinen- und Filteranlage                  | 9.435                            |
| Wartung Ozonungsanlage                               | 14.221                           |
| Wartung Elektroanlage                                | 12.434                           |
| Wartung Lüftungstechnik                              | 1.200                            |
| Wartung Klimatechnik                                 | 700                              |
| <b>Summe <math>\Sigma</math></b>                     | <b>120.763</b>                   |

\*) Ermittelter Wert zum spezifischen Stromverbrauch bei Anlagenbetrieb ohne Stillstandszeiten (s. Kapitel 7.4)

### 7.3 SPEZIFISCHE JAHRESKOSTEN

Grundlage zur Ermittlung der spezifischen Jahreskosten bildet die KVR-Leitlinie zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (DWA, 2012). Dabei wurden folgende Annahmen getroffen (vgl. mit den durchschnittlichen Nutzungsdauern wasserbaulicher Anlagen gemäß Anlage 1 der KVR-Leitlinien von 2012):

- Angesetzte Nutzungsdauer:
  - Bautechnik 30 Jahre,
  - Maschinenteknik 15 Jahre,
  - EMSR-Technik 10 Jahre,
- Zinssatz 3 %.

Auf Grundlage der ermittelten Investitions- und Betriebskosten betragen die spezifischen Jahreskosten für die vierte Reinigungsstufe rund 18 Cent/m<sup>3</sup> bzw. 15,1 Euro/(EW•a) (ohne Förderung der Investitionskosten durch den Freistaat Bayern). Dabei wurden eine in der vierten Reinigungsstufe behandelte Jahresabwassermenge von rund 2,16 Millionen m<sup>3</sup> und eine aktuelle Kläranlagenbelastung von 25.577 EW (85-Perzentilwert) angesetzt. Damit liegen die spezifischen Jahreskosten leicht höher als die in Kaste und Antakyali (2018) ermittelten Jahreskosten für die einzelnen Verfahrensstufen wie Ozon oder PAK-Stufe oder GAK-Stufe (zwischen 5 und 15 Cent/m<sup>3</sup>). Die in Kaste und Antakyali (2018) vorgestellten

Jahreskosten beziehen sich dabei vorwiegend auf von Planungsbüros erstellte Vorzugsvarianten in Machbarkeitsstudien. Bei einem Vergleich dieser Kosten mit den Kosten in Weißenburg ist zu berücksichtigen, dass in Weißenburg eine Verfahrenskombination, bestehend aus mehreren Verfahrensstufen (Ozonung mit Filterstraßen), errichtet wurde. Zudem haben die geschätzten Kosten für Anlagen zur Spurenstoffelimination in Machbarkeitsstudien (Bedarfsplanung oder Grundlagenermittlung) einer Kostenungenauigkeit von bis zu  $\pm 20\text{-}30\%$ . Hinzu kommen die Preissteigerungen der letzten Jahre in der Bauwirtschaft (Entwicklung der Baupreisindizes). Auch die behandelte Abwassermenge in der vierten Reinigungsstufe, welche sich zukünftig ändern kann<sup>11</sup> (z.B. wenn  $>$  oder  $<$  2,16 Mio. m<sup>3</sup>/a) sowie die gewählten Nutzungsdauern für Bautechnik, Maschinenteknik und EMSR-Technik können die Höhe der spezifischen Jahreskosten beeinflussen (z.B. bei der Festlegung von fortschreitenden Nutzungsdauern für Bautechnik mit 50 Jahren, Maschinenteknik mit 25-30 Jahren und EMSR-Technik mit 12-15 Jahren). Des Weiteren wurden aufgrund des Pilotcharakters der Anlage bestimmte Aufwendungen erforderlich. So wurde im Rahmen des Pilotprojektes zu Untersuchungszwecken zusätzliche Anlagen- und Messtechnik integriert, wie z.B.:

- verschiedene Sonden zur Überwachung des Anlagenbetriebs und zur Steuerung/Regelung der Ozondosierung,
- elektro- und programmiertechnische Einbindung von verschiedenen Steuer- und Regelkonzepten,
- spezielle bautechnische Applikationen wie Abgleichspumpe, Probenahmepumpen und Edelstahlmesstöpfe für Untersuchungszwecke,
- Implementierung der Reihenschaltung der Filterstraßen mit zusätzlichen Pumpen.

Für die Errichtung einer vierten Reinigungsstufe ohne wissenschaftliche Projektbegleitung würden die Investitionskosten geringer ausfallen (ca. 10 %, Schätzung des Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner). Daher kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Kläranlage mit vergleichbarer Ausbaugröße wie Weißenburg die spezifischen Jahreskosten für eine ähnliche Verfahrenskombination bei stabilem Anlagenbetrieb deutlich niedriger ausfallen werden als die errechneten 18 Cent/m<sup>3</sup>. Die o.g. genannten Randbedingungen und Annahmen (Betrachtungszeitraum während Inbetriebnahme- und Optimierungsphase, Abwassermenge, Festlegung der Nutzungsdauer) sind bei der Berechnung der spezifischen Jahreskosten zu berücksichtigen. Eine Reduzierung der Betriebskosten und damit der Jahreskosten der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg erscheint durch eine weitere Optimierung des Anlagenbetriebs durchaus möglich (z.B. Optimierung der Ozondosierung (Steuerung/Regelung) sowie der Filterlaufzeiten).

#### **7.4 ENERGETISCHE BETRACHTUNGEN**

Wie hoch der tatsächliche Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe nach fast einem Jahr Anlagenbetrieb ist, wird in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei werden die einzelnen Stromverbräuche der verschiedenen Anlagenkomponenten ausgewertet. Zudem wird bei der energetischen Auswertung unterschieden, ob der Anlagenbetrieb stabil war oder ob es Stillstandszeiten gab.

### 7.4.1 Berücksichtigung des Stromverbrauchs in der Planung der Versuchsanlage

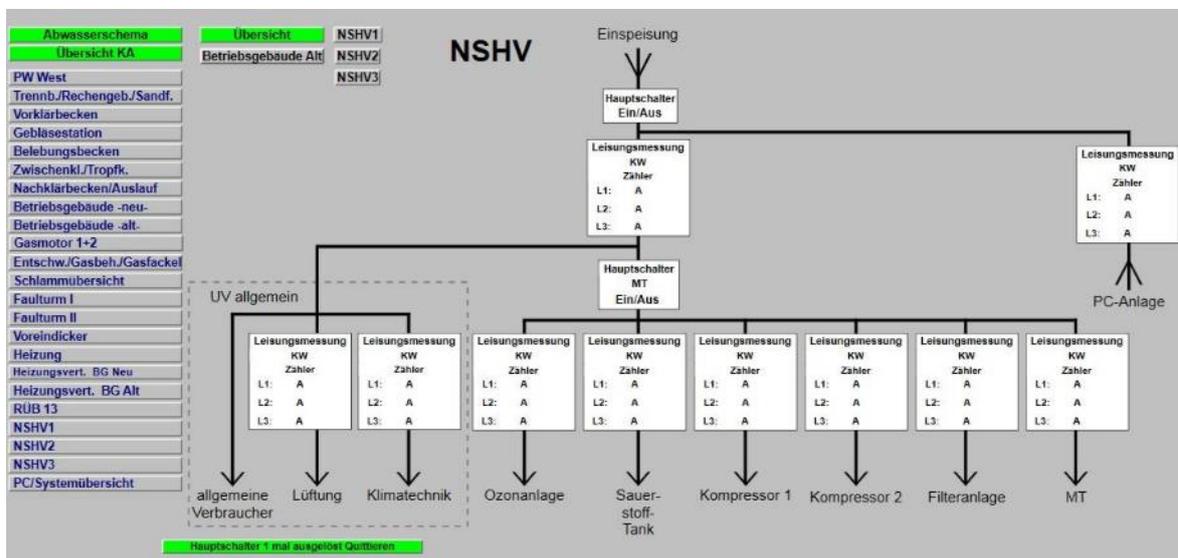
Die großen Verbraucher der vierten Reinigungsstufe sind das Pumpwerk, der Ozonerzeuger, das Injektorsystem für den Ozoneintrag, der Restozonvernichter (ROV) und die Filtration (Rückspülung). Bei der Ozonherstellung entsteht Wärme, weshalb eine Erzeugerkühlung benötigt wird. Diese verbraucht ebenfalls Strom. Den größten Einfluss auf den Stromverbrauch hat die notwendige Ozondosis. Daher ist diese sorgfältig zu bestimmen. Alle übrigen Aggregate gelten als untergeordnete Verbraucher (Herbst et al., 2011).

Transport und Herstellung des Flüssigsauerstoffs zur Ozonherstellung werden nicht betrachtet, da sich diese Energieverbräuche (Primärenergiebedarf) außerhalb der Kläranlagen (Systemgrenze) befinden und somit für die Energiebilanz der Kläranlage Weißenburg keine Rolle spielen.

Sollte sich der Zufluss der Kläranlage Weißenburg erhöhen, besteht bei einem Zufluss im freien Gefälle zur Ozonung die Gefahr eines Rückstaus. Um diesen zu vermeiden, wurden zwischen Nachklärbecken und vierter Reinigungsstufe zwei Zulaufpumpen installiert. Die erforderliche Förderhöhe beträgt hier zwischen 2,1 und 2,5 m.

Für die kontinuierlich betriebene Filteranlage wird der Stromverbrauch nur über die Mammutpumpe bzw. über den Kompressor bestimmt, der die Druckluft erzeugt. Auch diese Filteranlagen müssen nicht durchgehend gespült werden. Durch eine Pausenschaltung kann ihr Stromverbrauch reduziert werden.

Bei der Planung der vierten Reinigungsstufe wurden mehrere Zähler zur Leistungsmessung berücksichtigt, um die Verbräuche der einzelnen Verfahrensstufen getrennt zu erfassen. Eine Übersicht dieser geplanten Leistungsmessungen zeigt Abbildung 103.



**Abbildung 103: Übersicht Leistungsmessungen vierte Reinigungsstufe (aus Pflichtenheft der Fa. Hofmockel vom 14.09.2017)**

Realisiert wurden folgende Summenmessungen, die durch das Erfassen von Strom (über Wandler) und Spannung die verbrauchte Energie ermittelten.

- vierte Reinigungsstufe Gesamt,
- Ozonung Gesamt = Lieferumfang Firma Xylem, umfasst ROV + P01 + SMO + P11-1 + P.11.2 + sonstiger Lieferumfang,
- Filteranlage Gesamt.

Weiterhin wurden alle Verbraucher mit einer installierten Leistung über ein kW über Einzelmessungen erfasst. Die hier verwendeten Bezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen aus dem Datenprotokoll. In Klammern stehen die Bezeichnungen aus dem R+I-Schema.

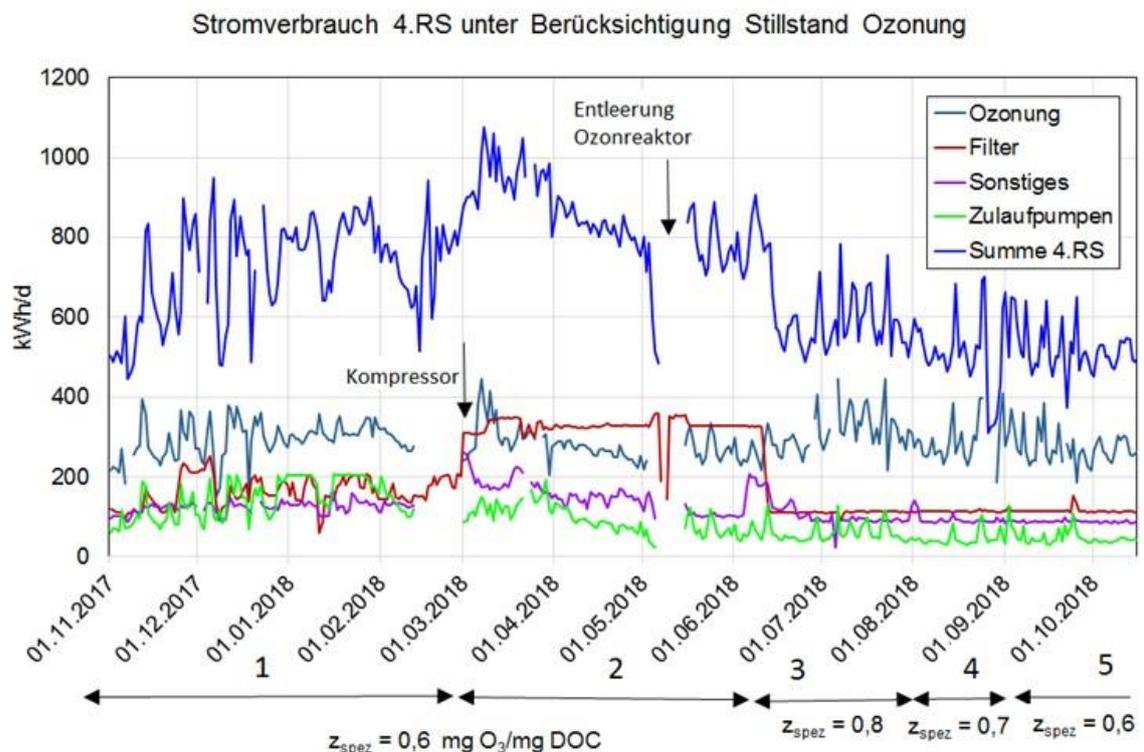
- Ozonung:
  - SMO Evo Ozongenerator,
  - Restozonvernichter (ROV),
  - Kühlwasserpumpe am Ozongenerator (P01, Warmer Kreislauf),
  - Pumpe Injektor 1 (P11.1),
  - Pumpe Injektor 2 (P11.2),
  - Kühlung Ozonung Pumpe 1 (P12.1, Kalter Kreislauf),
  - Kühlung Ozonung Pumpe 2 (P12.2, Kalter Kreislauf),
- Filteranlage:
  - Kompressor Filter 1 (K1001.1),
  - Kompressor Filter 2 (K1001.2),
  - Zulaufpumpe 1 (P10.1),
- Hebewerke:
  - Zulaufpumpe 2 (P10.2),
  - Zulaufpumpe 3 (P10.3),
  - Pumpe in Reihe 1 (P20.1) – nicht in Betrieb während der Versuche,
  - Pumpe in Reihe 2 (P20.2) – nicht in Betrieb während der Versuche,
- Probenahmepumpen für Messtöpfe:
  - PN-Pumpe 1 (P30.1),
  - PN-Pumpe 2 (P30.2),
  - PN-Pumpe 3 (P30.3),
  - PN-Pumpe 4 (P30.4),
  - Abgleichpumpe für SAK<sub>254</sub>-Vergleichsmessung (P30.5).

#### 7.4.2 Stromverbrauch nach Betriebsphasen

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, gliederte sich die Betriebszeit der vierten Reinigungsstufe in mehrere Abschnitte. Für die Energetische Auswertung ist vor allem der Ozoneintrag zu berücksichtigen. Da die Ozonerzeugung einen wesentlichen Anteil am Gesamtstromverbrauch der Anlage hat, ist zu erwarten, dass Phasen mit unterschiedlichen spezifischen Ozoneintrag ( $z_{\text{spez}}$  [mg Ozon/mg DOC]) auch deutliche Unterschiede im Stromverbrauch haben. Ebenfalls relevant ist eine Betriebsphase, in der die Steuerung der Filterspülung nicht funktionierte, und die Kompressoren für die Mammutpumpe im Dauerbetrieb waren. Daraus ergeben sich die in Tabelle 34 beschriebenen Betriebsphasen. Für diese wurden jeweils die Datenauswertungen durchgeführt. In Abbildung 104 sind diese Betriebsphasen graphisch für die verschiedenen Verbraucher dargestellt.

**Tabelle 34: Unterteilung in Betriebsphasen**

| Nr. | von ... bis ...         | Kenndaten   | Bemerkungen  |
|-----|-------------------------|---|--|
| 0   | 01.10. – 01.11.2017     | Einfahrphase  | noch keine umfassende Datenaufzeichnung, wird nicht ausgewertet                                |
| 1   | 01.11.2017 – 01.03.2018 | $z_{spez} = 0,6 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$<br>normaler Filterbetrieb     | Optimierungsphase  |
| 2   | 01.03. – 10.06.2018     | $z_{spez} = 0,6 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$<br>Kompressor im Dauerbetrieb | Filterverblockung, Nachlassen Wirkungsgrad Ozonung, erhöhte Stillstandszeiten                  |
| 2a  | 07.05. – 11.05.2018     | Stillstandszeit   | Beseitigung Filterverblockung, Entleerung Ozonreaktor zur Optimierung Einlaufrohr, keine Daten |
| 3   | 10.06. – 01.08.2018     | $z_{spez} = 0,8 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$<br>normaler Filterbetrieb     | ab Juli 2018 erhöhte Stillstandszeiten Ozongenerator   |
| 4   | 01.08. – 01.09.2018     | $z_{spez} = 0,7 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$<br>normaler Filterbetrieb     | hohe Stillstandszeiten   |
| 5   | 01.09. – 15.10.2018     | $z_{spez} = 0,6 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$<br>normaler Filterbetrieb     | Stillstandszeiten, jedoch Optimierungsmaßnahmen bei Anlagen- und Messtechnik erfolgreich       |



**Abbildung 104: Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe unterschieden nach Verfahrensstufen und Betriebsphasen**

### 7.4.3 Hinweise zur Auswertung der Energiedaten aus dem Datenprotokoll

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte im Oktober 2017. Die Datenaufzeichnung wurde im Laufe der ersten zwei Betriebsmonate erarbeitet. Aufgrund von verschiedenen Optimierungen und Fehlerbehebungen bei der Programmierung des Datenreports und bei der Datenaufzeichnung liegen erst seit dem 01.11.2017 zuverlässige Daten vor. Teilweise traten Fehler in der Datenaufzeichnung bei Einzelverbräuchen oder auch bei der Gesamtmessung auf. Dies zeigte sich durch unplausible Summenbildung oder negative Stromverbräuche bei Kleinverbrauchern. Diese Messwerte wurden daher nicht weiter berücksichtigt. Ebenfalls wurden längere Stillstandzeiten nicht berücksichtigt.

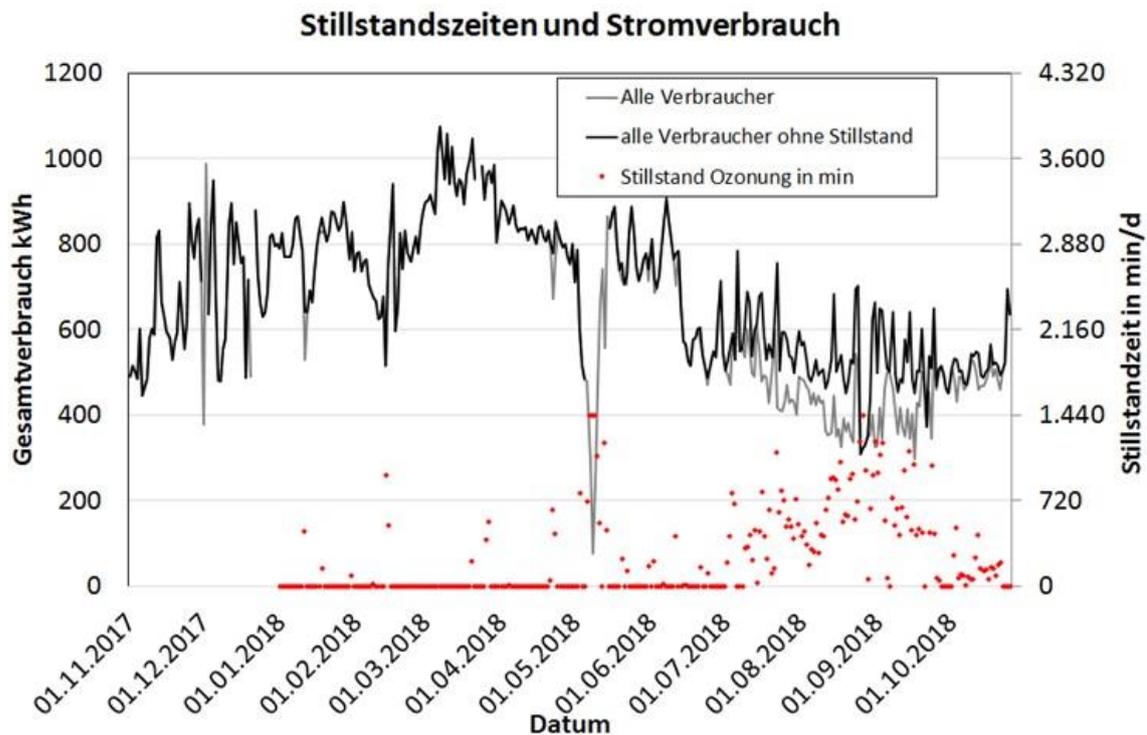
Im Datenprotokoll werden folgende Werte berechnet und ausgegeben (Bezeichnungen aus Datenprotokoll übernommen):

- Vierte Reinigungsstufe spezifisch [kWh/m<sup>3</sup>],
- Ozonung spezifisch [kWh/m<sup>3</sup>],
- Ozonproduktion spezifisch [kWh/kg O<sub>3</sub>],
- Filteranlage Gesamt [kWh/d],
- Filteranlage Spezifisch [kWh/m<sup>3</sup>].

Die Berechnung dieser Werte wurden von der wissenschaftlichen Begleitung überprüft. Fehlerhafte Berechnungen wurden im Laufe des Jahres 2018 korrigiert. Die Diagramme zur Überprüfung finden sich im Anhang D und Anhang E.

### 7.4.4 Betrachtung der Stillstandzeiten der Ozonanlage

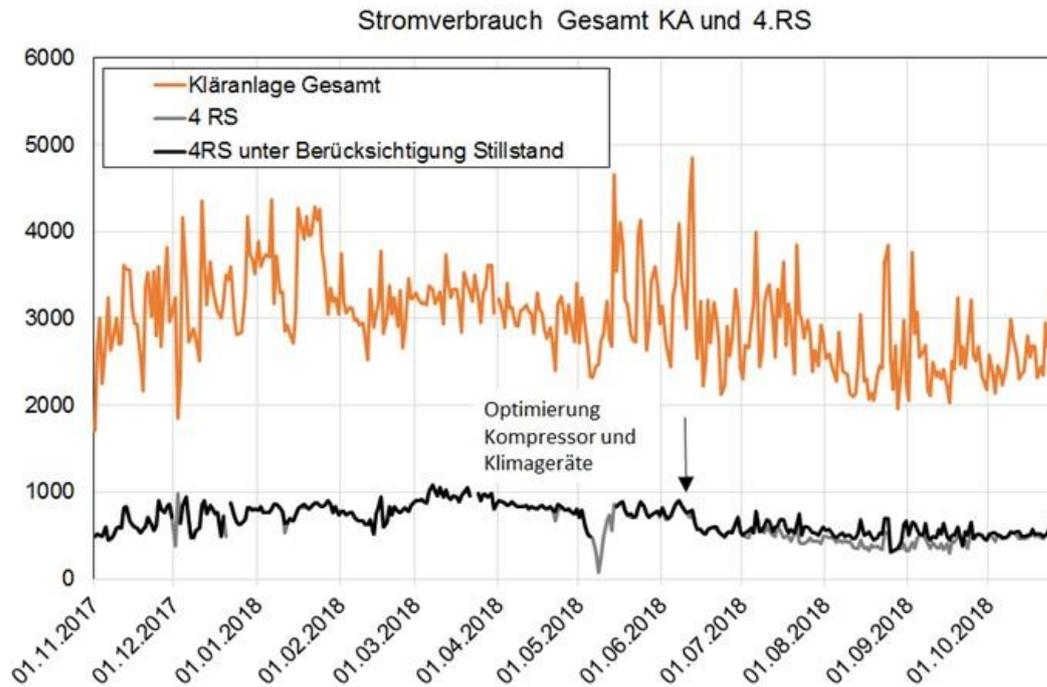
Ab 01.01.2018 wurden die Stillstandzeiten der Ozonanlage regelmäßig notiert. Insbesondere in der zweiten Jahreshälfte 2018 traten regelmäßige längere Stillstandzeiten dieses Anlagenteils auf (siehe Kapitel 3 und 8.1), so dass der tägliche Stromverbrauch der Ozonanlage und der Gesamtanlage in den Aufzeichnungen geringer ist als im zukünftigen Regelbetrieb. Um belastbare Stromverbrauchsdaten zu erhalten, mussten diese Stillstandzeiten berücksichtigt werden und eine Hochrechnung des Stromverbrauchs vorgenommen werden. Die täglichen Stillstandzeiten der Ozonanlage sowie die gemessenen und hochgerechneten Werte für den Gesamtverbrauch der Anlage zur Spurenstoffelimination sind in Abbildung 105 dargestellt.



**Abbildung 105: Stillstandszeiten Ozonung und Stromverbrauch Gesamtanlage**

#### 7.4.5 Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe und der Kläranlage

Abbildung 106 zeigt den Stromverbrauch der Kläranlage Weißenburg insgesamt. Dieser liegt im Versuchszeitraum im Mittel bei 2.950 kWh/d, das entspricht 47 kWh/(E•d). Dies ist eine deutliche Erhöhung im Vergleich zum Energiecheck aus den Jahren 2013 bis 2015, der jedoch nicht alleine auf die vierte Reinigungsstufe zurückzuführen ist. Tabelle 35 zeigt, dass auch ohne Anlage zur Spurenstoffelimination der Stromverbrauch der Kläranlage Weißenburg auf 36 kWh/(E•a) angestiegen ist. Insgesamt lag der Stromverbrauch in einem normalen Bereich. Als Vergleichszahl sei hier aus dem Benchmarkingbericht Bayern für das Erhebungsjahr 2014 der Medianwert von 30,2 kWh/(E•a) genannt (Graf und Schaper, 2016).



**Abbildung 106: Stromverbrauch gesamte Kläranlage und vierte Reinigungsstufe absolut [kWh/d]**

Da sich in den verschiedenen Versuchsphasen der Verbrauch unterschiedlich darstellt und insbesondere erst zum Ende des Jahres 2018 viele Optimierungsmaßnahmen bei Anlagen- und Messtechnik umgesetzt wurden, ist es sinnvoll den jährlichen Stromverbrauch aus dem Betriebszeitraum 5 (ab Anfang September 2018) hochzurechnen. Ab diesem Zeitraum führten die Optimierungsphasen zu einem längeren stabilen Anlagenbetrieb. In dieser Zeit betrug die Erhöhung des Stromverbrauchs durch die vierte Reinigungsstufe rund 25 %. Dies hat Auswirkungen auf die Betriebs- und Jahreskosten für die Abwasserbehandlung. Bei einem Strompreis von ca. 23 ct/kWh ist mit Stromkosten für die vierte Reinigungsstufe von etwa 59.500 Euro pro Jahr zu rechnen. Allerdings ist dieser Auswertzeitraum mit sechs Wochen relativ kurz, so dass weitere Beobachtungen empfohlen werden.

**Tabelle 35: Stromverbrauch gesamte Kläranlage und vierte Reinigungsstufe absolut [kWh/d]**

| Stromverbrauch KA  |            | alle Daten | 1                      | 2                      | 3                       | 4                      | 5                       |
|--------------------|------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
|                    |            |            | 1.11.2017 bis 1.3.2018 | 1.3.2018 bis 10.6.2018 | 11.6.2018 bis 31.7.2018 | 1.8.2018 bis 30.8.2018 | 1.9.2018 bis 15.10.2018 |
| <b>EW_CSB_120</b>  | E          | 23.122     | 23.725                 | 22.842                 | 22.457                  | 21.555                 | 23.176                  |
| <b>Gesamt</b>      | kWh/d      | 2.948      | 3.228                  | 3.136                  | 2.949                   | 2.476                  | 2.554                   |
|                    | kWh/(EW a) | 47         | 50                     | 50                     | 48                      | 42                     | 40                      |
| <b>davon 4. RS</b> | kWh/d      | 693        | 727                    | 854                    | 596                     | 544                    | 534                     |
|                    | kWh/(EW a) | 11         | 11                     | 14                     | 10                      | 9                      | 8                       |
| <b>ohne 4. RS</b>  | kWh/d      | 2.263      | 2.503                  | 2.292                  | 2.359                   | 1.967                  | 2.030                   |
|                    | kWh/(EW a) | 36         | 39                     | 37                     | 38                      | 33                     | 32                      |

#### 7.4.6 Stromverbrauch der Ozonung

Zur Ozonung gehören der Ozongenerator (SMO Evo), die Kühlwasserpumpen intern (P01) und der Restozonvernichter (ROV), sowie Kleinverbraucher (Messungen), diese werden über einen eigenen Zähler erfasst. Die externen Kühlwasserpumpen (P11.1 und P11.2) gehören ebenfalls dazu und werden dem Verbrauch hinzugerechnet.

Abbildung 107 zeigt die Aufteilung des Verbrauches der Ozonung auf den Ozongenerator sowie die Pumpen und dem Restozonvernichter und Kleinverbraucher (bereits hochgerechnet unter Berücksichtigung der Stillstandzeiten). Der Gesamtverbrauch liegt im Mittel bei 279 kWh/d. Größter Verbraucher ist der Ozongenerator mit im Mittel 200 kWh/d (entspricht ca. 70 %), dessen Verbrauch auch stark schwankt. Auffällig ist die sehr konstante Leistung der Kühlwasserpumpen und des ROV, offensichtlich laufen diese kontinuierlich durch. Hier ist zu prüfen, ob noch Optimierungspotential insbesondere der Pumpen besteht.

Die Ermittlung des Verbrauchs der Kleingeräte erfolgte durch Differenzbildung der Summe der Einzelverbraucher abzüglich der Gesamtmessung. Sie spielen für den Gesamtverbrauch der Anlage keine Rolle.

Der in Abbildung 108 gezeigte spezifische Verbrauch pro m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser wurde folgendermaßen berechnet:

*Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m<sup>3</sup>]\*)*

$$= \text{Verbrauch [kWh/d]} / ((Q_{\text{Zulauf O}_3} [\text{l/s}] + Q_{\text{Injektor}} [\text{l/s}]) \times 3,6 \times 24)$$

\*) Bereits hochgerechnet unter Berücksichtigung der Stillstandszeiten

Da die Berechnungen des Datenprotokolls bis 01.10.2018 teilweise nicht korrekt waren, wurden eigene Berechnungen durchgeführt. Der spezifische Verbrauch der Ozonung liegt zwischen 0,03 bis 0,08 kWh/m<sup>3</sup>, im Mittel bei 0,05 kWh/m<sup>3</sup>.

Der in Abbildung 120 gezeigte spezifische Verbrauch pro kg erzeugtem Ozon wurde folgendermaßen berechnet:

*Spezifischer Verbrauch Ozonerzeugung [kWh/kgO<sub>3</sub>]*

$$= \text{Ozonung Gesamt [kWh/d]} / (Q_{\text{Gas Injektor-1001}} [\text{Nm}^3/\text{h}] \times c_{\text{O}_3} \text{ Zugas} [\text{g/Nm}^3] \times 1000 \times 24)$$

Aufgrund der Mängel im Datenprotokoll wurden auch hier für den spezifischen Stromverbrauch der Ozonerzeugung eigene Berechnungen durchgeführt. Der spezifische Verbrauch der Ozonung wurde einmal nur auf den Ozongenerator bezogen. Er beträgt relativ konstant ca. 8,5 kWh/kgO<sub>3</sub>. Für die gesamte Ozonanlage inklusive Nebenaggregate liegt er etwas höher bei 12,3 kWh/kgO<sub>3</sub>. Es ist ein deutlicher Anstieg ab April 2018 zu erkennen, der bisher nicht erklärt werden kann.

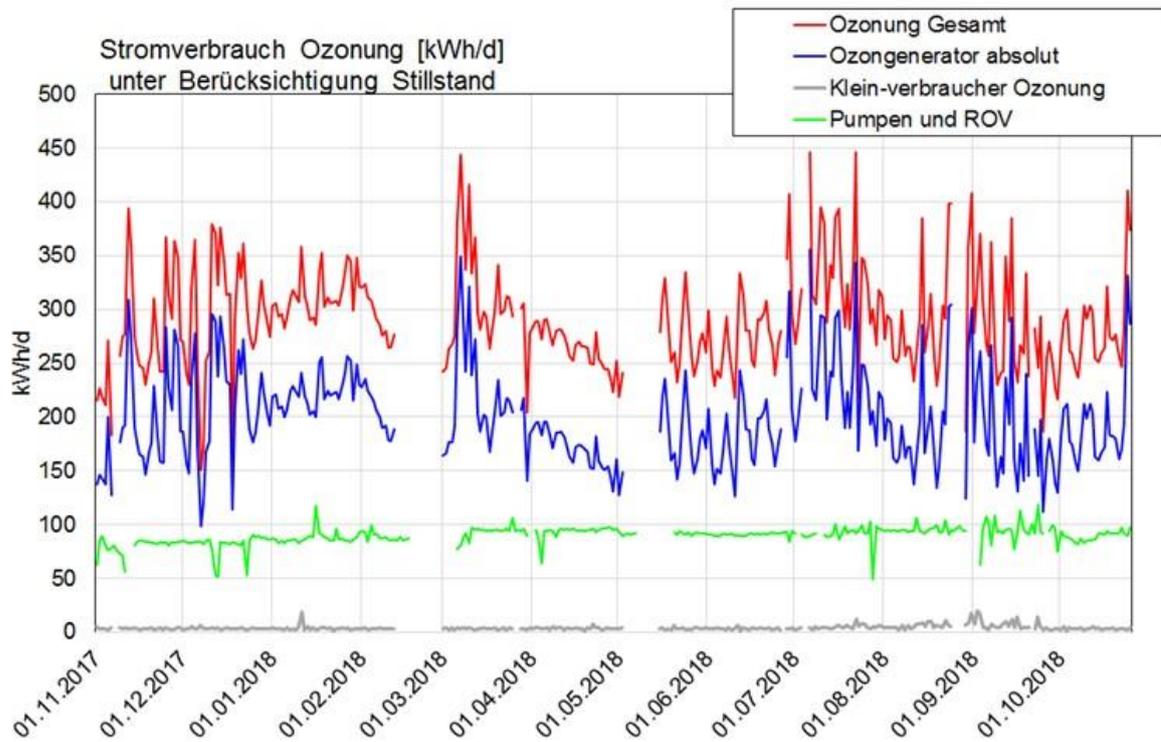


Abbildung 107: Verbrauch Ozongenerator, Pumpen, Kleinverbraucher

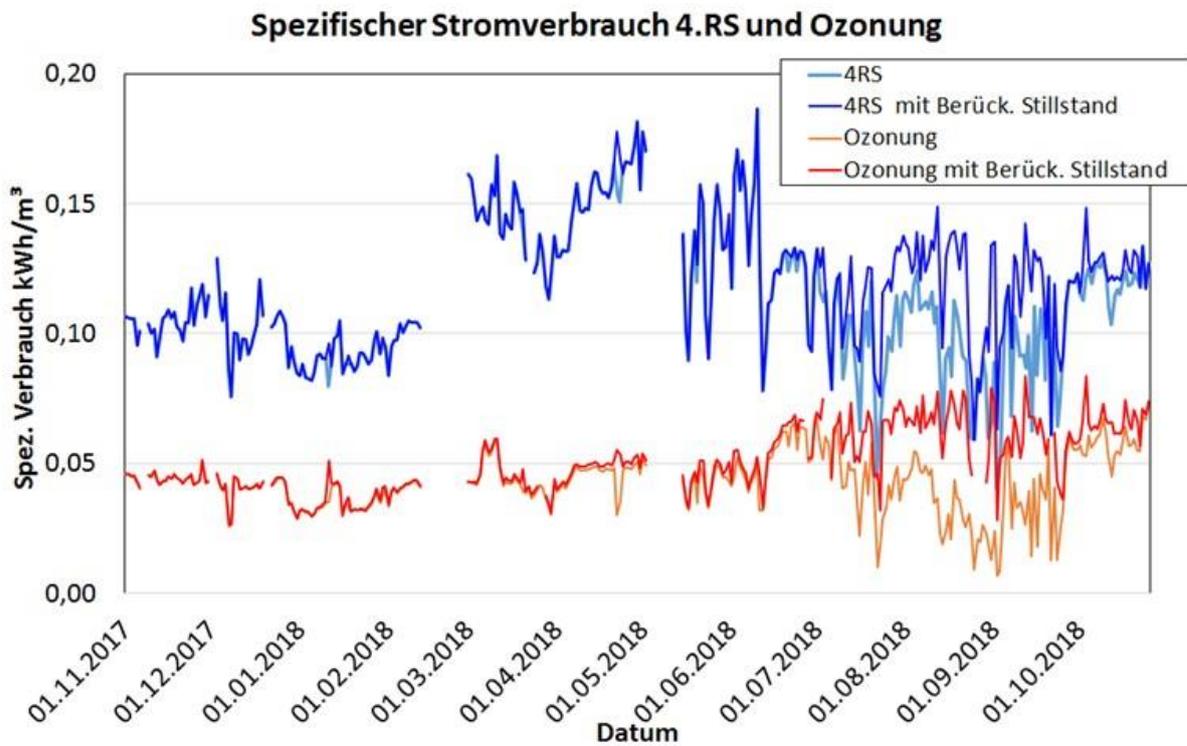
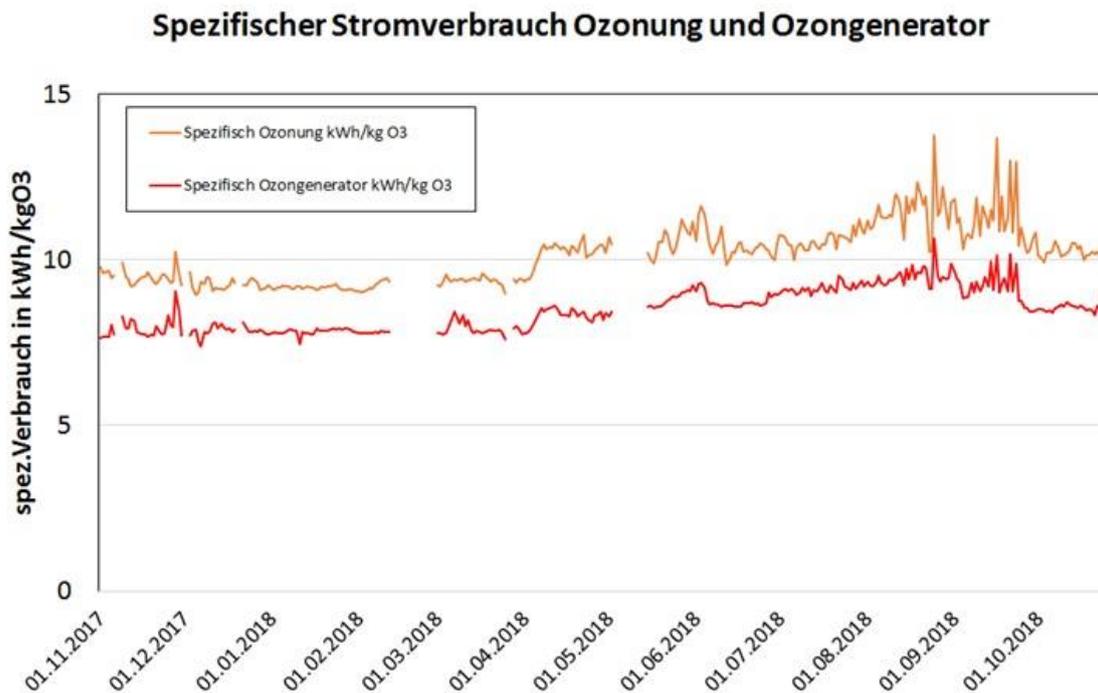


Abbildung 108: Spezifischer Verbrauch vierte Reinigungsstufe und Ozonung



**Abbildung 109: Spezifischer Stromverbrauch der Ozonerzeugung [kWh/kg O<sub>3</sub>]**

#### 7.4.7 Stromverbrauch der Filter

Bei der Filteranlage handelt es sich um eine zweistraßige Filteranlage nach dem System Dynasand. Hier werden beide Filter (Sandfilter und Aktivkohlefilter) kontinuierlich betrieben (bzw. gespült). Der Strombedarf wird nur über die Mammutpumpe bzw. über den Kompressor bestimmt, der die Druckluft erzeugt. Mit einer periodischen Betriebsweise kann der Stromverbrauch gesenkt werden.

Da nur ein Druckbehälter vorhanden ist, kann nur eine Gesamtbetrachtung der beiden Straßen erfolgen. Eine Unterscheidung des Stromverbrauchs der einzelnen Straßen ist nicht möglich. Je nach Abwasserbeschaffenheit kann Aktivkohle sich aufgrund ihrer Partikelgröße schneller mit Feststoffen zusetzen als herkömmliches Filtermaterial, was zu häufigeren Rückspülungen führen kann. Dies kann den Verbrauch im Vergleich zu konventionellen Filtern erhöhen.

Der Sandfilter wurde die meiste Zeit in 2018 mit 18 min Betrieb und 12 min Pause gefahren. Das aktuelle Spülintervall für den Sandfilter wurde ab Sommer bis Herbst 2018 optimiert und beträgt aktuell 18 min Spülen und 42 min Pause. Für den Aktivkohlefilter beträgt das Spülintervall 18 min Spülen und 12 min Pause (Stand Oktober 2018). Bei Überschreitung einer maximalen Druckdifferenz, wird sofort eine Spülung eingeleitet. Der Aktivkohlefilter wird also doppelt so oft gespült wie der Sandfilter. Die Luftmenge ist beim Aktivkohlefilter allerdings deutlich geringer mit 22 NI/min als wie beim Sandfilter mit 160 NI/min. Eine Umrechnung des Verbrauchs auf die einzelne Filterzelle oder die Filteroberfläche ist aufgrund der unterschiedlichen Luftmengen nicht möglich.

Der Gesamtverbrauch für die acht Filterzellen betrug nach Optimierung der Spülung (ca. 15.6.2018) und korrekter Einstellung der Kompressorenlaufzeit 115 kWh/d, also ca. 16 kWh/d pro Zelle. Der spezifische Verbrauch ist ebenfalls in Abbildung 110 dargestellt Er

liegt nach der Optimierung zwischen 0,01 und 0,04 kWh/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser, im Mittel bei 0,028 kWh/m<sup>3</sup>.

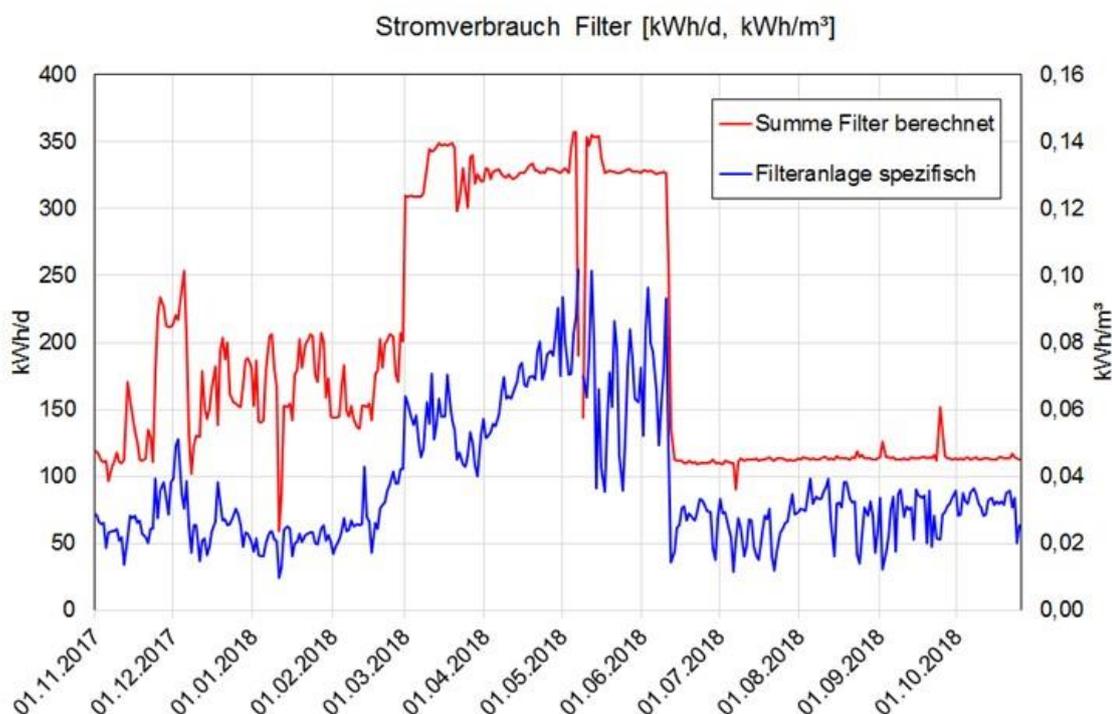


Abbildung 110: Gesamtverbrauch und spez. Verbrauch Filteranlage

#### 7.4.8 Anteilige Verbräuche der Verfahrensstufen und Anlagenkomponenten

Tabelle 36 zeigt die mittleren Verbräuche in kWh/d der einzelnen Verfahrensstufen über die Versuchsphasen. Die Optimierungsprozesse sind insbesondere bei der Filteranlage, den Zulaufpumpen und dem Posten Sonstiges zu erkennen. „Sonstiges“ umfasst alle Kleinaggregate unter 1 kW, sowie die Klima- und Lüftung des Gebäudes. Obwohl die Klimaanlage mittlerweile komplett ausgeschaltet ist, liegt der Verbrauch für diesen Posten „Sonstiges“ noch bei einem relativ hohen Wert von 89 kWh/d, dessen Ursachen noch nachgegangen wird.

Tabelle 36: Mittlere Verbrauchszahlen über Versuchsphasen

| Stromverbrauch absolut mit Berücksichtigung Stillstand |              | alle Daten | 1                      | 2                      | 3                       | 4                      | 5                       |
|--|--------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
|  |              |            | 1.11.2017 bis 1.3.2018 | 1.3.2018 bis 10.6.2018 | 11.6.2018 bis 31.7.2018 | 1.8.2018 bis 30.8.2018 | 1.9.2018 bis 15.10.2018 |
| Zulaufpumpen + ZPW                                     | kWh/d        | 92         | 144                    | 93                     | 61                      | 46                     | 49                      |
| Ozonung  | kWh/d        | 290        | 293                    | 279                    | 314                     | 289                    | 278                     |
| Filteranlage   | kWh/d        | 188        | 163                    | 326                    | 115                     | 114                    | 115                     |
| Probenahmepumpen                                       | kWh/d        | 3,0        | 3,1                    | 2,9                    | 3,0                     | 3,0                    | 3,0                     |
| Sonstiges  | kWh/d        | 120        | 124                    | 153                    | 103                     | 92                     | 89                      |
| <b>Gesamt Summe</b>                                    | <b>kWh/d</b> | <b>693</b> | <b>727</b>             | <b>854</b>             | <b>596</b>              | <b>544</b>             | <b>534</b>              |

Abbildung 111 zeigt den anteiligen Verbrauch der Verfahrensstufen der vierten Reinigungsstufe mit Prozentangaben. Größter Verbraucher ist - wie zu erwarten - die Ozonung mit 52 %. Die Kompressorenanlage der Filter liegt bei 21 %. Das Zulaufpumpwerk liegt bei 9 % (Zwischenpumpwerk war während der Projektlaufzeit nicht in Betrieb). Der Rest verteilt sich auf die Probenahmepumpen und den Posten Sonstiges.

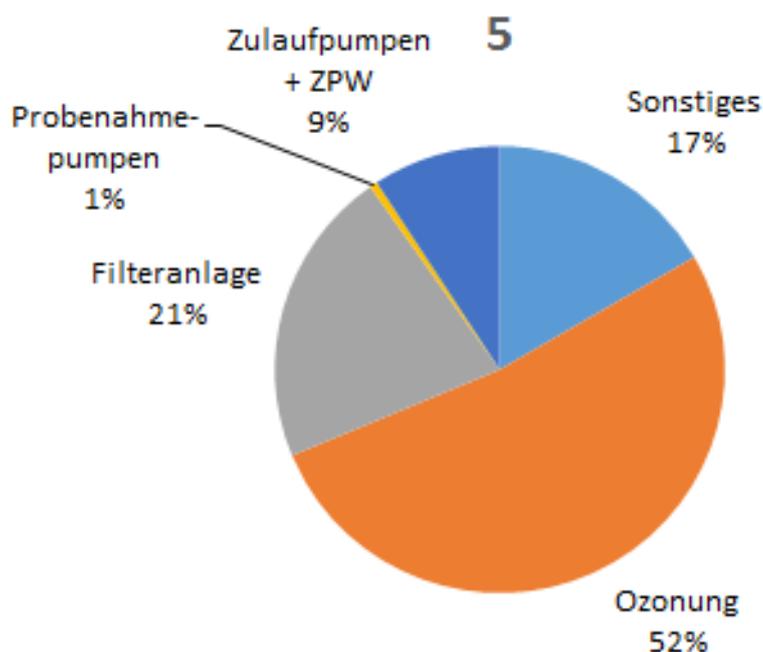


Abbildung 111: Verbrauchsanteile in Betriebsphase 5 (01.09. – 15.10.2018)

### 7.4.9 Spezifische Verbräuche der vierten Reinigungsstufe und der Verfahrens- stufen und Anlagenkomponenten

Tabelle 37 zeigt die Mittelwerte der berechneten spezifischen Verbräuche der Verfahrens-  
stufen. Zusätzlich aufgeführt sind Literaturangaben. Insgesamt gesehen liegen alle Verfah-  
rensstufen in allen Versuchsphasen in einem eher günstigen Verbrauchsbereich. Lediglich  
die Filter in Betriebsphase 2 (01.03. – 10.06.2018) bilden eine Ausnahme. Dies konnte je-  
doch durch Optimierung der Filterspülung wieder korrigiert werden (vgl. Kapitel 8.1.5.).

Tabelle 37: Spezifischer Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe und der Verfah-  
rensstufen und Anlagenkomponenten

| Stromverbrauch spezifisch mit Berücksichtigung Stillstand |                      | alle Daten | 1<br>1.11.2017<br>bis 1.3.2018 | 2<br>1.3.2018 bis<br>10.6.2018 | 3<br>11.6.2018 bis<br>31.7.2018 | 4<br>1.8.2018 bis<br>30.8.2018 | 5<br>1.9.2018 bis<br>15.10.2018 | Schätzungen/<br>Literatur |
|---|----------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Zulaufpumpen  | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,02       | 0,02                           | 0,02                           | 0,01                            | 0,01                           | 0,01                            |                           |
| Ozonung   | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,05       | 0,04                           | 0,05                           | 0,06                            | 0,07                           | 0,06                            | 0,05 bis 0,2              |
|   | kWh/kgO <sub>3</sub> | 13,8       | 11,1                           | 12,6                           | 15,4                            | 28,1                           | 17,4                            |                           |
| Filter  | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,03       | 0,02                           | 0,06                           | 0,02                            | 0,03                           | 0,03                            | 0,01 bis 0,08             |
| Probenahmepumpen  | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,001      | 0,000                          | 0,000                          | 0,001                           | 0,001                          | 0,001                           |                           |
| Sonstiges (Klima, Licht)                                  | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,02       | 0,02                           | 0,03                           | 0,02                            | 0,02                           | 0,02                            |                           |
| Gesamte 4.RS  | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,12       | 0,10                           | 0,15                           | 0,11                            | 0,12                           | 0,12                            |                           |
| Ozongenerator   | kWh/m <sup>3</sup>   | 0,03       | 0,03                           | 0,03                           | 0,03                            | 0,02                           | 0,03                            |                           |
|   | kWh/kgO <sub>3</sub> | 8,4        | 7,9                            | 8,4                            | 8,6                             | 9,1                            | 9,2                             | 9,8                       |
| Zulaufpumpen  | kWh/(E a)            | 1,5        | 2,2                            | 1,5                            | 1,0                             | 0,8                            | 0,8                             | 0,7 bis 1,8               |
| Ozonung   | kWh/(E a)            | 4,6        | 4,5                            | 4,5                            | 5,1                             | 4,9                            | 4,4                             | 10 bis 20                 |
| Filter  | kWh/(E a)            | 3,0        | 2,5                            | 5,2                            | 1,9                             | 1,9                            | 1,8                             | 2,00                      |
| Probenahmepumpen  | kWh/(E a)            | 0,05       | 0,05                           | 0,05                           | 0,05                            | 0,05                           | 0,05                            |                           |
| Sonstiges   | kWh/(E a)            | 1,9        | 1,9                            | 2,4                            | 1,7                             | 1,6                            | 1,4                             |                           |
| Gesamte 4.RS  | kWh/(E a)            | 10,9       | 11,2                           | 13,6                           | 9,7                             | 9,2                            | 8,4                             |                           |

#### 7.4.10 Vergleich der ermittelten Stromverbrauchswerte mit der Literatur

Umfassende Untersuchungen zum Energiebedarf und Stromverbrauch einer vierten Reinigungsstufe wurden im Forschungsvorhaben „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen“ Phase I+II durchgeführt (Pinnekamp et al., 2015; Bolle und Pinnekamp, 2011). Abbildung 112 und Abbildung 113 zeigen die Auswertungen aus dieser Studie. Es wurden sowohl Literaturangaben ausgewertet, wie auch Messungen an verschiedenen Anlagen in Nordrhein-Westfalen vorgenommen. Auffallend ist, dass neuere Anlagen bereits deutlich verbesserte Verbrauchswerte haben. Zu diesen sollte auch Weißenburg in Bezug gesetzt werden.

Die neuen Literaturwerte für den Verbrauch einer Ozonung (siehe Abbildung 112) liegen in der Spannweite von 0,04 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,17 kWh/m<sup>3</sup>. Auch in Abegglen und Siegrist (2012) werden Verbrauchszahlen von 0,05 bis 0,17 kWh/m<sup>3</sup> genannt (in Abbildung 112 ist weniger dargestellt!). Im Vergleich hierzu liegen die Verbrauchszahlen der Ozonung von Weißenburg mit bei Mittel 0,06 und mit maximal bei 0,075 kWh/m<sup>3</sup> in einem sehr günstigen Bereich.

Für die Filtrationsanlage (GAK) liegen die aus der Literatur zusammengetragenen Werte der Spannweite von 0,01 kWh/m<sup>3</sup> und 0,076 kWh/m<sup>3</sup> (Pinnekamp et al., 2015). In Abegglen und Siegrist (2012) wird der Energiebedarf für GAK-Filter im Bereich von 0,01–0,05 kWh/m<sup>3</sup>, ähnlich eines Sandfilters, angegeben. Ohne die Zahlen aus Betriebsphase 2 (01.03. – 10.06.2018) liegt der Verbrauch der Filteranlage in Weißenburg bei 0,03 kWh/m<sup>3</sup> und damit im mittleren Bereich (siehe Abbildung 113). Bei diesem Vergleich muss jedoch beachtet werden, dass sowohl Sandfilter als auch Aktivkohlefilter in Weißenburg kontinuierlich betrieben werden und auch keine Vergleichszahlen zu anderen großtechnischen kontinuierlich betriebenen Filter zur Spurenstoffelimination vorliegen. Zudem wird sich der ermittelte Wert von 0,03 kWh/m<sup>3</sup> zukünftig weiter reduzieren, da zum einen die Einstellungen bei den Kompressoren Ende Sommer 2018 optimiert (Abschaltung der Luftentwässerung) und die Pausenzeiten beim Sandfilter erhöht wurden (siehe Kapitel 8.1.5).

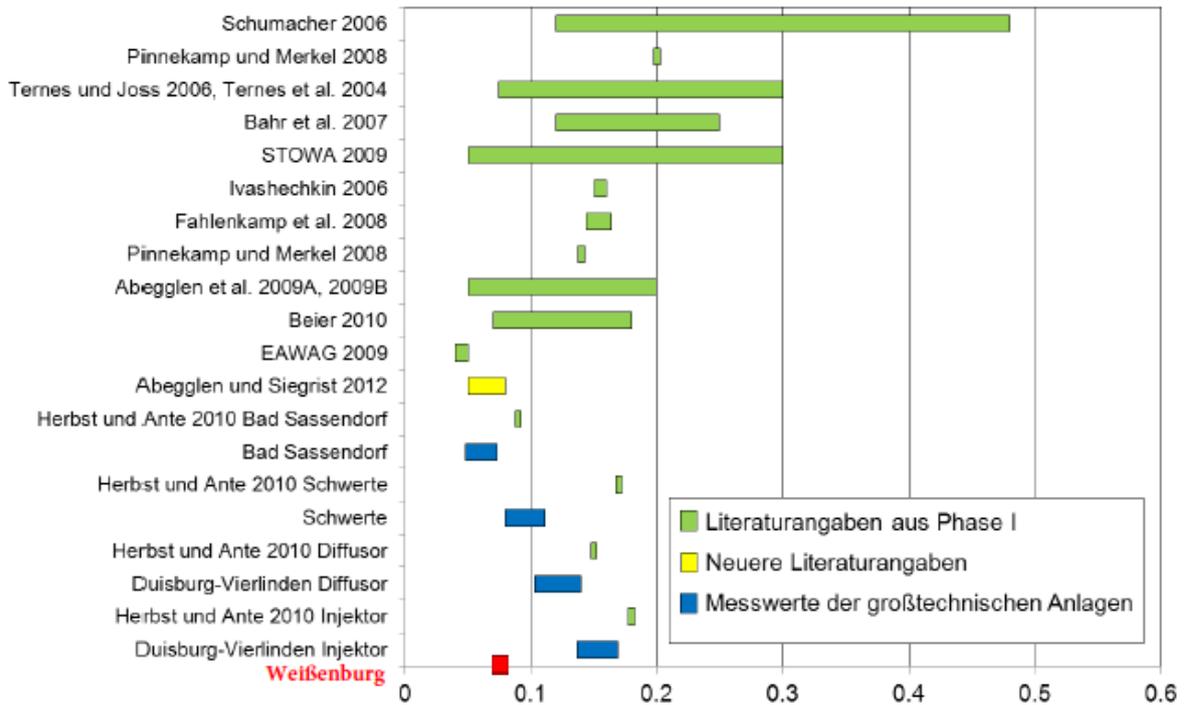


Abbildung 112: Strombedarf einer nachgeschalteten Ozonung auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus Weißenburg mit Literaturangaben, modifiziert nach Pinnekamp et al. (2015)

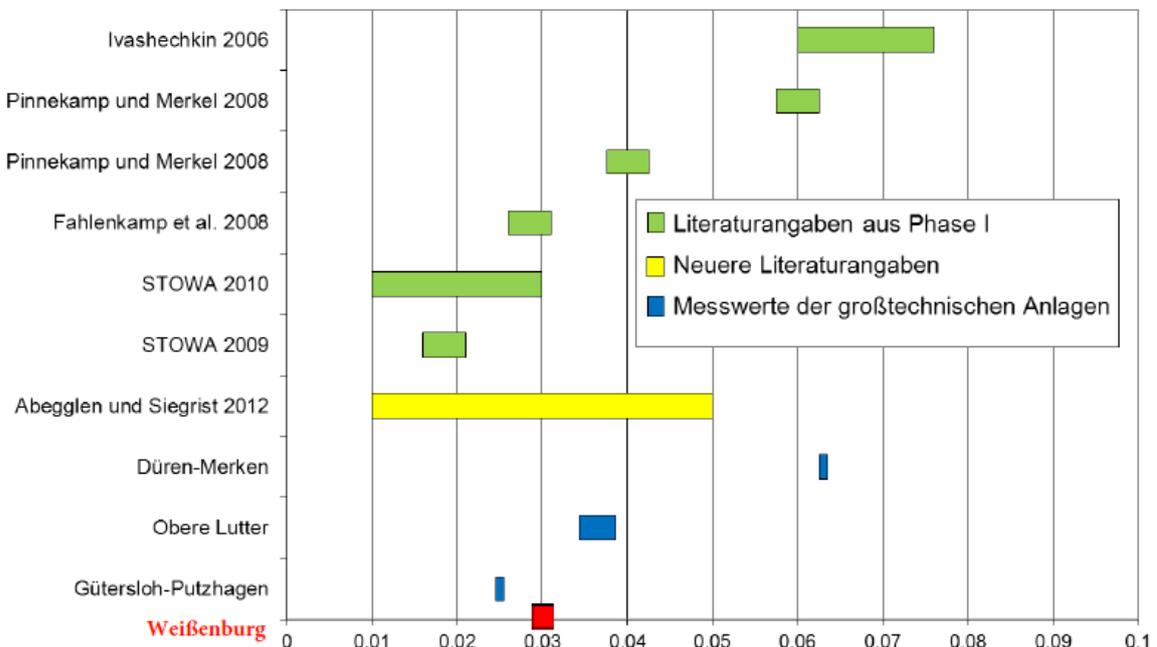


Abbildung 113: Strombedarf von nachgeschalteten GAK-Filtrationsanlagen – Vergleich von Daten aus Weißenburg mit Literaturangaben, modifiziert nach Pinnekamp et al. (2015)

#### 7.4.11 Wärmeenergie

Obwohl die Ozonbildung aus Sauerstoff unter Wärmeabsorption erfolgt, sind Ozonerzeugerkessel in industriellen Anwendungen wassergekühlt, da fast 90 % der eingetragenen Energie infolge der hohen Zersetzungsrate wieder abgeführt werden müssen (Willig, 2018).

Derzeit wird die anfallende Wärmeenergie ungenutzt in den Ablauf der Kläranlage abgegeben. Im Rahmen dieses Projektes wurde diese Wärmemenge erfasst, um bei späteren Planungsprozessen eine Entscheidungshilfe zur Weiterverwertung der Wärme zu haben.

Die Berechnung des spezifischen Wärmeenergieanfalls erfolgt nach folgender Formel:

$$P_{therm} [kWh/kgO_3]$$

$$= \text{Wärme [kWh/d]} / (c_{O_3} \text{Zugas [gO}_3\text{/Nm}^3] \times Q_{\text{Gas (Injektor) [Nm}^3\text{/h]} \times 24 / 1000)$$

Die erzeugte Wärmemenge hängt vor allem von der Ozonproduktion ab. Sie liegt deshalb stark schwankend, bedingt durch die aufgetretenen Stillstandszeiten bei der Ozonerzeugung, zwischen 50 bis 250 kW am Tag (siehe Abbildung 114). Wenn die Ozonanlage mit einer frachtspezifischen oder zuflussproportionalen Steuerung der Ozonproduktion gefahren wird, ist ebenfalls mit starken Schwankungen der Wärmemenge zu rechnen.

Relativ konstant ist dagegen die spezifische Wärmemenge, die sich zwischen 6 kWh/kg<sub>O<sub>3</sub></sub> und 8 kWh/kg<sub>O<sub>3</sub></sub> bewegt. Das entspricht im Mittel 80 % der zugeführten Energie und liegt damit etwas geringer als in den Literaturangaben.

Die im externen Kühlwasserkreislauf gemessenen Temperaturen betragen ca. 20 bis 25 °C. Bei einer zu erwartenden Temperaturdifferenz von ca. 5 °C im Wärmetauscher liegen die Temperaturen im internen Kreislauf bei maximal 30 °C. Damit ist das Temperaturniveau selbst für eine Niedertemperverwertung in der Regel zu gering. Weiterhin sind die Temperaturen leistungsabhängig von der Ozonerzeugung und damit nicht unbedingt kompatibel zum Wärmebedarf der Betriebsgebäude für Heizung oder Warmwasser. Für eine Aufheizung des Klärschlammes für die Faulung ist allenfalls eine Vorerhitzung denkbar. Da somit immer zusätzliche Heizsysteme bereitgehalten werden müssen, kann davon ausgegangen werden, dass sich zumindest bei kleinen Anlagen wie in Weißenburg die Wärmeverwertung nicht lohnt.

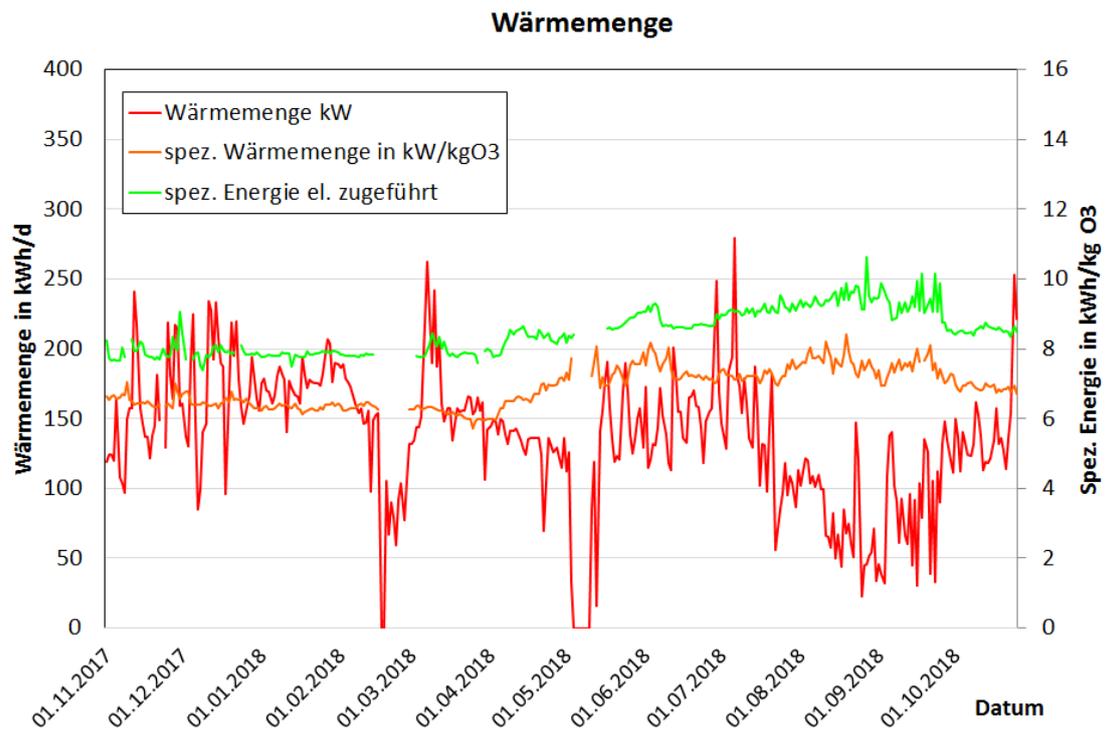


Abbildung 114: Wärmeerzeugung durch Ozongenerator

## 8 Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus dem dem Anlagenbetrieb in Weißenburg

Diese Kapitel umfasst die wesentlichen Erfahrungen und Erkenntnisse zum einjährigen Anlagenbetrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg. Schwerpunkte dieses Kapitels sind dokumentierte Optimierungspotenziale bei Anlagen- und Messtechnik. Zudem werden Hinweise und Empfehlungen zur Betriebsführung und Eigenüberwachung formuliert. Schlussendlich werden für einen dauerhaften weitergehenden und effektiven Betrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg Vorschläge gemacht.

### 8.1 ERKENNTNISSE UND ERFAHRUNGEN AUS DEM ANLAGENBETRIEB

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Anlagenbetrieb für den Zeitraum von Herbst 2017 bis September 2018 vorgestellt. In dieser Versuchsphase wurde die vierte Reinigungsstufe mit folgenden Einstellungen gefahren:

**Tabelle 38: Betriebsparameter der vierten Reinigungsstufe**

| Parameter/Prozessgröße               | Wert/Bemerkung                            |
|--------------------------------------|---|
| Maximaler Zufluss                    | 120 l/s                                   |
| Steuerung der Ozondosierung          | zuflussproportional                       |
| Spezifische Ozondosis                | 0,6 und 0,8 mg O <sub>3</sub> /mg DOC     |
| Minimale Aufenthaltszeit Ozonreaktor | 20 min                                    |
| EBCT in den Filtern                  | minimal bei 14 min (im Mittel ca. 27 min) |
| Filtergeschwindigkeit in den Filtern | maximal bei 8 m/h (im Mittel ca. 5 m/h)   |

Im o.g. Betrachtungszeitraum wurden verschiedene Optimierungspotenziale bei Anlagen- und Messtechnik festgestellt. Neben der Verringerung der Abschaltungen/Stillstandszeiten bei der Ozonung durch Optimierungsmaßnahmen wurde auch die Messtechnik verbessert. Grundsätzlich muss für die Inbetriebnahmephase und die anschließende Optimierungsphase (Mängelbeseitigung) ausreichend Zeit in Anspruch genommen werden. In KOMS-BW (2018) werden für eine Anlage zur Spurenstoffelimination sowohl für die Inbetriebnahmephase als auch für die Optimierungsphase jeweils ein Jahr empfohlen.

#### 8.1.1 Anlagentechnik Ozonung

Die Ozonung wurde in Versuchsphase 1 zuflussproportional gesteuert. Korrekturfaktoren (Regenwetter, Nitrit) wurden in der frühen Anfangsphase noch nicht berücksichtigt. Diese Korrekturfaktoren sind jedoch für die Ozondosierung (Regenwetter, Nitrit) essentiell und wurden in der Optimierungsphase Anfang 2018 ermittelt (für Nitrit siehe Kapitel 8.1.3).

Durch ein Regenereignis reduziert sich die Konzentration des Hintergrund-DOC durch Verdünnung des Abwassers. Bei Regenereignissen kann es daher zu einer Überdosierung von Ozon kommen, wenn sich bei einer zuflussproportionalen Steuerung die Ozonmenge entsprechend der steigenden Wassermenge erhöht. Zudem verkürzt sich nach Abeggen und

Siegrist (2012) auch die hydraulische Aufenthaltszeit im Ozonungsreaktor, während die notwendige absolute Ozonmenge im Vergleich zum Trockenwetter ansteigt (größere DOC Fracht). Folglich steht für die Elimination der Spurenstoffe zu viel Ozon zur Verfügung. Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich unerwünschte Nebenprodukte bilden können (z.B. Bromatbildung). Die spezifische Ozondosierung muss bei zuflussproportionaler Steuerung daher bei Regenwetter limitiert werden.

Um den Einfluss der Regenereignisse zu reduzieren, werden sogenannte Abminderungsfaktoren ermittelt. Sind diese Abminderungsfaktoren nicht implementiert, kann es zu einem Austrag des Ozons in die nachgeschalteten Filterstufen kommen, was zu einer Schädigung des Biofilms führen kann. In Regensdorf in der Schweiz wurden z.B. die in Abbildung 115 aufgezeigten Abminderungsfaktoren erarbeitet.

Für die zuflussproportionale Ozonsteuerung in Weißenburg wurden ebenfalls Abminderungsfaktoren festgelegt. Abbildung 116 zeigt für verschiedene Zuflüsse die Regenwetterkorrektur, welche eine Überdosierung vermeiden soll. Bezogen auf einen exemplarischen Zeitraum vom 03.04.2018 0:00 Uhr bis zum 03.04.2018 24:00 Uhr zeigt Abbildung 116 die Korrektur der Ozondosierung (hier Ozonmenge in g/h) durch die hinterlegten Abminderungsfaktoren. Ohne die Abminderungsfaktoren kommt es am 03.04.2018 um 09:00 Uhr (früh) zu einer Ozonproduktion von rund 2.250 g/h. Durch die Abminderung wird die Ozonproduktion auf rund 1.350 g/h gedrosselt, was einer Reduktion von 40 % entspricht. Eine Optimierung der Ozondosierung bei zuflussproportionaler Steuerung unter Regenwetterbedingungen könnte noch durch eine Erweiterung zusätzlicher Abminderungsfaktoren im Bereich von 55 l/s bis 98 l/s erfolgen, da hier die Differenz der Zuflüsse relativ groß ist. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die einfache volumenproportionale Steuerung der Ozonzugabe sich insbesondere für Kläranlagen mit einer homogenen Abwasserzusammensetzung und mit möglichst kontinuierlichem Zufluss eignet.

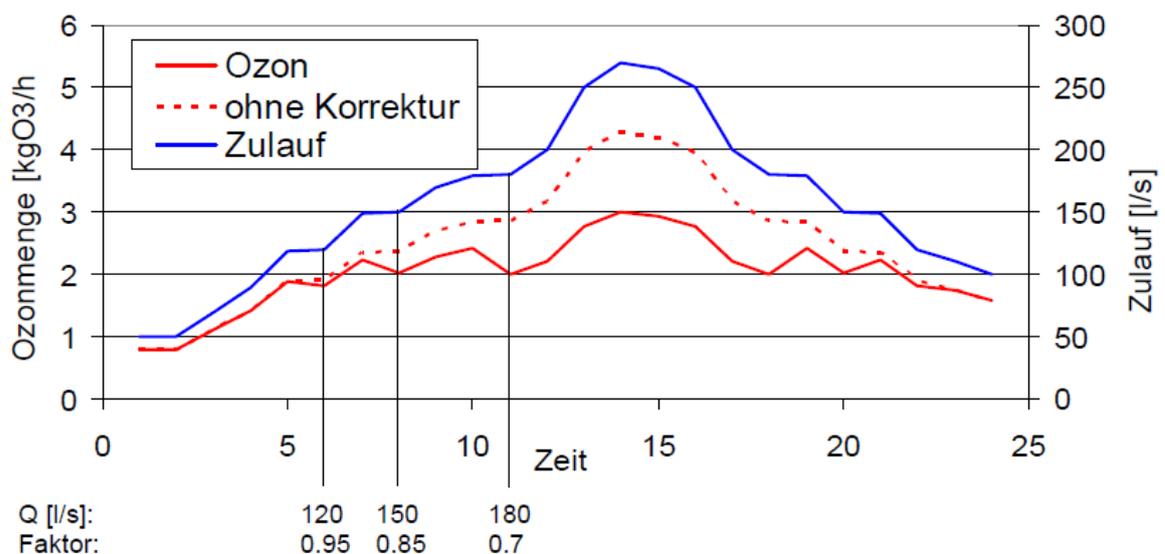
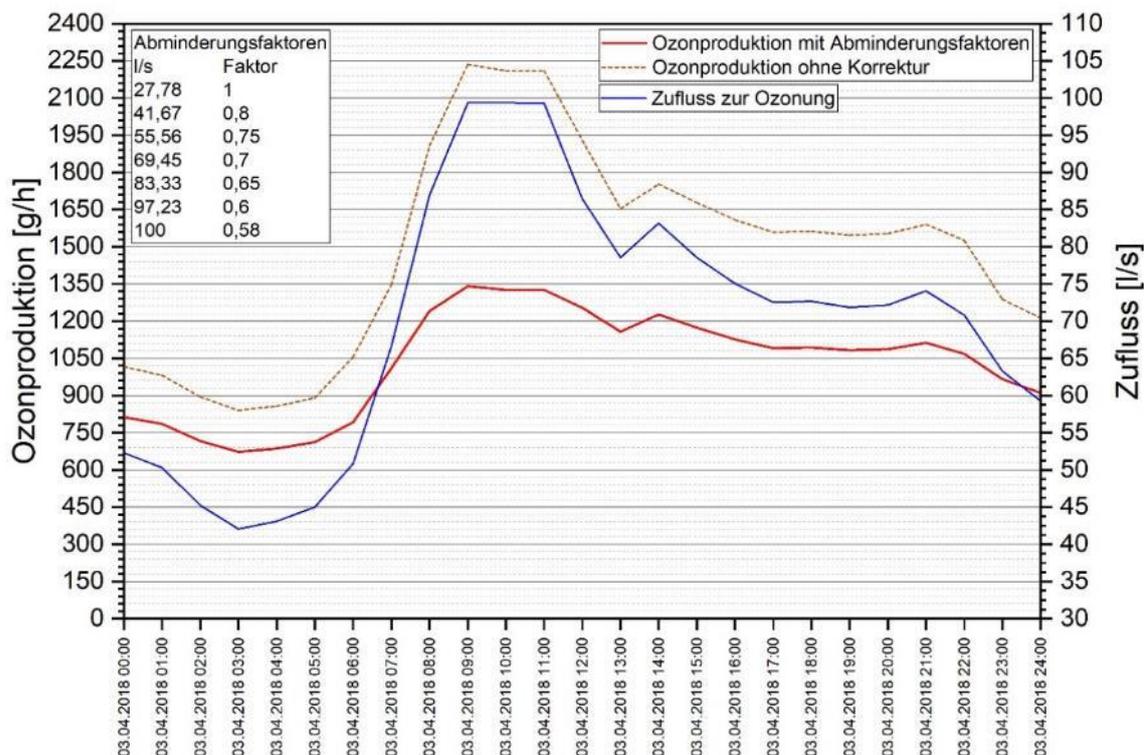


Abbildung 115: Regenwetterkorrektur auf der Kläranlage Regensdorf (Abegglen et al., 2009)



**Abbildung 116: Regenwetterkorrektur bei der zuflussproportionalen Steuerung der Ozonzugabe (Auszug Messwerte vom 03.04.2018 aus Datenreport)**

Zu Beginn der Untersuchungsphase konnte die maximale Produktionsleistung des Ozongenerators nicht erreicht werden. Mit einem Softwareupdate konnte dies behoben werden. Während der Versuchsphase 1 wiesen die Probenahmepumpen (Undichtigkeiten) und die Abgleichpumpe (Transportschaden) zur SAK-Vergleichsmessung Mängel auf. Während des Projektverlaufs konnte diese Mängel behoben werden.

Um die Förderleistung der Zulaufpumpen zur Ozonanlage zu optimieren, wurde eine Druckanalyse mit hydraulischer Modellierung des Ozonreaktors durchgeführt (Hunze, 2017). Abbildung 117 zeigt die Austrittsöffnungen der Löcher im Zulaufrohr innerhalb des Ozonreaktors für den gebauten Ozonreaktor. Dabei hatten die Zutrittsöffnungen folgenden Durchmesser: A1/B1 mit 61 mm, A2/B2 mit 58,5 mm, A3/B3 mit 56 mm und A4/B4 mit 53,5 mm. Aufgrund der Resultate einer weiteren Strömungssimulation zur Optimierung des Anlagenwiderstandes wurde geplant, den Durchmesser der Austrittslöcher im Zulaufrohr im Ozonreaktor zu erweitern. Die Druckanalyse bei der Strömungssimulation bei vergrößertem Durchmesser der Zutrittsöffnungen bei der Lochverteilung am Zulaufrohr ergab ca. 3 m Wassersäule weniger Druckverlust am Rohraustritt (Berechnung siehe Abbildung 118). Anschließend erfolgte im Mai 2018 der Einbau eines modifizierten Zulaufrohrs mit vergrößertem Durchmesser der Zutrittsöffnungen bei der Lochverteilung. Dabei hatten die neuen Zutrittsöffnungen folgende Durchmesser: A1/B1 mit 84 mm, A2/B2 mit 81 mm, A3/B3 mit 78 mm und A4/B4 mit 76,5 mm.

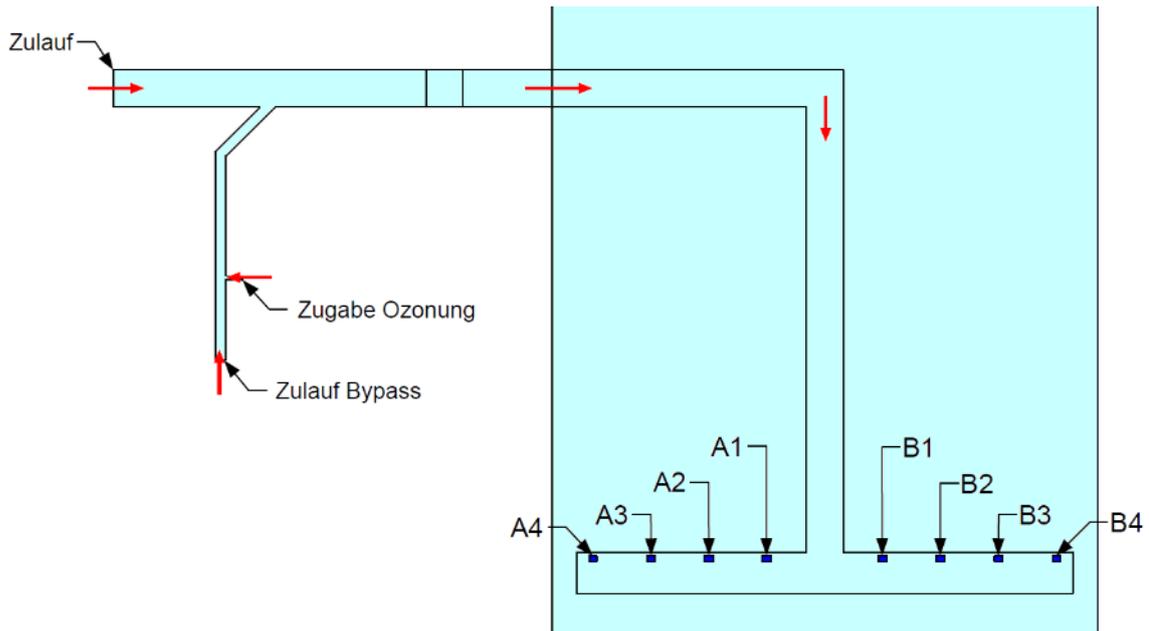


Abbildung 117: Reaktorquerschnitt mit Zulaufrohr und Austrittsöffnungen aus (Hunze, 2017)

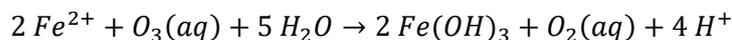
| Druckdifferenzen in Bezug auf den Zulauf |                  |                   |                  |  |
|--|------------------|-------------------|------------------|--|
| Zulauf                                   | 0 Pa             | 0,000 bar         | Referenzdruck    |  |
| Zulauf Bypass                            | 2808 Pa          | 0,028 bar         | 0,28 mWS         |  |
| Zulauf Ozon                              | -801 Pa          | -0,008 bar        | -0,08 mWS        |  |
|  |                  |                   |                  |  |
| Durchgangsfläche Zulaufrohr              | -15378 Pa        | -0,154 bar        | -1,54 mWS        |  |
|  |                  |                   |                  |  |
| Rohraustritt                             |                  |                   |                  |  |
| A 1                                      | -21608 Pa        | -0,216 bar        | -2,16 mWS        |  |
| A 2                                      | -19945 Pa        | -0,199 bar        | -1,99 mWS        |  |
| A 3                                      | -19477 Pa        | -0,195 bar        | -1,95 mWS        |  |
| A 4                                      | -19251 Pa        | -0,193 bar        | -1,93 mWS        |  |
| B 1                                      | -20923 Pa        | -0,209 bar        | -2,09 mWS        |  |
| B 2                                      | -19756 Pa        | -0,198 bar        | -1,98 mWS        |  |
| B 3                                      | -19330 Pa        | -0,193 bar        | -1,93 mWS        |  |
| B 4                                      | -19132 Pa        | -0,191 bar        | -1,91 mWS        |  |
|  |                  |                   |                  |  |
| <b>Übergang zu Kammer 2</b>              | <b>-29763 Pa</b> | <b>-0,298 bar</b> | <b>-2,98 mWS</b> |  |

Abbildung 118: Ergebnisse der Druckanalyse bei vergrößerten Zutrittsöffnungen im Zulaufrohr aus Hunze (2017)

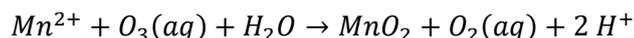
Die Treibwasserpumpe im Injektor-System wies zu Beginn der Versuchsphase 1 eine teilweise zurückgehende Förderleistung auf (Ursache vermutlich Gaspolster im System). Dieser Mangel wurde Anfang November 2017 behoben. Die Nachlaufzeiten der Injektorpumpen (abhängig vom Betrieb der Ozonerzeugung) wurden angepasst bzw. reduziert.

Zudem wurden bräunliche Ausfällungen im vorderen Teil des Ozonreaktors beobachtet (siehe Abbildung 119). Durch die Untersuchung des braunen Belages (Elementanalytik)

wurde sowohl Eisen als auch Mangan identifiziert. Hier wird eine mögliche Braunsteinbildung durch die Reaktion von Ozon mit Mangan vermutet. Für den Betrieb der Ozonung sind diese beiden Stoffe, wegen ihrer hohen Reaktionsgeschwindigkeit mit Ozon, ungünstig (Gunten, 2003). Stöchiometrisch wird bei der Oxidation des Eisens 0,43 mg O<sub>3</sub>/mg Fe und für Mangan 0,88 mg O<sub>3</sub>/mg Mn verbraucht (ebd.):



(Geschwindigkeitskonstante ( $k_{\text{O}_3}$ ) mit  $8,2 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )



(Geschwindigkeitskonstante ( $k_{\text{O}_3}$ ) mit  $1,5 \cdot 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

Das Eisen stammt dabei wahrscheinlich aus den Eisenverbindungen der Fällmittel für die Phosphatfällung, die vermutlich innerhalb des Reaktors sedimentieren. Ursache für den Eintrag von Mangan könnte ein diffuser Eintrag durch Auswaschungen von manganhaltigen Böden durch das Grundwasser im Einzugsgebiet der Kläranlage Weißenburg sein (auch möglich z.B. Grundwasserinfiltration in den Kanal, Einleitung von Industrie- und Gewerbebetrieben der Metallverarbeitung sowie Bestandteile der Fällmittel). Durch Messungen des LfU wurden Konzentrationen an Mangan (Gesamt Mn) im Mittel ( $n = 6$ ) von 0,054 mg/l im Zulauf der Ozonung ermittelt. Eine signifikante Beeinträchtigung der Oxidationskraft in der Ozonung für die Spurenstoffelimination wird bei Mangankonzentrationen um die 50 µg/l (Zulauf der Ozonung) jedoch nicht erwartet.

Wie bereits in Kapitel 6.4 beschrieben, kam es während der Versuchsphase 1 zu Stillständen bei der Ozonanlage. Als Ursache hierfür wurden folgende Phänomene im Anlagenbetrieb identifiziert:

- **Phasenwächterstörung:** regelmäßige Abschaltung der Ozonanlage aufgrund von zu empfindlich eingestellten Phasenwächtern (Auslösezeit zu empfindlich eingestellt),
- **Offgaslimitierung** (Abschaltung Ozonanlage, wenn Ozonkonzentration vor Restozonvernichter  $> 0,8 \text{ g/Nm}^3$ ) **und Störungen beim Restozonvernichter** (Abschaltung Ozonanlage, wenn Ozonkonzentration nach Restozonvernichter  $> 2 \text{ ppm}$ ; Katalysator war vorzeitig erschöpft).

Um einen dauerhaften stabilen Anlagenbetrieb zu ermöglichen und um Spannungsschwankungen im Netz aufnehmen zu können, wurden in der Optimierungsphase die Einstellungen bei den Phasenwächtern angepasst.



**Abbildung 119: Ausfällungen im vorderen Teil des Ozonreaktors, Bild: Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG**

### 8.1.2 Beobachtungen bei Abschaltungen der Ozonanlage

Aus der Ozonkonzentration im Zugas ist die Funktionsfähigkeit und Betriebsweise der Ozonanlage erkennbar (z.B. ob die Anlage stillsteht oder die Ozonkonzentration im Zugas stark variiert). Die Ozonkonzentration im Zugas sollte in der Regel bei  $148 \text{ g/Nm}^3$  liegen. Wie in Abbildung 120 dokumentiert, konnten ein starkes Absinken und Schwankungen durch Anlagenstillstand oder Wartungsarbeiten oder veränderte Anlageneinstellungen verzeichnet werden. Diese Anlagenzustände zeigten sich sofort, auch bei den mit aufgezeichneten Betriebsparametern wie z.B. Zufluss zur Ozonung (Q Zulauf Ozonung in l/s, hellblau), Abwasserstrom im Injektor (Q Injektor in l/s, orange), Gasfluss Injektor (Q Gas Ozon in  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , grau) und Offgasstrom (Q Ozon Offgas in  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , gelb). In Abbildung 121 bis Abbildung 123 sind auszugsweise entsprechende Stillstandszeiten bzw. Auffälligkeiten für den 28. und 29. Januar 2018 sowie für den 19. und 20. Februar 2018 und den 25. und 26. Februar 2018 dargestellt. Grundsätzlich ist aus den Abbildungen gut zu erkennen, dass der Zufluss (hellblau) zur vierten Reinigungsstufe gut mit dem Ozongasfluss des Injektorsystems (grau) korreliert. Daraus lässt sich ableiten, dass die Q-proportionale Steuerung für die Ozondosierung hinterlegt ist. Bestätigt wird dieser Zusammenhang mit dem nahezu identischen Kurvenverlauf zwischen dem Zufluss zur vierten Reinigungsstufe und der Ozonproduktion in g pro Stunde (vgl. mit Abbildung 124).

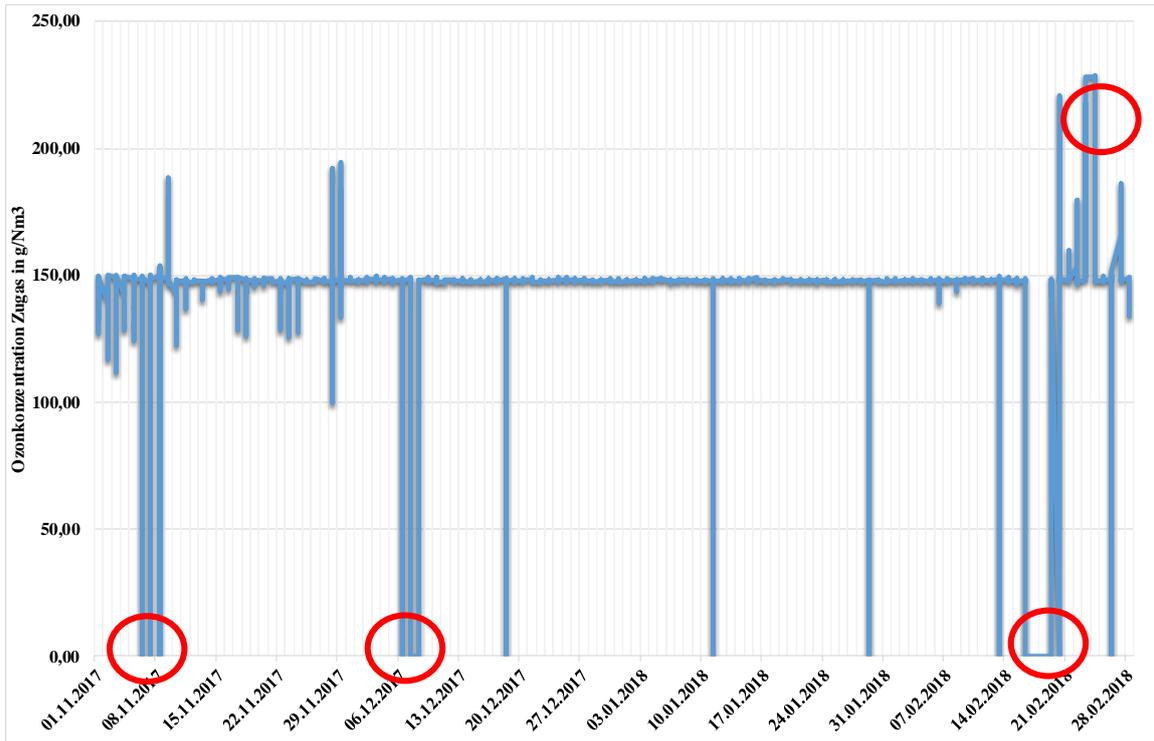


Abbildung 120: Verlauf der Ozonkonzentration im Zugas von November 2017 bis Anfang März 2018

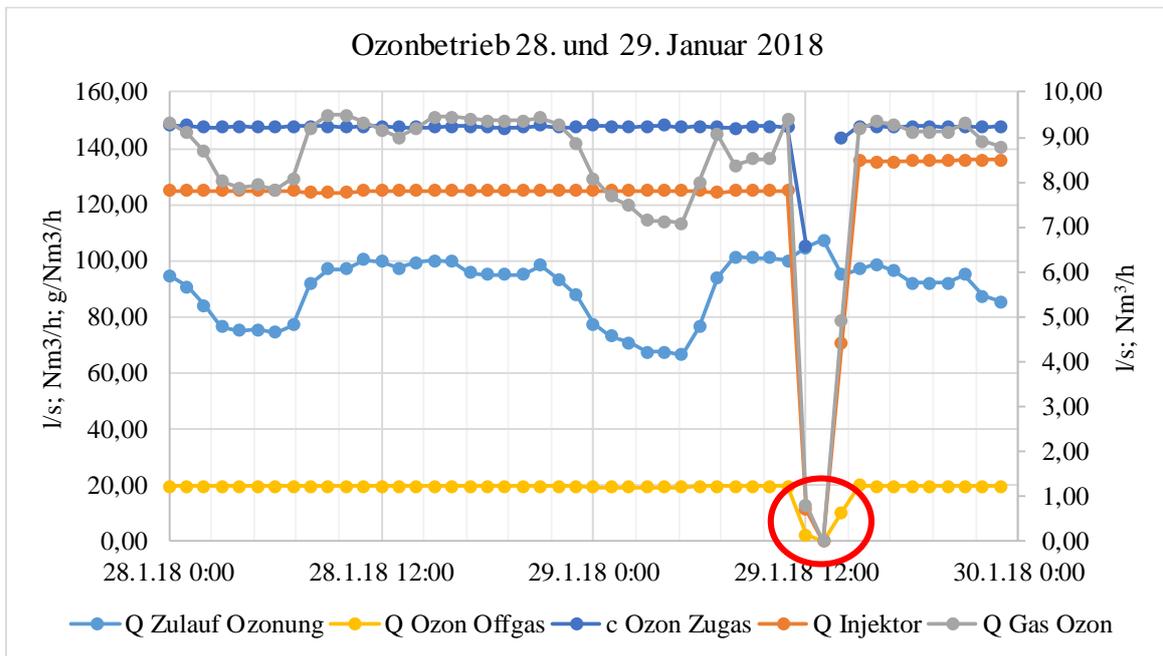


Abbildung 121: Ozonbetrieb zwischen 28. und 29. Januar 2018

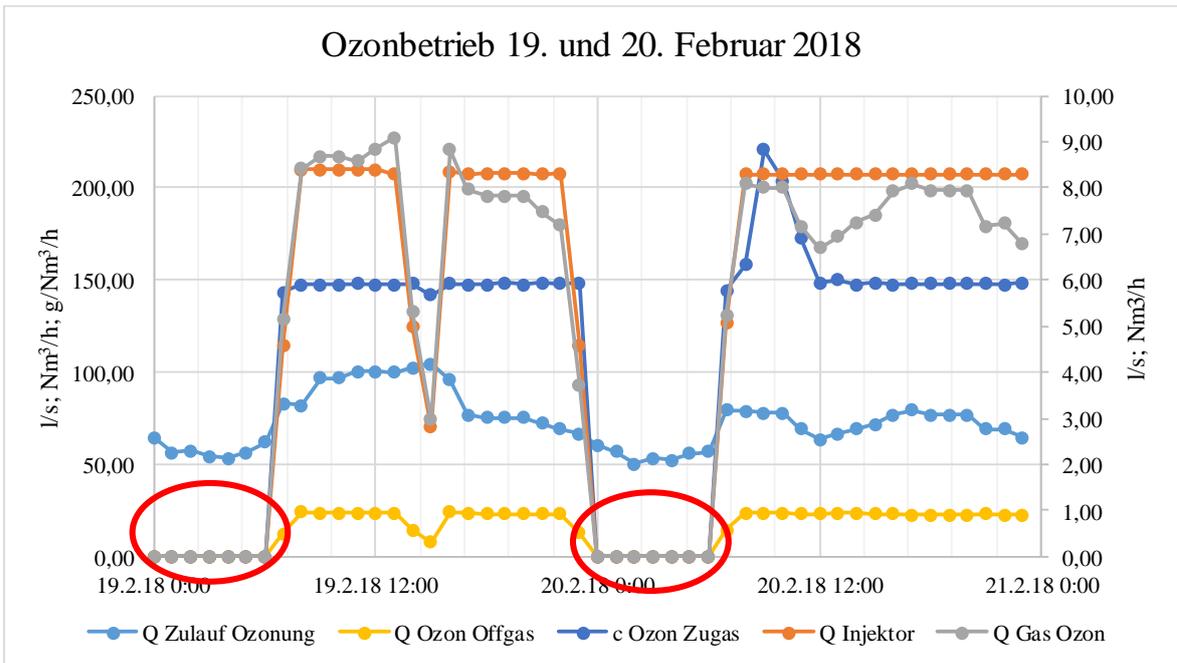


Abbildung 122: Ozonbetrieb zwischen 19. und 20. Februar 2018

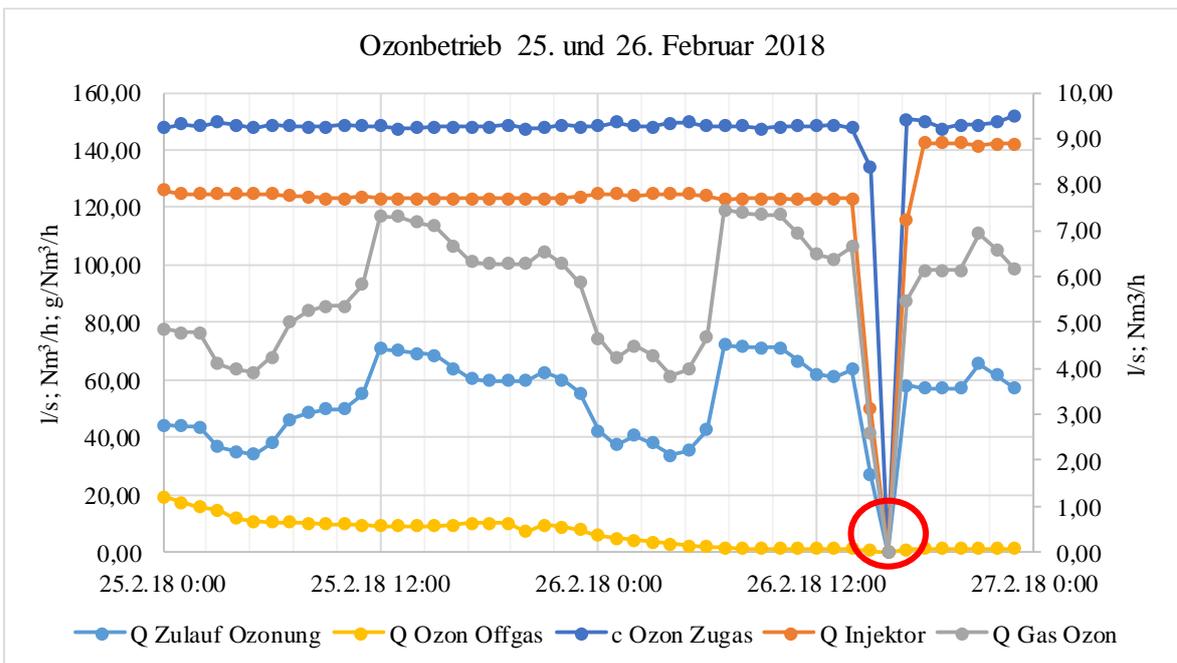
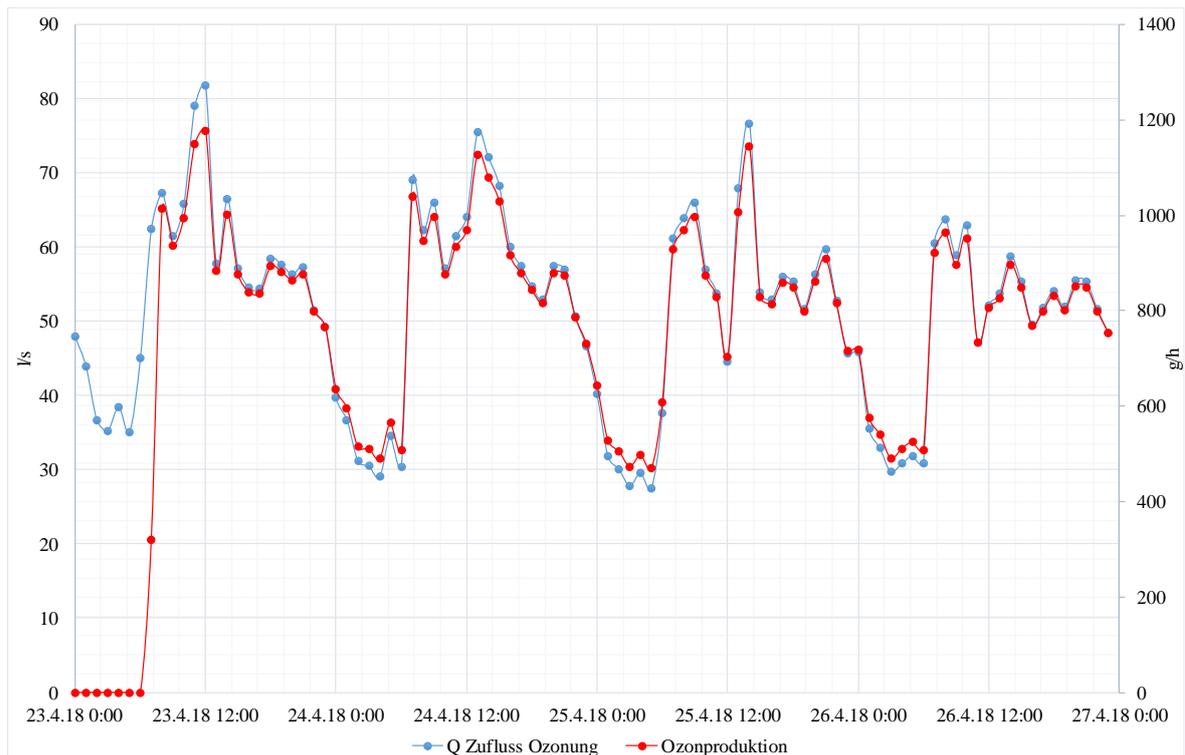


Abbildung 123: Ozonbetrieb zwischen 25. und 26. Februar 2018

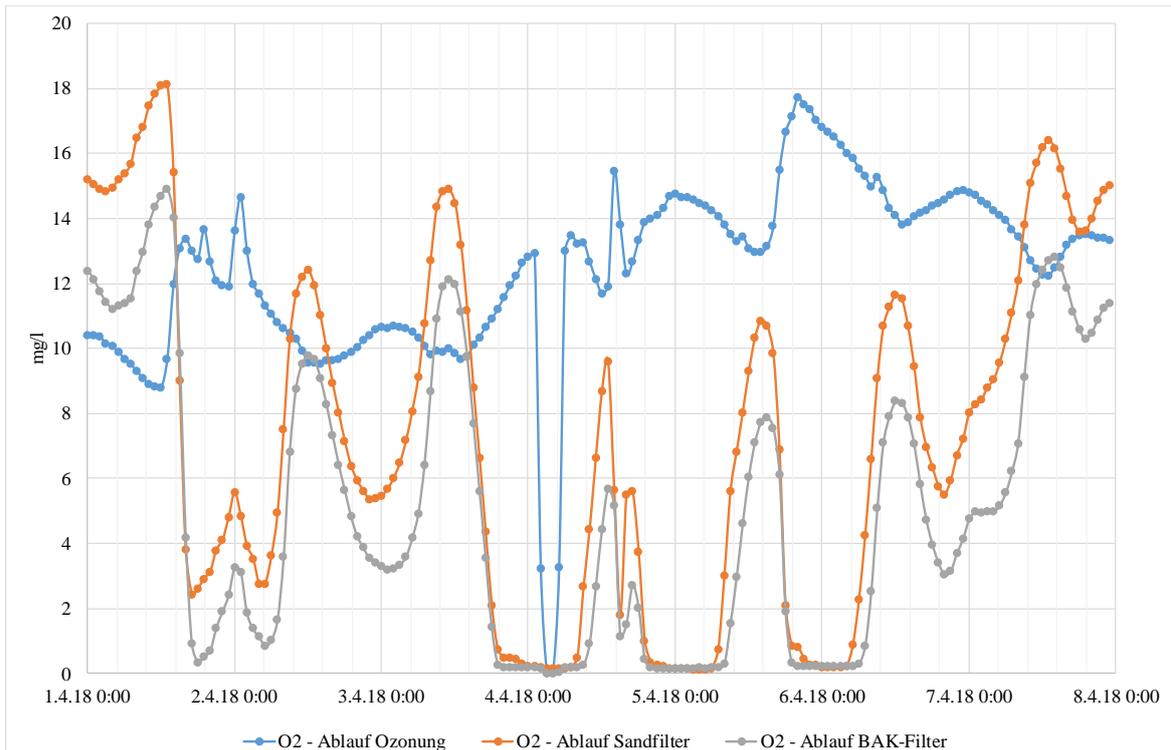


**Abbildung 124: Verlauf von Zufluss zur vierten Reinigungsstufe u. Ozonproduktion im April 2018**

Zudem konnten durch die Prüfung der Online-Mesdaten folgende weitere Ereignisse identifiziert werden:

- Ausfall des Offgassystems im Februar 2018 (kein Gasfluss messbar):
  - Ursache: Abschaltung der Ventilsteuerung,
- Regelmäßig wiederkehrendes Absinken der Sauerstoffkonzentrationen bei den Sauerstoffsonden in den Filterstraßen (< 0,2 mg/L, siehe Abbildung 125):
  - Ursache: mögliche Sauerstoffzehrung auf den Sonden durch Biomasse, Phänomen noch nicht abschließend geklärt,
  - Die optischen Sonden zur Sauerstoffmessung wurden anschließend tiefer versetzt, sodass kein signifikantes Absinken der Sauerstoffkonzentrationen mehr festgestellt wurde.

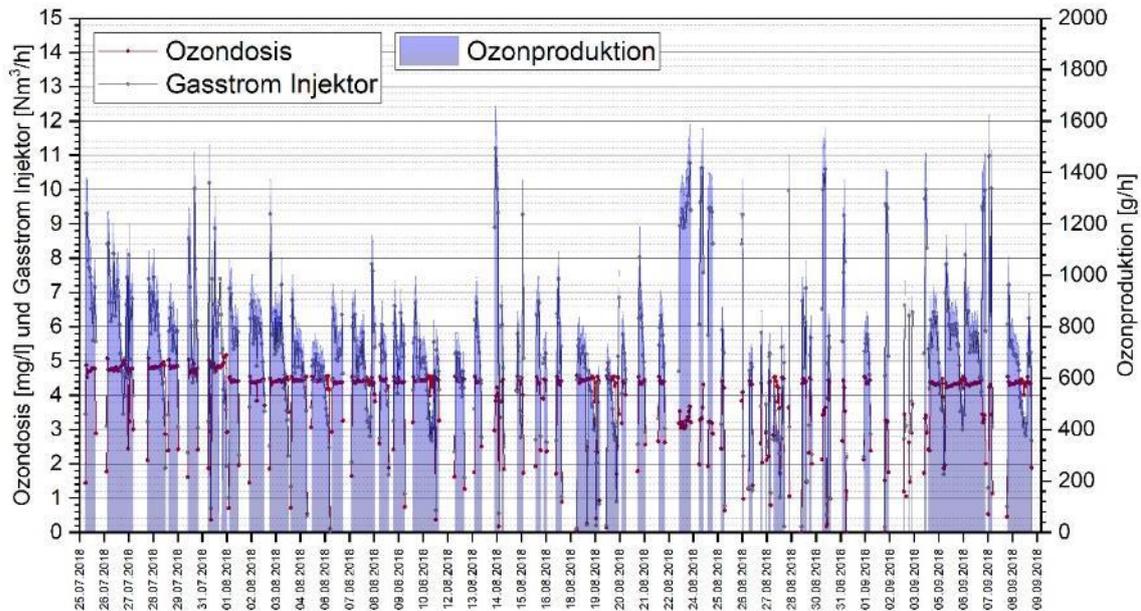
Entscheidend für die Bewertung der Reinigungsleistung der Ozonung und der Filterstufen ist, dass zu den Stillstandszeiten und Anlagenabschaltungen keine Probenahme für die Spurenstoffanalytik durchgeführt wurde. Dies konnte in Versuchsphase 1 nicht immer eingehalten werden. Für den Zeitraum vom 19.02.2018, 20:00 Uhr bis zum 20.02.2018, 09:00 Uhr kann sicher davon ausgegangen werden, dass die 24 h-Mischprobe vom 19.02.2018, 11:30 Uhr bis 20.02.2018, 11:30 Uhr definitiv beeinflusst wurde und für mehrere Stunden keine Ozonung und dadurch auch keine Oxidation von Spurenstoffen stattfand (siehe auch Abbildung 122). Aufgrund des dokumentierten Anlagenstillstandes lag daher die mittlere Eliminationsrate der Indikatorsubstanzen (ermittelt aus einer 24 h-Mischprobe) am 20.02.2018 in der Ozonung nur bei 16,28 %, bei den sehr gut oxidierbaren Substanzen bei 21,25 % und bei den gut oxidierbaren Substanzen bei nur 6,33 % (siehe auch Kapitel 6.4).



**Abbildung 125: Sauerstoffmessungen im April 2018**

Die zuvor in Kapitel 8.1.1 erwähnten Störungen „Phasenwächterstörung“ und „Offgaslimitierung sowie Störungen durch Restozonvernichter“ traten vermehrt in den Sommermonaten 2018 auf. Abbildung 126 zeigt die Abschaltungen der Ozonanlage für den Betrachtungszeitraum Ende Juli 2018 bis Anfang September 2018. Aus dieser Grafik kann vermutet werden, dass für diesen Zeitraum an vielen Tagen keine Spurenstoffelimination in der Ozonung aufgrund der fehlenden Ozonproduktion erfolgte. Sobald die Ozonanlage und damit auch die Ozonproduktion durch entsprechende Störungen automatisch abgeschaltet wurden, wurden auch keine Ozondosis und kein Gasstrom im Injektorsystem gemessen.

Ein stabiler Anlagenbetrieb war daher dauerhaft nicht gewährleistet. Wurden Ozonkonzentrationen  $> 2$  ppm nach dem Restozonvernichter detektiert, so schaltete sich die Ozonanlage automatisch ab. Grundsätzlich sollte nach dem Restozonvernichter kein Ozon mehr in der Abluft enthalten sein. Die Funktionsfähigkeit des Restozonvernichters wurde in einem ersten Schritt vor Ort überprüft und es konnten vorerst keine technischen Mängel identifiziert werden. Daher wurde davon ausgegangen, dass die Abschaltung nicht durch Ozon verursacht wird, sondern von anderen Störstoffen, die sich im Messgerät ähnlich wie Ozon verhalten. Ozon absorbiert UV-Strahlung zwischen 220 nm und 300 nm. Das Maximum liegt bei 254 nm. Der hierfür genutzte Spektralbereich der Messeinrichtung liegt vermutlich zwischen 200 bis 400 nm. In dem Bereich sind Überlappungen zwischen den einzelnen Absorptionsbanden der Gase (z.B. NO oder  $\text{SO}_2$ ) und damit auch Querempfindlichkeiten nicht auszuschließen. Ggf. wäre eine Gasanalyse aufschlussreich, um mögliche Querempfindlichkeiten durch andere Gasbestandteile (z.B. auch organische flüchtige Substanzen) nachweisen zu können.



**Abbildung 126: Abschaltung der Ozonproduktion durch Störungen im Anlagenbetrieb (grau = Gasstrom Injektor, rot = Ozondosis, blau = Ozonproduktion)**

Um die Ursache bezüglich der Restozonvernichterproblematik zu identifizieren, wurde Mitte September 2018 die Ozonung acht Stunden ohne Ozon gefahren (nur im Spülbetrieb mit Sauerstoff). Aus bisher ungeklärten Gründen kam es auch hier zur Abschaltung der Ozonung durch den Restozonvernichter, da durch das Messgerät Ozon > 2 ppm im Off-Gas detektiert wurde. Bei Labormessungen vor und nach dem Restozonvernichter wurde aber ohne Ozonproduktion kein Ozon nachgewiesen. Um weitere Stillstände zu vermeiden, wurde die automatische Abschaltung der Ozonung durch die Störmeldung des Restozonvernichters vorübergehend deaktiviert. Zusätzlich wurde der Ozonkonzentrationswert (vor Restozonvernichter) für die Offgaslimitierung von 0,8 g/Nm<sup>3</sup> auf 1,6 g/Nm<sup>3</sup> erhöht. Auch bei Konzentrationen bis zu 2 g/Nm<sup>3</sup> im Offgas vor dem Restozonvernichter (aufgrund höherer Ozondosen, z.B. > 0,8 mg Ozon / mg DOC) ist ein Normalbetrieb der Ozonanlage möglich. Typischerweise befindet sich im Mantelrohr des Restozonvernichters eine sogenannte Katalysatormasse, welche sich meistens aus Magnesium-, Kupfer- und Aluminiumoxiden zusammensetzt. Das Restozon im Offgas wird beim Durchströmen der Katalysatormasse in Sauerstoff reduziert. Um mögliche Störungen oder Fehler durch den katalytischen Prozess auszuschließen, wurde die Katalysatormasse im November 2018 ausgetauscht. Die alte Katalysatormasse wurde zur genaueren Untersuchung an die Herstellerfirma geschickt.

Um das Problem der Phasenwächterstörung auf den Grund zu gehen, wurden mit Unterstützung des Energieversorgers vor Ort die Spannungsschwankungen und Ausfallzeiten im öffentlichen Netz geprüft (Netzanalyse). Diese bewegten sich im üblichen Bereich und waren nicht für die Störungen der Phasenwächter in der Ozonanlage verantwortlich. Vielmehr waren die Phasenwächter mit einer Auslösezeit von < 60 ms zu empfindlich eingestellt. Beide Phasenwächter wurden anschließend auf eine Auslösezeit von 0,2 s eingestellt, um bei Ausfallzeiten im Netz von < 0,2 s keine Abschaltung der Ozonanlage zu bewirken.

### 8.1.3 Einfluss von Nitrit auf die Spurenstoffelimination

Aufgrund der in Kapitel 6.4 dargestellten Abnahme der mittleren Eliminationsleistung in der Ozonung von ca. 80 % auf ca. 30 % bezüglich der untersuchten Indikatorsubstanzen wurde vermutet, dass hohe Nitritkonzentrationen im Zulauf zur Ozonung die Ursache für den Einbruch der Spurenstoffelimination in der Ozonung sein könnten. Da Nitrit ozonzehrend ist und sehr schnell mit Ozon reagiert, muss die Nitritkonzentration ebenfalls überprüft werden. Durch die Oxidation von Nitrit zu Nitrat wird die Ozonzehrung erhöht und somit die Effizienz der Ozonung negativ beeinflusst. Der spezifische Ozonbedarf für Nitrit beträgt 3,43 g O<sub>3</sub>/g NO<sub>2</sub>-N. Bezüglich der Reaktionskinetik hat Nitrit eine sehr hohe Geschwindigkeitskonstante ( $k_{O_3}$ ) mit  $3,7 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  bei der das Nitrit sofort mit Ozon reagiert (Gunten, 2003).

Aufgrund dieser Problematik wurden die Nitritkonzentrationen im Ablauf der Gesamtkläranlage in der Vergangenheit (aus den Betriebstagebüchern) und die regelmäßig gemessenen Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung ausgewertet. Weiterhin wurde im Rahmen eines Forschungsprogramms des Kompetenzzentrums Wasser Berlin (vgl. Miehe, 2017) eine zusätzliche Analyse zur Bestimmung der Nitritkonzentration im Zulauf der Ozonung mit betrachtet.

Die Nitritkonzentrationen in der Vergangenheit zeigen einen ausgeprägten Jahresgang (siehe Abbildung 127). Ab Mitte 2016 ist kein deutlicher Jahresgang mehr erkennbar, was auf eine Veränderung in der Biologie (Nitrifikation/Einstellung Gebläsetechnik) schließen lässt. Die Sauerstoffkonzentrationen im Belebungsbecken waren allerdings laut Betreiber dauerhaft bei > 2 mg/l. Die Ursache für die Verschiebung des ausgeprägten Jahresgangs hin zu einer Punktwolke lässt sich abschließend nicht klären.

Grundsätzlich ist aber festzustellen, dass insbesondere in den Wintermonaten sowie zu Beginn des Frühlings (Anfang März 2018) Nitritspitzen von bis zu 0,7 mg/L zu verzeichnen sind (siehe Abbildung 75). Dies wird vor allem durch die durchgeführten Messungen auf der Kläranlage sowie der analysierten Stichprobe des Kompetenzzentrums Wasser Berlin vom 26.02.2018 bestätigt. Die Analyse dieser Stichprobe ergab einen Wert für Nitrit von 0,7 mg/l (siehe Abbildung 128).

Auch frühere Untersuchungen des Schweizer Labors Envilab bestätigen dieses Phänomen. Bei der damals untersuchten Mischprobe (17.03. bis 21.03.2016) wurde eine Nitritkonzentration von 0,74 mg NO<sub>2</sub>-N pro Liter festgestellt. Hier wurde auch gezeigt, dass im Zuge der Batchuntersuchungen mit einer Ozondosis von 0,5 g O<sub>3</sub> / g DOC, welche im Falle der untersuchten Probe der Kläranlage Weißenburg 5,6 g/m<sup>3</sup> Abwasser entsprach, 2,5 g Ozon pro m<sup>3</sup> alleine zur Oxidation von Nitrit benötigt wurden. Grundsätzlich muss daher das Ziel des Betreibers eine deutliche Reduktion des Nitritgehaltes im Ablauf der Nachklärung sein. Die im Rahmen des Projekts *TestTools* (Miehe, 2017) gezogene Probe vom 26.02.2018 bestätigte das Phänomen, dass bei hohen Nitritkonzentrationen im Zulauf zur Ozonung die Eliminationsleistung bezüglich Spurenstoffe vermindert wird. In Abbildung 129 ist die Spurenstoffelimination bezüglich verschiedener, gut mit Ozon reagierender Substanzen bei einem spezifischen Ozoneintrag 0,5 mg O<sub>3</sub>/mg DOC dargestellt. Auch Abbildung 130 verdeutlicht die eher ungewöhnlich geringe Eliminationsleistung für mittelmäßig mit Ozon reagierender Spurenstoffe. Neben der hohen Nitritkonzentration wurden zum Probenahmezeitpunkt auch Stillstandszeiten bei der Ozonung festgestellt (s. Abbildung 123 in Kapitel 8.1.2).

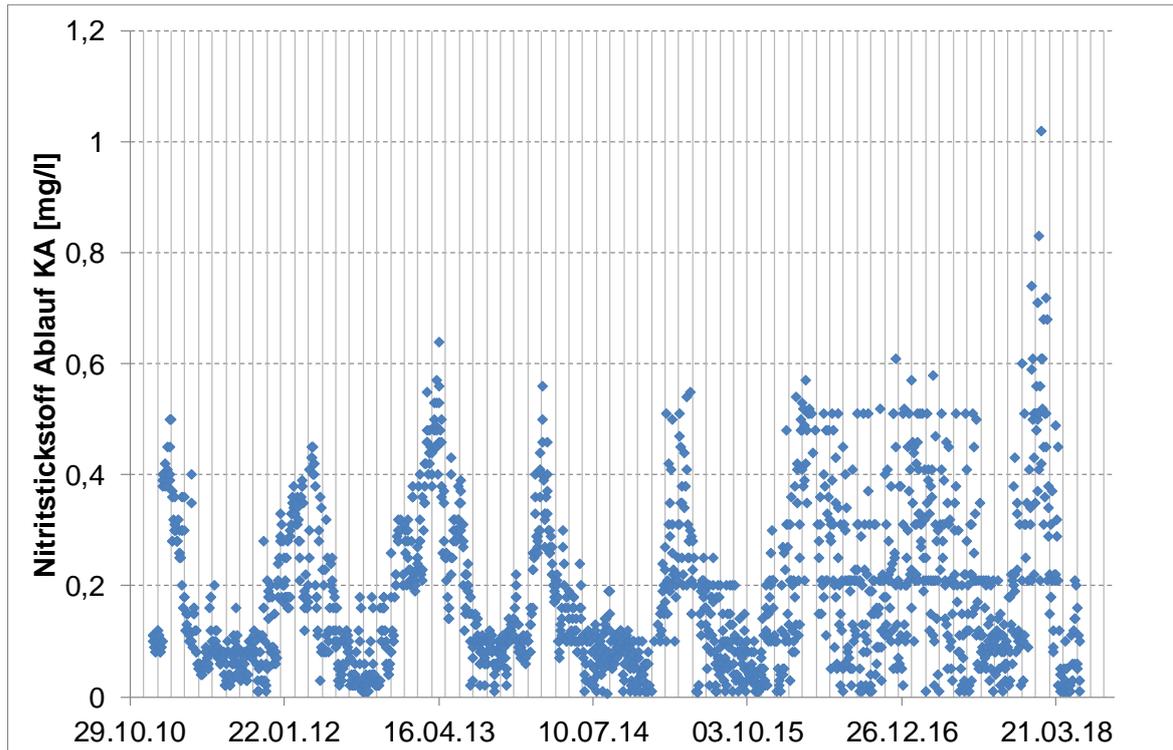


Abbildung 127: Nitritkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage von 2010 bis 2018 (ab Oktober 2017 beinhaltet der Gesamtablauf der Kläranlage auch den Ablauf der vierten Reinigungsstufe)

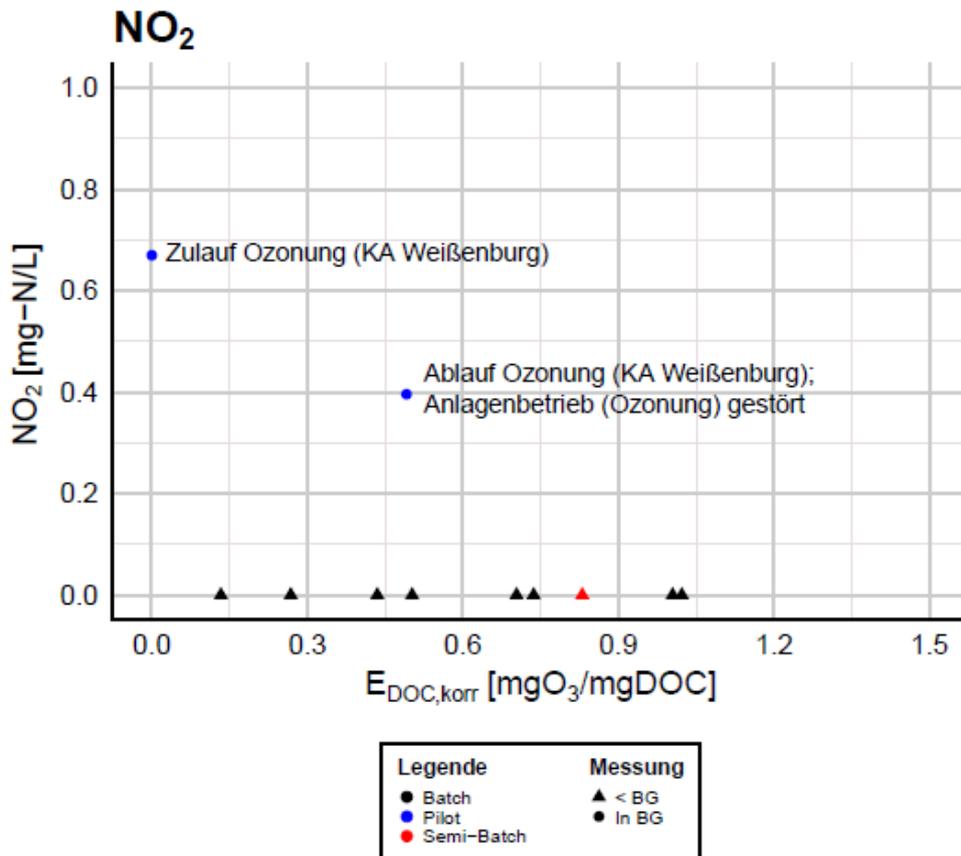
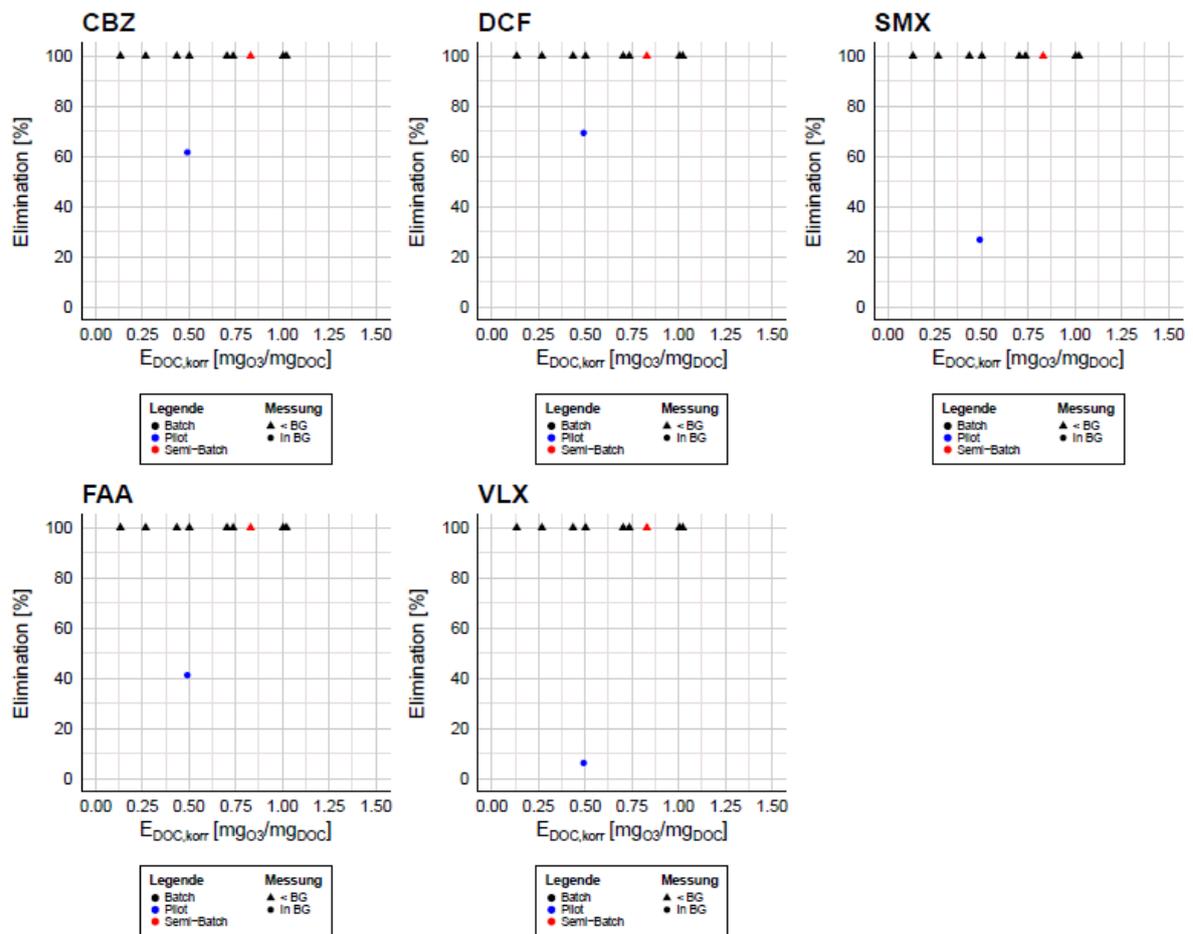


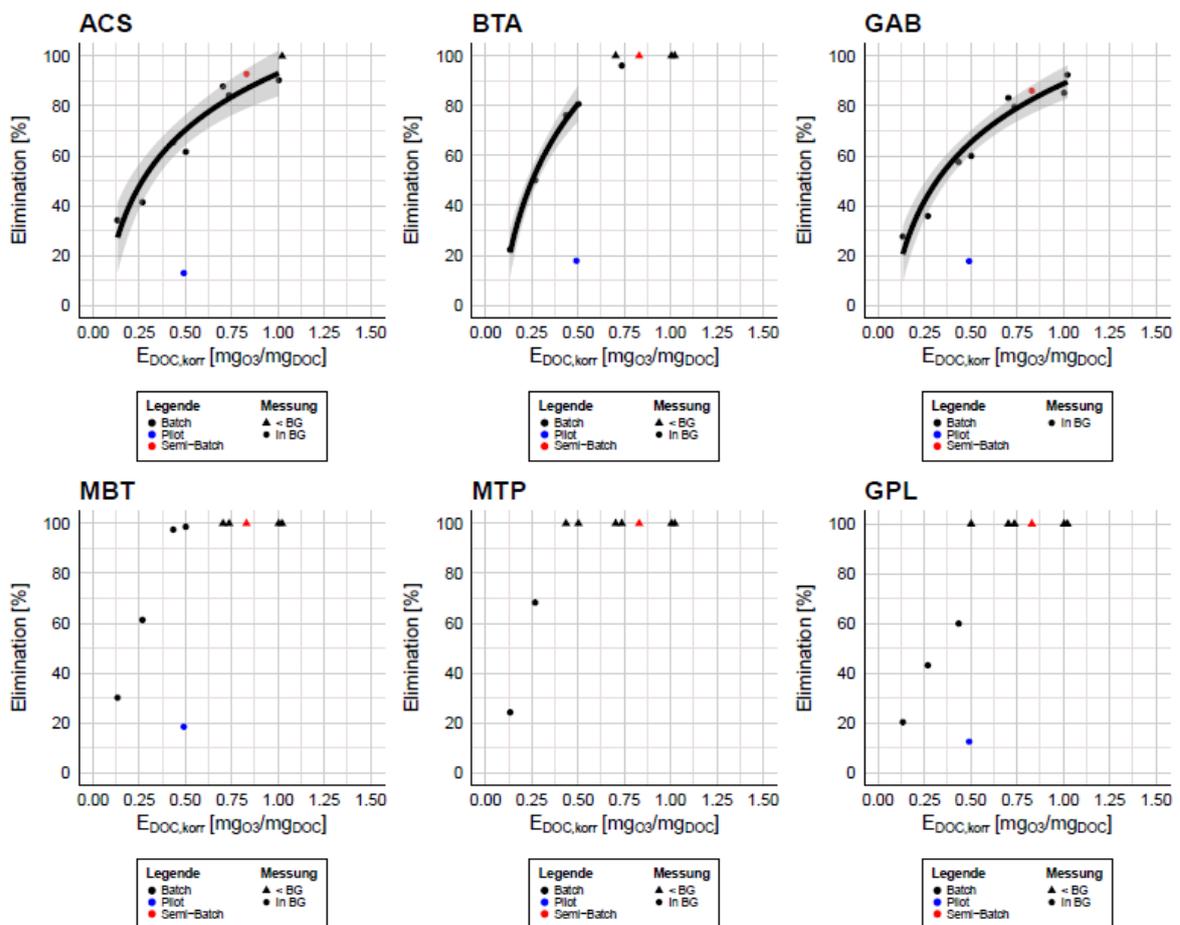
Abbildung 128: Nitritkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Ozonung (blaue Punkte = Ozonung Kläranlage Weißenburg, Dreiecke = Referenzmessungen aus anderen Versuchen) aus Stapf (2018)



**Abbildung 129: Spurenstoffelimination bezüglich der Abwasserprobe aus Weißenburg (blauer Punkt = KA Weißenburg, Dreiecke = Referenzmessungen aus anderen Versuchen, CBZ = Carbamazepin, DCF = Diclofenac, SMX = Sulfamethoxazol, FAA = 4-Formylaminoantipyrin, VLX = Venlafaxin) aus Stapf (2018)**

Die Nitritmessungen im Zulauf der Ozonung zeigten in den Monaten ab Mitte März 2018 eine kontinuierliche Konzentrationsabnahme. Ein Ausreißer konnte jedoch am 16.05.2018 mit 0,63 mg/l verzeichnet werden (vgl. Abbildung 75). Eine mögliche Ursache hierfür konnte bis heute nicht gefunden werden. Zusätzliche Messungen am 23.04. und 26.04.2018 über den Tag zeigen, dass ein ausgeprägter Tagesgang nicht auftritt (vgl. Tabelle 39). Im Mittel liegt die Nitritkonzentration der zwölf durchgeführten Einzelmessungen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,02 mg/l.

Die Feststellung, dass die Nitritwerte im April und Mai 2018 eher unauffällig sind und einzelne gut oxidierbare Spurenstoffe (wie z.B. Citalopram, Clarithromycin, Metoprolol, Venlafaxin) eher mäßig in der Ozonung eliminiert werden können, spricht dafür, dass neben Nitrit auch andere Ursachen für die nicht ausreichende Spurenstoffelimination in der Ozonung möglich sind (z.B. kurzzeitige Abschaltung der Ozonanlage).



**Abbildung 130: Spurenstoffelimination bezüglich der Abwasserprobe aus Weißenburg (blauer Punkt = KA Weißenburg, Dreiecke/schwarze Punkte = Referenzmessungen aus anderen Versuchen, ACS = Acesulfam, BTA = Benzotriazol, GAB = Gabapentin, MBT = 4/5-Methylbenzotriazol, MTP = Metoprolol, GPL = Gabapentin-Lactam) aus Stapf (2018)**

**Tabelle 39: Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung am 23. und 26. April 2018 (SP = Stichproben)**

| Datum      | Uhrzeit | Probenart | Wetter | NO <sub>2</sub> -N im Zulauf Ozonung<br>(aus Schacht) in mg/l |
|------------|---------|-----------|--------|---|
| 23.04.2018 | 08:00   | SP        | 1      | 0,016   |
|            | 9:30    | SP        | 1      | 0,014   |
|            | 11:00   | SP        | 1      | 0,015   |
|            | 13:00   | SP        | 1      | 0,025   |
|            | 14:30   | SP        | 1      | 0,024   |
|            | 16:00   | SP        | 1      | 0,03  |
| 26.04.2018 | 08:00   | SP        | 1      | 0,025   |
|            | 9:30    | SP        | 1      | 0,032   |
|            | 11:00   | SP        | 1      | 0,027   |
|            | 13:00   | SP        | 1      | 0,025   |
|            | 14:30   | SP        | 1      | 0,023   |
|            | 16:00   | SP        | 1      | 0,023   |

Auf Grundlage der Erkenntnisse zum Verhalten von Nitrit auf der Kläranlage Weißenburg (vgl. Abbildung 127) wurde Anfang 2018 ein Vorschlag zur Korrektur für die Nitritkompensation erarbeitet. Voraussetzung hierzu sind regelmäßige Nitritmessungen im Zulauf und Ablauf der Ozonung. Weiterhin wurde empfohlen den Kläranlagenbetrieb zu optimieren, um Nitritspitzen zu vermeiden (z.B. bei den Gebläseeinstellungen). Zur Optimierung und Erhöhung der biologischen Reinigung auf der Kläranlage Weißenburg fand im November 2018 ein Austausch der Belüfter statt.

Bei zuflussproportionaler Steuerung ist eine Anpassung der spezifischen Ozondosis an schwankende Nitritkonzentrationen möglich. Hierzu müssen Nitritmessungen (Zu- und Ablauf Ozonung) möglichst mehrmals pro Woche regelmäßig durchgeführt. Die in Weißenburg durchgeführten Tagesmesskampagnen (vgl. Tabelle 39) lassen keinen ausgeprägten Tagesverlauf erkennen.

Ausgehend von den Werten und Erkenntnissen über das Nitritverhalten im Zulauf und Ablauf der Ozonung kann eine Mehrdosierung erforderlich werden, wenn hohe Nitritkonzentration im Zulauf der Ozonung zu erwarten sind. Dabei kann folgende Gleichung die Berechnung der angepassten spezifischen Ozondosis verwendet werden:

$$\text{spezifische Ozondosis}_{\text{korrigiert}} = z_{\text{spezifisch}} = 3,43 \times \left( \frac{c_{\text{Nitrit,zu}} - c_{\text{Nitrit,ab}}}{c_{\text{DOC,zu}}} \right)$$

mit  $z_{\text{spezifisch}}$  = spezifische Ozondosierung;  $c_{\text{Nitrit,zu}}$  = Nitritkonzentration im Zulauf zur Ozonung;  $c_{\text{Nitrit,ab}}$  = Nitritkonzentration im Ablauf zur Ozonung;  $c_{\text{DOC,zu}}$  = DOC-Konzentration im Zulauf zur Ozonung.

Abbildung 131 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Mehrbedarf an Ozon und einer höheren spezifischen Ozondosis bei steigenden Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung.

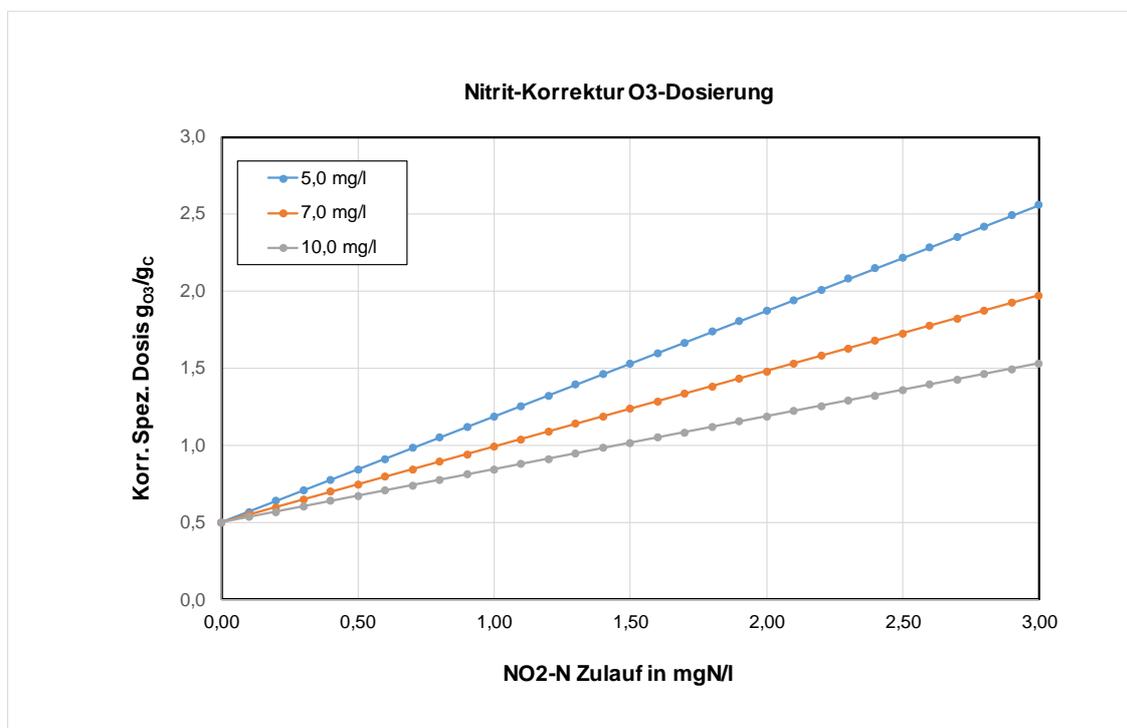


Abbildung 131: Nitritkorrektur bei der Ozondosierung (spezifische Ozondosis gewählt mit 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC für 5 mg (blau), 7 mg (orange) und 10 mg (grau) Ozon pro Liter)

Eine Nitritkorrektur auf Basis durchgeführter Einzelmessungen ist mit einer gewissen Ungenauigkeit verbunden, da keine Echtzeitanpassung bei der Ozondosierung erfolgt. Alternativ kann eine Nitritsonde ( $\text{NO}_2$ -Analyzer) zum Einsatz kommen, um in Echtzeit die Steuerung der Ozondosierung mit einer entsprechenden Nitritkorrektur anzupassen. Weiterhin ist die Umstellung der Ozonzugabe auf  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -basierte Regelung zu empfehlen, da hier die Nitritzehrung bei der Absorbanzmessung mitberücksichtigt wird und daher keine Nitritmessungen mehr erforderlich werden.

#### 8.1.4 Einfluss des DOC

Grundsätzlich wird die benötigte Ozonmenge durch die Abwasserzusammensetzung (DOC-Konzentration), Abwassermenge und das Reinigungsziel (via Ozondosis) beeinflusst. Daher sind Aussagen über den DOC-Gehalt für die Implementierung einer bedarfsgerechten Ozondosierstrategie sehr hilfreich. Entscheidend für den Ozonbedarf ist demnach der vorliegende DOC. Die spezifische Ozonzehrung (in  $\text{mg O}_3/\text{mg DOC}$ ) wird als wichtige Bezugsgröße des Ozonverfahrens verwendet, sodass auch verschiedene Abwässer gut miteinander verglichen werden können (Jekel, 2014).

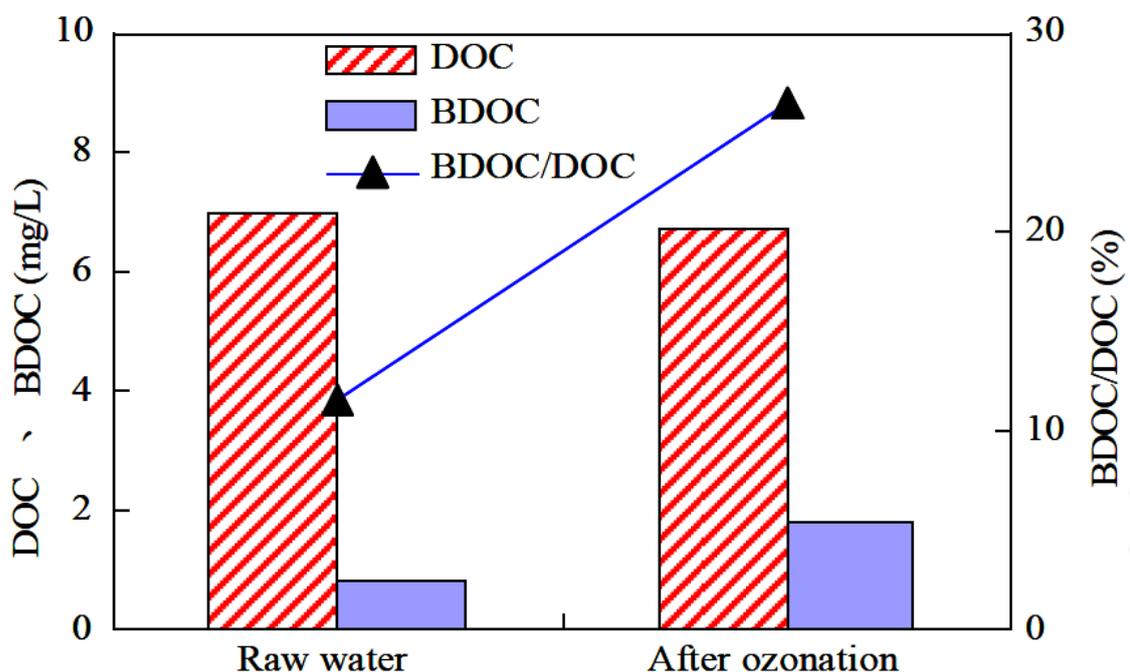
Bei der Ozonung kann die Dosierung über den DOC gesteuert werden. Die Ozonkonzentration kann, falls erforderlich, zum Beispiel auf elektrochemischem Weg online gemessen und damit an die ebenso online ermittelte Konzentration des organisch gebundenen Kohlenstoffs (DOC) angepasst werden. Wenn eine DOC-Steuerung geplant ist, dann muss zur Steuerung eine entsprechende DOC-Sonde im Zulauf zur Ozonung eingesetzt werden (vgl. Egerland und Weingartner, 2017). Zudem kann aufgrund der „Anoxidation“ des DOC eine deutliche Verminderung des Spektralen Absorptionskoeffizienten (SAK) bei 254 nm beobachtet werden, wodurch dieser einfach zu bestimmende Parameter auch als Steuergröße verwendet werden kann (Bahr et al., 2007).

Die Konzentration der anthropogenen Spurenstoffe ist in der Regel proportional zur DOC-Konzentration, wobei diese Zusammensetzung von Kläranlage zu Kläranlage entsprechend unterschiedlich ist (Abegglen und Siegrist, 2012). Ihr Anteil am DOC ist jedoch sehr gering. Der DOC-Gehalt sollte, um die Konkurrenz mit Spurenstoffen bei der Adsorption zu reduzieren, im Zulauf der vierten Reinigungsstufe möglichst niedrig gehalten werden. Grundsätzlich wird ein niedriger DOC-Gehalt im Ablauf der Nachklärung durch eine gut funktionierende biologische Reinigung des Abwassers mit Abscheidung der partikulären Stoffe im Vorfeld gewährleistet. Nachteilig am Organikparameter DOC ist, dass dieser nicht spezifisch für die eigentlichen Zielparameter (Spurenstoffe) ist, auch weil Spurenstoffe dadurch nicht direkt quantifiziert werden können.

Auch die Zusammensetzung des DOC spielt hinsichtlich der Abbauleistung in einem biologisch aktiven Filter eine entscheidende Rolle. Ist demnach der Anteil widerstandsfähiger organischer Substanzen hoch, so kann die Abbauleistung, auch unter normalen Betriebsbedingungen, abnehmen. Auch Ozon reagiert zum einen mit den Spurenstoffen, aber auch mit der organischen Hintergrundmatrix (z.B. DOC, natural organic matter (NOM)) und anderen anorganischen Abwasserinhaltsstoffen (z.B. Nitrit), was wiederum den Ozonbedarf beeinflusst.

Die Eigenschaften des DOC im Zulauf zu den beiden Filterstraßen in Weißenburg werden durch die vorgeschaltete Ozonung beeinflusst. Ozon sowie die gebildeten OH-Radikale reagieren nicht nur mit den Spurenstoffen, sondern auch mit der Hintergrundmatrix (Abegglen und Siegrist, 2012). Je höher die Konzentrationen an organischem Hintergrundmaterial

(z.B. DOC) und auch Nitrit im Zulauf zur Ozonung sind, desto mehr Ozon ist erforderlich. Die in der Ozonung stattfindenden Oxidationsprozesse erhöhen auch die Bioverfügbarkeit des DOC (messbar via biodegradable dissolved organic carbon (BDOC, vgl. Abbildung 132) oder assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC)) (vgl. Volk et al., 1993; van der Kooij et al., 1989). Dies fördert die biologische Aktivität in den Filtern. Gleichzeitig wird die Adsorption oxidierter organischer Bestandteile tendenziell erschwert (Zietzschmann et al., 2015a). Zietzschmann et al. (2015b) beschreiben, dass insbesondere die niedermolekularen Verbindungen des organischen Hintergrunds starke Konkurrenz auf die Aktivkohleadsorption von Spurenstoffen ausüben. Demnach verschlechtert sich die Adsorbierbarkeit der Hintergrundorganik durch eine Vorozonung. Sontheimer und Fettig (1985) weisen auch darauf hin, dass eine Ozonung Wasserinhaltsstoffe polarer macht, was ihre Adsorbierbarkeit vermindert. Dies könnte theoretisch die Möglichkeit bieten, dass durch die Ozonung transformierte Anteile des DOC bei der konkurrierenden Adsorption gezielt benachteiligt werden, was für die Spurenstoffelimination von Vorteil sein könnte (Schaar et al., 2017). Nachgewiesen wurde dieser Effekt in Zietzschmann et al. (2015a), Orlandini et al. (1997) sowie in Haslinger et al. (2017). Hier konnte gezeigt werden, dass die Beladung bzw. die Adsorbierbarkeit von Fraktionen des organischen Hintergrunds an der Aktivkohle durch die Ozonung verringert wird, sodass Spurenstoffe besser adsorbiert werden können. In den Untersuchungen von Zietzschmann et al. (2015a) wurde zudem gezeigt, dass Molekülgröße, Hydrophobizität und Aromatizität der gelösten organischen Hintergrundverbindungen kombinatorische Effekte auf die Adsorptionskonkurrenz haben.



**Abbildung 132: Veränderungen des DOC u. BDOC vor/nach der Ozonung (Jin et al., 2013)**

Wie gut die verschiedenen Spurenstoffe oxidativ bzw. adsorptiv entfernt werden, ist stoffspezifisch und insbesondere abhängig von der Konzentration des im Wasser vorliegenden DOC, der Kontaktzeit im Aktivkohlefilter und der Ozondosis. Da hier die konkurrierende Oxidation bzw. Adsorption des DOC und somit dessen Konzentrationen entscheidend sind, ist die Verfahrenswirksamkeit bzw. Effektivität von Oxidation und Adsorption teilweise unabhängig von der Ausgangskonzentration der Spurenstoffe (Sperlich und Gnirss, 2016).

Der Gehalt an gesamtorganischen Stoffen wie z.B. der DOC liegt bei kommunalen Abwässern (Kläranlagenablauf) im Bereich von 5 bis 16 mg/l. Der Gehalt an DOC im Weißenburger Kläranlagenablauf mit 7 mg/l im Mittel liegt im unteren Bereich. Da die Wirksamkeit der Hauptverfahren Ozonung und Adsorption durch konkurrierende Oxidation und Adsorption erheblich beeinflusst wird, ist ein niedriger DOC-Wert für die Effektivität der Spurenstoffelimination von Vorteil. In DOC-armen Wässern (wie in der Trinkwasseraufbereitung) ist die Adsorbierbarkeit immer deutlich besser als in DOC-reichen Wässern (wie im Klarlauf der kommunalen Klärwerke), da weniger Konkurrenz mit dem Hintergrund-DOC auftritt (z.B. ist Benzotriazol sehr gut adsorbierbar, wenn  $\text{DOC} \leq 2 \text{ mg/l}$ ) (Jekel, 2014).

Zur Umsetzung einer Steuer- und Regelstrategie für eine bedarfsgerechte Ozondosierung und für die Überwachung der Reinigungsleistung in der vierten Reinigungsstufe ist daher eine regelmäßige Dokumentation des DOC in der vierten Reinigungsstufe sowie die Vorgabe eines DOC-Wertes zur Ermittlung der spezifischen Ozondosis und Ozonzehrung erforderlich. Zudem können anhand von gemessenen DOC-Konzentration und seinem Verhalten in der vierten Reinigungsstufe Aussagen über mögliche Einflüsse auf die Effizienz oxidativer, adsorptiver und biochemischer Prozesse getroffen werden.

### 8.1.5 Filterbetrieb

Seit der Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe bis zum 25.11.2018 wurden im Aktivkohlefilter (Volumen Filtermaterial =  $62 \text{ m}^3$ ; Schüttdichte:  $460 \text{ kg/m}^3$ ) ca. 19.500 Bettvolumina und im Sandfilter (Volumen Füllmaterial =  $64 \text{ m}^3$ , davon sind  $54 \text{ m}^3$  durchflossen<sup>12</sup>; Schüttdichte:  $1.500 \text{ kg/m}^3$ ) ca. 22.400 Bettvolumina durchgesetzt. Dabei wurden auch Anlagenstillstände (z.B. Reparatur- oder Baumaßnahmen) und Stillstandszeiten beim Anlagenbetrieb (wo kein Wasser in die Filterstufen gefördert wurde) berücksichtigt.

Die bisherige Entnahmewirkung des kontinuierlich betriebenen Aktivkohlefilters bei Spurenstoffen, CSB und DOC (vgl. Kapitel 6.4 und 6.8) kann im Vergleich zu einem konventionellen GAK-Filter (Abegglen und Siegrist, 2012) auch nach rund 19.500 BVT und einer Filterlaufzeit von mehr als zwölf Monaten als sehr effektiv eingestuft werden. Vergleichbare lange Entnahmewirkungen für kontinuierlich betriebene Aktivkohlefilter finden sich z.B. in den Untersuchungen in Emmingen-Liptingen (Locher et al., 2015). Wann die Aktivkohle in Weißenburg vollständig beladen ist, ist abhängig vom gewählten Reinigungsziel bzw. Grenzkriterium, welches nach Benstöm (2017) in absoluter (Schad-)Stoffkonzentration (mg/l oder ng/l) im Ablauf des GAK-Filters oder in verbliebener Adsorptionsleistung (%) in einer auf den Filterzulauf normierten Darstellung ( $c/c_0$ ) angegeben wird. Für Weißenburg können sowohl die mit fortschreitender Betriebsdauer des GAK-Filters abnehmende Adsorptionsleistung als auch der mögliche Konzentrationsanstieg von bestimmten Stoffen oder Substanzen im Filterablauf noch nicht abgeschätzt werden. Daher können bisher auch noch keine

---

<sup>12</sup> Bei einem Vergleich der Bettvolumina wird der konische Anteil beim Sandfilter herausgerechnet, da dieser nicht aktiv durchflossen wird. Da für den Sandfilter kein Grenzkriterium zur Beurteilung der Adsorptionskapazität herangezogen werden kann, spielen die durchgesetzten BVT für die Reinigungsleistung des Sandfilters eher keine Rolle.

Aussagen für ein mögliches Austauschintervall für die verwendete GAK in einem kontinuierlich betriebenen Filter getroffen werden (abhängig von BVT, Zufluss und Betriebsdauer bis zum Erreichen des Grenzkriteriums). Weiterhin können in Hinblick auf die angedachte Betriebsweise als BAK-Filter auch noch keine Aussagen zur zukünftigen Entnahmewirkung, Betriebsdauer und Filterstandzeit gemacht werden.

Im März 2018 war für einige Filterzellen der Aktivkohlefilterstraße keine Sinkgeschwindigkeit mehr messbar. Durch ein Anpassen der Spülintervalle auf 18 min Spülen und 12 min Pause (vorher 15 min Spülen und 15 min) wurde seitdem keine Beeinträchtigung des Filterbetriebes beobachtet. Die Anpassung der Spülintervalle wurde ab September 2018 in Abstimmung mit dem Filterhersteller wie folgt durchgeführt:

- Die Spülzeiten des Aktivkohlefilters wurden vorerst nicht verändert (18 min Spülen, 12 min Pause bei 22 NI/min),
- Die Spül-/Pausenzeiten des Sandfilters wurden wie folgt angepasst:
  - Beibehaltung Spüldauer (18 min pro h);
  - Erhöhung der Pausenzeiten um 5 min auf 17 min,
  - Ergeben sich nach einer Woche keine Probleme beim Betrieb, erfolgt die Erhöhung der Pausenzeiten um weitere 5 min,
  - Fortführung im Wochenrhythmus bis Spülpause 42 min beträgt, dann wäre die Spüldauer bei 30 % und die Pausenzeiten bei 70 %,
  - Entsprechend der o.g. Vorgehensweise betragen die Spüleinstellungen beim Sandfilter aktuell 18 min Spülen und 42 min Pause bei 160 NI/min.
  - Ggf. kann der Sandfilter zu einem späteren Zeitpunkt auf das Ausschreibungssoll eingestellt werden (Betrieb: 12 min, Pause: 48 min)

Mit den gewählten Filtergeschwindigkeiten ( $\leq 8$  m/h) wurde bisher kein Austrag der Aktivkohle über das Klarwasser beobachtet.

Die biologische Aktivität in den Filtern zeigte sich am Biofilmbewuchs im Filterablauf (optisch erkennbar). Zudem konnten Biofilmlagerungen am Luftverteilerkopf der Mammutpumpe sowohl beim Sandfilter als auch beim Aktivkohlefilter festgestellt werden (siehe Abbildung 133).



**Abbildung 133: Biofilmbewuchs Luftverteilerkopf der Mammutpumpe März 2018**

### 8.1.6 Messtechnik und Datenreport

Bei den Messsonden zur Erfassung des SAK<sub>254</sub> wurden einige Auffälligkeiten beobachtet. In Tabelle 40 sind die wichtigsten Beobachtungen zusammengefasst.

**Tabelle 40: Beobachtungen und Optimierungspotenziale bei den SAK-Sonden**

| Beobachtung   | Maßnahme und Lösung   |
|---|---|
| Unplausible Messwerte der SAK <sub>254</sub> -Sonde im Ablauf der Ozonung (PN 6) durch Luftblasen               | Versetzung der Probenwasserentnahmestelle vom Sammel-schacht nach der Überfallkante Ozonreaktor (=Zulauf Sandfilter) in den Ozonreaktor unterhalb der Überfallkante. Im Messtopf für PN 6 wurden seitdem keine Luftblasen beobachtet. |
| Auftreten von Kondenswasser hinter dem Messspalt bei der SAK <sub>254</sub> -Sonde im Zulauf der Ozonung (PN 5) | Austausch der Sonde   |

Die Online-Messwerte für die SAK-Sonde im Ablauf der Ozonung (PN 6) waren zu Beginn der Versuchsphase 1 nicht plausibel. Diesbezüglich wurde vermutet, dass Mikroblasen und daraus resultierende Reflexionen im Abwasser entstanden sein könnten, welche das Messsignal verfälscht haben. Mikroblasen, so wurde vermutet, entstanden durch die Bewegung und den Fall des Abwassers aus der Ozonung in den Schacht zum Zulauf Sandfilter. Anschließend wurde das mit Bläschen und Verwirbelungen angereicherte Abwasser (PN 6) über die Probenahmepumpe in den dazugehörigen Messtopf gefördert, in dem die SAK-Sonde installiert ist. Das ausgegebene Messsignal wurde daher stark beeinflusst. Über eine Kernlochbohrung wurde die entsprechende Probenahmestelle versetzt (Nähe Pumpensumpf), um den o.g. Einfluss ausschließen zu können.

Die Online-Messwerte für die SAK-Sonde im Zulauf der Ozonung (PN 5) wurden während der Versuchsphase 1 ebenfalls als nicht plausibel bewertet. Grund hierfür war eine Undichtigkeit in der Sonde und die daraus resultierende Ansammlung von sogenanntem „Schwitzwasser“ hinter dem Messfenster. Um die Funktionsfähigkeit der Sonden gewährleisten zu können, wurde diese durch eine neue Sonde im Mai 2018 ausgetauscht.

Die Funktionsfähigkeit aller SAK-Sonden konnte erst Mitte Mai 2018 hergestellt werden. Diesbezüglich wurde durch die wiss. Begleitung festgestellt, dass für die geplante  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Regelung eine Trübungskompensation der SAK-Rohmesswerte erforderlich ist. Zur Überwachung der SAKs werden Sonden des Typs uv::lyser U2-i-015-p0-s-NO-075 verwendet. Diese über Druckluft sich selbstreinigenden Messsonden messen photometrisch die Absorption des gesamten UV-Vis – Spektrums von 220 - 720 nm. Die installierten SAK-Sonden gaben keinen trübungskompensierten SAK-Wert aus. Es wurden nur die Rohdaten erfasst. Die gemessenen Rohdaten unterlagen dabei sehr starken Schwankungen bedingt durch den signifikanten Einfluss der Trübung im Zulauf (insbesondere Zulauf Ozonung = PN 5). Die Verwendung der Rohdaten zur Implementierung einer  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> basierten Regelung wurde daher als ungeeignet eingestuft (starke Schwankungen des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> führen zu einer schwankenden Ozonerzeugung bzw. Ozondosierung, siehe dazu auch Kapitel 8.1.7). Im Juni 2018 erfolgte die Umstellung der Rohdatenausgabe in trübungskompensierte Werte. Der Einfluss der Trübung durch Partikel und Ablagerungen in den Messtöpfen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Es wird vermutet, dass es bei strömungsberuhigten Zonen innerhalb der Messtöpfen zu Anreicherungen von Trübstoffen kommen kann. Bei der

automatisierten Sondenreinigung mit Druckluft können diese Trübstoffe aufgewirbelt werden und die SAK-Messung beeinflussen. Um dies zu vermeiden und um die Reinigungsintervalle zu reduzieren wurde im Juli 2018 die SAK-Sonde im Zulauf der Ozonung mit einer Bürstenreinigung ausgestattet.

Die Messwerte für pH und Redox im Zulauf der Ozonung (PN 5) waren anfänglich ebenfalls nicht zufriedenstellend. Optimierungen, Referenzmessungen sowie Kalibrierungen wurden durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Sonden herzustellen.

Deutlich abweichende Kontrollmessungen an der Orbisphere deuteten auf eine nicht korrekt funktionierende Messung der Ozonkonzentration in wässriger Phase hin. Die Funktionsfähigkeit der Sonde zur Messung der Ozonkonzentration in wässriger Phase (Messung Gelöstozon via Orbisphere) konnte erst im April 2018 hergestellt werden.

Die Ausgabe der Rohmessdaten (Datenpunkte) und die Übertragung in eine Art zusätzliches Betriebstagebuch (Excel-basierter Datenreport) wies programmierseitig einige Fehler sowie weitere Unklarheiten auf, sodass eine Überarbeitung notwendig wurde. Relevante Anmerkungen, Hinweise sowie gewünschte Änderungen zum Datenreport und zur Messtechnik wurden von der wiss. Begleitung erarbeitet und sowohl am 27.03.2018 als auch am 14.06.2018 zur weiteren Bearbeitung und Prüfung an die verantwortlichen Projektbeteiligten verschickt. Die Fehler im Datenreport konnte im Verlauf der Versuchsphase 1 behoben werden.

### 8.1.7 Beobachtungen beim SAK<sub>254</sub>

Testweise wurde die Ozonanlage in der Versuchsphase 1 (März 2018) für eine Woche mit einer  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-basierten Regelung zur Ozondosierung mit einem  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwert von 35 % gefahren (ermittelt aus Absorbanzabnahme und der gemittelten Spurenstoffentnahme für die zwölf Indikatorsubstanzen in der Ozonung bei 80 %). Dabei wurden extreme Schwankungen beim  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> und ein signifikanter Einfluss der Trübung und der Abwasserqualität (DOC) auf den SAK<sub>254</sub> im Zulauf der Ozonung (PN 5) beobachtet.

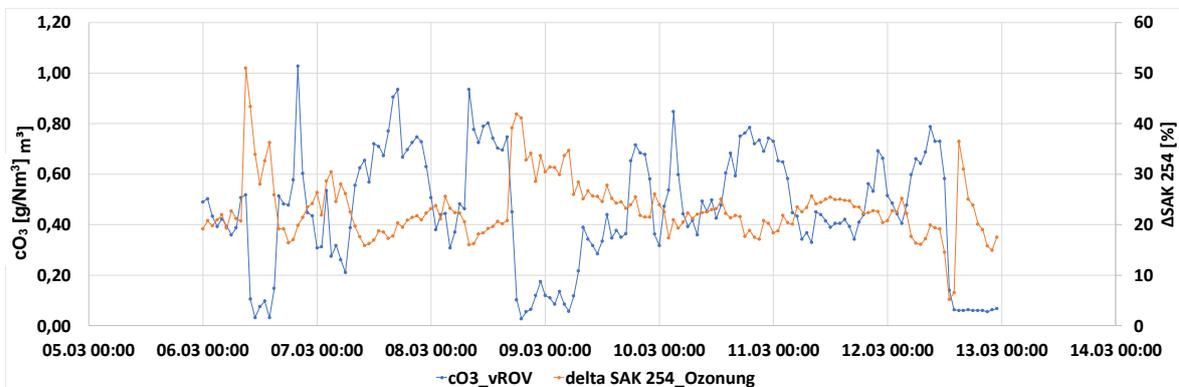
Abbildung 134 zeigt die Verläufe des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> in der Ozonung (hier in orange dargestellt) und der Ozonkonzentration im Offgas (in blau dargestellt). Die Schwankungen der Ozonkonzentration begründen sich insbesondere durch die ständige Anpassung (Nachregelung) der Ozonerzeugung. Verantwortlich hierfür ist der Trübungseinfluss auf den SAK<sub>254</sub> im Zulauf der Ozonung, was zu hohen Eingangswerten führt. Insgesamt konnten in den Messwertdaten starke Schwankungen beim SAK<sub>254</sub> im Zulauf der Ozonung beobachtet werden. Ein Zusammenhang zwischen SAK<sub>254</sub>-Spitzen und Trübungsspitzen im Zulauf der Ozonung ist deutlich erkennbar. Da die Trübung ständigen Schwankungen unterworfen ist und Trübungsspitzen auftreten können, schwanken daher auch die  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Werte in der Ozonung. Diese Schwankungen führten bei der Ozonproduktion zu einer Überdosierung. Diese Beobachtung kann damit begründet werden, dass Trübungsspitzen im Zulauf der Ozonung zu hohen Eingangswerten beim SAK<sub>254</sub> (PN 5) führen. Der  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> in der Ozonung nimmt dabei stark zu, was zu einer hohen Differenz des gemessenen  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> zum eingestellten Sollwert des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> führt. Abbildung 94 zeigt den Verlauf der Ozonkonzentration im Offgas mit Bezug zur Veränderung der Trübung im Zulauf. Es wird deutlich, dass die Ozondosierung stark von der Trübung im Zulauf der Ozonung abhängig ist.

Abbildung 135 zeigt das Verhalten der Ozonkonzentration im Offgas auf die Veränderung der Trübung im Zulauf. Die Zunahme der Offgaskonzentration verläuft dabei ähnlich mit der

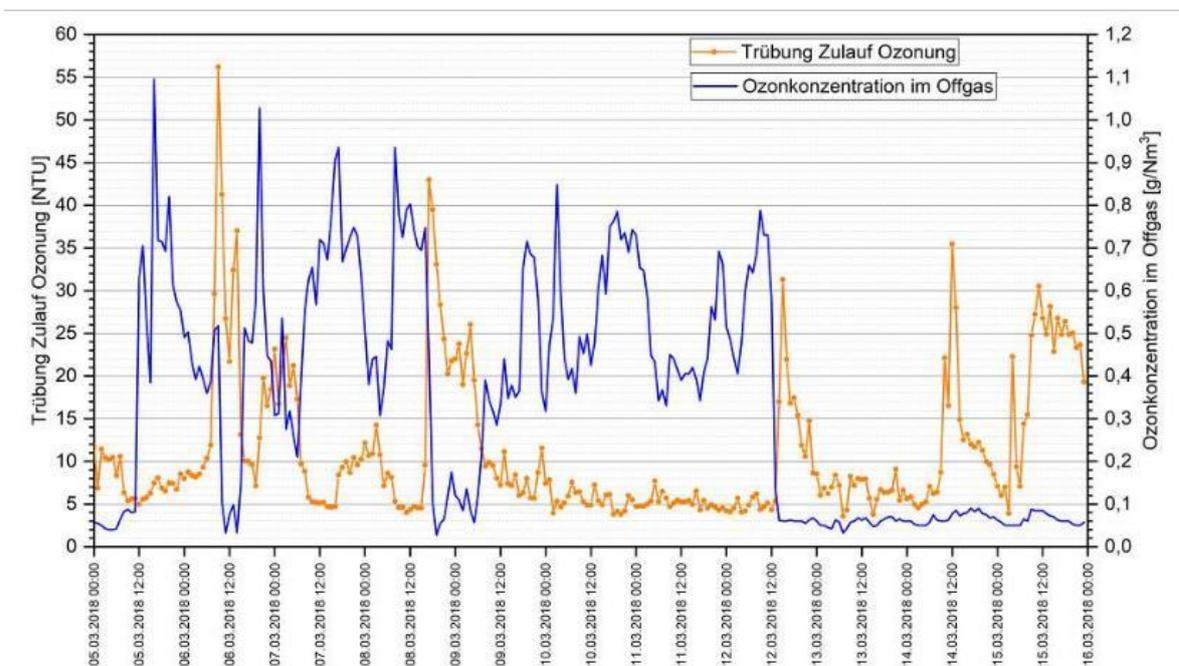
Zunahme der Ozonproduktion. Es wird deutlich, dass die Ozondosierung und somit die Ozonproduktion stark von der Trübung im Zulauf abhängig sind. Interessant ist, dass nur der  $\Delta\text{SAK}_{254}$  der Ozonung durch die Schwankungen beeinflusst wird. Die  $\Delta\text{SAK}_{254}$  der beiden Filtertypen waren während des  $\Delta\text{SAK}_{254}$  geregelten Betriebes nahezu konstant bei 14 % für den Sandfilter und 25 % für den Aktivkohlefilter.

Abbildung 136 zeigt den Verlauf der nicht trübungskompensierten  $\text{SAK}_{254}$ -Werte bei den einzelnen Messstellen (Sonden). Im Vergleich zum  $\text{SAK}_{254}$  im Zulauf der Ozonung (in gelb, PN 5) zeigen sich weniger starke Schwankungen bei den anderen Sonden (insbesondere bei den Filterabläufen).

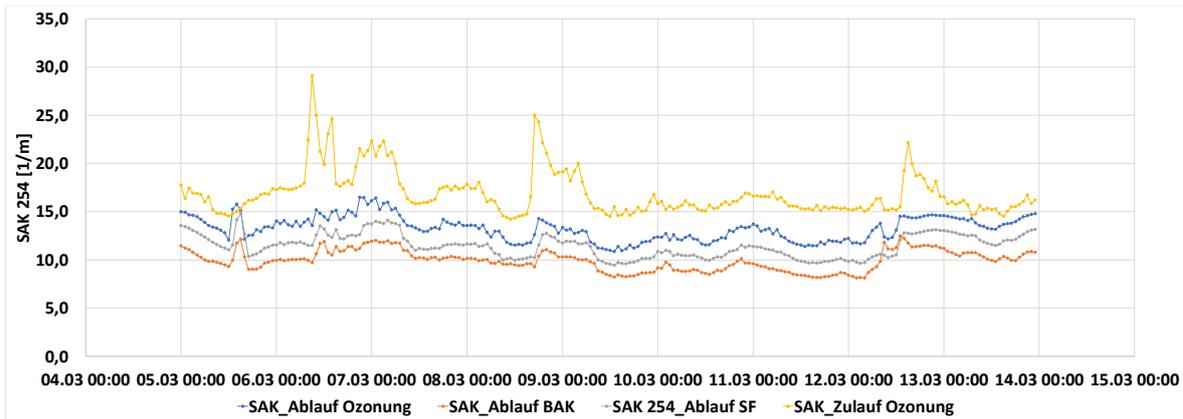
Abbildung 137 zeigt die Korrelation des  $\text{SAK}_{254}$  mit der Trübung im Zulauf der Ozonung während der  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Regelung. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8897 kann davon ausgegangen werden, dass der  $\text{SAK}_{254}$  im Zulauf der Ozonung in seinem Verhalten stark den Trübungsschwankungen unterliegt.



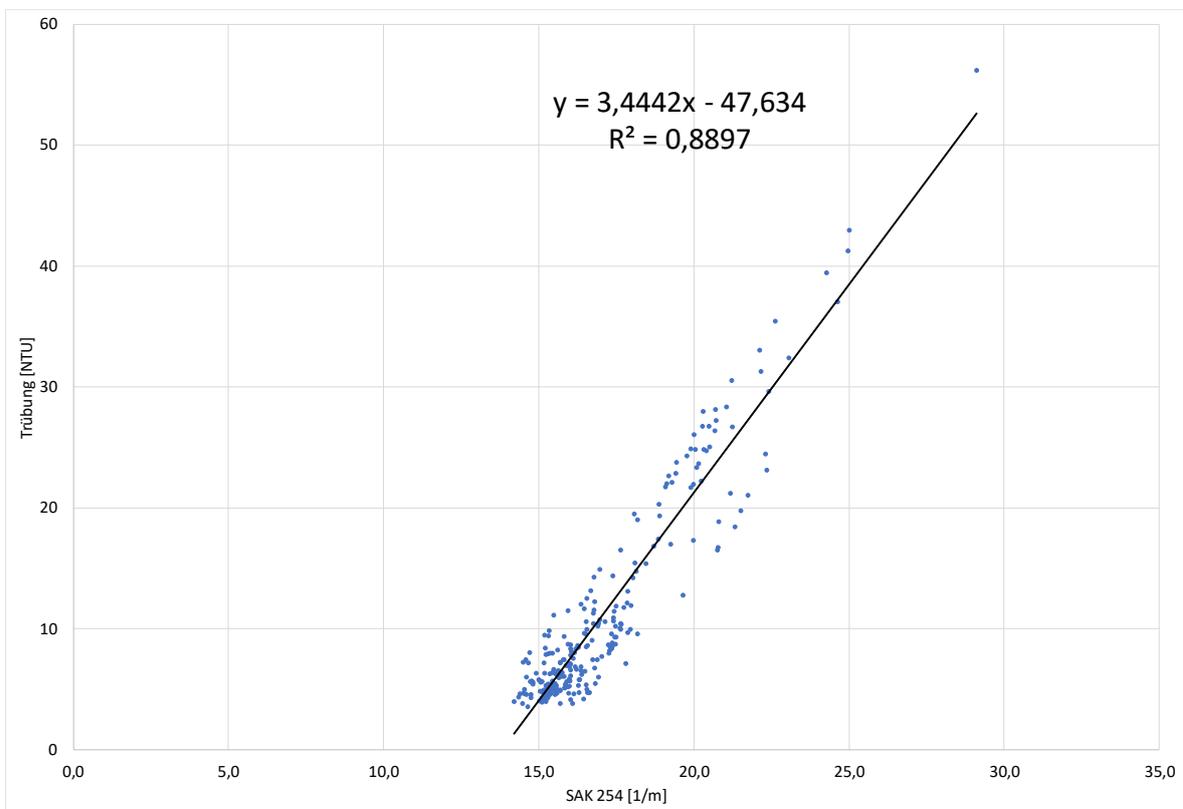
**Abbildung 134: Verlauf des  $\Delta\text{SAK}_{254}$  und der Konzentration an Ozon im Offgas während der  $\Delta\text{SAK}_{254}$  – Regelung**



**Abbildung 135: Einfluss der Trübung auf den Ozongehalt im Offgas**



**Abbildung 136: Verhalten des nicht trübungskompensierten SAK<sub>254</sub> für die verschiedenen Messstellen**



**Abbildung 137: Korrelation des SAK<sub>254</sub> mit der Trübung im Zulauf der Ozonung**

Ausgehend aus diesen Erkenntnissen ist für eine  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> basierte Regelung der Ozondosierung eine Trübungskompensation der SAK<sub>254</sub>-Messung erforderlich, um einen gleichmäßigen Ozonbetrieb ermöglichen zu können. Damit können Überdosierungen vermieden und ein effizienterer Betrieb der Ozonerzeugung erzielt werden. Die Verwendung der Rohdaten der SAK-Messung zur Implementierung einer  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-basierten Regelung wurde daher als ungeeignet eingestuft, da die starken Schwankungen des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> in der Ozonung zu einer schwankenden Ozonerzeugung bzw. Ozondosierung (auch Überdosierung) führten. Um eine gleichmäßige  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-basierte Ozondosierung sicherzustellen, erfolgte im Juni 2018 die Umstellung der Rohdatenausgabe des SAK<sub>254</sub> auf trübungskompensierte Werte. Die ersten Betriebserfahrungen zeigen zudem, dass eine 14-tägige händische Reinigung der SAK-Messsonden erforderlich ist.

### 8.1.8 Konzept der Vergleichsmessung des SAK<sub>254</sub>

Zum Erkennen von Fehlern in der SAK<sub>254</sub>-Messung wird in Weißenburg täglich eine Referenzmessung durchgeführt. Die Optimierung und Implementierung der automatisierten Abgleichsmessung erfolgte im Frühjahr bis Sommer 2018. Nachfolgend wird das Funktionsprinzip der Vergleichsmessung beschrieben.

Eine Pumpe beschickt aus dem Kühlwasserschacht (Ablauf Sandfilter) die Messtöpfe mit den darin verbauten SAK-Sonden. Anschließend erfolgt die Abgleichsmessung (Dauer ca. 15 min). Die maximale Abweichung für die Messung ist derzeit mit 20 % festgelegt (Abweichung frei einstellbar). Bei Überschreitung wird eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben. Wird bei der Abgleichsmessung der vorgegebene Maximalwert überschritten, so ist eine manuelle chemisch-mechanische Reinigung durchzuführen. Um den Erfolg der Reinigung zu kontrollieren, erfolgt die Abgleichsmessung erneut. Zur Optimierung der SAK<sub>254</sub>-Messung wurde auch eine Offset-Regelung integriert. Da die SAK-Sonden unterschiedlich stark verschmutzen (SAK-Sonde im Zulauf der Ozonung verschmutzt schneller als SAK-Sonde im Ablauf der Ozonung), wird nach jeder Abgleichsmessung der Offset der einzelnen Messungen ermittelt. Bezugssonde ist hierbei die Zulaufsonde (Zulauf Ozonung = PN 5). Der Offset ist dann auf die tatsächliche Messung aufzuaddieren und ergibt einen neuen SAK<sub>254</sub>-Wert. Dieser Wert wird im PLS angezeigt, aufgezeichnet und zur Regelung der Ozondosierung verwendet. Für die Abgleichsmessung und zur Kontrolle des Einhaltens der maximalen Abweichung wird weiterhin der tatsächliche Messwert verwendet. Nach der Vergleichsmessung werden wieder die Probenahmepumpen angesteuert und die Messtöpfe mit den unterschiedlichen Abwässern befüllt. Dieser gesamte tägliche Sondenabgleich zur Drifterkennung und Korrektur ist automatisiert. Weiterhin wird zur Vermeidung von Messungenauigkeiten und Fehlern bei der optischen Messtechnik ein monatliches Molchen der Probenahmeleitungen erforderlich, um somit Trübstoffe, Ablagerungen und Biofilmbewuchs zu entfernen und damit das Messsignal durch optische Einflüsse nicht zu verfälschen.

### 8.1.9 Bestimmung und Überprüfung der SAK<sub>254</sub>-Werte als Regelparameter

Zur Kontrolle der SAK<sub>254</sub>-Onlinewerte sowie zur Ermittlung geeigneter Sollwerte für die spätere  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-basierte Regelung zur Ozondosierung wurden auch labortechnische Analysen des SAK<sub>254</sub> am LfU durchgeführt (Messwerte ab Juni 2018 für Zulauf und Ablauf Ozonung). Zudem wurden vom Personal der Kläranlage regelmäßig SAK<sub>254</sub>-Werte für den Zulauf/Ablauf der Ozonung und für die beiden Filterabläufe bestimmt. Dies erfolgte ab Mitte Juni 2018 in der Regel anhand einer membranfiltrierten Stichprobe (0,45 µm) und anschließender photometrischer Bestimmung mit Glasküvetten. Vorher wurde der SAK<sub>254</sub> photometrisch ohne Vorfiltration bestimmt. Es handelt es sich hierbei um den spektralen Schwächungskoeffizienten (SSK). Dabei wird zusätzlich die Lichtabschwächung durch Lichtstreuungseffekte von partikulären Probeninhaltsstoffen erfasst. Daher werden diese Ergebnisse nicht weitergehend berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden die Messergebnisse aus dem Labor (LfU sowie Kläranlage Weißenburg) und die Messwerte der Online-Sonden (trübungs kompensiert) vorgestellt und verglichen.

#### 8.1.9.1 Vergleich der SAK<sub>254</sub>-Online-Messwerte mit den Laborwerten (LfU)

In Abbildung 138 werden die Messergebnisse der membranfiltrierten Proben vom LfU (ab Juni 2018) mit den Online-Messwerten der SAK-Sonden im Zu- und Ablauf der Ozonung

verglichen. Für den betrachteten Zeitraum Juni bis September 2018 kann davon ausgegangen werden, dass die SAK-Messsonden weitestgehend funktionsfähig waren. Für den Zulauf der Ozonung zeigt sich eine weniger gute Korrelation zwischen Laborwerten und Online-Werten als im Vergleich zu den SAK<sub>254</sub>-Werten im Ablauf der Ozonung. Für den Ablauf der Ozonung kann eine gute Übereinstimmung und eine Korrelation mit  $R^2 = 0,98$  festgestellt werden. Aufgrund der Abweichungen des Labor-SAK<sub>254</sub>-Wertes zu den Online-Werten im Zulauf der Ozonung, insbesondere für die Monate Juni bis Juli 2018, ist nur eine mäßige Korrelation bei den Absorbanzabnahmen in der Ozonung erkennbar ( $R^2 = 0,66$ ). Die Abweichungen beim Zulauf der Ozonung sind vermutlich durch verschiedene Effekte zu erklären:

- Die dargestellten Laborwerte beziehen sich sowohl auf Stichproben als auch auf 24 h-Mischproben. Stichproben können genauer sein, da der genaue Probenahmezeitpunkt mit dem in Echtzeit ausgegebenen Online-Messwert nahezu übereinstimmt. Eine zeitliche Abweichung zwischen Probenahmezeitpunkt und der Ausgabe des Messsignals der Online-Sonde ist jedoch nicht auszuschließen. Für den Vergleich eines SAK<sub>254</sub>-Wertes aus einer 24 h-Mischprobe mit dem dazugehörigen Online-Messwert wurde ein Mittelwert aus den Minutenwerten des SAK<sub>254</sub> über 24 h gebildet. Dieser gemittelte Wert unterliegt einer statistischen Ungenauigkeit (Standardabweichung), sodass auch hier Abweichungen zum Laborwert wahrscheinlich sind. Zudem wurde bei den Online-Messungen festgestellt, dass die Messwerte um mehr als  $0,6 \text{ Abs/m}^{-1}$  innerhalb von zwei Minuten schwanken können. Daher kann grundlegend immer von einer Abweichung und Differenz ausgegangen werden, wenn der gemittelte Online-Messwert mit einem Laborwert aus einer volumenproportionalen 24 h-Mischprobe verglichen wird.
- Die SAK-Sonden verschmutzen unterschiedlich stark. Vor allem die SAK-Sonde im Zulauf der Ozonung verschmutzt schneller als die SAK-Sonde im Ablauf der Ozonung. Abhängig vom Reinigungsintervall können sich am Messfenster Trübstoffe, Schwebstoffe, Ablagerungen oder auch Mikroorganismen anlagern, welche die optische Messung beeinflussen. Daher kann der SAK<sub>254</sub>-Messwert teilweise höher liegen als ein Laborwert aus einer membranfiltrierten Probe. Zur Optimierung der SAK<sub>254</sub>-Messung wurde daher die in Kapitel 8.1.8 beschriebene Offset-Regelung integriert. Ende August und Anfang September 2018 ist dadurch auch eine bessere Übereinstimmung bei den SAK<sub>254</sub>-Werten im Zulauf der Ozonung zu erkennen.

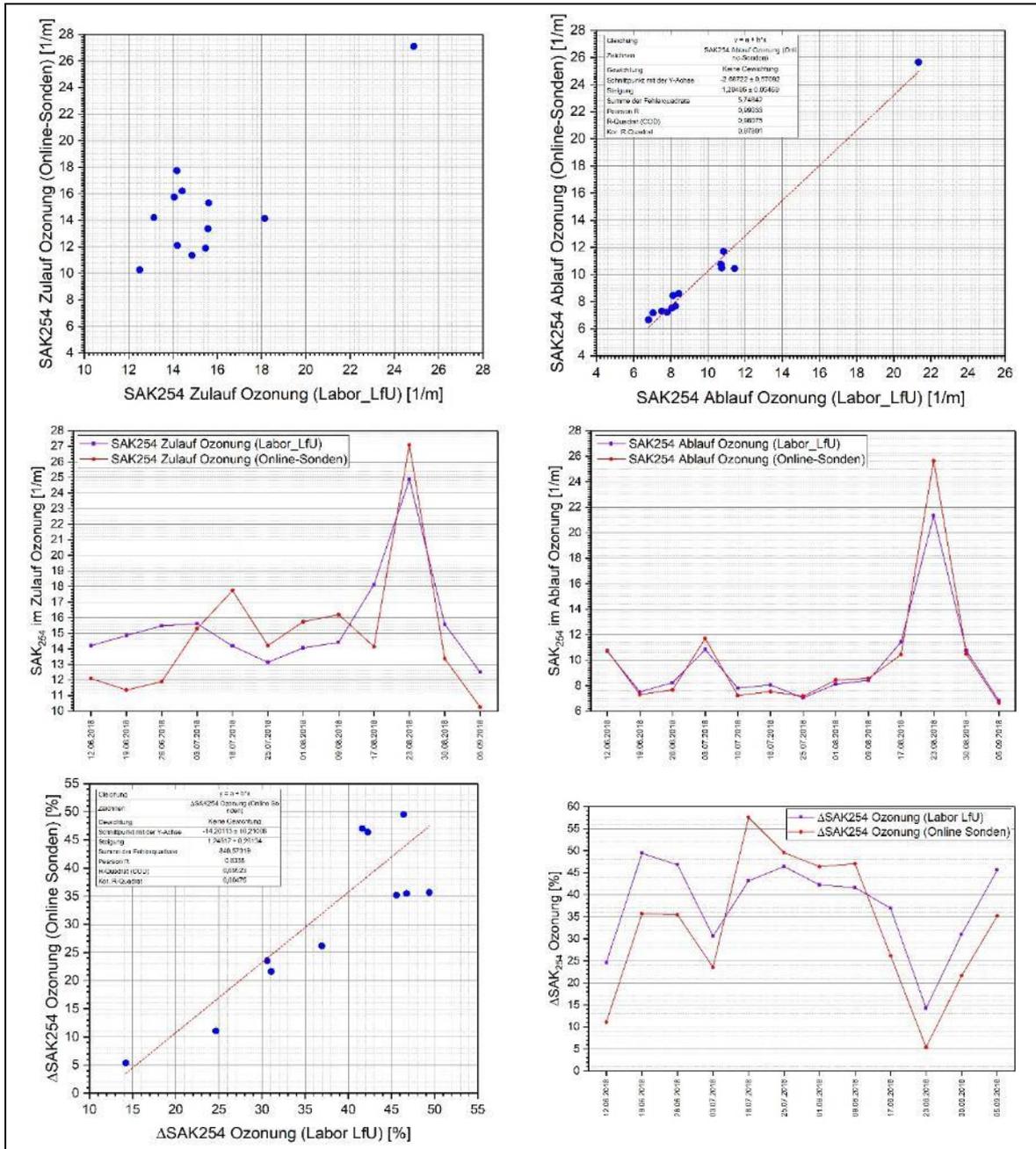


Abbildung 138: Vergleich der Laborwerte (LfU) mit den Onlinemessungen bezüglich SAK<sub>254</sub> aus Zu- und Ablauf Ozone

### 8.1.9.2 Vergleich der SAK<sub>254</sub>-Online-Messwerte mit den Laborwerten (Kläranlage Weißenburg)

In Abbildung 139 und Abbildung 140 sind die ermittelten SAK<sub>254</sub>-Werte aus den Labormessungen der Kläranlage Weißenburg (Stichproben) im Vergleich zu den Online-Messwerten dargestellt. Sowohl für den Zulauf als auch für den Ablauf der Ozonung ist keine signifikante Übereinstimmung und nachvollziehbare Korrelation zwischen trübungs kompensierten Online-Messwerten und den Messwerten aus den membranfiltrierten Stichproben zu erkennen. Eine eindeutige Korrelation zwischen den Absorbanzabnahmen (in der Ozonung) aus Laborwerten und Online-Messwerten ist daher auch nicht gegeben. Auch bei den beiden Filterabläufen (siehe Abbildung 140) kann keine eindeutige Übereinstimmung zwischen Online-Messwert und Laborwert festgestellt werden. Die festgestellten Abweichungen lassen sich vermutlich durch den Einfluss der Probenahme und Probenaufbereitung sowie den o.g. Effekt der unterschiedlichen Sondenverschmutzungen begründen. Weiterhin ist vor allem bei der Probenahme der Probenahmezeitpunkt (zeitlich korrespondierend) unter Berücksichtigung der hydraulischen Verweilzeiten in den einzelnen Verfahrensstufen entscheidend. Da die Online-Messwerte innerhalb von Minuten beachtlich schwanken können, ist eine Stichprobe ohne definierbaren Probenahmezeitpunkt auch mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Ein weiterer möglicher Einfluss auf die Abs-Verschiebung und Veränderung des SAK<sub>254</sub>-Wertes bei einer Stichprobe ist die Dauer der Probenlagerung. Messergebnisse eines Parameters bezüglich einer Abwasserprobe können durch Einflüsse wie Zeit, Temperatur oder mikrobiologische Aktivität unterschiedlich sein (Veränderung der Abwassereigenschaften). Durch mögliche Ausgasung, biologische Aktivität und Freisetzung von Trübstoffen kann der Laborwert daher im Vergleich zum Online-Messwert stark abweichen. Zudem muss beachtet werden, dass die SAK-Sonden in der Ozonung (Zu- und Ablauf) erst im Mai/Juni 2018 voll funktionsfähig waren und optimiert wurden. Die Messergebnisse aus der frühen Versuchsphase sind aufgrund der aufgetretener Mängel bei den Sonden mit Unsicherheiten verbunden (siehe Tabelle 40).

In Abbildung 139 und Abbildung 140 sind ergänzend zu den zeitlichen Verläufen der trübungs kompensierten Online-Messwerte (grüner Graph) und Laborwerte (filtriert, roter Graph) die SAK<sub>254</sub>-Werte der nicht filtrierten Probe (SSK) grafisch abgebildet (schwarzer Graph). Erwartungsgemäß ist der SAK<sub>254</sub> (SSK) aus den nicht filtrierten Abwasserproben bei allen Probenahmestellen (Zu- und Ablauf Ozonung sowie Ablauf Sandfilter und Aktivkohlefilter) höher als der SAK<sub>254</sub>. Bei den zeitlichen Verläufen zeigt sich demnach tendenziell bei allen Probenahmestellen eine ähnliche Ganglinie.

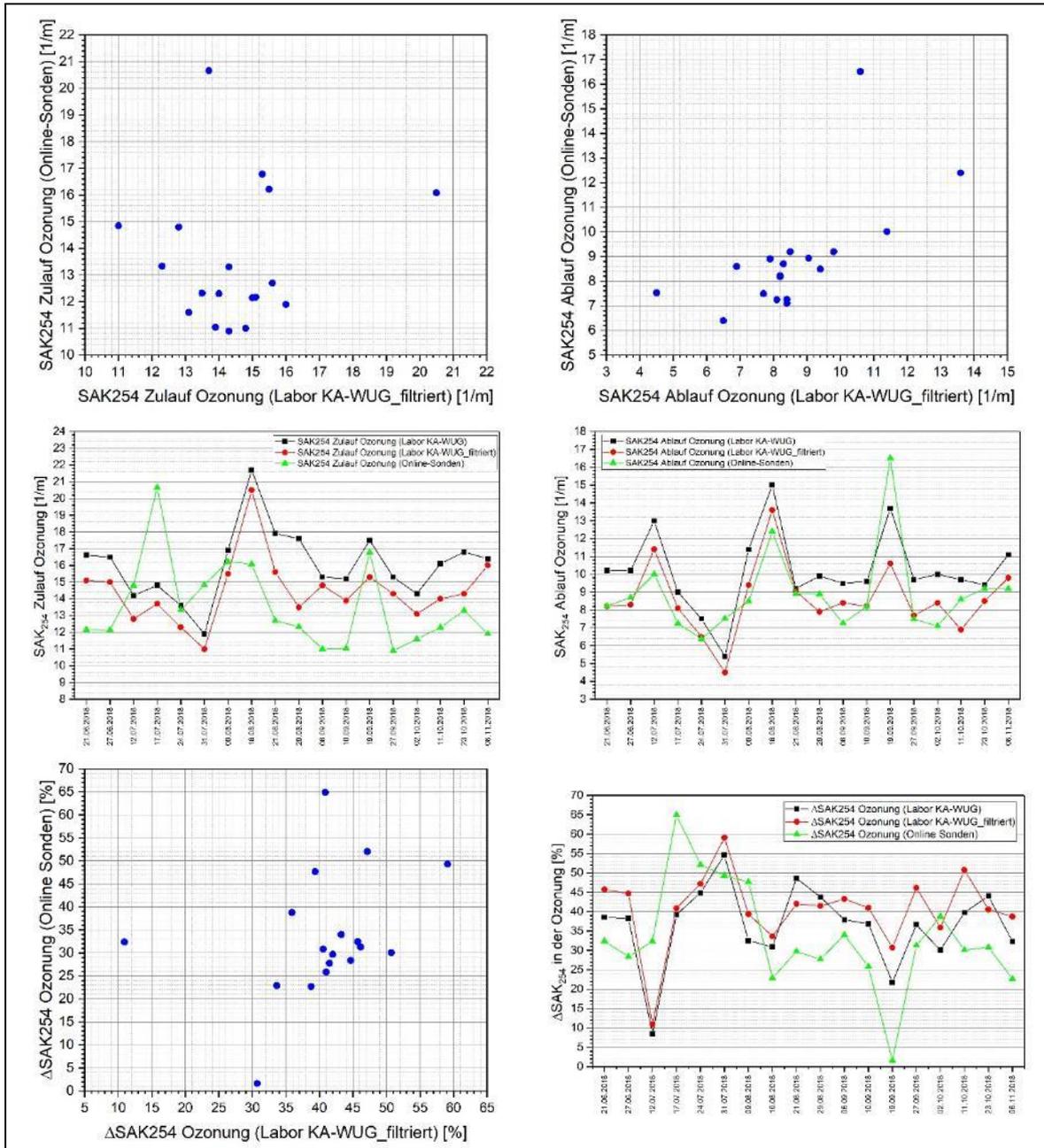
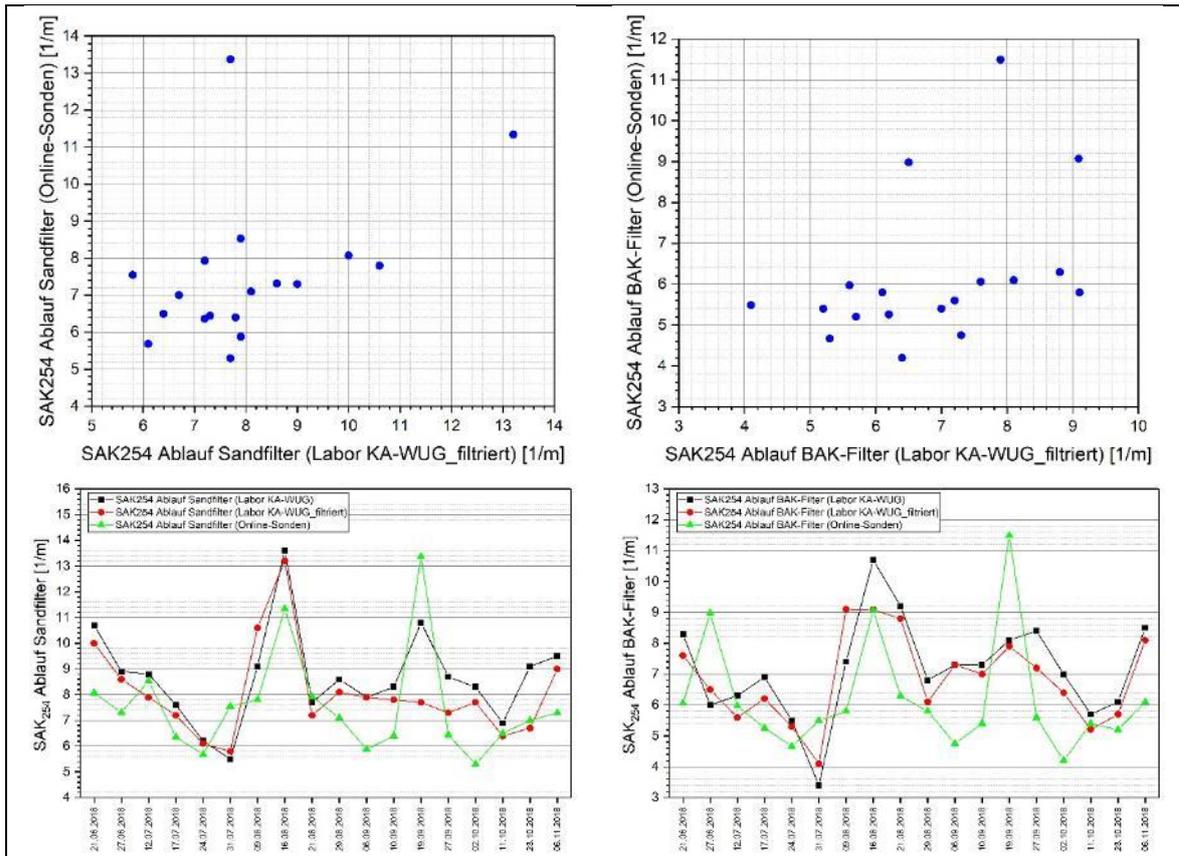


Abbildung 139: Vergleich der Laborwerte (Kläranlage Weißenburg) mit den Onlinemessungen bezüglich SAK<sub>254</sub> aus Zu- und Ablauf Ozonung



**Abbildung 140: Vergleich der Laborwerte (Kläranlage Weißenburg) mit den Onlinemessungen bezüglich SAK<sub>254</sub> aus Ablauf Sandfilter und Aktivkohlefilter**

### 8.1.9.3 Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme und Spurenstoffelimination

Abbildung 141 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme ( $\Delta\text{SAK}_{254}$ ) und Spurenstoffelimination in der Ozonung. Aussagen über diesen Zusammenhang sind erforderlich, um entsprechende  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwerte für die Regelung der Ozondosierung vorzugeben. Dabei kann neben der Regelung auch die Reinigungsleistung bezüglich der Spurenstoffentnahme indirekt überprüft werden (siehe auch Kapitel 5.2.6).

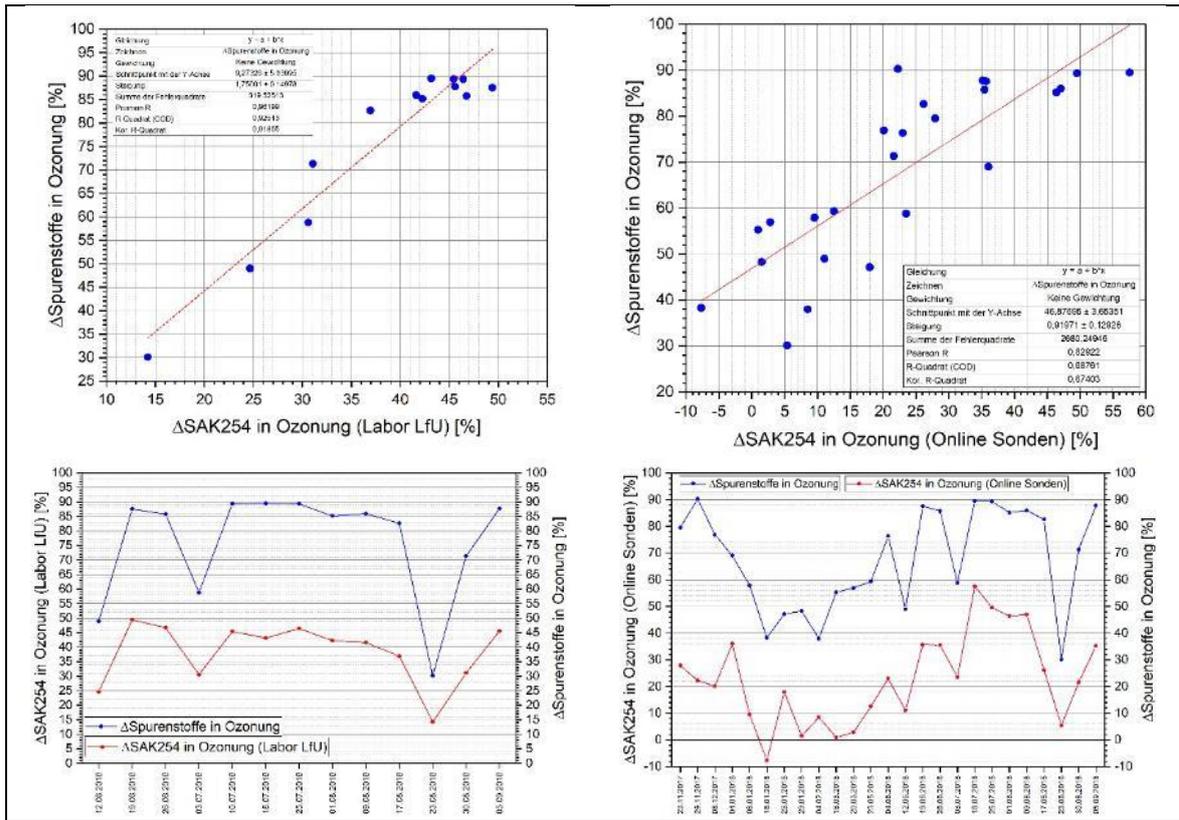
Abbildung 141 zeigt eine gute Korrelation ( $R^2 = 0,92$ ) des  $\Delta\text{SAK}_{254}$  (Laborwerte LfU) mit den Ergebnissen der Spurenstoffelimination in der Ozonung (gemittelte Eliminationsleistung bezogen auf die zwölf Indikatorsubstanzen). Dabei ist zu erkennen, dass bei Probenahmen wo Stillstandszeiten beim Anlagenbetrieb aufgetreten sind (z.B. Abschaltung Ozongenerator) sowohl die Eliminationsleistung bei den Spurenstoffen als auch die Absorbanzabnahme in der Ozonung durch die geringeren Ozoneinträge deutlich niedriger sind. Auch die über die Zeit aufgetragenen Graphen zeigen einen überwiegend übereinstimmenden Ganglinienverlauf. Betrachtet man hingegen die ermittelte Absorbanzabnahme aus den Online-Messwerten mit der Spurenstoffelimination in der Ozonung, so ergibt sich eine weniger gute Übereinstimmung bzw. Korrelation ( $R^2 = 0,68$ ). Dies bestätigt sich auch in der graphischen Darstellung der Ganglinien über den Zeitraum November 2017 bis September 2018. Auch hier ist zu bemerken, dass die mäßige Korrelation durch die bereits oben erwähnten Einflüsse zu erklären ist:

- unterschiedliche Probenahmearten (Stichproben und 24 h-Mischproben),

- Messsonden im Zu- und Ablauf der Ozonung waren erst im Mai/Juni 2018 voll funktionsfähig.

Insbesondere ab Juni 2018, nachdem die SAK-Sonden optimiert wurden und vorwiegend Stichproben gezogen wurden sind, ist ein ähnlicher Kurvenverlauf zwischen der Spurenstoffentnahme (blauer Graph) und der Absorbanzabnahme (roter Graph), ermittelt aus den Online-Messwerten, zu erkennen. Auffällig im zeitlichen Verlauf der Ganglinie bei den Onlinewerten ist auch der ermittelte Wert für die Absorbanzabnahme in der Ozonung am 18.01.2018. Hier wurde nach einer zeitlich korrespondierenden Stichprobe im Ablauf der Ozonung ein höherer  $SAK_{254}$ -Wert als im Zulauf zur Ozonung festgestellt (14:00 bis 15:00 Uhr). Zuvor wurden zwischen 08:30 bis 10:30 Uhr die Messtöpfe gereinigt. Anschließend wurde in die Ereignisliste durch das Kläranlagenpersonal dokumentiert, dass die  $SAK_{254}$ -Werte deutlich geschwankt haben. Daher kann angenommen werden, dass ein optischer Einfluss nach der Messtopfreinigung auf die Messung des  $SAK_{254}$  gegeben ist (Aufwirbelung von Trübstoffen oder Ablagerungen möglich). Dies sollte für die  $\Delta SAK_{254}$ -basierte Regelung zur Ozondosierung unbedingt berücksichtigt werden. Da zu diesem Zeitpunkt die Ozonproduktion und der Eintrag von Ozon stabil liefen, kann zudem vermutet werden, dass Ozon durch eine Nitritspitze im Zulauf der Ozonung weitestgehend aufgezehrt wurde und damit kaum Ozon für die Oxidation von Spurenstoffen zur Verfügung stand. Dies kann insbesondere für Spurenstoffe möglich sein, bei denen die Abbauraten in der Ozonung und die Absorbanzabnahme gut korrelieren. Für die Stichprobe am 18.01.2018 wurde auch eine eher schlechte mittlere Eliminationsrate in der Ozonung (spezifischer Ozoneintrag von 0,4 mg  $O_3$ /mg DOC) von rund 38 % ermittelt.

Mit weiteren Messungen im Projektverlauf sollte ein Vergleich der  $SAK_{254}$ -Onlinewerte mit den  $SAK_{254}$ -Laborwerten erfolgen. Hierzu wurde ein Stufenversuch mit Vorgabe unterschiedlicher  $\Delta SAK_{254}$ -Sollwerte durchgeführt (siehe Kapitel 9.2), um somit Empfehlungen für eine  $\Delta SAK_{254}$ -basierte Regelung zur Ozondosierung vorzuschlagen.



**Abbildung 141: Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme und Spurenstoffentnahme in der Ozonung, Vergleich der Laborergebnisse (LfU) mit den Online-Messwerten**

8.1.9.4 Einfluss des spezifischen Ozoneintrags auf die Absorbanzabnahme und Spurenstoffelimination

Ein ausreichend guter Zusammenhang zwischen spezifischem Ozoneintrag und Absorbanzabnahme sowie Spurenstoffelimination in der Ozonung konnte bisher nur bedingt hergestellt werden. Tendenziell ist mit einer höheren Ozondosis und einem höheren spezifischen Ozoneintrag auch eine höhere Spurenstoffentnahme und Absorbanzabnahme möglich. Für die Untersuchungen in Weißenburg zeigt sich für die Spurenstoffentnahme, dass ein erhöhter spezifischer Ozoneintrag auch eine höhere Spurenstoffentnahme bewirkt. Dabei muss beachtet werden, dass der Nachweis einer nachvollziehbaren Korrelation aufgrund der Stillstandszeiten und Optimierungspotenziale (z.B. Nitritkorrektur) bei der Ozonung für den Betrachtungszeitraum bisher noch nicht möglich war. Dennoch zeigt sich, dass bei einem spezifischen Ozoneintrag  $< 0,4 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$ , eine Spurenstoffentnahme in der Ozonung von  $\geq 70 \%$  nicht mehr erzielt werden kann (Grafik unten rechts in Abbildung 142). Wird mehr Ozon eingetragen, so erhöht sich auch die Absorbanzabnahme bzw. der  $\Delta\text{SAK}_{254}$  in der Ozonung. Dieser Zusammenhang kann auch für die Untersuchungen in Weißenburg belegt werden. Die obere linke Grafik in Abbildung 142 zeigt die Korrelation (mit  $R^2 = 0,68$ ) zwischen Absorbanzabnahme (Labordaten LfU) und spezifischen Ozoneintrag. Zudem lässt sich vermuten, dass die Art der Probenahme (Stichproben und 24 h-Mischproben) und die Stillstandszeiten sowie Optimierungspotenziale beim Anlagenbetrieb einen erheblichen Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß der Korrelation haben. Ist der Anlagenbetrieb stabil und werden zeitlich korrespondierende Stichproben oder auch 24 h-Mischproben aus dem Zu- und Ablauf der Ozonung gezogen, so ist nach anschließender

Ermittlung der Absorbanzabnahme eine bessere Korrelation zum spezifischen Ozoneintrag zu erwarten. Da neben den Stillstandszeiten beim Anlagenbetrieb die Messsonden zur Dokumentation des SAK<sub>254</sub> erst im Mai/Juni 2018 optimiert wurden und voll funktionsfähig waren, kann keine eindeutige Korrelation zwischen spezifischen Ozoneintrag und der Absorbanzabnahme, ermittelt aus den Online-Messwerten, festgestellt werden (Grafik oben rechts in Abbildung 142). Tendenziell ist aber erkennbar, dass ein spezifischer Ozoneintrag von 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC eine Absorbanzabnahme von 20 - 45 % bewirkt (vgl. mit den Labordaten vom LfU). Der Schwankungsbereich begründet sich durch die anfänglichen Optimierungspotenziale bei der Messtechnik sowie durch die unterschiedlichen Konzentrationen an Nitrit, DOC und anderen ozonzehrenden Stoffen im Zulauf der Ozonung. Ein Zusammenhang zwischen spezifischen Ozoneintrag und der Absorbanzabnahme, ermittelt aus den Laborwerten der Kläranlage Weißenburg, ist nicht erkennbar (Grafik unten links in Abbildung 142). Auch hier wird vermutet, dass ein ungenauer Probenahmezeitpunkt und Änderungen der Abwassermatrix durch Einflüsse bei Probenaufbereitung sowie Probenlagerung die SAK<sub>254</sub>-Werte verändert haben, sodass der Nachweis einer eindeutigen Korrelation mit dem in Echtzeit ermittelten spezifischen Ozoneintrag bisher noch nicht möglich war.

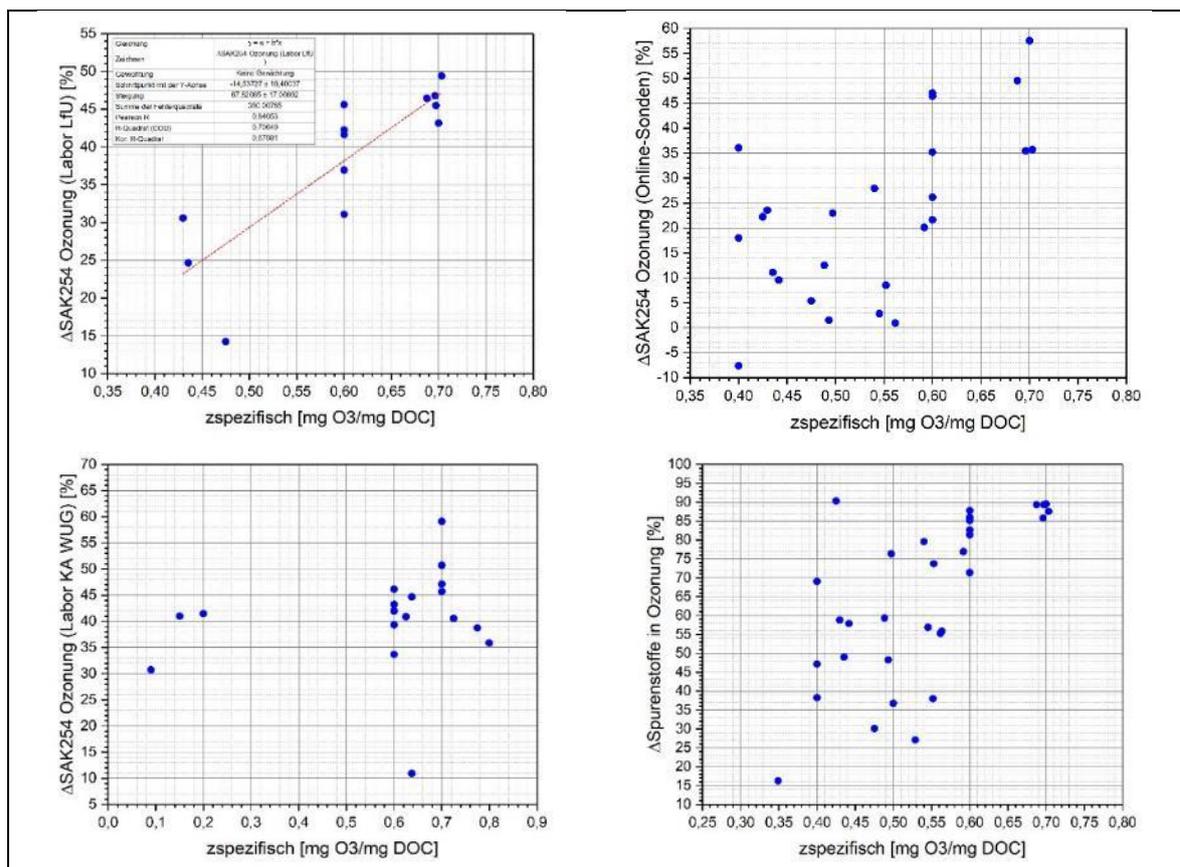


Abbildung 142: Zusammenhang zwischen spezifischen Ozoneintrag und Absorbanzabnahme sowie Spurenstoffentnahme in der Ozonung

## 8.2 HINWEISE UND PARAMETER ZUR BETRIEBSFÜHRUNG UND EIGENÜBERWACHUNG

Ausgehend von den Erfahrungen aus Weißenburg haben sich für die Dokumentation und Beurteilung des Anlagenbetriebes die in Tabelle 41 beschriebenen Parameter als geeignet erwiesen. Zur regelmäßigen Kontrolle der Betriebsstabilität müssen im Vorfeld die anlagen-spezifischen Betriebswerte einer Anlage zur Spurenstoffelimination ermittelt werden (mindestens 1 Jahr Betrieb erforderlich), um für den dauerhaften Betrieb die festgelegten Reinigungsziele sicher und effizient erreichen zu können. Grundsätzlich empfiehlt sich nach der Inbetriebnahme, dass mit Beginn der Optimierungsphase ein stabiler Betriebszustand der vierten Reinigungsstufe ohne Variation der Dosiermenge (z.B. Vorgabe der Ozonkonzentration) einzustellen ist. Hier soll auch die Funktionsfähigkeit der Anlagen- und Messtechnik getestet und dokumentiert werden. Bei Bedarf und bei Mess- oder Betriebsstörungen kann in diesem Zeitraum zur Optimierung des Anlagenbetriebes erforderliche Maschinen- und Messtechnik nachgerüstet werden. In Weißenburg wurden neben einigen Optimierungspotenzialen in der Anlagen- und Messtechnik typische Soll-Bereiche für verschiedene Messungen während des Anlagenbetriebs identifiziert (Vorgaben zur Betriebsweise). Werden diese Bereiche unter- oder überschritten, so sind entsprechende Maßnahmen oder Anpassungen durchzuführen. Diese Vorgehensweise muss für jede Anlage individuell abgestimmt werden. Um in der Optimierungsphase anschließend Erkenntnisse zur Spurenstoffentnahme und Absorbanzabnahme in Abhängigkeit von den Anlageneinstellungen (z.B. Ozondosis, Spülzeiten bei den Filtern, Steuer- und Regelkonzept Ozonzugabe, Korrekturfaktoren bei der zuflussproportionalen Ozondosierung) zu erhalten, können die Anlageneinstellungen so variiert werden, dass unter Berücksichtigung von Trocken- und Regenwetterbedingungen eine Spurenstoffentnahme bezogen auf die gesamte Kläranlage zwischen 70 und 90 % erzielt wird (vgl. KOMS-BW, 2018).

Die hier eingesetzten Messungen sind mögliche Parameter für den Nachweis eines ordnungsgemäßen Betriebs einer vierten Reinigungsstufe bestehend aus Ozonung und nachgeschalteter kontinuierlich betriebener Filtration. Mit der Erhebung und Dokumentation der in Tabelle 41 und Tabelle 42 aufgeführten Parameter kann der Anlagenbetrieb überprüft werden. Weiterhin ist durch die Online-Erfassung von Ersatzparametern (z.B. SAK<sub>254</sub>) auch die Überprüfung der Reinigungsleistung bzw. die indirekte Überwachung der Spurenstoffelimination möglich (Hubaux et al., 2018).

Die Art und der Umfang von Probenahmekampagnen und labortechnischen Analysen zur Überprüfung der Spurenstoffentnahme ist von der Zielsetzung (behördliche Vorgaben; Substanzauswahl etc.) abhängig. Weiterhin sind verschiedene Einflussfaktoren z.B. bei der Probenahme, Probenaufarbeitung, Probenaufbewahrung, beim Probentransport und bei der instrumentellen Analytik zur Bestimmung von Spurenstoffen zu beachten (siehe z.B. Kuch und Steinmetz, 2015; KOMS-BW, 2018). Zur Kontrolle der Spurenstoffeliminationsleistung auf der Kläranlage und in den einzelnen Verfahrensstufen können an den folgenden Probenahmestellen volumenproportionale 24 h-Mischproben (zeitlich korrespondierend) gezogen werden: Zulauf Kläranlage oder Ablauf Vorklärung; Zulauf Ozonung; Ablauf Ozonung und Ablauf Filteranlage (optional); Ablauf Kläranlage. Eine standardisierte Methode zur Entnahme von Spurenstoffen zur Bewertung von Anlagen zur Spurenstoffelimination existiert derzeit nicht. Fundneider et al. (2018) kritisieren in diesem Zusammenhang, dass 24-Stunden-Mischproben resp. 48-Stunden-Mischproben keine stoff- und ereignis-spezifischen Schwankungen im Wochenverlauf berücksichtigen und somit zu Fehlinterpretationen resp. -einschätzungen führen können. Fundneider et al. (2018) kommen zu dem

Ergebnis, dass die Erstellung von Wochenmischproben besser geeignet ist, um ereignis-spezifische und ereignisunabhängige Stoffe zu erfassen und um repräsentative Konzentrationen und (spezifische) Frachten ableiten zu können.

Schlussendlich muss die Häufigkeit und der Umfang der Eigenüberwachung sowie die Terminierung der Probenahmen und der Spurenstoffanalytik (über geeignetes/zertifiziertes Labor) individuell festgelegt werden und richtet sich nach den betrieblichen Notwendigkeiten und ggf. Vorgaben der Wasserbehörde. Dabei muss berücksichtigt werden in welcher Phase die Messkampagnen zur Überprüfung der Spurenstoffelimination durchgeführt werden. Die Häufigkeit der Messkampagnen muss daher sowohl für die Inbetriebnahmephase (zwei bis dreimal) und die Optimierungsphase (fünf bis zehnmal) als auch für den dauerhaften Normalbetrieb (drei bis sechsmal pro Jahr) festgelegt werden (vgl. KOMS-BW, 2018).

**Tabelle 41: Mögliche Parameter zur Dokumentation und Überwachung des Anlagenbetriebes**

| Parameter   | Empfehlung  | Begründung/Bemerkung   |
|---|---|--|
| Zufluss zur vierten Reinigungsstufe (l/s);<br><br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Als kontinuierliche Messgröße unbedingt am Zulauf zur Ozonung bzw. Ablauf der Nachklärung integrieren.</li> <li>• Als Größe zur Steuerung der Ozonzugabe implementieren und Korrekturfaktoren für bestimmte Lastfälle (Regenwetterzuflüsse/Nitritspitzen) ermitteln und hinterlegen, um Überdosierungen zu vermeiden.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit dem maximalen und minimalen Zufluss können Schwankungen über den Tag aufgezeigt werden, um Tagesschwankungen in der Ozondosierung zu dokumentieren (mehr Fracht erfordert mehr Ozon bei zuflussproportionaler Steuerung).</li> </ul>  |
| Trübung (FNU oder NTU);<br><br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Als kontinuierliche Messgröße unbedingt am Zulauf zur Ozonung und am Ablauf der Kläranlage integrieren.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitative Bewertung der Absorbanzabnahme (<math>\Delta\text{SAK}_{254}</math>) in der Ozonung und somit auch der Leistungsfähigkeit der Anlage zur Spurenstoffelimination möglich, da ein Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Trübung im Zulauf der Ozonung und der Veränderung des gemessenen <math>\Delta\text{SAK}_{254}</math> in der Ozonung besteht.</li> <li>• Schwankungen im <math>\Delta\text{SAK}_{254}</math> durch z.B. Einfluss von Trockenwetter- oder Mischwasserzufluss können anhand der Trübung mitverfolgt und erklärt werden.</li> </ul> |
| Sauerstoff (mg/l);<br><br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Als kontinuierliche Messgröße im Ablauf der Ozonung und des Filters integrieren.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indiz für die biologische Aktivität im Filter und, ob durch die Ozonung Sauerstoff in das Filtersystem eingetragen wird.</li> <li>• Über den Sauerstoffgehalt können Aussagen zur Bioaktivität des Aktivkohlefilters, zum Filterzustand und zur Funktionsfähigkeit der Ozonung getroffen werden.</li> <li>• Wenn die Ozondosierung ausfällt, bedeutet dies weniger Sauerstoff und eine Verminderung der biologischen Aktivität.</li> </ul>  |

| Parameter   | Empfehlung   | Begründung/Bemerkung  |
|---|--|---|
| <p>SAK<sub>254</sub> (1/m) und <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> (%);</p> <p>Ausgabe im PLS: als Stundenwert</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Als kontinuierliche Messgröße unbedingt im Zulauf und Ablauf der Ozonung (trübungskompensierte Messung) integrieren (optional im Ablauf des Filters) und den berechneten <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> in der Ozonung als Parameter zur Regelung der Ozondosierung und indirekten Überwachung der Spurenstoffentnahme im Steuer- und Regelkonzept hinterlegen.</li> <li>• Die Messstreckenlänge unter Berücksichtigung der Abwassereigenschaften und der Messgenauigkeit festlegen, z.B. beeinflussen Trübung und mögliche Partikelsedimentation am Messfenster die Messgenauigkeit.</li> <li>• Trübungskompensierte SAK<sub>254</sub>-Messung erforderlich, da starke Schwankungen innerhalb des SAK<sub>254</sub> ohne Trübungskompensation auftreten und so zu einer ungleichmäßigen Regelung der Ozondosierung über den <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> führen können (Überdosierung von Ozon). Bei sehr hohen Trübungswerten ist eine Vorfiltration vor der SAK-Sonde empfehlenswert.</li> <li>• Bei <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub>-basierter Regelung und zur Sollwertvorgabe sind im Vorfeld und während des Betriebs Korrelationsanalysen zwischen Absorbanzabnahme und Spurenstoffentnahme bei variierenden Ozondosen durchzuführen.</li> <li>• Bei der Regelung der Ozonzugabe via <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> den zeitlichen Versatz der Messung im Ablauf der Ozonung aufgrund der hydraulischen Aufenthaltszeit des Abwassers im Ozonreaktor berücksichtigen und als Faktor in das Regelkonzept hinterlegen.</li> <li>• Art und Häufigkeit der Sondenreinigung im Vorfeld kritisch diskutieren und während des Betriebes unter Berücksichtigung auftretender Änderungen der Abwasserqualität anpassen.</li> <li>• Einbausituation der Sonden im Vorfeld kritisch prüfen. Generell wird empfohlen SAK-Messsonden horizontal mit dem Messspalt nach unten zeigend, in eine Leitung zu setzen. Ist eine horizontale Ausrichtung der Messsonde nicht möglich, sollte zumindest darauf geachtet werden, dass die Sonde von unten angeströmt wird (vgl. Meier, 2018).</li> <li>• Messsondenabgleich und regelmäßige Referenzmessungen (täglich bis wöchentlich) der verwendeten SAK-Son-</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfluss von Trockenwetter- oder Mischwasserzufluss auf den Wirkungsgrad des <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> und somit auf den Anlagenzustand erkennbar.</li> <li>• Zur Dokumentation des Rückgangs des <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> und zur Abschätzung der Reinigungsleistung sowie zur Beurteilung des Sondenverhaltens erforderlich.</li> <li>• Funktionsfähigkeit der Sonden muss zu 100 % sichergestellt sein, Messwerte müssen plausibel und reproduzierbar sein (Plausibilitätsprüfung und regelmäßiger Abgleich mit Labormessungen empfehlenswert).</li> <li>• Bei Anwendungen mit Ozon kann eine automatisierte chemische Reinigung der Sonden z.B. mit Phosphorsäure eingesetzt werden, um ein langsames Abwandern (driften) der Messwerte aufgrund der zu erwartenden Biofilmbildung speziell nach der Ozonung zu verhindern (vgl. Meier, 2018).</li> <li>• Bürstenreinigung kann bei Biofilmbildung das Messfenster verschmieren.</li> <li>• Druckluftreinigung führt zur Aufwirbelung von Trübstoffen in Messtöpfen, dabei kann durch Partikelsedimentation am Messfenster die Messgenauigkeit beeinflusst werden.</li> <li>• Kosten-Nutzen bei manueller oder automatisierter chemischer Reinigung abwägen (z.B. ist eine tägliche händische Funktionsprüfung mit destilliertem Wasser ebenfalls möglich).</li> <li>• In Weißenburg wurden neben den SAK-Sonden mehrere Messgeräte in Messtöpfen untergebracht. Durch die zentrale Unterbringung der Messtechnik ergeben sich Vorteile beim Installations-, Wartungs- und Kontrollaufwand.</li> <li>• Weitere betriebliche Hinweise zu Einbau, Trübungskompensation, Wartung und Reinigung von SAK-Sonden siehe Meier (2018); Krappmann (2017).</li> </ul> |

| Parameter   | Empfehlung   | Begründung/Bemerkung  |
|---|--|---|
|   | den zwingend erforderlich. Eine automatisierte Kalibrierung und Dokumentation im PLS ist empfehlenswert.   |   |
| SAK <sub>436</sub> (1/m);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Als kontinuierliche Messgröße optional im Zulauf und Ablauf der Ozonung und im Ablauf des Filters integrieren.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mögliche Korrelation zwischen <math>\Delta</math>SAK<sub>436</sub> (UV-Absorbanzabnahme bei 436 nm) und der Abnahme an Spurenstoffen (Nachweis in Weißenburg noch nicht erbracht).</li> </ul>  |
| Gasmengen (m <sup>3</sup> /h) und Ozonkonzentration im Zugas und Offgas (g/Nm <sup>3</sup> ) sowie im Abgas nach Restozonvernichter (ppm);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert | <ul style="list-style-type: none"> <li>Als kontinuierliche Messgrößen in die Ozonanlage integrieren.</li> <li>Ziel bei der Anpassung der Ozondosis via Ozonerzeuger ist die Anpassung des Gasflusses, Konzentration im Zugas bleibt gleich (148 g/Nm<sup>3</sup>).</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ozon im Offgas (schlechte Eintragungseffizienz) ist zu vermeiden.</li> <li>Aussagen über den Ozoneintrag, die Ozonzehrung im Reaktor und somit über die Ozonbilanzierung und die Effizienz der Ozonung möglich.</li> <li>Ozon im Abgas (nach Restozonvernichter) relevant aus Sicherheitsgründen.</li> </ul> |
| Ozongehalt in Lösung (mg/l);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Als kontinuierliche Messgröße im hinteren Teil des Ozonreaktors integrieren (optional als „Polizeifunktion“).</li> <li>Ozon im Reaktorablauf ist zu vermeiden, bei einem Überschreiten des festgelegten Soll-Bereiches muss die Ozonproduktion bzw. die Ozonkonzentration des Offgases beobachtet werden und bei einer Überdosierung die Ozondosierung angepasst werden.</li> <li>Filter im Zulauf der Messeinrichtung empfehlenswert, um Trübstoffe zurückzuhalten und weil ozoniertes Wasser zur Biofilmbildung neigt und die Messung dadurch negativ beeinflusst werden kann.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Indiz für Überdosierung.</li> <li>Ozon erhöht den bioverfügbaren Anteil der Hintergrundorganik (Biofilmbildung möglich), siehe zum Beispiel van der Kooij et al. (1989) und Vahala et al. (1998).</li> </ul>   |
| Ozonproduktion (g/h);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Als Prozessgröße zur Dokumentation im PLS integrieren.</li> <li>Schwankt die Ozonproduktion sollte eine Überprüfung der Messtechnik sowie der Steuerung/Regelung der Ozondosierung erfolgen.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dient der schnellen Kontrolle des Anlagenzustandes.</li> </ul>   |
| Nitritkonzentration (mg/l);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wenn eine zuflussproportionale Steuerung der Ozondosierung zum Einsatz kommt als kontinuierliche Messgröße im Zulauf und Ablauf der Ozonung zur Festlegung der erforderlichen Nitritkompensation integrieren.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Indiz zur Beurteilung der Nitrifikation der Kläranlage und des Einflusses der Abwasserqualität für den Ozonbedarf.</li> </ul>  |
| Filterdruck (mbar);<br>Ausgabe im PLS: als Stundenwert  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Als kontinuierliche Messgröße in die Filteranlage integrieren.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wichtig als Überwachungs- und Steuerparameter für die Rückspülung (Intervalle).</li> <li>Indiz für die Verblockung des Filterbetts. Wenn der Filterdruck zunimmt, dann ist eine Überprüfung der Filtergeschwindigkeit und der Spülzyklen erforderlich.</li> </ul>  |

| Parameter  | Empfehlung   | Begründung/Bemerkung   |
|--|--|--|
| Filtergeschwindigkeit (m/h), EBCT (min), Bettvolumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgabe und Dokumentation der berechneten Prozessgrößen im PLS als Stundenwerte empfehlenswert.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aussagen zur verfahrenstechnischen Betriebsführung möglich, z.B. Filtergeschwindigkeit: Indiz für Fluidisierung des Filterbetts und für GAK-Austrag über Klarwasserablauf bei zu hohen Filtergeschwindigkeiten.</li> <li>• Beurteilung der Leistungsfähigkeit, Betriebsstabilität und Wirtschaftlichkeit des Filters möglich, siehe dazu auch Benstöm et al. (2016); Benstöm (2017).</li> </ul> |
| Sandsinkgeschwindigkeit bei kontinuierlich betriebem Filter (m/h)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regelmäßige Messung vor Ort vom Kläranlagenpersonal und Abgleich mit den Herstellerangaben; Abstimmung und Betreuung durch Filterhersteller essentiell.</li> <li>• Ausführliche Schulung und Einweisung bezüglich Messprinzip vom Filterhersteller zwingend erforderlich (siehe entsprechende Betriebsanleitungen).</li> <li>• Bei einer Zunahme der Sandsinkgeschwindigkeit sollte die Filtergeschwindigkeit überprüft werden (Gefahr der Filterbettfluidisierung).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sandsinkgeschwindigkeit gibt an, wie locker die Filterschüttung liegt und dient zur Überwachung von Filterverblockungen.</li> <li>• Nimmt die Sandsinkgeschwindigkeit in einem Filtersegment ab, deutet dies auf eine lokale Verblockung hin.</li> </ul>  |
| Spülzeiten (min) bei kontinuierlich betriebem Filter                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung und individuelle Anpassung der Filterspülungen hat unter Berücksichtigung der anlagenspezifischen Randbedingungen durch Abstimmung zwischen Betreiber und Filterhersteller zu erfolgen.</li> <li>• Kann im PLS über die Laufzeiten der Kompressoren mit dokumentiert werden.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewählte Spülintervalle in Weißenburg für Sandfilter 18 min Spülen und 42 min Pause; für Aktivkohlefilter 18 min Spülen und 12 min Pause (Stand November 2018).</li> <li>• Reduzierung der Spülzeiten aus wirtschaftlichen Gründen wird in Weißenburg angestrebt.</li> </ul>  |
| Waschwassermenge (l/min) bei kontinuierlich betriebem Filter                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebseinstellungen mit Filterhersteller abstimmen (z.B. Luftzufuhr Mammutheber, Filtergeschwindigkeit, Höhe des Niveauunterschieds zwischen Wasserspiegel Filter und Wasserspiegel Waschzelle).</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indiz für den GAK-Austrag über das Waschwasser.</li> <li>• Betriebliche Erfahrungen siehe auch Locher et al. (2015).</li> </ul>   |
| Korngrößenverteilung der Aktivkohle (über Sieblinien)                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung ggf. ein bis zweimal im Jahr (auch über Herstellerfirma möglich).</li> <li>• Ggf. weitere Analysen durchführen (Iodzahl, Adsorptionsisothermen, Asche etc.).</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indiz für das Abriebverhalten der eingesetzten Aktivkohle.</li> <li>• Überprüfung der Veränderungen in der Korngröße und der verfügbaren Aktivkohleoberfläche möglich.</li> </ul>   |
| Stromverbräuche (kWh);<br><br>Ausgabe im PLS: als Tageswert                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromverbrauch der Ozonanlage und der Filteranlage zur kontinuierlichen Dokumentation im PLS integrieren, ggf. Leistungsmessung einzelner Aggregate (z.B. Pumpen) im PLS mit dokumentieren.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aussagen zum Energiebedarf bzw. Stromverbrauch, zur Wirtschaftlichkeit (Kosten) und zur Optimierung der Energieeffizienz möglich.</li> </ul>  |

Zusätzlich zu den Online-Messwerten sind regelmäßige labortechnische Analysen von Spurenstoffen, CSB, DOC (Indiz für die Höhe der Konzentration an organischem Hintergrundmaterial und somit auf den Einfluss für den Ozonbedarf) und AFS (Indiz für Mischwassereinfluss) sowie Nitrit zu empfehlen (vgl. mit Tabelle 42). Weiterhin sollte der SAK<sub>254</sub> als labortechnische Kontrolle der Onlinewerte (Qualitätssicherung und Plausibilitätsprüfung) ebenfalls mitbestimmt werden. Um Schwankungen in den Abwassereigenschaften (z.B. Veränderungen in der organischen Hintergrundmatrix) zu verfolgen und somit die Betriebsstabilität sowie Änderungen im Anlagenbetrieb zu überprüfen, sollten die Messstellen Zulauf Ozonung, Ablauf Ozonung und Ablauf Filteranlage regelmäßig beprobt werden (mindesten einmal in der Woche volumenproportionale, zeitlich korrespondierende 24 h-Mischproben, ggf. auch Stichproben möglich).

**Tabelle 42: Ergänzende Parameter zur Eigenkontrolle**

| Parameter          | Empfehlung   | Probenahmestelle   |
|--------------------|--|--|
| CSB                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 bis 3 wöchentlich</li> <li>• Membranfiltrierte Probe (0,45 µm) für Zulauf Ozonung</li> <li>• Membranfiltrierte Probe oder homogenisierte Probe für Gesamtablauf Kläranlage</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulauf Ozonung</li> <li>• Gesamtablauf Kläranlage</li> </ul>                                |
| AFS                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 bis 3 wöchentlich</li> <li>• Membranfiltrierte Probe (0,45 µm)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulauf Ozonung</li> <li>• Ablauf Filter</li> </ul>  |
| Nitrit             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 bis 3 Wöchentlich, Beprobung bei durchflussproportionaler Steuerung und wenn keine Nitritsonde vorhanden</li> <li>• Membranfiltrierte Probe (0,45 µm)</li> <li>• Photometrischer Nitrit-Küvettest</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulauf Ozonung</li> <li>• Ablauf Ozonung</li> </ul>   |
| DOC                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 bis 3 Wöchentlich</li> <li>• Membranfiltrierte Probe (0,45 µm)</li> <li>• TOC Küvettest (Austreib- und Differenzmethode)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zulauf Ozonung</li> </ul>   |
| SAK <sub>254</sub> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 bis 3 Wöchentlich</li> <li>• Membranfiltrierte Probe (0,45 µm)</li> <li>• Photometrische Bestimmung mit Glasküvetten</li> <li>• Dokumentation des Rückgangs des <math>\Delta</math>SAK<sub>254</sub> und Vergleich mit Messwerten der SAK-Sonden</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ablauf Ozonung</li> <li>• Ablauf Filteranlage</li> <li>• Gesamtablauf Kläranlage</li> </ul> |

### 8.3 EMPFEHLUNGEN ZUR WEITEREN BETRIEBSWEISE

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse zum Anlagenbetrieb kann die Anlage zur Spurenstoffelimination zukünftig stabil betrieben werden. Hierzu war aber die Durchführung umfangreicher Optimierungsmaßnahmen bei Anlagen- und Messtechnik notwendig (vgl. Kapitel 8.1.). Zudem laufen derzeit noch weitere Maßnahmen zur Optimierung der Prozess- und Messtechnik. Daher sollte bei der Inbetriebnahme einer großtechnischen Anlage zur Spurenstoffelimination davon ausgegangen werden, dass mindestens ein Jahr Optimierungsphase für einen dauerhaften Anlagenbetrieb erforderlich ist. Weitere Untersuchungen zur genauen Bestimmung der Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage sind notwendig. Damit können zuverlässige Aussagen über die tatsächlich und wirtschaftlich notwendige spezifische Ozondosis zur Erreichung des angestrebten Reinigungsziels getroffen werden. Dabei sollte auch die vermutlich abnehmende Adsorptionskapazität des Filters über die Zeit berücksichtigt werden. Die Erforderlichkeit weiterer Untersuchungen wird im Kapitel 9 begrün-

det. Um einen stabilen Anlagenbetrieb zukünftig sicher zu stellen, werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Untersuchungsprogramm folgende Betriebseinstellungen vorgeschlagen:

- **Option 1:**
  - zuflussproportionale Steuerung der Ozonzugabe mit einer spezifischen Ozondosis von 0,7 bis 0,8 mg Ozon/mg DOC. Dabei sollte der berechnete spezifische Ozoneintrag  $\geq 0,6$  mg Ozon/mg DOC sein. Hierzu ist eine regelmäßige Messung/Überprüfung des DOC im Zulauf der Ozonung für die Berechnung der Solldosis erforderlich (auch zur Plausibilisierung der Ozonzugabe); Die Implementierung einer Online-Nitritmessung (Zulauf/Ablauf Ozonung via NO<sub>2</sub>-Analyser) ist hilfreich.
  - Beibehaltung der Filtereinstellungen und Spülzeiten für den Sandfilter mit 18 min Spülen und 42 min Pause; ggf. Reduzierung der Spülzeiten von 18 min auf 12 min und Erhöhung der Pausenzeiten von 42 min auf 48 min, Abstimmung mit dem Filterhersteller erforderlich.
  - Beibehaltung der Filtereinstellungen und Spülzeiten für den Aktivkohlefilter mit 18 min Spülen und 12 min Pause; ggf. Reduzierung der Spülzeiten von 18 min auf 12 bis 15 min und Erhöhung der Pausenzeiten von 12 min auf 15 bis 20 min, Abstimmung mit Filterhersteller erforderlich.
- **Option 2:**
  - $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-basierte Regelung der Ozonzugabe mit einer spezifischen Ozondosis von 0,5 mg Ozon/mg DOC und einem  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwert von 20 bis 27%. Für die genaue Festlegung der spezifischen Ozondosis und des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwerts sind jedoch noch weitere Untersuchungen bzw. Stufenversuche zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen spezifischer Ozondosis, Absorbanzabnahme und Spurenstoffentnahme in der Ozonung erforderlich (siehe dazu Kapitel 9.2).
  - Filtereinstellungen und Spülzeiten analog zu Option 1.

Zudem wird die regelmäßige Überprüfung relevanter Betriebsparameter, Kenngrößen und Abwassereigenschaften empfohlen (vgl. Kapitel Tabelle 43):

- Tägliche Überprüfung der Online-Messwerte und Dokumentation von Störungen und Auffälligkeiten in eine Ereignisliste bzw. in einem Betriebstagebuch. Dabei sind die in Tabelle 43 aufgeführten Parameter besonders relevant. Für die Überprüfung ist mindestens arbeitstäglich eine Stunde erforderlich. Wartungsmaßnahmen, Reinigungsarbeiten, Umbaumaßnahmen, Funktionsüberprüfungen, Testläufe, Sensorfehler, Stillstandzeiten, Anlageausfälle/Abschaltungen (z.B. Stromausfall) und ähnliche Ereignisse sind ebenfalls in das Betriebstagebuch (Ereignisliste) einzutragen.
- Regelmäßige Bestimmung der Summenparameter AFS, CSB, DOC und SAK<sub>254</sub> analog zur Tabelle 42 in Kapitel 8.2; Empfehlung:  $\geq$  dreimal wöchentlich. Insbesondere der DOC ist für die Plausibilisierung und entsprechende Anpassung der Ozonzugabe im PLS essentiell. Die Bestimmung des SAK<sub>254</sub> im Labor der Kläranlage dient als Qualitätssicherung und Plausibilitätskontrolle zu den Messwerten der SAK-

Sonden (siehe hierzu Meier, 2018). Bei der Bestimmung des  $\text{SAK}_{254}$  über eine qualifizierte Stichprobe ist auf eine nahezu zeitlich exakte Probenahme (passend zum Onlinewert) und ordnungsgemäße Probenaufbereitung sowie möglichst kurze Probenlagerung zu achten. Bei der Probenahme sind die hydraulischen Verweilzeiten in den Verfahrensstufen (HRT in der Ozonung) unbedingt zu berücksichtigen.

- Bei zuflussproportionaler Steuerung ist eine regelmäßige Bestimmung von Nitrit im Zulauf und Ablauf der Ozonung erforderlich analog zur Tabelle 42 in Kapitel 8.2; Empfehlung:  $\geq$  dreimal wöchentlich. Anschließend muss eine entsprechende Anpassung der Ozonzugabe im PLS erfolgen. Werden Konzentrationen an Nitrit im Zulauf der Ozonung dauerhaft mit  $\geq 0,3$  mg/l dokumentiert, so sind entsprechende Überprüfungen und Maßnahmen bei der Biologie (z.B. Gebläseeinstellung Belebung) durchzuführen. Ggf. kann für die Ozonung die Nachrüstung einer Nitritsonde ( $\text{NO}_2$ -Analyzer) und die Einbindung der Messwertaufzeichnung in das PLS und in die Steuerung der Ozonzugabe sinnvoll sein. Weiterhin sind bei Bedarf über den Tag verteilte Einzelmessungen an ein bis drei Tagen in der Woche denkbar, um somit genauere Aussagen zum Nitritverhalten im Tagesverlauf zu erhalten (insbesondere in den Wintermonaten sind höhere Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung zu erwarten).
- Regelmäßige manuelle Reinigung, Wartung sowie Kalibrierung der optischen Sonden (SAK, Trübung, Sauerstoff). Optimierung der Reinigungsintervalle in Abstimmung mit Herstellerfirma erforderlich. Hierfür muss noch zukünftig geklärt werden, welche automatisierte Reinigungsart bei den SAK-Sonden dauerhaft zum Einsatz kommen soll (Bürste, Druckluft, Säureeindüsung).
- Regelmäßige (täglich bis wöchentlich) Überprüfung der Messtechnik für die Bestimmung des Gelöstozons (Orbisphere) im Abwasser (z.B. auf Biofilmbildung, Verstopfung, Funktionsfähigkeit des Filters und der Ansaugvorrichtung).
- Regelmäßige Überprüfung der Sandsinkgeschwindigkeiten gemäß Filterherstellereinstellungen. Bei deutlich verminderten Sandsinkgeschwindigkeiten als üblich, sind die Messungen zu wiederholen. Bei gleichen ungewöhnlichen Messergebnissen aus mehreren Messungen ist der Filterhersteller zu kontaktieren.
- Betriebseinstellungen mit Filterhersteller nochmal überprüfen (z.B. Luftzufuhr Mammutheber, Filtergeschwindigkeit, Höhe des Niveauunterschieds zwischen Wasserspiegel Filter und Wasserspiegel Waschzelle); ggf. Waschwassermengen dementsprechend anpassen.
- Dokumentation und regelmäßige Überprüfung (täglich bis wöchentlich) der durchgesetzten Bettvolumina in beiden Filterstraßen (erforderlich zur Abschätzung der Filterstandzeit).
- Regelmäßige Überprüfung und Bewertung der Stromverbräuche und Laufzeiten der einzelnen Anlagenkomponenten der Ozonung und der Filteranlage; Empfehlung: einmal in der Woche. Bei Auffälligkeiten im Vergleich zum Normalbetrieb entsprechende Überprüfungen und Maßnahmen in Abstimmung mit den Herstellerfirmen durchführen.

**Tabelle 43: Überprüfung relevanter Messwerte im PLS anhand einer Checkliste**

| <b>Online-Parameter</b>  | <b>Ozonung / Zulauf vierte Reinigungsstufe</b> |  |
|--|--|--|
|  | Bereich Normalbetrieb                          | auffällig/kritisch*)   |
| Temperatur [°C]  | 8 – 18   | ≤ 5 und ≥ 20   |
| pH-Wert [-]  | 6 – 8,5  | ≤ 6 und ≥ 9  |
| SAK <sub>254</sub> Zulauf Ozonung [1/m]                                      | 5 – 22   | ≤ 3 und ≥ 25   |
| SAK <sub>254</sub> Ablauf Ozonung [1/m]                                      | 5 – 18   | ≤ 3 und ≥ 20   |
| Trübung Zulauf Ozonung [NTU]   | 1 – 30   | ≥ 50, ≤ 0,5  |
| Zufluss Ozonung [l/s]  | 40 – 120                                       | ≤ 20 und ≥ 120   |
| Zufluss Injektor [l/s]   | 5 – 9  | ≤ 2 und ≥ 10   |
| Gasmenge Injektor [Nm <sup>3</sup> /h]                                       | 5 – 14   | ≤ 1 und ≥ 15   |
| cO <sub>3</sub> Zugas [g/Nm <sup>3</sup> ]                                   | i.d.R. 148                                     | Bei Abweichungen mögliche Störung beim Gasfluss oder bei Ozonerzeuger  |
| Ozonproduktion [g/h]   | 500 – 2.700                                    | < 300 Störung bei Ozonerzeuger oder zu niedriger Zufluss zur Ozonung<br>wenn dauerhaft (z.B. > 6 h) > 2.650 g/h<br>Überdosierung, Anlagenbetrieb, Messtechnik, Temperatur Ozongenerator prüfen |
| Druck Ozongenerator [bar]  | i.d.R. 1 bis 1,3                               | ≤ 1  |
| Ozoneintragsgrad [%]   | > 98   | < 98 schlechte Eintrags­effizienz, Indiz für Überdosierung oder Anlagenstörung   |
| spez. Ozoneintrag [mgO <sub>3</sub> /mg DOC]                                 | i.d.R. 0,3 bis 0,8**)                          | < 0,3  |
| Ozoneintrag [g/m <sup>3</sup> ]  | i.d.R. 2 bis 6**)                              | < 2  |
| cO <sub>3</sub> Orbisphere [ppm]; [mg/l]                                     | 0 – 0,05                                       | ≥ 0,1 Indiz für Überdosierung  |
| cO <sub>3</sub> Offgas vor ROV [g/Nm <sup>3</sup> ]                          | 0 – 2  | ≥ 3 Überdosierung möglich und Indiz für hohe Ozonproduktion  |
| cO <sub>3</sub> Offgas nach ROV [ppm]  | 0 – 2  | ≥ 2  |
| Sauerstoff Ablauf Ozonung [mg/l]   | 8 – 20   | ≤ 4  |
| Sauerstoffverbrauch [kg O <sub>2</sub> /d] bzw. Füllstand Sauerstofftank [%] | -  | ≤ 10 %   |
| <b>Online-Parameter</b>  | <b>Sandfilter</b>                              |  |
|  | Bereich Normalbetrieb                          | auffällig/kritisch*)   |
| SAK <sub>254</sub> Ablauf Sandfilter [1/m]                                   | 3 – 15   | ≤ 2 und ≥ 20   |
| Sauerstoff Ablauf Sandfilter [mg/l]  | 8 – 20   | ≤ 4  |
| Filterdruck Sandfilter [mbar]  | 10 – 60  | ≥ 70 und ≤ 6   |
| EBCT [min]   | 14 – 60  | ≤ 14 und ≥ 120   |

| <i>Filtergeschwindigkeit [m/h]</i>                     | 2 – 8                                       | ≥ 8 und ≤ 1                      |
|--|---|----------------------------------|
| <b>Online-Parameter</b>                                | <b>Aktivkohlefilter</b>                     |                                  |
|  | Bereich Normalbetrieb                       | auffällig/kritisch <sup>*)</sup> |
| <i>SAK<sub>254</sub> Ablauf Aktivkohlefilter [1/m]</i> | 2 – 14                                      | ≤ 1 und ≥ 15                     |
| <i>Sauerstoff Ablauf Aktivkohlefilter [mg/l]</i>       | 8 – 20                                      | ≤ 4                              |
| <i>Filterdruck Aktivkohlefilter [mbar]</i>             | 10 – 50                                     | ≥ 60 und ≤ 5                     |
| <i>EBCT [min]</i>                                      | 14 – 60                                     | ≤ 14 und ≥ 120                   |
| <i>Filtergeschwindigkeit [m/h]</i>                     | 2 – 8                                       | ≥ 8 und ≤ 1                      |
| <b>Online-Parameter</b>                                | <b>Gesamt Ablauf vierte Reinigungsstufe</b> |                                  |
|  | Bereich Normalbetrieb                       | auffällig/kritisch <sup>*)</sup> |
| <i>Temperatur [°C]</i>                                 | 8 – 18                                      | ≤ 5 und ≥ 20                     |
| <i>pH-Wert [-]</i>                                     | 6 – 8,5                                     | ≤ 6 und ≥ 9                      |
| <i>Trübung [NTU]</i>                                   | 1 – 30                                      | ≥ 50                             |
| <i>NO<sub>4</sub>-N [mg/l]</i>                         | 0 – 5                                       | ≥ 12                             |
| <i>NO<sub>3</sub>-N [mg/l]</i>                         | 1 – 10                                      | ≥ 12                             |
| <i>PO<sub>4</sub>-P [mg/l]</i>                         | 0 – 2                                       | ≥ 2                              |

<sup>\*)</sup> Abwassereigenschaften auffällig, Online-Messwerte unplausibel (ggf. Sonde/Messtechnik prüfen, kalibrieren, warten oder reinigen) oder mögliche Anlagenstörung sowie Fehler bei der Messwertausgabe; <sup>\*\*)</sup> abhängig vom DOC im Abwasser und der im PLS hinterlegten Berechnung zur Bestimmung der Ozondosis

Eindeutige und dauerhafte Abweichungen vom Normalbereich müssen kritisch geprüft werden. Zeitnah sind Maßnahmen zur Mängelbeseitigung und Fehlerbehebung durchzuführen (auch in Abstimmung mit Herstellerfirmen und Planer). Die Messwertbereiche in Tabelle 43 sind zu diesem Zeitpunkt vorerst als Orientierung und Vorschlag zu verstehen und nicht verbindlich. Bei längeren Betriebserfahrungen bezüglich des Anlagenverhaltens und der Messtechnik sollte diese Liste unbedingt durch das Kläranlagenpersonal individuell und regelmäßig in gewissen Abständen erneuert und angepasst werden.

Unter Berücksichtigung weiterer erforderlicher Untersuchungen (siehe dazu Kapitel 9) könnte für die Zukunft eine Reduzierung der spezifischen Ozondosis bei Umrüstung des bestehenden Sandfilters mit Aktivkohle geprüft werden.

## 9 Weitere Untersuchungen

Weil zwischen Ende 2017 und Ende 2018 noch kein dauerhafter stabiler Anlagenbetrieb gewährleistet werden konnte, wurde der Vergleich der Zustände im Gewässer sowie die Ermittlung estrogener und toxischer Wirkungen auf Fische und Muscheln vor und nach der Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe verschoben. Folgende Untersuchungen stehen noch aus:

- Untersuchung der Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe und Ermittlung sowie Überprüfung des Gesamtwirkungsgrades der Kläranlage durch regelmäßige 24 h oder 48 h-Mischproben an den Probenahmestellen: Ablauf Vorklärung, Zulauf Ozonung, Ablauf Ozonung, Ablauf Aktivkohlefilter und Sandfilter sowie Gesamtablauf Kläranlage (vgl. mit Kapitel 6.1.2). Der Untersuchungsumfang sollte sich dabei an die Routineuntersuchungen analog zur Versuchsphase 1 orientieren (mindestens 1 x wöchentliche Mischprobe). Es wird vorgeschlagen die Anlage nochmal mindestens mehr als ein halbes Jahr durch Probennahme, Analytik und Auswertung zu betreuen und zu unterstützen. Zur Gewährleistung der Interpretierbarkeit der Messwerte ist auf eine ausreichende Anzahl an Messkampagnen zu achten! Es sollten mindestens zwölf Messkampagnen unter Berücksichtigung von Trocken- und Regenwetterbedingungen durchgeführt werden.
- Fischmonitoring mit vierter Reinigungsstufe: Estrogene und toxische Wirkungen gemäß Kapitel 6.10 (vom LfU im 4. Quartal 2019 vorgesehen),
- In vitro Assay mit vierter Reinigungsstufe: Estrogene Wirkung und begleitende Untersuchung von Wasser und Abwasserproben gemäß Kapitel 6.10,
- Muschelschadstoffmonitoring mit vierter Reinigungsstufe gemäß Kapitel 6.10 (vom LfU im 4. Quartal 2019 vorgesehen),
- Belastung mit endokrin aktiven Substanzen gemäß Kapitel 6.13,
- Beprobung Makrozoobenthos und Makrophyten / Phytobenthos im Gewässer gemäß Kapitel 6.14 mit vierter Reinigungsstufe,
- Untersuchung chemischer Basisparameter im Gewässer und Ablauf Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe gemäß Kapitel 6.14.2.
- Untersuchung der Kohleeigenschaften auf chemisch-physikalische Parameter gemäß Kapitel 6.15 und Interpretation der aktuellen und zukünftigen Adsorptionskapazität der verwendeten Aktivkohle bezüglich ermittelter Konzentrationswerte bei den Spurenstoffen sowie bei CSB und DOC (Vergleich Ablauf der Ozonung mit Ablauf Aktivkohlefilter). Es wird empfohlen die gebrauchte Kohle im Sommer 2019 erneut zu untersuchen (vgl. mit den Untersuchungen in Kapitel 6.15). In dem Zusammenhang ist auch zum Zeitpunkt der Kohleuntersuchung die erzielbare Spurenstoffentnahme sowie CSB und DOC Reduktion im Aktivkohlefilter erneut zu bewerten. Dabei sollte die sich verändernde Adsorptionskapazität im Zusammenhang mit der biologischen Aktivierung des Filters untersucht werden. Sowohl die Wirkungsweise als auch die Reinigungsleistung eines biologisch aktivierten Aktivkohlefilters (BAK-Filter) konnten in Weißenburg noch nicht belegt und überprüft werden.
- Untersuchung und vergleichende Bewertung der in Weißenburg hinterlegten Steuer- und Regelstrategien für die Ozonzugabe und Abschätzung der potentiellen Einsparmöglichkeiten (Betriebskosten) durch die Dokumentation und Ermittlung der

Stromverbräuche sowie der produzierten Ozonmengen der verschiedenen Steuer- und Regelstrategien (Vorgaben bei den Anlageneinstellungen z.B. Ozondosis oder Sollwert für  $\Delta\text{SAK}_{254}$  erforderlich).

Weiterhin werden in diesem Kapitel zusätzliche Untersuchungen empfohlen, bei denen die Ergebnisauswertung dazu beitragen kann einen stabilen und wirtschaftlich effizienten Anlagenbetrieb sicherzustellen. Aus wissenschaftlicher Sicht werden ergänzend dazu weitere interessante Forschungsideen und Untersuchungsansätze in Kapitel 9.4 vorgeschlagen.

### 9.1 WEITERE UNTERSUCHUNGEN ZUM ENERGIEBEDARF

Im Rahmen des Pilotvorhabens war der Zeitraum für die Auswertung zuverlässiger Messwerte zu den Stromverbräuchen limitiert. Für weitergehende Aussagen zum Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe und der einzelnen Anlagenkomponenten wird deshalb die Auswertung der Betriebsdaten eines kompletten Jahres mit stabilem Anlagenbetrieb empfohlen.

Zudem war keine exakte Unterscheidung des Stromverbrauchs für die unterschiedlichen Filterstraßen (Sand und Aktivkohle) möglich. Es wird zwar in der Literatur vermutet, dass der spezifische Stromverbrauch einer Aktivkohlefilteranlage höher ist, es gibt hierzu jedoch keine eindeutige Verifizierung. Hier wäre in einem Folgeprojekt eine Nachrüstung der Messtechnik (Protokollierung der Öffnungszeiten und Aufzeichnung der jeweils zugehörigen Luftmenge) wünschenswert, um genauere Aussagen zu bekommen.

Weiterhin sollte untersucht werden, warum der Posten „Sonstiges“ (alle Kleinaggregate unter 1 kW) einen sehr hohen Stromverbrauchsanteil (89 kWh/d) von ca. 17 % am Gesamtstromverbrauch der vierten Reinigungsstufe hat.

Die anfallende Wärmeenergie durch die Ozonanlage beträgt ca. 80 % der eingesetzten elektrischen Energie. Eine Nutzung dieser Wärmemenge ist wünschenswert und sollte im Einzelfall geprüft werden.

### 9.2 ERFORDERLICHE UNTERSUCHUNGEN ZUR ABSORBANZABNAHME IN DER OZONUNG UND ÜBERWACHUNG DES REINIGUNGSZIELS

Wie bereits in Kapitel 5.2.6 beschrieben, eignet sich für eine bedarfsgerechte Ozondosierung und indirekten Überwachung der Spurenstoffentnahme die Regelung nach Absorbanzabnahme bzw.  $\Delta\text{SAK}_{254}$ . Zudem hat die Regelung den Vorteil, dass die Nitritzehrung berücksichtigt wird. Damit kompensiert die Absorbanzabnahme den Einfluss von Nitrit, wodurch eine separate Nitritmessung im Zulauf und Ablauf der Ozonung nicht mehr erforderlich wird.

Um entsprechende  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwerte unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Abwassereigenschaften in Weißenburg vorzugeben, wurde ein Stufenversuch durchgeführt. Für diesen Stufenversuch wurde folgende Vorgehensweise vorgeschlagen (siehe auch Tabelle 44):

- Stufenweise Änderung des  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwert [%]: 25 %, 30 %, 35 %, 40 %, 50 %,
- zeitlich korrespondierende Stichproben zu jedem  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwert: Zulauf Ozonung, Ablauf Ozonung, Ablauf Aktivkohlefilter und Ablauf Sandfilter,

- Einstellung der spezifischen Ozondosis mit 0,6 mg Ozon/mg DOC.

**Tabelle 44: Stufenversuch mit Vorgabe unterschiedlichen  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwerten**

| $\Delta$ SAK <sub>254</sub><br>Sollwert | Datum      | Uhrzeit     | Zeitpunkt<br>Probenahme | Stichproben<br>(Anzahl)  | Untersuchte<br>Parameter  |
|---|------------|-------------|-------------------------|--|---|
| 25 %                                    | 25.09.2018 | 8:00-10:00  | 10:00                   | jeweils vier am Ende jeder<br>$\Delta$ SAK <sub>254</sub> -Phase:<br>Zulauf Ozonung<br>Ablauf Ozonung<br>Ablauf Sandfilter,<br>Ablauf Aktivkohlefilter | Spurenstoffe (zwölf Indikatormaterialien)<br>SAK <sub>254</sub><br>TOC<br>DOC |
| 30 %                                    | 25.09.2018 | 10:00-12:00 | 12:00                   |  |   |
| 35 %                                    | 25.09.2018 | 12:00-14:00 | 14:00                   |  |   |
| 40 %                                    | 25.09.2018 | 14:00-16:00 | 16:00                   |  |   |
| 45 %                                    | 26.09.2018 | 8:00-10:00  | 10:00                   |  |   |
| 50 %                                    | 26.09.2018 | 10:00-12:00 | 12:00                   |  |   |

Für die Auswertung des Stufenversuches konnten nur die Werte bei 25 % und 30 %  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwertvorgabe herangezogen werden. Eine Erhöhung des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwerts auf über 35 % war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Eine Erhöhung des  $\Delta$ SAK<sub>254</sub> von 25 % auf 30 % Prozent führte zu einer minimalen Erhöhung der mittleren Spurenstoffelimination in der Ozonung um knapp drei Prozent (siehe Abbildung 143). Auffällig hierbei war, dass die gemessenen SAK-Werte der Onlinesonden im Zulauf der Ozonung stark von den gemessenen Laborwerten abweichen (ca. 23 %). Daraus resultiert eine andere Absorbanzabnahme in der Ozonung (vgl. Abbildung 143). Bei den anderen Probenahmestellen wie Ablauf Ozonung, Ablauf Sandfilter und Aktivkohlefilter können wiederum keine signifikanten Abweichungen (< 10 %) bei den SAK<sub>254</sub>-Werten festgestellt werden (siehe Abbildung 144). Auch in (Meier, 2018) wird empfohlen, dass zur Qualitätssicherung die Messwerte der Sonden regelmäßig mit Messwerten filtrierter Proben (0,45 µm Membranfilter) des UV/VIS-Spektrometers bei 254 nm im Kläranlagenlabor verglichen und entsprechend angepasst werden sollten (z.B. Kalibrierung). Weitere Informationen zum Umgang mit dem SAK und SAK-Sonden sind im Dokument „Erfahrungen mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen“ des VSA zu finden (Meier, 2018)

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem verkürztem Stufenversuch wird vorgeschlagen, dass nach einer erfolgreichen Regleroptimierung ein weiterer Stufenversuch mit unterschiedlichen  $\Delta$ SAK<sub>254</sub>-Sollwertvorgaben durchgeführt werden sollte (in fünf Schritten von 20 % bis 50 %). Voraussetzung hierfür ist die Sicherstellung eines stabilen Anlagenbetriebes und die Funktionsfähigkeit der SAK-Sonden im Zu- und Ablauf der Ozonung. Eine weitere Voraussetzung für einen zuverlässigen Vergleich der Online-Messungen mit den Spurenstoffmessungen und der Bestimmung des SAK<sub>254</sub> im Labor ist eine zeitlich exakt korrespondierende Probenahme, sodass zu dem entsprechenden online dokumentierten Minutenwert

( $\text{SAK}_{254}$ ) auch der Probenahmezeitpunkt zeitlich nahezu übereinstimmt. Dabei sind die jeweiligen hydraulischen Verweilzeiten in den Verfahrensstufen zu beachten. Diese können in Echtzeit über das PLS aufgerufen werden. Proben sind dann zu ziehen, wenn sichergestellt ist, dass kontinuierliche Zuflussbedingungen zur vierten Reinigungsstufe vorliegen und die Verweilzeit in den Verfahrensstufen dementsprechend nicht erheblich variiert. Zudem sollte im Vorfeld geklärt werden, warum zwischen den bisher aufgezeichneten Onlinewerten und den Laborwerten des  $\text{SAK}_{254}$  im Zulauf der Ozonung Abweichungen von bis zu 20 % feststellbar sind. Aufbauend auf zuverlässig ermittelte Absorbanzabnahmen in der Ozonung (Labor bzw. via Sonden) können anschließend Vorgaben für eine  $\Delta\text{SAK}_{254}$  basierte Regelung zur Ozondosierung vorgeschlagen werden.

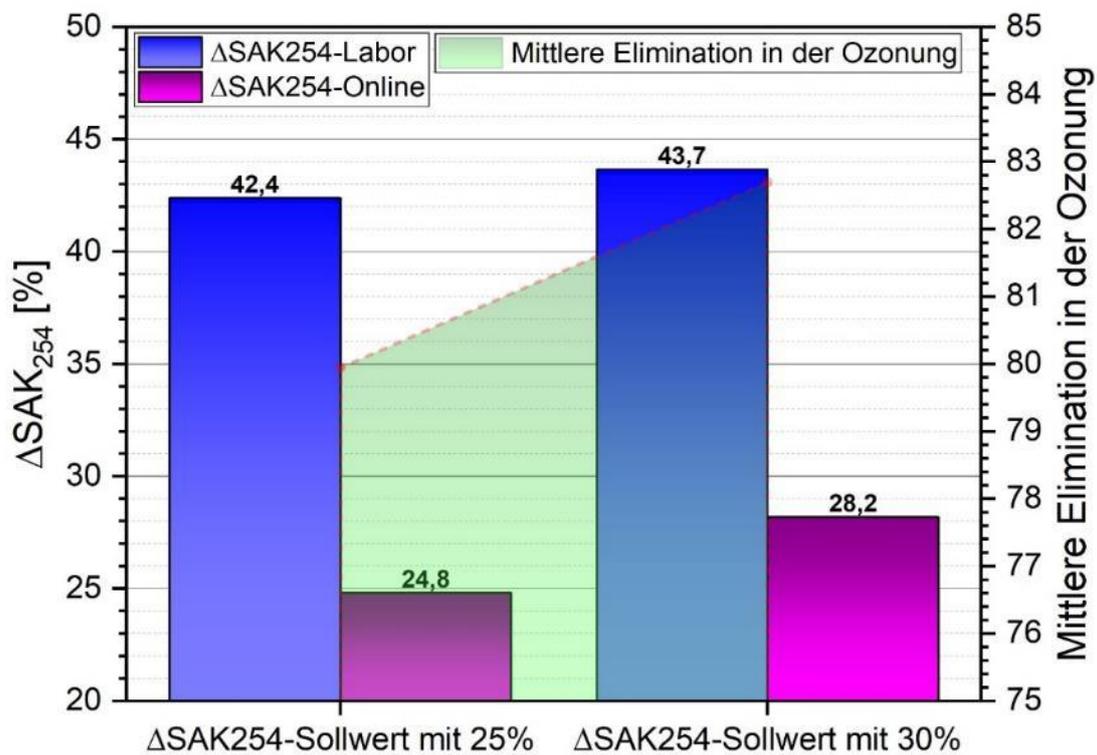
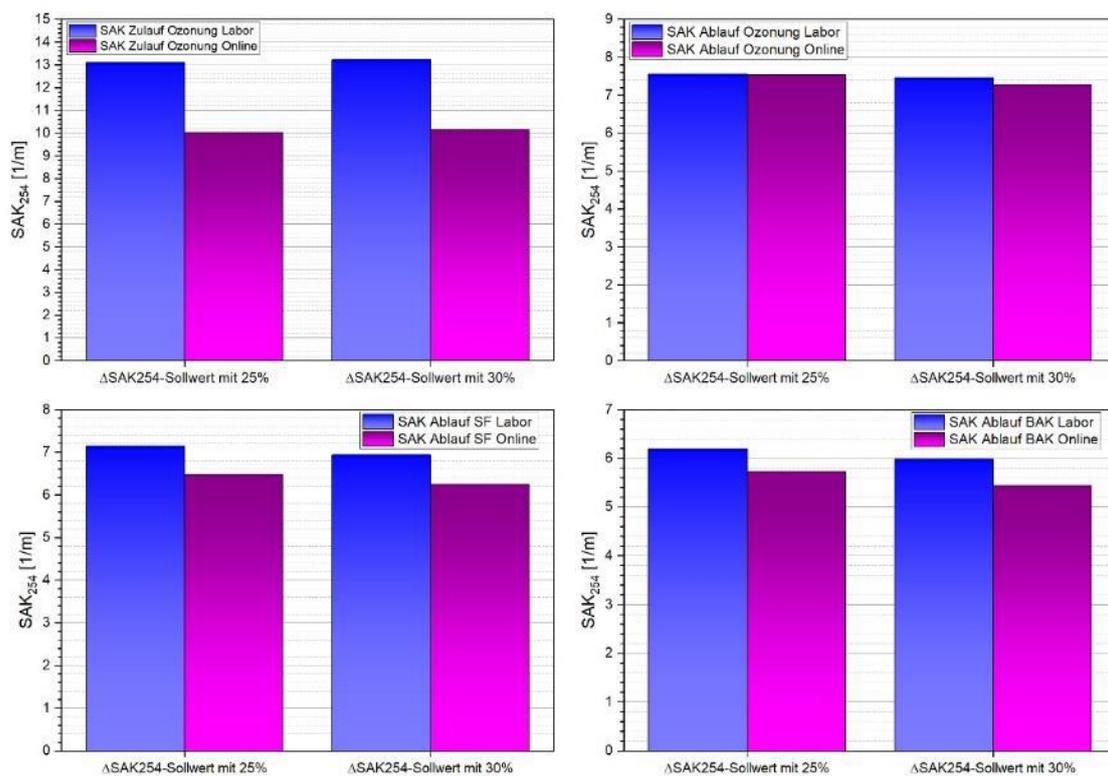


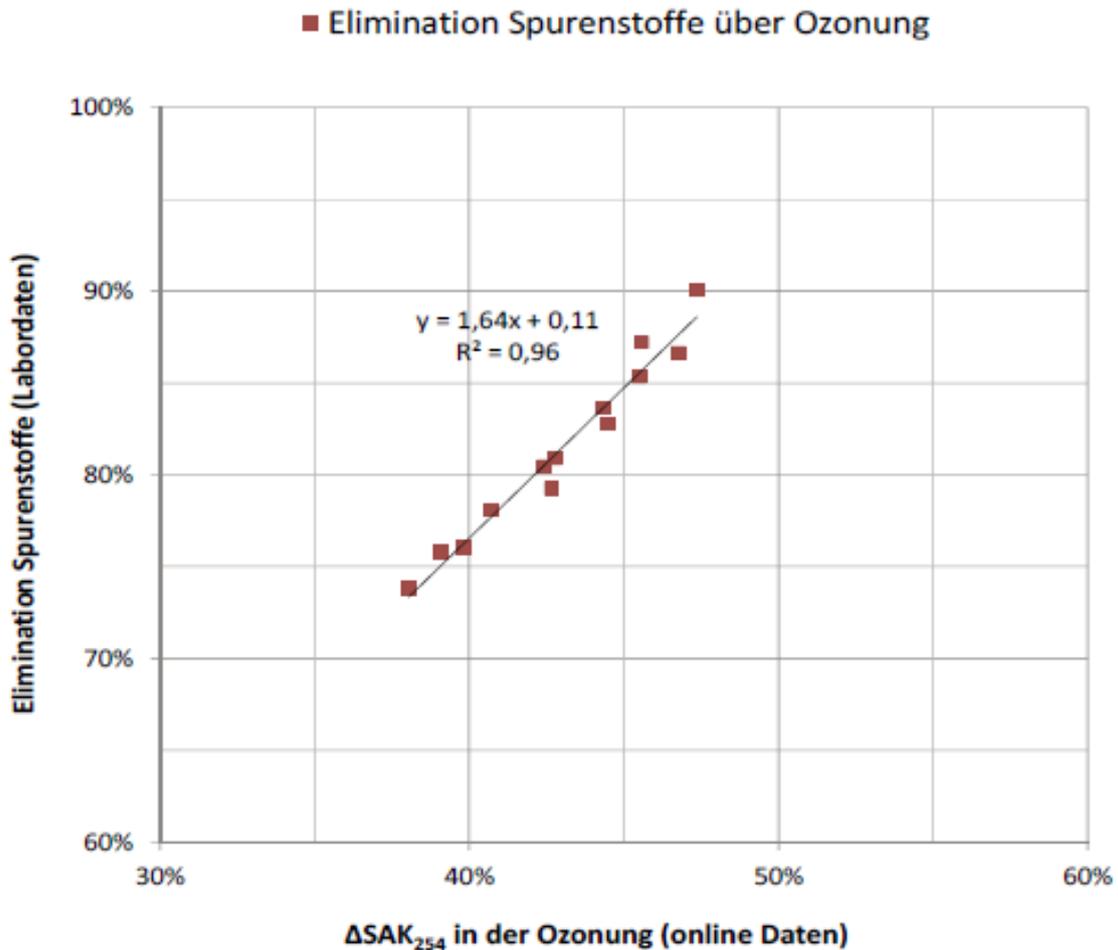
Abbildung 143: Absorbanzabnahme und Spurenstoffelimination in der Ozonung bei unterschiedlichen  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwerten



**Abbildung 144: Vergleich der SAK<sub>254</sub>-Werte aus Labor mit den Onlinemesswerten**

Eine weitere Möglichkeit, um  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwertvorgaben sowie die Korrelation zwischen dem im Labor gemessenen Spurenstoffabbau und dem über die Ozonung online gemessenen  $\Delta\text{SAK}_{254}$  bestimmen zu können, ist ein Stufenversuch bei dem die Ozondosierungen variiert werden. Dabei ist die Messkampagne so durchzuführen, dass bei zuflussproportionaler Steuerung der Ozondosierung die Ozondosis an mehreren Probenahmetagen variiert wird. Um dann die korrespondierende Abbauleistung zu überprüfen, sollen parallel zu den über 24 h gemittelten SAK<sub>254</sub>-Werten (via Onlinesonden) auch die Konzentrationen der ausgewählten Spurenstoffe in 24 h-Mischproben bestimmt werden. Schlussendlich kann dann für jeden Messtag mit unterschiedlicher Ozondosis ein Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme, Spurenstoffelimination sowie erforderlicher Ozondosis hergestellt werden (vgl. Abbildung 144). In einem nächsten Schritt wäre dann zu überprüfen, ob der per Onlinesonden bestimmte  $\Delta\text{SAK}_{254}$  auch zur Überprüfung des Reinigungsziels (bezogen auf die Gesamt-Kläranlage) als Ergänzung zu den Spurenstoffmessungen herangezogen werden kann. Hierzu muss die Messkampagne bei den vorgeschlagenen Stufenversuchen (variierender  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -Sollwert oder variierende Ozondosis) um weitere Probenahmen am Ablauf der Vorklärung und am Gesamtablauf ergänzt werden. Mit den online ermittelten Absorbanzabnahmen und der im Labor ermittelten Spurenstoffentnahme in der Kläranlage kann dann ein Zusammenhang hergestellt und eine Korrelationskurve bestimmt werden. Anhand des in Echtzeit dokumentierten  $\Delta\text{SAK}_{254}$  in der Ozonung kann dann abgeschätzt werden, wie hoch die momentane Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage ist. Da in Weißenburg das Abwasser in der vierten Reinigungsstufe in einem Teilstrom behandelt wird, sind bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Absorbanzabnahme in der Ozonung und Spurenstoffelimination auf der Kläranlage die entsprechenden Zuflussbedingungen zu beachten. Die Durchführung dieser Untersuchung empfiehlt sich daher vorerst unter

Trockenwetterbedingungen (maximaler Trockenwetterzufluss bei 288 m<sup>3</sup>/h) oder wenn weniger als 430 m<sup>3</sup>/h zur vierten Reinigungsstufe fließen. Bei mehr als 430 m<sup>3</sup>/h zur vierten Reinigungsstufe (Bypass bzw. Umfahrung der vierten Reinigungsstufe aktiv) verändern sich die Abwassereigenschaften (da nicht behandelter Abwasserteilstrom) und damit ggf. auch die Korrelation zwischen dem  $\Delta\text{SAK}_{254}$  und der Spurenstoffelimination. Bei bekannten Zuflussbedingungen und der Aufzeichnung der hydraulischen Durchflüsse (Zufluss vierte Reinigungsstufe und Zufluss im Bypass) können die Untersuchungen ebenfalls bei Regenwetterbedingungen wiederholt werden.



**Abbildung 145: Vergleich zwischen dem Abbau der Leitsubstanzen über den Ozonreaktor mit dem online gemessenen  $\Delta\text{SAK}$  bei 254 nm in der Ozonung aus Hubaux et al. (2018)**

Bei erfolgreicher Umsetzung der  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -basierten Regelung zur Ozondosierung ist zudem ein Vergleich der Effizienz, der Wirtschaftlichkeit und der Bedienerfreundlichkeit der Steuer- und Regelstrategien möglich. Mit einem Vergleich zwischen der Ozonzugabe über die Absorbanzabnahme und der zuflussproportionalen Ozondosierung könnten auch die jeweilig erreichbaren Eliminationsraten und Ablaufkonzentrationen gegenübergestellt werden. Weiterhin wären Aussagen zur Ozonproduktion und zur Funktionsfähigkeit sowie Betriebsstabilität der eingesetzten erforderlichen Messtechnik über einen längeren Zeitraum interessant. Damit können auch die anfallenden Betriebskosten bei zuflussproportionaler Steuerung und bei  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -basierter Regelung miteinander verglichen werden, um zukünftig eine geeignete Ozondosierstrategie für Weißenburg festzulegen.

### 9.3 VERHALTEN VON ARB UND ARG IN DEN VERFAHRENSSTUFEN

Anlagen, welche nur auf die Reduktion von anthropogenen Spurenstoffen ausgelegt sind, können nur bei implementierter Ozonung Pathogene, antibiotikaresistente Bakterien (ARB) sowie Resistenzgene (ARG) zusätzlich reduzieren. Die Höhe der Reduktion ist dabei abhängig von der gewählten Ozondosis, der Expositionsdauer (Hembach et al., 2018) sowie der Betriebsweise der Anlage zur Spurenstoffelimination (Teil- oder Vollstromanlage).

Eine Reduktion von ARB und ARG in der Ozonung konnte auch in Weißenburg bestätigt werden. In beiden Filtersystemen ist jedoch aufgrund der biologischen Aktivität ein Aufwuchs von ARB und die Bildung von ARG durchaus möglich. Bei einer Verfahrenskombination mit einer Ozonung und einem biologisch aktiven Filter stellt sich die Frage, wie der Anlagenbetrieb so gefahren werden kann, dass ein Aufwuchs von ARB vermindert und die Bildung von ARG reduziert werden können. Weiterhin wäre zu untersuchen, ob eine Ozonung auf längerfristiger Sicht einen Selektionsvorteil für Bakterienspezies mit verringerter Empfindlichkeit gegenüber Ozon und Antibiotika verschafft.

### 9.4 WEITERE FORSCHUNGSANSÄTZE

Weitere Anreize zu wissenschaftlichen Untersuchungen und weitergehender Forschungsbedarf in Hinblick auf Technologien zur Spurenstoffentfernung ergeben sich zum Beispiel bei folgenden Schwerpunkten:

- Ökobilanzielle Betrachtung von Verfahren zur Spurenstoffelimination (vgl. Mutz et al., 2017),
- Vergleich von Ozoneintragssystemen und Optimierung durch Strömungssimulation,
- Untersuchungen zur Organik und biologischer Aktivität in den Filterstufen,
- Differenzierung zwischen Adsorption und biologischen Abbau in einem Aktivkohlefilter,
- Online-Überwachung der mikrobiologischen Aktivität (Qualität) im Filtratwasser zur Beurteilung der biologischen Abbauprozesse im Filtersystem (Sand/GAK-Filter).

#### 9.4.1 Ökobilanzielle Betrachtung

Neben der Verbesserung des Gewässer- und Ressourcenschutzes bedarf die Einführung bekannter Verfahren zur Spurenstoffelimination zusätzlicher Energie und erzeugt weitere damit verbundene negative Umweltauswirkungen (zum Beispiel Ausstoß von Treibhausgasen). Zwar dient die vierte Reinigungsstufe der Verbesserung der Oberflächengewässer, aber für alle Betriebsmittel, Aggregate (z.B. Pumpen), Materialien und Baustoffe, welche hierfür hergestellt werden und über einen bestimmten Lebenszyklus sich im Einsatz befinden, entstehen Emissionen und Ressourcen werden verbraucht.

Im Zuge einer ganzheitlichen Betrachtung bekannter abwassertechnischer Verfahrenstechniken/Technologien zur Spurenstoffelimination (keine Produkte im eigentlich Sinn) könnten mit einer ökobilanziellen Betrachtung (umweltrelevante Inputs und Outputs, Stoff- und Energieumsätze) mögliche negative Umweltauswirkungen der Verfahren zur Spurenstoffelimination genauer quantifiziert werden (Mutz et al., 2017). Der Erkenntnisgewinn würde somit

auch bei der späteren Verfahrenswahl und der Entscheidungsfindung zur Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Spurenstoffelimination einfließen.

Am Beispiel Weißenburg wäre die Durchführung einer ökobilanziellen Betrachtung durchaus denkbar. Hier liegen die notwendigen Daten für eine Ökobilanz bereits vor. Die Ergebnisauswertung kann dann dazu beitragen anderen Entscheidungsträger bei der Umsetzung von Maßnahmen des Gewässerschutzes zu unterstützen. Zudem ergibt sich anhand der Ergebnisse einer Ökobilanz ein interessanter Diskurs bei dem die Zielvorstellungen des Gewässerschutzes in Konflikt mit den Zielvorstellungen des Klimaschutzes geraten.

#### **9.4.2 Optimierung von Gaseintragssystemen**

Eine energetische Optimierung zum Beispiel wäre auch grundsätzlich durch ein optimales und energieeffizientes Gaseintragssystem möglich. Im Pilotprojekt Weißenburg wurde dieser Gedanke berücksichtigt und in einer Nutzwertanalyse aufgenommen. Dennoch könnte dieses Thema im Zuge weiterer Forschungsarbeiten noch weiter vertieft werden. So spielen die Art (z.B. konstruktive Ausführung und Dimensionen) und der Ort der Gaseinmischung bei Injektorsystemen eine entscheidende Rolle. So könnte unter Anwendung entsprechend erstellter Strömungsmodelle (2-Phasen Modell unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen wie Geometrie und Zuflüsse) eine bessere Beschreibung von Vermischungen (z.B. Quervermischungen in Rohrleitungen, auftretende Strömungsverluste, Interaktionen, Aufbau von Wirbelsystemen) und Ozonkonzentrationsänderungen (Ozoneinbringungsgrad) in solchen Systemen ermöglicht werden. Schlussendlich wären die Aussagen solcher Modelle hilfreich für die Auslegung und konstruktive Gestaltung des Eintragssystems (z.B. Einbau eines statischen Mischers).

#### **9.4.3 Untersuchungen zur Organik und biologischer Aktivität in den Filtern**

Grundsätzlich können zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der biologischen Filtration organische Parameter wie DOC (dissolved organic carbon), BDOC (biodegradable dissolved organic carbon), AOC (assimilable organic carbon) und NOM (natural organic matter) bestimmt werden. Dabei sollten folgende Fragestellungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Filters (nach einer Ozonung) zur Spurenstoffelimination berücksichtigt werden:

- Wie ist der Einfluss der Ozonung (Dosis) auf den Filterbetreib und die Filterstandzeit einzuschätzen? Ist ein effizienterer und längerer Filterbetrieb möglich? Wenn ja, wie? (Adsorption oder biologischer Abbau oder beides?) Welche Zielsubstanzen sind dabei zu betrachten?
- Ist ein Nachweis eines ausgebildeten Biofilms möglich und wie könnte diesbezüglich der Nachweis einer weitergehenden Spurenstoffelimination anhand biologischen Abbaus aussehen?
- Besteht ein Einfluss der Vorozonung auf die organische Hintergrundmatrix (NOM) und die Bioverfügbarkeit sowie die Bildung von BDOC. Was bedeutet das für den Filterbetrieb und wie ist der Einfluss der organischen Hintergrundmatrix (Schwankungen) und der gebildeten Oxidationsnebenprodukte auf die Adsorptionsleistung und die Leistung des biologischen Abbaus zu bewerten.
- Wie wirken sich Schwankungen der organischen Hintergrundmatrix auf die Reinigungsleistung bei Spurenstoffen aus?

- Beeinflussen die Art (Material und Herstellung) und die Eigenschaften (chemisch-physikalische) der Kohle die Spurenstoffelimination im Filter? Und wenn ja, wie? (Affinität, Adsorption/Desorption, Bioregeneration, Porengröße?).

Einen sicheren und online messbaren Summenparameter, der die Entfernungsleistung bezüglich Spurenstoffe in Echtzeit angibt oder sich in einem Schnelltest messen lässt, gibt es jedoch nicht. Zwar ist eine DOC-Messung online möglich, eine genauere Bestimmung des DOC-Gehalts ist aber nur im Labor möglich. Verschiedene labortechnische Methoden zur Bestimmung von organischen Fraktionen werden in Huck (1990), Page und Dillon (2007) sowie Hammes (2008) beschrieben und verglichen.

Parallel zur DOC-Online-Messung sind Probenahmen (Mischproben, wegen tages- und jahreszeitlicher Schwankungen) zur Untersuchung des DOC-Gehaltes sinnvoll. Der Vergleich vom DOC-Gehalt im Zufluss zum Filter, mit dem Gehalt im Abfluss, gibt die Entfernungsrate an. Eine genauere Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit ist jedoch mit der Ermittlung des BDOC-Gehalts oder des AOCs möglich. Konzepte und Untersuchungsmethoden kommen aus dem Trinkwasserbereich und zielen in den meisten Fällen auf die biologische Stabilität des aufbereiteten Trinkwassers und der mikrobiologisch induzierten Wiederverkeimung im Trinkwasserverteilungsnetz ab. Ein direkter Vergleich der AOC-Bestimmungsmethoden findet sich in Hammes (2008). Für einen standardmäßigen Einsatz zur Überwachung des AOC-Gehaltes und der Reinigungsleistung eines Filters wäre ggf. die Eawag-Methode zu empfehlen, da diese teilweise schneller und genauer als die anderen Verfahren ist. Für die Bestimmung des BDOC existieren ebenfalls verschiedene Methoden, welche zum Beispiel in Page und Dillon (2007) beschrieben werden (vgl. Tabelle 46). Eine Übersicht zu AOC- und BDOC-Bestimmungsmethoden ist in Tabelle 47 dargestellt.

Grundsätzlich empfiehlt sich, dass beide Parameter (AOC und BDOC) bestimmt werden, um die biologische Abbauleistung des Filters auch unter dem Einfluss der Ozonung und der Adsorption beurteilen zu können. Nach der Ozonung steigt der biologisch abbaubare Anteil des DOC durch vollständige oder teilweise Oxidation der Stoffe an. Findet im Aktivkohlefilter ein biologischer Abbau statt (BAK-Filter), reduziert sich der biologische Anteil. Weil die AOC-Bestimmung in den meisten Fällen darauf abzielt das Wiederverkeimungspotential zu beurteilen, wäre ein geeigneterer Parameter zur Kontrolle der biologischen Prozesse im Filter der BDOC. Da spezifische Abbautests (via Bioreaktor) relativ teuer und zeitintensiv sind, sollte darüber diskutiert werden, ob die BDOC Bestimmung im Batch-Versuch für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Filters in Weißenburg untersuchungsbegleitend durchgeführt werden kann. Grundsätzlich wäre eine modifizierte Batch-Methode nach Servais et al. (1987), Servais et al. (1989) oder McDowell et al. (2006) möglich. Hierzu kann an den Probenahmestellen Abwasser (Mischproben vor und nach dem Filter) entnommen werden, welches anschließend gefiltert und in einem Batchreaktor inokuliert und inkubiert wird.

**Tabelle 45: Vergleich der AOC Bestimmungsmethoden (Hammes, 2008)**

|   | Dutch standard method  | Dutch method with ATP                     | Werner and Hamsch method  | Eawag Method                              |
|---|--|---|---|---|
| <b>Glassware preparation</b>            | Overnight in acid bath; rinse; 550 °C, 6h                        | Overnight in acid bath; rinse; 550 °C, 6h | 12 h in detergent; rinse with hot water (10X); rinse with deionised water (3X); dry at 100°C (4h) | Overnight in acid bath; rinse; 500 °C, 4h |
| <b>Quenching of oxidation residuals</b> | Optional Thiosulphate  | Optional Thiosulphate                     | Yes Thiosulphate  | Yes NaNO <sub>2</sub>                     |
| <b>Bacterial inactivation/removal</b>   | 70 °C, 30 min  | 70 °C, 30 min                             | 0.22 µm filtration  | 0.22 µm filtration                        |
| <b>Mineral addition</b>                 | Optional   | Yes                                       | Yes   | Optional                                  |
| <b>Inoculation</b>                      | Pseudomonas P17<br>Aquaspirillum NOX                             | Pseudomonas P17<br>Aquaspirillum NOX      | Natural community retrieved from filter   | Pre-cultivated natural community          |
| <b>Incubation time/temperature</b>      | < 14 days; 15 °C   | 2< 14 days; 15 °C                         | 22 °C; 2-4 days until stationary phase is reached   | 3 days; 30 °C                             |
| <b>Measurement</b>                      | Cell concentration (plating)                                     | ATP analysis (luminescence)               | Biomass (Turbidity)   | Cell concentration (flow cytometry)       |
| <b>Conversion factor</b>                | 4.6 × 10 <sup>6</sup> for P17<br>1.2 × 10 <sup>7</sup> for A.NOX | 1.85 fg/cell (P17)<br>0.213 fg/cell (NOX) | (Δ turbidity / turbidity yield*<br>(* = 2.3 ppm/mg/L DOC)   | 1 µg C = 1 × 10 <sup>7</sup> cells        |

**Tabelle 46: BDOC Bestimmungsmethoden (Page und Dillon, 2007)**

| Improvement sought                   | Modification   | Reference  |
|--------------------------------------|--|--|
| Original method                      | Standardised BDOC method based on measurement of DOC | Servais <i>et al.</i> (1987); APHA (1998)              |
| Increase size of measured BDOC pool  | Use of attached bacteria                             | Joret and Levi 1986; Park <i>et al.</i> (2004)         |
|                                      | Increase incubation time                             | McDowell <i>et al.</i> (2006)                          |
| Increased speed                      | Use of attached bacteria                             | Trulleyová and Rulík (2004); Park <i>et al.</i> (2004) |
|                                      | Use of recirculating batch reactor                   | Gimbel and Mälzer (1987); Lucena <i>et al.</i> (1990)  |
|                                      | Use of a plug flow bioreactor                        | Volk <i>et al.</i> (1997)                              |
| Reduction of contamination potential | Pre-filtering of test water                          | Kaplan <i>et al.</i> (1994)                            |

**Tabelle 47: Übersicht über AOC und BDOC Bestimmungsmethoden (Page und Dillon, 2007)**

| BOM measurement method    | Test water pre-treatment | Inoculum   | Temperature (°C) | Culture Type        | Duration   | Test parameter                    | Reference  |
|---------------------------|--------------------------|--|------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|--|
| AOC / cell growth         | Pasteurization           | <i>Pseudomonas fluorescens</i> P-17 / <i>Spirillum</i> NOX | 15               | batch               | 5-25 days  | colony counts or ATP              | van der Kooij <i>et al.</i> (1982a; 1982b); Le Chevallier <i>et al.</i> (1993) |
| AOC / microscopy          | membrane filtration      | <i>Pseudomonas fluorescens</i> P-17 / <i>Spirillum</i> NOX | 20               | batch               | 24 hours   | viable cells                      | Bradford <i>et al.</i> (1994)  |
| Coliform growth response  | membrane filtration      | <i>Enterobacter cloacae</i>                                | 20               | batch               | 5 days     | colony counts                     | Rice <i>et al.</i> (1990)  |
| bacterial growth          | membrane filtration      | Indigenous bacteria  | 20               | batch               | 1-2 days   | turbidity                         | Wemer (1984)   |
| bacterial growth          | membrane filtration      | Indigenous bacteria  | 22               | batch               | 2-5 days   | ATP                               | Stanfield and Jago (1989)  |
| bacterial mortality       | membrane filtration      | Indigenous bacteria  | 20               | batch               | 10-30 days | bacterial abundance and mortality | Servais <i>et al.</i> (1987)   |
| BDOC / suspended bacteria | membrane filtration      | Indigenous bacteria  | 15 – 25          | batch               | 10–30 days | DOC                               | Servais <i>et al.</i> (1987)   |
| BDOC / sand bacteria      | unfiltered               | bacteria on sand filter                                    | 20               | batch               | 2-7 days   | DOC                               | Joret and Levi (1986)  |
| BDOC / batch reactor      | unfiltered               | Indigenous bacteria  | 20               | recirculating batch | 3-5 days   | DOC                               | Gimbel and Mälzer (1987); Frias <i>et al.</i> (1992)                           |
| BDOC / bioreactor         | Glass fibre filtered     | indigenous bacteria  | 10 - 25          | continuous          | 2 hours    | DOC                               | Ribas <i>et al.</i> (1991).  |

Zur Abschätzung des Abbaus möglicher Transformationsnebenprodukte wird eine Charakterisierung des NOM-Gehalts im Abwasser vor und nach der Ozonung empfohlen. Damit kann zum Beispiel der Einfluss des Ozons auf die organischen Substanzen (Einfluss auf Struktur, Polarität und Eigenschaften) dokumentiert werden. Insbesondere mit chromatographischen und spektroskopischen Methoden lassen sich u.a. Aussagen zur Änderung der Molekulargewichtsverteilung (vor und nach der Ozonung oder vor und nach dem Filter) treffen. Zur Charakterisierung von NOM werden nach Page und Dillon (2007) folgende Methoden beschrieben:

- Fraktionierung,
  - Membranfraktionierung,
  - Größenausschluss-Chromatographie (size-exclusion chromatography (SEC)),
- Indirekte Methoden,
  - Fluoreszenzspektroskopie (3D siehe Kornfeind *et al.*, 2015),
  - UV/VIS-Spektroskopie (UV-Absorbanz),
- Direkte Methoden,
  - Analyse der Kohlenhydrate im Wasser,
  - Analyse der Aminosäuren,
- Spezielle Methoden,
  - Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie,
  - Kernspinresonanzspektroskopie.

Eine weitere Übersicht (Vor- und Nachteile) und ausführliche Beschreibungen über die Methoden zur Charakterisierung von NOM finden sich in Matilainen *et al.* (2011) (vgl. Tabelle 48).

Welche Fraktionen des organischen Hintergrunds mit Spurenstoffen bei der AktivkohleadSORPTION im Kläranlagenablauf konkurrieren wurde in Zietzschmann *et al.* (2015b) untersucht. Hier konnte festgestellt werden, dass insbesondere die niedermolekularen Verbindungen des organischen Hintergrunds starke Konkurrenz auf die AktivkohleadSORPTION von Spurenstoffen ausüben. Aufgrund der sehr ausgeprägten Adsorptionskonkurrenz gegenüber den Spurenstoffen, kann davon ausgegangen werden, dass die durch niedermoleku-

lare Stoffe hervorgerufene direkte Konkurrenz um die Aktivkohle-Adsorptionsplätze wesentlich bedeutsamer ist, als die durch höhermolekulare Verbindungen bewirkte Verblockung von Zuleitungsporen (Zietzschmann et al., 2015b). In Zietzschmann et al. (2015a) konnte zudem gezeigt werden, dass Molekülgröße, Hydrophobizität und Aromatizität der gelösten organischen Hintergrundverbindungen kombinatorische Effekte auf die Adsorptionskonkurrenz haben.

Grundsätzlich könnten für Weißenburg regelmäßige Proben (vor und nach der Ozonung bzw. vor und nach dem Filter, ggf. mehrere Stichproben oder Mischproben) in einem ersten Schritt fraktioniert werden. Hierbei empfiehlt sich z.B. eine Trennung mittels HPLC, da diese Methode schnell, sensibel und relativ günstig ist. Somit wären die Proben in niedrig-, mittel- und hochmolekulargewichtige Stoffe eingeteilt. Die getrennten Stoffe könnten dann anschließend mit einer UV/VIS-Spektroskopie charakterisiert werden. In Zusammenhang mit der Bestimmung des DOC und BDOC wären Aussagen über den Einfluss des Ozons sowie über die Bildung von Transformationsprodukten möglich. Darüber hinaus könnten Korrelationseffekte zwischen Spurenstoffabbau und biologischer Aktivität im Filter dokumentiert werden. Durch die Ozonung (abhängig von der Dosis) verursachte Änderungen der Molekulargewichtsverteilung und die damit bedingte Strukturveränderung der Spurenstoffe bzw. Ausgangssubstanzen haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Effektivität des biologischen Abbaus im Filter. Mithilfe der NOM-Charakterisierung und der Kenntnis über die räumliche und zeitliche Variation des DOCs sowie der Änderungen der Moleküleigenschaften ist es ggf. auch möglich die benötigte Ozonmenge für ein vorgegebenes Reinigungsziel abschätzen zu können.

Eine weitere Untersuchungsmöglichkeit zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der biologischen Filtration ist eine Charakterisierung der im Filtermaterial vorhandenen Biomasse. Die Mikroflora im Filter wird vor allem durch die Eigenschaften der Aktivkohle (Poren, chemisch-physikalische Eigenschaften), die Ozondosis, die hydraulische Aufenthaltszeit, die Filtergeschwindigkeit, die Schichthöhe, die Temperatur, die Sauerstoffverfügbarkeit und dem Spülbetrieb beeinflusst. Eine entsprechende Vorgehensweise zur Charakterisierung der Mikroorganismen in einem BAK-Filter wird in Jin et al. (2013) genau beschrieben und könnte auch Untersuchungsgegenstand in Weißenburg sein. Für mögliche Untersuchungen muss aber berücksichtigt werden, dass die Filter in Weißenburg kontinuierlich betriebene Filter sind. Dabei findet eine ständige Umwälzung des Filterbettes statt, sodass Aussagen zur biologischen Aktivität in Abhängigkeit von der Filtertiefe nicht getroffen werden können.

In Jin et al. (2013) wurde der Nachweis eines Biomassewachstums in einem konventionellen BAK-Filter erbracht. Es konnte in Abhängigkeit des verfügbaren Sauerstoffgehalts im Filter eine abnehmende Biomassenkonzentration und eine veränderte Biomasseverteilung (andere Mikroorganismen wie z.B. *Vorticella*, *Epistylis*, *Water bear*, *Litonotus*) mit abnehmender Filtertiefe nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 146). D.h., dass mit abnehmender Filtertiefe auch die Leistungsfähigkeit des biologischen Abbaus abnimmt, während die Adsorptionskapazität tendenziell größer wird.

Für Weißenburg wäre eine Messkampagne denkbar. Hierzu wären für einen bestimmten Zeitraum Entnahmen von Biofilm- und Filtermaterialproben notwendig. Ein Abgleich der vorhandenen Biologie mit der Bestimmung des Sauerstoffgehaltes (gelöst) ermöglicht belastbare Aussagen zu den Wirkmechanismen und den biologischen Abbauprozessen im Filter. Auf Basis möglicher Erkenntnisse wären betriebliche Anpassungen bzw. Optimierungen des Filterbetriebs zur Verbesserung der Reinigungsleistung möglich.

**Tabelle 48: Vor- und Nachteile von Methoden zur NOM-Charakterisierung (Matilainen et al., 2011)**

| Method (references)  | Detected features   | Positive   | Negative  |
|--|---|--|---|
| <i>Spectroscopic methods</i>   |   |  |   |
| Fluorescence (Liu et al., 2007; Seredynska-Sobecka et al., 2007; Spencer et al., 2007; Wu et al., 2007b; Baker et al., 2008; Hudson et al., 2008; Zhang et al., 2008; Bieroza et al., 2009; Peiris et al., 2010) | Molecules of the sample are excited by irradiation at a certain wavelength and the emitted radiation is measured at a different wavelength. Conjugated double bonds and aromatic rings, -OH and -NH <sub>2</sub> enhance fluorescence, while -COOH diminishes. Three major groups: tryptophan-, humic- and fulvic-like fluorophores | Sensitivity, specificity, speed  | Sensitive to chemical environment, e.g. pH  |
| UV-vis (Korshin et al., 1999; Hur et al., 2006; Ates et al., 2007; Spencer et al., 2007; Li et al., 2009; Roccaro and Vagliasindi, 2009)   | Quantitative measurement of all compounds in the sample which adsorb UV-light. Conjugated C-C multiple bonds, aromatic carbon, -COOH and -OH increase adsorption  | Simple and fast, not too sophisticated instrumentation   | Not all of the compounds of NOM can be detected. Wavelength specific adsorption. Under estimation of LMW compounds. Sensitive to chemical environment, e.g. pH and ionic strength |
| FTIR (Kanokkantapong et al., 2006b; Hay and Myneni, 2007; Her et al., 2008a)   | Aromatic and aliphatic hydrocarbon, different bonds and functional groups, e.g. OH in carboxylic and alcoholic groups   | Sample can be measured both in liquid and solid phases, instruments nowadays small, reliable and easy to use                           | Interpretation of the analysis may be difficult because of overlapping of characteristic spectral features due to the complexity and polyfunctionality of NOM                     |
| <sup>1</sup> H NMR (Ma et al., 2001; Kim et al., 2006; Kim and Yu, 2007; Mao et al., 2007a)  | Determine the structure with respect to hydrogen-1 nuclei within the molecules of a substance   | Very sensitive. Powerful tool especially together with <sup>13</sup> C NMR in structural analysis                                      | Interpretation of spectra can be limited  |
| <sup>13</sup> C NMR (Chen et al., 2002; Wong et al., 2002; Mao et al., 2007a,b; Lankes et al., 2008)   | Carboxylic structures of NOM, as well as aliphatic carbon, o-alkyl carbon, aromatic carbon and carbonyl carbon. Can be done both on solid or liquid sample  | Powerful tool especially together with <sup>1</sup> H NMR in structural analysis   | Less sensitive to carbon than <sup>1</sup> H NMR to hydrogen. NOM sample needs to be isolated in solid state NMR measurements. Parameter sensitive                                |
| <sup>15</sup> N NMR (Mao et al., 2007b; Lankes et al., 2008; Thorn and Cox 2009)   | Identifies carbons bonded to nitrogen   | Broader view to NOM structure  | Nuclear quite insensitive, <sup>15</sup> N appears in low percentage in natural nitrogen  |
| 2-D NMR (Deshmukh et al., 2007; Mao et al., 2007a,b)   | Spreads the spectrum in two dimensions and allow the observation of cross peaks. Structural environments of, e.g. carboxyls in detail   | Multidimensional NMR techniques can be used to resolve contributions that overlap strongly in a 1 D NMR experiment                     | Very large molecules may not be detected  |
| <i>Chromatographic methods</i>   |   |  |   |
| HP-SEC (Wu et al., 2007a; Chow et al., 2008; Fabris et al., 2008; Her et al., 2002, 2008b; Zhang et al., 2008, 2009; Korshin et al., 2009)   | Fractionates NOM on basis of molecular sizes of organic compounds present   | Rapid, sensitive, no pre-extraction needed, equipment not too sophisticated or expensive but rather available in research laboratories | Charge effects during measurement (column/NOM, eluent/NOM), choice of detector and proper standards   |
| FIFFF (Moon et al., 2006; Messaud et al., 2009; Alasonati et al., 2010).   | Chromatography like separation technique. Fractionate NOM by size and MWD   | No stationary phase  | Choice of proper standards  |
| <i>Mass spectrometric methods</i>  |   |  |   |
| LC-MS (Reemtsma and These, 2005; Mawhinney et al., 2009)   | Chemical formulae of compounds in NOM   | ESI is a soft ionisation technique   | Dependent on chemical properties of the analyte. Not so sensitive to all of the species (e.g. with HMW). Matrix effects   |
| FTICR MS (Reemtsma et al., 2006, 2008; Stenson, 2008; Kunenkov et al., 2009; Reemtsma, 2009)   | Molecular species, exact masses and molecular formulae of compounds on NOM  | The full scale of molecular complexity of NOM has been revealed. Can be combined with SEC or RPHPLC                                    | Data interpretation is difficult, because of complexity of NOM  |
| GC-MS (Templier et al., 2005; Parsi et al., 2007)  | Structural and molecular properties of compounds in NOM   | Sensitive, specific, quick   | Unwanted thermal reactions. Data interpretation is difficult, because of complexity of NOM  |
| <i>Bulk parameters</i>   |   |  |   |
| TOC (Koprivnjak et al., 2006; Liu et al., 2007; Seredynska-Sobecka et al., 2007; Spencer et al., 2007)   | Total organic carbon content in water   | Easy to use, analytical equipment not too expensive. Can be used as on-line method   | Give only information on quantity of NOM, not quality   |
| DOC (Koprivnjak et al., 2006; Liu et al., 2007; Seredynska-Sobecka et al., 2007; Spencer et al., 2007)   | Dissolved organic carbon in water, after filtration through 0.45 µm filter  |  |   |
| SUVA (Edzwald and Tobiason 1999; Archer and Singer, 2006; Bose and Reckhow, 2007; Ates et al., 2007; Jung and Son, 2008; Wei et al., 2008)   | High SUVA-value >4 refers to hydrophobic, aromatic compounds, while low SUVA <3 indicates mainly hydrophilic material   | Easy to determine, analytical equipments not too sophisticated   | High nitrate content in low DOC waters may interfere the measurement  |

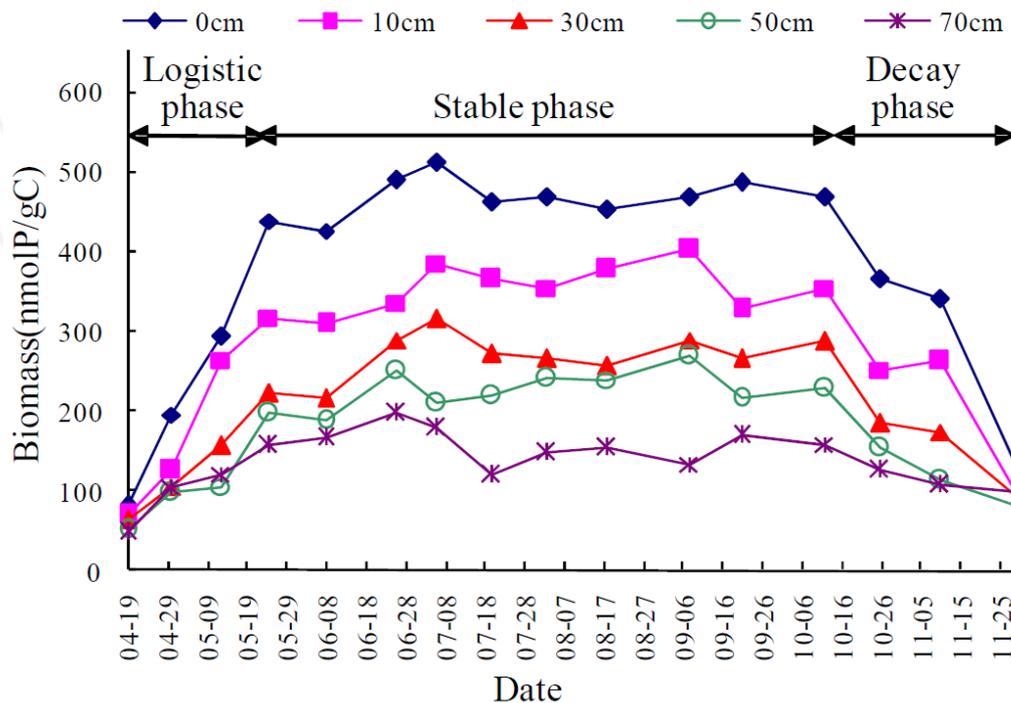


Abbildung 146: Zeitabhängige Veränderung der Biomasse in unterschiedlichen Filtertiefen eines BAK-Filters aus Jin et al. (2013)

#### 9.4.4 Untersuchungen zur qualitativen Differenzierung zwischen Adsorption und biologischen Abbau

Bekannt ist, dass für die Spurenstoffelimination in einem Filter sowohl Adsorption als auch biologischer Abbau, elektrostatische Wechselwirkungen und auch das Desorptionsverhalten der Spurenstoffe am Filtermaterial verantwortlich sind (Benstöm, 2017). Welchen Anteil diese Prozesse an der weiteren Elimination haben, ist teilweise noch unklar. Im Folgenden werden einigen Untersuchungen vorgestellt, welcher dieser Thematik nachgehen. Solche Untersuchungen wären auch als mögliche Begleituntersuchungen in Weißenburg denkbar.

Für eine generelle Unterscheidung der Prozesse in einem Filter kann z.B. auf Kümmel und Worch (1990) verwiesen werden, welche die Gesamtentnahme organischer Stoffe in einem biologischen Aktivkohlefilter in das Zusammenspiel der folgenden drei Mechanismen einteilen:

- Adsorption,
- Direkte biologische Degradation im Biofilm an der Oberfläche der Adsorbierkörper,
- Bioregeneration des Adsorbiers durch Abbau der adsorbierten Stoffe.

Um Aussagen über die Rolle von Adsorption und biologischen Abbau treffen zu können, wurden entsprechende Untersuchungen u.a. in Australien durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Batchversuche zur Bestimmung des Adsorptionsverhaltens und des biologischen Abbaus mit biologisch aktivierter Aktivkohle aus dem South Caboolture Water Reclamation Plant sowie mit frischer GAK durchgeführt. Die Durchführung der Laborversuche wird in Rattier et al. (2012a) und Rattier et al. (2013) beschrieben. Um zwischen biologischen Abbau und Adsorption zu unterscheiden, wurde einem GAK- und einem BAK-Filter  $\text{NaN}_3$  zugegeben. Eine ähnliche Vorgehensweise zur Vermeidung biologischer Aktivität wird in Kaastrup und Halmo (1989) sowie in Nishijima und Speitel (2004) beschrieben.

Grundsätzlich konnte bei den Versuchen in Australien bestätigt werden, dass eine mikrobielle Kolonisierung eines GAK-Filters nach dessen Erschöpfung durchaus möglich und abhängig von der Porengrößenverteilung ist. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der durchschnittliche Eliminationsgrad durch BAK sich durch die Inhibierung von  $72 \pm 15 \%$  auf  $59 \pm 20 \%$  reduzierte. Auch eine Verringerung der DOC-Elimination von bis zu 39 % durch Inhibierung der Biomasse macht deutlich, dass der biologische Abbau im Filter über einen längeren Zeitraum Einfluss auf die Reinigungsleistung hat. Die Ergebnisse in Rattier et al. (2012a) zeigen aber auch, dass eine klare qualitative Differenzierung zwischen Adsorption und biologischen Abbau nicht möglich sind und Aussagen über den biologischen Abbau von gut adsorbieren Substanzen (wie z.B. Citalopram, Atenolol, Roxithromycin, Metoprolol) kaum möglich sind. Auch weil sich gezeigt hat, dass trotz Inhibierung mit Natriumazid, Zellatmung gemessen werden konnte.

Ein quantitativer Berechnungsansatz zur Bestimmung des Anteils der Adsorption und des biologischen Abbaus von DOC und BDOC findet sich Jin et al. (2013). Hier wurden zwei halbtechnische vorozonierte Filtersysteme (BAK; BCF = bio-chemical Filter) miteinander verglichen, wobei ein Filtersystem (BCF) ausschließlich nur über biologischen Abbau bestimmt war. Das Prinzip der Methode besteht darin, dass der gelöste Sauerstoff (dissolved oxygen = DO) vor und nach dem Filterdurchgang gemessen wird. Aus diesen Werten werden anschließend Rückschlüsse auf die biologische Aktivität im Filter gezogen. Je aktiver die Mikroorganismen sind, desto mehr organische Stoffe werden abgebaut und dementsprechend steigt der Sauerstoffbedarf der aeroben Bakterien an. Durch Probenahmen an den obersten Filterschichten und Bestimmung des Verlaufes des Sauerstoffverbrauchs über die Filtertiefe und der anschließenden Ableitung der biologischen Aktivität konnte für die Entfernung von DOC und BDOC kann der Anteil der Adsorption und des biologischen Abbaus ermittelt werden. Die Vorgehensweise zur Quantifizierung der Reduktion von organischer Substanz über Adsorption oder biologischen Abbau ist in Abbildung 147 dargestellt.

Lesage et al. (2013) entwickelte ein mathematisches Modell, dass die Dynamik der Konzentration für bestimmte Stoffe in fester, flüssiger und gasförmiger Phase beschreibt. Das mit Matlab erstellte Modell beinhaltet Prozesse wie Zellatmung, Adsorption und Desorption, sowie das Gas- Flüssiggleichgewicht in porösen Medien. Die Adsorptionskinetiken und Isothermen von bestimmten Stoffen an GAK (z.B. Toluene, Naphthalene) wurden in einem Batchsystem ermittelt. Der Sauerstoffverbrauch während des biologischen Abbaus ausgewählter Stoffe wurde in einem Respirometer (Sapromat®) ermittelt. Zusammen aus der Bioabbaukinetik und dem Adsorptionsmodell wurde ein dynamisches Modell entwickelt, um die Entfernung von Stoffen im BAK-Prozess zu simulieren. U.a. wurde festgestellt, dass adsorbierte Stoffe im BAK-Filter biologisch abgebaut werden können, sodass die Adsorptionskapazität des Filters beeinflusst werden kann. Eine Antwort auf das Zusammenwirken von Adsorption und biologischem Abbau wurde aber auch in diesem Versuch nicht gegeben.

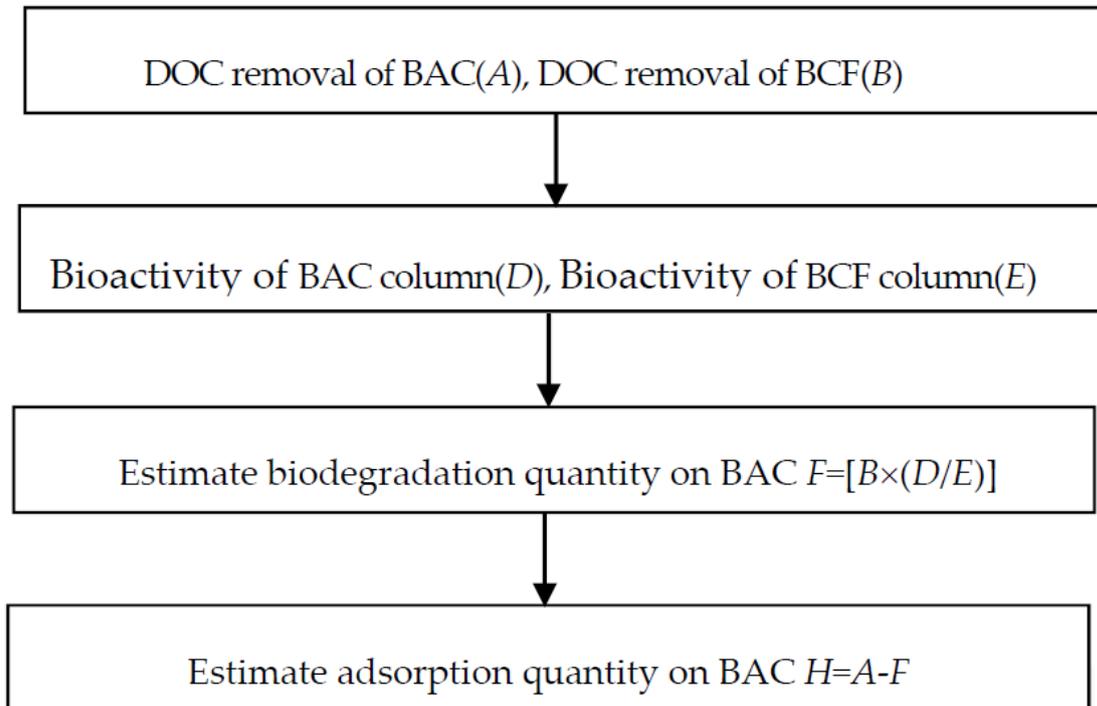


Abbildung 147: Quantification of the removal of organic matters by adsorption and biodegradation (Jin et al., 2013)

#### 9.4.5 Online-Überwachung der biologischen Aktivität in Filtersystemen

Grundsätzlich bieten Durchfluss-Zytometer die Möglichkeit zur Online-Überwachung der mikrobiellen Zellzahl im Trinkwasser. Hierzu werden Mikroorganismen vor der Messung mit einem fluoreszierenden Farbstoff markiert. Die Zellen bzw. Partikel werden anschließend aufgrund ihres Streulichts bzw. ihrer Fluoreszenz detektiert. Entsprechend der Struktur, Form und auch Färbung der Zellen werden unterschiedliche Effekte generiert. Dadurch können bestimmte Eigenschaften der Zelle abgeleitet werden.

Eine Untersuchung von gereinigtem Abwassers aus einem biologisch aktiven Filtersystem (z.B. BAK- oder Sandfilter) zur Bestimmung der Zellzahl und des Größenverhältnisses der Zellen wäre durchaus denkbar. Mit den Ergebnissen wären auch Aussagen zu Abhängigkeiten, Korrelationen und Wechselwirkungen mit anderen variierenden Parametern und Prozessgrößen möglich. Die Beeinflussbarkeit der biologischen Aktivität im Filtersystem und die daraus resultierenden Abbauraten für Spurenstoffe und Transformationsprodukte könnten zum Beispiel anhand folgenden Einflussfaktoren genauer beschrieben werden:

- Filtergeschwindigkeit,
- Kontaktzeit (EBCT),
- Spülbetrieb/Spülintervalle,
- Temperatur,
- Sauerstoffgehalt im Filter,
- Kohleeigenschaften.

Damit wären Aussagen über die Betriebsführung von Filtern zur Spurenstoffelimination (in Abhängigkeit vom gewünschten Reinigungsziel) möglich. Dies hätte wiederum Einfluss auf die Gestaltung der Betriebsführung einer vorgeschalteten Ozonungsstufe (insbesondere Ozondosierung).

## 10 Zusammenfassung

### *Hintergrund und Veranlassung*

Viele anthropogene Spurenstoffe wie z.B. Arzneimittel können aufgrund ihrer teilweise schlechten biologischen Abbaubarkeit in der konventionellen Abwasserreinigung nicht ausreichend eliminiert werden. Kommunale Kläranlagen sind für viele anthropogenen Spurenstoffe ein wesentlicher Eintragspfad in den Wasserkreislauf. Zudem haben insbesondere Arzneimittel, wie z.B. das Schmerzmittel Diclofenac negative Auswirkungen auf die aquatische Umwelt. Um anthropogene Spurenstoffe gezielt aus dem Abwasser zu reduzieren, sind weitere Verfahrenstechniken (sog. vierte Reinigungsstufe) notwendig.

Die Stadt Weißenburg hat im Zuge eines Pilotprojektes mit Förderung des Freistaates Bayern auf der Kläranlage Weißenburg (Ausbaugröße 35.000 EW) eine großtechnische Anlage zur Elimination von Spurenstoffen errichtet. Träger des Vorhabens ist die Stadt Weißenburg. Die Planung und ingenieurtechnische Umsetzung wurde vom Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner durchgeführt. Das Vorhaben wurde im Auftrag des LfU ingenieurtechnisch und wissenschaftlich durch die Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft begleitet. Das begleitende Untersuchungsprogramm wurde vom LfU durchgeführt.

### *Zielsetzung*

Das Pilotprojekt in Weißenburg startete im Mai 2014 mit dem Ziel praktische Erkenntnisse zu Bemessung, Betrieb und der Leistungsfähigkeit sowie zu den wichtigsten Prozessparametern einer großtechnischen vierten Reinigungsstufe zu gewinnen. Weitere wesentliche Zielsetzungen in diesem Pilotvorhaben sind die Auswirkungen der vierten Reinigungsstufe auf die Zustände im Gewässer vor und nach der Inbetriebnahme zu untersuchen. Um eine chemische, ökotoxikologische und mikrobiologische Bewertung des aufnehmenden Gewässers sowie des Kläranlagenzu- und -ablaufs vor und nach der Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe vorzunehmen, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm erstellt.

Für das Pilotprojekt in Weißenburg soll nach dem emissionsbasierten Ansatz eine Eliminationsrate von 80 % (bezogen auf den Gesamtablauf zu Ablauf Vorklärung der Kläranlage) für ausgewählte Indikatorsubstanzen (Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Tolyltriazol und Venlafaxin) erreicht werden. Die angestrebte Spurenstoffentnahme von 80 % soll bei einem Zufluss von  $\leq 430 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $430 \text{ m}^3/\text{h} \triangleq$  dem 1,5-fachen des maximalen Trockenwetterzuflusses) zur vierten Reinigungsstufe erreicht werden.

### *Bestandsaufnahme und Messungen auf der Kläranlage vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe*

Die Abwasserbehandlung der Kläranlage Weißenburg erfolgt in einer mechanisch-biologisch-chemischen Kläranlage. Die bestehende Verfahrenstechnik umfasst Rechen, Langsandfang, Vorklärbecken, Tropfkörper, Zwischenklärung, Belebungsbecken und Nachklärbecken. Die aktuelle Belastung der Kläranlage beträgt rund 25.600 EW. Der Trockenwetterabfluss beträgt bis zu  $288 \text{ m}^3/\text{h}$  und der Mischwasserabfluss zur Kläranlage bis

zu 972 m<sup>3</sup>/h. Die Auswertung der Standardabwasserparameter (CSB, BSB<sub>5</sub>, N<sub>ges</sub>, NH<sub>4</sub>-N, und P<sub>ges</sub>) zu Beginn des Pilotvorhabens ergab, dass alle Überwachungswerte eingehalten werden.

Für die Planung und Errichtung der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg und zur Erhöhung der Planungssicherheit wurden umfangreiche Untersuchungen und Erhebungen durchgeführt. Neben der Erfassung aller notwendigen Basisdaten und bemessungs- sowie projektrelevanten Informationen (Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse) wurden noch zusätzliche Voruntersuchungen durchgeführt:

Es wurde ein Spurenstoffscreening (Ist-Zustand) zur Ermittlung der Belastung der Kläranlage und des Gewässers durchgeführt. Die gemessenen Spurenstoffkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Weißenburg bewegen sich in einer durchschnittlichen Größenordnung, wie sie bei kommunalen Kläranlagen aus anderen Untersuchungen bekannt sind. Fast alle festgelegten Indikatorsubstanzen konnten nachgewiesen werden (außer Mecoprop), wobei das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol stellenweise eine auffällig hohe Konzentration im Ablauf der Kläranlage Weißenburg aufwies. Bei den Indikatorsubstanzen lag die mittlere Elimination der untersuchten Substanzen in der Kläranlage bei 23 % (Mecoprop nicht nachweisbar).

Neben Spurenstoffen wurden auch die Konzentrationen an endokrin wirksamen Substanzen in der Kläranlage gemessen. Im Zulauf der Kläranlage Weißenburg schwankt die Konzentration von endokrin aktiven Substanzen relativ stark im Bereich von 10 bis 80 ng/l EEQ. Im Ablauf der Kläranlage wurden vor Errichtung der vierten Reinigungsstufe Konzentration zwischen < 5 und 20 ng/l EEQ gemessen. Untersuchungen von hormonellen Wirkungen an Fischen zeigten estrogene Aktivität oberhalb und unterhalb der Kläranlage sowie im Ablauf der Kläranlage und im Gewässer (Schwäbische Rezat). Die estrogene Aktivität im Kläranlagenablauf war geringer als in 50 % der bisher in Bayern untersuchten Kläranlagenabläufe. Im Kläranlagenablauf ist eine höhere estrogene Aktivität im Vergleich zu den Probenahmestellen oberhalb und unterhalb der Kläranlage vorhanden. Zusätzlich zu den Einträgen von Arzneimittelwirkstoffen ist die Kläranlage somit auch als Haupteintragspfad von hormonellen Substanzen zu sehen. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass bei Muscheln im Kläranlagenablauf höhere Konzentrationen an bioakkumulierende Substanzen (insbesondere die Duftstoffe OTNE und HHCb) gemessen wurden als bei entsprechenden Vergleichsproben oder den Poolproben oberhalb/unterhalb der Kläranlage.

Die Belastung mit Fäkalindikatorbakterien im Zulauf der Kläranlage Weißenburg lag in einer für Kläranlagen üblichen Größenordnung und wies nur mäßige Unterschiede auf. Im Ablauf wurden wesentlich größere Konzentrationsschwankungen festgestellt (z.B. bei E. coli und Enterokokken). Dies führte zu deutlichen Unterschieden in den Reduktionsraten während der konventionellen Abwasserreinigung, die für E. coli und Enterokokken zwischen 2 und 4 Zehnerpotenzen, für Clostridium perfringens zwischen 1,5 und 2,5 Zehnerpotenzen lagen. Unterhalb der Kläranlageneinleitung kam es immer zu einem Anstieg der Bakterienkonzentrationen. Dass dieser Anstieg auf die Einleitung der Kläranlage Weißenburg zurückzuführen war, konnte an der enormen Zunahme der Konzentration humanbürtiger DNA-Marker bestätigt werden.

Vor Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe wurden nach der konventionellen Abwasserreinigung (mechanische und biologische Stufen, Ablauf Nachklärbecken) ca. 90 bis

99 % (1-2 log-Stufen) der bakteriellen Biomasse und der untersuchten Antibiotikaresistenzgene (ARG) aus dem Abwasser entfernt.

### *Verfahrenskonzept in Weißenburg*

Im Zuge der Planungsphase wurden auf Grundlage der Erkenntnisse aus Literatur und Forschung die Vorteile der Verfahrenskombination Ozonung mit einer Aktivkohleadsorption oder einer biologisch aktiven Filterstufe in der Variantenuntersuchung mit Kostenvergleichsrechnung vom Planer berücksichtigt.

Durch die Verfahrenskombination wird im Vergleich zu einer einzelnen Verfahrensstufe ein breiteres Spektrum an Spurenstoffen entfernt und eine höhere Spurenstoffentnahme erreicht. Zudem sind Synergieeffekte wie Filterstandzeitverlängerung oder Reduzierung der Ozondosis möglich. Auf Basis der Ergebnisse der Vorplanung wurde daher in Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber beschlossen, die Variante Ozonung + biologisch aktivierter GAK Filter und Sandfilter (zweistraßig, parallel) umzusetzen. Mit der Verfahrenskombination hat man sich auch einen höheren Erkenntnisgewinn im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung versprochen.

Für die Anlage zur Spurenstoffelimination in Weißenburg wurde aus wirtschaftlichen Gründen eine Teilstrombehandlung ausgewählt. Für die Auslegung der vierten Reinigungsstufe wurden die 2 h-Mittelwerte (Auslaufmessung Nachklärung) für die Jahre 2011 bis 2013 (2015) herangezogen und daraus ein Bemessungszufluss von 430 m<sup>3</sup>/h ermittelt. Mit dem gewählten Bemessungszufluss können rund 86 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden. Die minimale hydraulische Verweilzeit im Ozonreaktor ( $V = 144 \text{ m}^3$ ) wurde mit 20 min gewählt. Die maximale Produktionsleistung des Ozongenerators wurde mit 2,7 kg/h ermittelt. Beide Filter wurden mit einer maximalen Filtergeschwindigkeit von 8 m/h und einem maximalen Zufluss von 60 l/s ausgelegt. Die minimale Kontaktzeit (EBCT) beträgt in beiden Filtern ca. 14 min.

### *Voruntersuchungen während der Planung*

Um Aussagen zum Verhalten von Ozon im vorgereinigtem Abwasser, zur OH-Radikal-Ausbeute sowie zur Bildung von toxischen Nebenprodukten treffen zu können, wurde ein Testverfahren zur Ozonierbarkeit des Weißenburger Abwassers durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Laborversuchen haben gezeigt, dass keine auffälligen Werte identifiziert wurden, welche die Implementierung einer Ozonung auf der Kläranlage Weißenburg grundsätzlich ausschließen.

Zur konstruktiven Optimierung des Ozonreaktors wurden die Strömungs- und Durchmischungsverhältnisse hydraulisch modelliert. Aus mehreren Optimierungsvarianten mit veränderter Anordnung der Trenn- und Leitwände im Ozonreaktor wurde für die bauliche Ausführung eine Variante gewählt, bei der die Durchmischung, die Strömungsverhältnisse und die Aufenthaltszeiten am besten waren.

Als Eintragungssysteme für das Ozon kommen grundsätzlich Injektor, Diffusor und Radial-Diffusor in Betracht. In Weißenburg wurde das Pumpe-Injektorsystem aus Gründen der Betriebsführung sowie Betriebs- und Arbeitssicherheit gewählt. Zudem ist beim Pumpe-Injektorsystem eine Mindestgasbeaufschlagung nicht erforderlich.

Wichtige Kriterien bei der Auswahl eines geeigneten Aktivkohleproduktes für die Filterstraße in Weißenburg waren Wirtschaftlichkeit, breite Eliminationsleistung, Abriebfestigkeit sowie Eignung für den Einsatz in kontinuierlich betriebenen Filtern.

Im Zuge der Planungsphase in Weißenburg wurden folgende Voruntersuchungen durchgeführt (Rödel et al., 2017):

- Spurenstoffscreening im Gewässer und am Kläranlagenzulauf und -ablauf sowie Ermittlung der Reinigungsleistung der Kläranlage.
- Für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens und zur Erhöhung der Planungssicherheit sind unter Berücksichtigung der Zielvorgaben Pilotversuche, Testverfahren zur Ozonierbarkeit, Schnelltests zur Auswahl eines geeigneten Aktivkohleproduktes für GAK-Filter (z.B. Rapid-Small-Scale-Column-Tests) und Simulationsberechnungen (zum Beispiel für Ozonreaktor) hilfreich. Das Testverfahren zur Ozonierbarkeit gibt Aufschluss, ob es je nach Abwassereigenschaften zur Bildung von Nebenprodukten (zum Beispiel Bromat) oder auch zu erhöhten Betriebskosten bzw. Ozondosen durch ozonzehrende Inhaltsstoffe (zum Beispiel Nitrit) kommt.

### *Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb*

Die Inbetriebnahme der Anlage zur Spurenstoffelimination bestehend aus einer Ozonung mit einer nachgeschalteten zweistraßigen kontinuierlich betriebenen Filtration (paralleler Betrieb von Sandfilter und Aktivkohlefilter) erfolgte im Oktober 2017.

Bis Juni 2018 wurde vorwiegend eine spezifische Ozondosis von 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC gewählt. Um den Einfluss einer höheren Ozondosis auf die Spurenstoffelimination und Absorbanzabnahme zu untersuchen, wurde die Ozonanlage in den darauf folgenden Monaten mit einer spezifischen Ozondosis von 0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC gefahren.

Ein stabiler Anlagenbetrieb konnte im Rahmen des Pilotvorhabens während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase nur zeitweise erzielt werden. Gründe hierfür waren u.a.:

- Mängelbeseitigung bei Anlagentechnik und einzelnen Anlagenkomponenten,
- Verbesserungen bei der Messtechnik sowie beim Datenreport (unplausible Messwerte, da zunächst keine Trübungskompensation bei den SAK-Sonden),
- hohe Nitritkonzentrationen im Zulauf der Ozonung mit erhöhter Ozonzehrung und damit verminderte Spurenstoffentnahme (da zunächst keine Nitritkorrektur bei der zuflussproportionalen Steuerung der Ozondosierung hinterlegt war),
- Verbesserungen bei der Ozonung bezüglich der Offgaslimitierung und beim Restozonvernichter (vorzeitige Erschöpfung des Katalysators),
- Behebung von Phasenwächterstörungen bei der Ozonung (Auslösezeit bei den Phasenwächtern war zu empfindlich eingestellt und wurde angepasst).

Im Untersuchungszeitraum von November 2017 bis September 2018 wurden verschiedene Optimierungspotentiale bei Anlagen- und Messtechnik identifiziert. Hier wurde auch die Funktionsfähigkeit der Anlagen- und Messtechnik getestet und dokumentiert. Es wurden Verbesserungen und Optimierungen bei folgenden Anlagenkomponenten und Messgeräten durchgeführt:

- Ermittlung und Berücksichtigung von Korrekturfaktoren für eine bedarfsgerechte Ozondosierung bei zuflussproportionaler Steuerung der Ozonzugabe (Implementierung Regenwetterdämpfung und Nitritkorrektur),

- Optimierung der Förderleistung der Zulaufpumpen zur Ozonanlage durch bauliche Maßnahmen (Modifikation des Zulaufrohrs in den Ozonreaktor auf Grundlage einer zweiten Strömungssimulation),
- Optimierung der Produktionsleistung des Ozongenerators,
- Integrierung einer automatisierten, regelmäßigen Vergleichsmessung aller SAK-Sonden, um Abweichungen und Fehler rechtzeitig zu erkennen und zu beheben,
- Optimierungen bei der Messtechnik, vor allem bei den SAK-Sonden (z.B. Optimierung Reinigung, Berücksichtigung der Trübungskompensation, Vergrößerung Messspalt und Versetzung der Probenwasserentnahmestelle),
- Optimierung der Anlageneinstellungen zur Verminderung der Stillstandszeiten (Anpassung und Optimierung der Offgaslimitierung, Herstellung der Funktionsfähigkeit des Restozonvernichters, Anpassung der Phasenwächtereinstellungen),
- Optimierung der Spüleinstellungen bei Sandfilter und Aktivkohlefilter.

Durch die Umsetzung der o.g. Optimierungsmaßnahmen und Reduzierung der Stillstandszeiten konnte zum Ende des Pilotvorhabens ein weitgehend stabiler Anlagenbetrieb erreicht werden. Daher ist es wichtig bei künftigen Projekten ausreichend Zeit von 1 bis 2 Jahren für die Inbetriebnahme- und Optimierungsphase vorzusehen.

### *Ergebnisse aus der Untersuchungsphase*

In Hinblick auf die Reinigungsleistung in der vierten Reinigungsstufe ist die Kombination von Ozonung mit einer nachgeschalteten Adsorptionsstufe erwartungsgemäß am wirksamsten. Hier konnte eine gemittelte Elimination der zwölf Indikatorsubstanzen von rund 92 % erreicht werden. Die gemittelte Eliminationsrate bezüglich der Indikatorsubstanzen für die Ozonung mit anschließender Sandfiltration liegt für die betrachteten acht Probenahmetage zwischen 76,1 und 89,8 %. Die gemittelte Eliminationsrate der Ozonung liegt im Bereich von 73,7 % bis 89,5 %. Insbesondere für Carbamazepin und Diclofenac weist die Ozonung als alleinige Verfahrensstufe hohe Eliminationsraten im Mittel von mehr als 95 % auf. Für Benzotriazol beträgt die Elimination in der Ozonung im Mittel 67,2 %. Zudem zeigen die Ergebnisse der Spurenstoffmessungen, dass eine höhere spezifische Ozondosis (0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC im Vergleich zu 0,6 mg O<sub>3</sub>/mg DOC) zu einer verbesserten Eliminationsleistung insbesondere in der Ozonung führte. Der nachgeschaltete Sandfilter bewirkt für Benzotriazol keine zusätzliche Konzentrationsverringerung. Vor allem Benzotriazol, Metoprolol und Tolyltriazol werden allein im Aktivkohlefilter nach der Ozonung im Mittel nochmal bis zu mehr als 85 % eliminiert. Eine deutliche zusätzliche Reduktion im GAK-Filter konnte auch für die Stoffe Irbesartan (im Mittel um 71 %) und Candesartan (im Mittel um 48 %) beobachtet werden. Clarithromycin wurde in der vierten Reinigungsstufe am geringsten eliminiert. Die Eliminationsrate für Clarithromycin beträgt bei der Ozonung mit Sandfilter und bei der Ozonung mit Aktivkohlefilter im Mittel zwischen 64 % und 65 %. Sowohl die Wirkungsweise als auch die Spurenstoffentnahme eines biologisch aktivierten Aktivkohlefilters (BAK-Filter) konnten in Weißenburg bisher noch nicht belegt und überprüft werden.

Seit der Inbetriebnahme (Oktober 2017) der vierten Reinigungsstufe bis November 2018 wurden im Aktivkohlefilter ca. 19.500 Bettvolumina und im Sandfilter ca. 22.400 Bettvolumina (konische Anteil beim Sandfilter wird nicht aktiv durchflossen) durchgesetzt. Im Herbst 2018 konnten seit Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe kein signifikanter Rückgang der Adsorptionsleistung des Aktivkohlefilters hinsichtlich der Spurenstoffentnahme sowie

keine Veränderung der Korngrößenverteilung bei der Aktivkohle festgestellt werden. Es konnte aber im Frühjahr/Sommer 2018 im Vergleich zu Beginn der Inbetriebnahme eine Verminderung der Adsorptionswirkung des Aktivkohlefilters beim DOC und CSB beobachtet werden. Dies bestätigt sich durch die dokumentierte geringe Beladung (via Jodadsorption) der Aktivkohle im Vergleich zur Frischkohle.

Bei Trockenwetterbedingungen (maximaler Trockenwetterzufluss bei 288 m<sup>3</sup>/h) oder Zuflüssen zur vierten Reinigungsstufe ≤ 430 m<sup>3</sup>/h, bei stabilem Anlagenbetrieb mit einer gewählten spezifischen Ozondosis von 0,7 bis 0,8 mg O<sub>3</sub>/mg DOC (spezifischer Ozoneintrag muss ≥ 0,6 mg Ozon/mg DOC sein) und bei der derzeitigen adsorptiven Entnahmewirkung des Aktivkohlefilters kann gegenwärtig eine Gesamteliminationsrate der Indikatorsubstanzen in der Kläranlage Weißenburg von bis zu 90 % erreicht werden.

In Weißenburg ergibt sich eine rechnerische Gesamtreduktion von 80 % in der Kläranlage bei einer Eliminationsrate in der vierten Reinigungsstufe von 80 % bzw. 90 % und einem Zufluss zur Kläranlage von bis zu 458 m<sup>3</sup>/h bzw. 516 m<sup>3</sup>/h. Die vierte Reinigungsstufe in Weißenburg ist jedoch so ausgelegt, dass etwa 86 % der Jahresabwassermenge behandelt werden können. Damit ergibt sich eine rechnerische Gesamtreduktion in der Kläranlage von 75 % bzw. 82 % im Jahresdurchschnitt.

In der vierten Reinigungsstufe können zusätzlich organische Stoffe (z.B. DOC, CSB) sowie Feststoffe reduziert werden. Dabei ist die zusätzliche Entfernung mit Aktivkohlefilter bisher deutlich besser als im Sandfilter.

Für Weißenburg bestätigte sich zudem ein Zusammenhang von  $\Delta\text{SAK}_{254}$  mit den Abbauraten der Spurenstoffe. Zur Anwendung der  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -basierten Regelung in Weißenburg sind jedoch weitere Messreihen bzw. Stufenversuche und eine Vergleichskontrolle des  $\text{SAK}_{254}$  durch Labormessungen notwendig, um zuverlässige Grundlagen für eine  $\Delta\text{SAK}_{254}$ -basierte Regelung zur Ozondosierung zu ermitteln.

In Weißenburg wurde festgestellt, dass Verfahren und Verfahrenskombinationen, welche nur auf die Reduktion von anthropogenen Spurenstoffen in einer Teilstrombehandlung ausgelegt sind, nur teilweise Pathogene/Keime, antibiotikaresistente Bakterien (ARB) sowie Antibiotikaresistenzgene (ARG) zusätzlich reduzieren können. Eine effektive Reduktion von Bakterien, Keimen sowie ARB und ARG bedarf einer Vollstrombehandlung.

Es konnten zwei Untersuchungen zur Reduktion der Fäkalindikatorbakterien durch die vierte Reinigungsstufe durchgeführt werden. Bei Anlagenbetrieb ohne Stillstandszeiten konnten die Parameter *E. coli* und Enterokokken durch die Ozonbehandlung auf Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (38 MPN/100 ml) reduziert werden (Einzelmessung). Dies entspricht einer Reduktionsrate von etwa 4 log-Stufen für *E. coli* und 2,7 log-Stufen für Enterokokken. Die Werte blieben auch nach Aktivkohlefilter und Sandfilter unterhalb bzw. an der Bestimmungsgrenze. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der fäkalen Belastung bezogen auf die gesamte Kläranlage bei einer Teilstrombehandlung des Abwassers nicht zu erwarten ist.

Eine teilweise Reduktion abwasserrelevanter Krankheitserreger in der Ozonung konnte anhand einer einmaligen Untersuchung unter ungünstigen Randbedingungen erkannt werden (insbesondere für *Campylobacter* und F-spez. RNA-Bakteriophagen).

Die Reduktion von ARB und ARG in der vierten Reinigungsstufe ist größtenteils nur in der Ozonung festgestellt worden. Dabei konnte eine ARG-Reduktion um 1,5 - 2 log-Stufen gemessen werden (Einzelmessung). Die anschließende Filtration über einen Sandfilter bzw.

Aktivkohlefilter hatte keinen weiteren Effekt auf das Vorkommen der Resistenzgene im Ablauf. Zudem wurde in einer einmaligen Untersuchung festgestellt, dass ARB in der mechanisch-biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage Weißenburg bis zu 99,5 % reduziert wurden. Die anschließende Ozonung reduzierte die Lebendzellzahl nochmal deutlich. Beide Filterstraßen nach der Ozonung bewirken keine zusätzliche Reduktion von ARB.

Eine signifikante Reduktion der endokrinen Aktivität fand während der konventionellen biologischen Reinigung auf der Kläranlage statt (ca. 70-90 %). Zur Beurteilung der Reduktion der endokrinen Aktivität durch die Ozonung und die Filtersysteme sind weitere Untersuchungen notwendig, da die bisherigen Messungen aufgrund der teilweise aufgetretenen Stillstandszeiten bei der Ozonanlage nur Tendenzen aufzeigen.

Die Untersuchungen zum Gewässerzustand (Makrozoobenthos und Makrophyten & Phytobenthos) sowie zu den estrogenen und toxischen Wirkungen auf aquatische Lebewesen (Fisch- und Muschelmonitoring) nach Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe stehen noch aus. Vorgesehen sind Untersuchungen in 2019 und 2020.

### *Kosten und Energie*

Basierend auf den Unterlagen und Daten aus der Entwurfsplanung wurde zu Beginn des Pilotvorhabens für die geplante vierte Reinigungsstufe ein spezifischer Stromverbrauch von ca. 13,35 kWh/(E•a) bzw. 0,126 kWh/m<sup>3</sup> abgeschätzt (Prognosewert). Nach ca. fast einem Jahr Betrieb wurden die Laufzeiten und Stromverbräuche der einzelnen Anlagenkomponenten ausgewertet. Der gemessene Stromverbrauch der vierten Reinigungsstufe liegt nach Umsetzung einiger Optimierungsmaßnahmen insgesamt mit ca. 0,12 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 8,4 kWh/(E•a) im günstigen Bereich im Vergleich zu anderen Anlagen zur Spurenstoffelimination und ist niedriger als der geschätzte spezifische Stromverbrauch. Für die Ozonung in Weißenburg wurden im Mittel 0,06 und maximal 0,075 kWh/m<sup>3</sup> gemessen. Für die Filterstufe liegt der Verbrauch bei 0,03 kWh/m<sup>3</sup> ebenfalls sehr günstig. Größter Stromverbraucher ist die Ozonung mit 52 %. Die Kompressorenanlage der Filter liegt bei 21 %. Das Zulaufpumpwerk liegt bei 9 % (Zwischenpumpwerk war während der Projektlaufzeit nicht in Betrieb). Der Rest verteilt sich auf die Probenahmepumpen und den Posten Sonstiges. Die anfallende Wärmeerzeugung durch die die Ozonanlage beträgt ca. 80 % der eingesetzten elektrischen Energie.

Die Investitionskosten der Pilotanlage zur Spurenstoffelimination in Weißenburg belaufen sich auf ca. 3,7 Millionen Euro (brutto, inkl. Nebenkosten). Die spezifischen Jahreskosten liegen mit 18 Cent pro m<sup>3</sup> bzw. 15 Euro pro Einwohner und Jahr im Rahmen der geschätzten Kostenangaben aus der Literatur. Bei den Kostenbetrachtungen muss berücksichtigt werden, dass aufgrund des wissenschaftlichen Pilotcharakters der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg und der damit verbundenen zusätzlichen Mess- und Anlagentechnik leicht höhere Investitionskosten angefallen sind. Hinzu kommen die Baupreissteigerungen der letzten Jahre. Eine weitere Optimierung des Energieverbrauchs und Betriebsmitteleinsatzes ist vor allem im Bereich der Ozonanlage (Optimierung Steuerung/Regelung Ozondosierung, Wärmenutzung), bei den Filterlaufzeiten und bei dem Posten „Sonstiges“ (alle Kleinaggregate unter 1 kW) möglich. Dadurch können die Betriebskosten gesenkt werden.

### *Ausblick und Empfehlungen für das weitere Vorgehen*

Nach ca. einem Jahr Optimierungsphase wurde ein Zustand erreicht, die es dem Betreiber ermöglicht die Anlage betriebssicher weiterzutreiben. Weitere Verbesserungen sind noch möglich. Hierzu werden zusätzliche Untersuchungen, Versuche und Messkampagnen über die Dauer von mehr als einem halben Jahr empfohlen. Zur Belastbarkeit der Messwerte ist auf eine ausreichende Anzahl an Messkampagnen zu achten. Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen muss der Zusammenhang zwischen Absorbanzabnahme und der Spurenstoffentnahme in der vierten Reinigungsstufe und bezogen auf die gesamte Kläranlage sein.

Zur Einstellung eines dauerhaft sicheren Betriebes muss das Verhalten der Anlagen- und Messtechnik weiter überprüft werden. Optimierungspotenziale bestehen insbesondere bei den optischen Messgeräten, der Ozonanlage (Vermeidung von Stillstandzeiten) sowie bei der Steuerung/Regelung der Ozondosierung. Zudem können noch keine belastbaren Aussagen zum zukünftigen und langfristigen Adsorptionsverhalten sowie zu einer möglichen Standzeitverlängerung des Aktivkohlefilters getroffen werden, da die Adsorptionskapazität des Aktivkohlefilters zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erschöpft ist. Dies ist aber notwendig, um mittel- und langfristig eine effektive und effiziente Betriebsweise (z.B. für die Ozondosierung) in Abhängigkeit vom Reinigungsziel umzusetzen.

Inwieweit sich die vorgesehene Betriebsweise des Aktivkohlefilters als BAK-Filter im Hinblick auf die Reinigungsleistung auch langfristig, als vorteilhaft herausstellt, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Gleiches gilt für eine mögliche Nachrüstung der Sandfilterstraße mit Aktivkohle.

Die untersuchte Verfahrenskombination ist technisch und wirtschaftlich umsetzbar. Zudem konnte belegt werden, dass die Kombination aus Ozonung mit nachgeschalteter Aktivkohlefiltration (GAK-Stufe), im Vergleich zu den Einzelverfahren, deutlich höhere Reduktionsraten bei Spurenstoffen, CSB und DOC erzielen kann.

## 11 Literaturverzeichnis

Abegglen, Christian; Escher, Beate; Hollender, Juliane; Koepke, Stephan; Ort, Christoph; Siegrist, Hansruedi et al. (2009): Ozonung von gereinigtem Abwasser. Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Hg. v. Eawag und BAFU.

Abegglen, Christian; Siegrist, Hansruedi (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern (Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210 S.).

Alexander, Johannes; Bollmann, Anna; Seitz, Wolfram; Schwartz, Thomas (2015): Microbiological characterization of aquatic microbiomes targeting taxonomical marker genes and antibiotic resistance genes of opportunistic bacteria. In: *The Science of the total environment* 512-513, S. 316–325.

Alexander, Johannes; Knopp, Gregor; Dötsch, Andreas; Wieland, Arne; Schwartz, Thomas (2016): Ozone treatment of conditioned wastewater selects antibiotic resistance genes, opportunistic bacteria, and induce strong population shifts. In: *The Science of the total environment* 559, S. 103–112.

Altmann, Johannes; Massa, Lukas; Sperlich, Alexander; Gnirss, Regina; Jekel, Martin (2016): UV254 absorbance as real-time monitoring and control parameter for micropollutant removal in advanced wastewater treatment with powdered activated carbon. In: *Water Research* 94, S. 240–245.

Altmann, Johannes; Sperlich, Alexander; Jekel, Martin (2015): Überwachung der Spurenstoffentfernung einer adsorptiven Reinigungsstufe mittels UV254-Messungen. In: *Vom Wasser* 113 (2), S. 47–49.

Arge (2013): Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren. Abschlussbericht zur Phase 2 der Arbeitsgemeinschaft Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6 (Arge), Vergabenummer 08-058/1. gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV). Hg. v. MKULNV.

Austermann-Haun, U.; Meier, J. F.; Nahrstedt, A.; Sikorski, D.; Kuhlmann, S.; Alt, K. (2017): Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Detmold mittels der Kombination von Ozon mit nachgeschalteter Aktivkohlefiltration. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Hochschule Ostwestfalen-Lippe, IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH und Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH. Detmold.

Bahr, C.; Schumacher, J.; Ernst, M.; Luck, F.; Heinzmann, B.; Jekel, M. (2007): SUVA as control parameter for the effective ozonation of organic pollutants in secondary effluent. In: *Water Science & Technology* 55 (12), S. 267–274.

Barjenbruch, Matthias; Firk, Wolfgang; Peter-Fröhlich, Anton (2014): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61 (10), S. 861–875.

- Benstöm, Frank (2017): Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V (Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, 246).
- Benstöm, Frank; Nahrstedt, Andreas; Böhler, Marc; Knopp, Gregor; Montag, David; Siegrist, Hansruedi; Pinnekamp, Johannes (2016): Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen. Ein Überblick über halb- und großtechnische Untersuchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (4), S. 276–289.
- Bleisteiner, Stefan (2017): Pilotprojekt Weißenburg - Anlass und Zielsetzung. 8. Treffen des Arbeitskreises Mikroverunreinigungen. Umweltcluster Bayern. Weißenburg, 24.10.2017.
- Bleisteiner, Stefan; Sengl, Manfred; Rödel, Sascha (2016): Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg. In: *Tagungsband der 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 02.03.-04.03.2016 in Essen*, 53/1-53/8.
- Boere, J.A. (1992): Combined Use of Ozone and Granular Activated Carbon (GAC) in Potable Water Treatment; Effects on GAC Quality After Reactivation. In: *Ozone: Science & Engineering* 14 (2), S. 123–137.
- Böhler, M.; Blunski, M.; Czekalski, N.; Fleiner, J.; Kienle, C.; Langer, M. et al. (2017a): Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung - ReTREAT. Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt (Bafu) im Rahmen eines Projektes der Technologieförderung. Hg. v. Eawag. Dübendorf.
- Böhler, M.; Wittmer, A.; Heisele, A.; Wohlhauser, A.; Salhi, L.; Gunten, U. von et al. (2013): Berichterstattung - Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der Ara Neugut. Vertrags-Nr.: 08.0020.PJ / K402-0205; Projekt 85336. Hg. v. Eawag und Bundesamt für Umwelt (BAFU). Dübendorf, Bern.
- Böhler, Marc; Fleiner, Julian; McArdeall, Christa; Teichler, Rebekka; Siegrist, Hansruedi; Kienle, Cornelia et al. (2017b): Projekt ReTREAT - Untersuchungen zu Verfahren für die biologische Nachbehandlung nach Ozonung. In: *Aqua & Gas* (5), S. 54–63.
- Bolle, Friedrich-Wilhelm; Pinnekamp, Johannes (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I. Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J. Hg. v. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen und Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen. Aachen.
- Bolong, N.; Ismail, A. F.; Salim, M. R.; Matsuura, T. (2009): A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. In: *Desalination* 239 (1-3), S. 229–246.
- Brandenburg, Heinz; Benstöm, Frank; Hartenberger, Manuel (2018): Umbau einer Kölner BIOFOR®-Filtrationsanlage zur 4. Reinigungsstufe. Fachtagung Arzneimittel und Mikroschadstoffe in Gewässern vom 18. und 19. Juni 2018 in Düsseldorf. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW; MKULNV. Düsseldorf, 19.06.2018.
- Cauci, Serena; Karkman, Antti; Cacace, Damiano; Rybicki, Marcus; Timpel, Patrick; Voolaid, Veiko et al. (2016): Seasonality of antibiotic prescriptions for outpatients and resistance genes in sewers and wastewater treatment plant outflow. In: *FEMS microbiology ecology* 92 (5), fiw060.

- Chon, Kangmin; Salhi, Elisabeth; Gunten, Urs von (2015): Combination of UV absorbance and electron donating capacity to assess degradation of micropollutants and formation of bromate during ozonation of wastewater effluents. In: *Water Research* 81, S. 388–397.
- Crittenden, John C.; Berrigan, John K.; Hand, David W. (1986): Design of Rapid Small-Scale Adsorption Tests for a Constant Diffusivity. In: *Journal of the Water Pollution Control Federation* 58 (4), S. 312–319.
- Crittenden, John C.; Reddy, Parimi Sanjay; Arora, Harish; Trynoski, John; Hand, David W.; Perrman, David L.; Summers, R. Scott (1991): Predicting GAC Performance With Rapid Small-Scale Column Tests. In: *American Water Works Association* 83 (1), S. 77–87.
- Czekalski, Nadine (2015): Eliminierung von antibiotikaresistenten Bakterien aus behandeltem Abwasser durch Ozonung. VSA/Peak-Kurs. Eawag. VSA; Eawag. Dübendorf, 19.06.2015.
- Czekalski, Nadine; Berthold, Tom; Caucci, Serena; Egli, Andrea; Bürgmann, Helmut (2012): Increased levels of multiresistant bacteria and resistance genes after wastewater treatment and their dissemination into lake Geneva, Switzerland. In: *Frontiers in microbiology* 3, S. 106.
- Czekalski, Nadine; Imminger, Stefanie; Salhi, Elisabeth; Veljkovic, Marjan; Kleffel, Karolin; Drissner, David et al. (2016): Inactivation of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes by Ozone: From Laboratory Experiments to Full-Scale Wastewater Treatment. In: *Environmental science & technology* 50 (21), S. 11862–11871.
- Diel, Matthias; Sack, Andreas (2018): Einsatz von kontinuierlich durchströmten Sandfiltern bei der Spurenstoffelimination. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* Modernisierungsreport 2018/19 (11), S. 49–52.
- Dussert, B.W.; Tramposch, W. G. (1996): Impact of Support Media and Properties on the Biological Treatment of Drinking Water. In: *Advances in slow sand and alternative biological filtration (editors: Graham, Nigel and Collins, Robin)*, S. 167–176.
- DWA (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). 8. überarb. Aufl. Hennef: DWA.
- DWA (2014): Bedeutung von Transformationsprodukten für den Wasserkreislauf. [Stand:] August 2014. Hennef: DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (4/2014).
- DWA (2015): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen. Stand: April 2015. Hennef: DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (T3/2015).
- DWA (2018): Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung. Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte. Entwurf zum Themenband - DWA KA-8.6 „Aktivkohle“. Hg. v. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef.
- Eawag (2009): Anthropogene Spurenstoffe im Wasser, Effekte – Risiken – Massnahmen. In: *Eawag News* (67d).

- Eberhardt, M.; Madsen, S.; Sontheimer, H. (1974): Untersuchungen zur Verwendung biologisch arbeitender Aktivkohlefilter bei der Trinkwasseraufbereitung. Hg. v. Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe und Stadtwerke Bremen AG. Karlsruhe (Veröffentlichungen des Bereichs und des Lehrstuhls für Wasserchemie, Heft 7).
- Egerland, Benjamin; Weingartner, Andreas (2017): Online-Messtechnik steuert vierte Reinigungsstufen. Online-Messtechnik zur Überwachung und Steuerung von vierten Reinigungsstufen in Abwasserreinigungsanlagen. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* (4), S. 14–18.
- DWA Arbeitsblatt A 216, Dezember 2015: Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen.
- Eßlinger, Marc (2017): Erfolgskontrolle 4. Reinigungsstufe – Probenahme und Ziele. Weissenburg, 24.07.2017.
- Fleiner, Julian; Wittmer, Anita; Siegrist, Hansruedi; Böhler, Marc; McArdeil, Christa; Teichler, Rebekka et al. (2015): Ozonung ARA Neugut, Dübendorf - Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung. UTF-Projekt-Nr.: 358.38.10/IDM 2006.2423.308. Hg. v. Eawag. Dübendorf.
- Fundneider, T.; Wick, A.; Grund, H.; Lackner, S. (2018): Spurenstoffmonitoring von Kläranlagen – Entwicklung und Validierung einer Methode zur Erstellung von Wochen-Mischproben. In: *Spurenstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf (SUK 2018)*, 23. – 24. Oktober 2018, Frankfurt am Main, S. 54–55.
- Gerhardt, A.; Bühler, C.; Hofer, M. (2013): Biomonitoring in der kommunalen Abwasserreinigung. In: *Aqua & Gas* (7/8), S. 58–62.
- Gerrity, Daniel; Gamage, Sujanie; Jones, Darryl; Korshin, Gregory V.; Lee, Yunho; Pissarenko, Aleksey et al. (2012): Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminant oxidation and microbial inactivation during ozonation. In: *Water Research* 46 (19), S. 6257–6272.
- Gerrity, Daniel; Owens-Bennett, Emily; Venezia, Teresa; Stanford, Benjamin D.; Plumlee, Megan H.; Debroux, Jean; Trussell, R. Shane (2014): Applicability of Ozone and Biological Activated Carbon for Potable Reuse. In: *Ozone: Science & Engineering* 36 (2), S. 123–137.
- Götz, Christian; Otto, Johanna; Singer, Heinz (2015): Überprüfung des Reinigungseffektes. Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. In: *Aqua & Gas* (2), S. 34–40.
- Götz, Christian; Piazzoli, Alessandro (2016): Beurteilung der Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon. Untersuchung des Weissenburger Abwassers: Ozonzehrung, Spurenstoffabbau und Oxidationsnebenprodukte. Im Auftrag von: Universität der Bundeswehr München. Hg. v. Envilab AG. Zofingen.
- Graf, Peter; Schaper, Jan-Hendrik (2016): Benchmarking Abwasser Bayern. Benchmarking der Unternehmen der Abwasserentsorgung Ergebnisbericht für das Erhebungsjahr 2014. Hg. v. aquabench GmbH. Hamburg.
- Green, Hyatt C.; Haugland, Richard A.; Varma, Manju; Millen, Hana T.; Borchardt, Mark A.; Field, Katharine G. et al. (2014): Improved HF183 quantitative real-time PCR assay for characterization of human fecal pollution in ambient surface water samples. In: *Applied and Environmental Microbiology* 80 (10), S. 3086–3094.

- Griffiths, R. I.; Whiteley, A. S.; O'Donnell, A. G.; Bailey, M. J. (2000): Rapid Method for Coextraction of DNA and RNA from Natural Environments for Analysis of Ribosomal DNA- and rRNA-Based Microbial Community Composition. In: *Applied and Environmental Microbiology* 66 (12), S. 5488–5491.
- Grünebaum, Thomas (2011): Schlussbericht Phase 1 „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“. Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt: "Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren", Vergabenummer 08-058/1 Bezug: IV-7-042 600 001F. Hg. v. Ruhrverband. Essen.
- Grünebaum, Thomas; Jardin, Norbert; Lübken, Manfred; Wichern, Marc; Lyko, Sven; Rath, Ludger et al. (2014): Untersuchung verschiedener Verfahren zur weitergehenden Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen im großtechnischen Maßstab. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61 (10), S. 876–884.
- Gunten, Urs von (2003): Ozonation of drinking water. Part I. Oxidation kinetics and product formation. In: *Water Research* 37 (7), S. 1443–1467.
- Gunten, Urs von (2015): Die Bildung von Transformationsprodukten während der Ozonung und deren Schicksal bei der biologischen Nachbehandlung. Beitrag im Tagungsband des Eawag Infotages 2015. In: *Eawag Infotag 2015, 03.09.2015, Lausanne*, S. 8.
- Haist-Gulde, Brigitte (2015): Bewertung von Aktivkohlen zur Spurenstoffelimination im Trinkwasserbereich. i-net Cleantech Technology Event «Verminderung von Mikroverunreinigungen im Wasserkreislauf – ein transnationaler Erfahrungsaustausch». TZW Karlsruhe. i-net innovation networks; Fachhochschule Nordwestschweiz. Basel, 22.09.2015.
- Hammes, Frederik (2008): A comparison of AOC methods used by the different TECHNEAU partners. Hg. v. TECHNEAU. Eawag.
- Haslinger, J.; Schaar, H.; Saracevic, E.; Walder, C.; Kreuzinger, N. (2017): Impact of ozonation on adsorptive removal of organic micropollutants in granular activated carbon filters. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering*, in submission.
- Hembach, N.; Hiller, C.; Wieland, A.; Schwartz, T. (2018): Kombinierte erweiterte Prozesse in der Abwasserreinigung zur Entfernung von antibiotikaresistenten Bakterien. In: *Spurenstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf (SUK 2018)*, 23. – 24. Oktober 2018, Frankfurt am Main, S. 52–53.
- Herbst, Heinrich; Kauffmann, Michael; Türk, Jochen; Launer, Martin (2011): Abwasserozonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden - Auslegung - Bau - erste Betriebsergebnisse. Beitrag im Tagungsband der 25. Karlsruher Flockungstage 2011. Karlsruhe: Verl. Siedlungswasserwirtschaft (Schriftenreihe SWW, Bd. 141).
- Herbst, Heinrich; Maus, Christian (2013): Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Warburg. Machbarkeitsstudie. Hg. v. Grontmij GmbH und IUTA. Köln.
- Herbst, Heinrich; Maus, Christian; Ante, Sandra; Becker, Hans-Peter; Glathe, Wolfgang; Börgers, Andrea; Türk, Jochen (2014): Hinweise zu Auslegung und Design von Ozonanlagen zur Mikroschadstoffelimination. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61 (11), S. 998–1006.

- Hertel, Martina; Maurer, Peter; Steinmetz, Heidrun (2014): Auswahl und Überprüfung granulierter Aktivkohlen (GAK) für den Einsatz in kontinuierlich gespülten Filtern. In: *Wasser Abfall* 16 (11), S. 40–45.
- Hubaux, Nathalie; Schachtler, Max; Götz, Christian (2018): Eignung von UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (10), S. 899–904.
- Huck, Peter M. (1990): Measurement of Biodegradable Organic Matter and Bacterial Growth Potential in Drinking Water. In: *Journal - American Water Works Association* 82 (7), S. 78–86.
- Hunze, Michaela (2016): Untersuchung der Strömungs- und Durchmischungsverhältnisse in der geplanten Ozonierungsanlage der Kläranlage Weißenburg. Auftraggeber: Große Kreisstadt Weißenburg in Bayern. Hg. v. FlowConcept GmbH. Hannover.
- Hunze, Michaela (2017): Stationäre Rechnung – Lochverteilung. Kurzauswertung Druckanalyse (Modellgeometrie, Druckanalyse, Druckverteilung). Auftraggeber: Stadt Weißenburg. Hg. v. FlowConcept GmbH. Hannover.
- Jacobi (2017): Betriebsanleitung zur Inbetriebnahme von Aquasorb-Aktivkohlefiltern. Hg. v. Jacobi.
- Janssens, J.G.; Meheus, J.; Dirickx, J. (1985): Ozone Enhanced Biological Activated Carbon Filtration and its Effect on Organic Matter Removal, and in Particular on AOC Reduction. In: *Water Science & Technology* 17 (6-7), S. 1055–1068.
- Jekel, Martin (2014): Die weitergehende Abwasserreinigung zur Entfernung von organischen Spurenstoffen. In: *Aktuelle-Wochenschau© der GDCh – Wasserchemische Gesellschaft* (23).
- Jekel, Martin; Ruhl, Aki Sebastian (2016): Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Abschlussbericht zum Projekt: Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten der weitergehenden Abwasserreinigung zur Entlastung der Berliner Gewässer – Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Hg. v. Universitätsverlag der TU Berlin. Berlin.
- Jin, Pengkang; Jin, Xin; Wang, Xianbao; Feng, Yongning; C., Xiaochang (2013): Biological Activated Carbon Treatment Process for Advanced Water and Wastewater Treatment. In: *Biomass Now – Cultivation and Utilization*, S. 153–191.
- Johanna, Otto; Vogler, Bernadette; Deuber, Fabian; Longree, Philipp; Götz, Christian; Singer, Heinz (2014): Evaluation der Reinigungsleistung weitergehender Verfahren in Kläranlagen durch Substanzanalyse von knapp 500 Mikroverunreinigungen. Abstract zum Vortrag. 6. Gemeinsame Tagung von SETAC GLB und der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der GDCh. Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung; Justus-Liebig-Universität Gießen, I. F.Z. Gießen, Homberg, 2014.
- Jongh, Cindy de; Kooij, Pascal; ter Laak, Thomas (2011): Screening and human health risk assessment of pharmaceuticals and their transformation products in Dutch surface waters and drinking water. BTO 2011.045, Project number B111744. Hg. v. KWR Watercycle Research Institute. Nieuwegein (NL).

- Kaastrup, Ellen; Halmø, Terje M. (1989): Removal of Aquatic Humus by Ozonation and Activated-Carbon Adsorption. In: *Aquatic Humic Substances* 219 (Chapter 39), S. 697–726.
- Kaiser, Hans-Peter; Köster, Oliver; Gresch, Markus; Périsset, Philipp M.J.; Jäggi, Pascal; Salhi, Elisabeth; Gunten, Urs von (2013): Process Control For Ozonation Systems: A Novel Real-Time Approach. In: *Ozone: Science & Engineering* 35 (3), S. 168–185.
- Kassandra, Klaer; Montag, David; Pinnekamp, Johannes; Veith, Martin; Stürznickel, Karl-Heinz (2013): Spurenstoffelimination durch den kombinierten Einsatz von granulierter Aktivkohle und Ozon am Beispiel der Kläranlage Leverkusen. In: *10. Aachener Tagung Wasser und Membranen : Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung ; Begleitbuch zur 10. Aachener Tagung Wasser und Membranen, 29. - 30. Oktober 2013*, S. 245–256.
- Kaste, Andrea; Antakyali, Demet (2018): Zwischenbilanz Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in NRW. Fachveranstaltung: "Arzneimittel und Mikroschadstoffe in Gewässern – Belastungen - Minderungsstrategien - Maßnahmen. DWA Landesverband NRW; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 19.06.2018.
- Kaub, Mauriz; Biebersdorf, Norbert; Urueta, Fernando (2014): Kläranlage Emmerich 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen. Machbarkeitsstudie. Hg. v. TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH.
- Kildare, Beverly J.; Leutenegger, Christian M.; McSwain, Belinda S.; Bambic, Dustin G.; Rajal, Veronica B.; Wuertz, Stefan (2007): 16S rRNA-based assays for quantitative detection of universal, human-, cow-, and dog-specific fecal Bacteroidales: a Bayesian approach. In: *Water Research* 41 (16), S. 3701–3715.
- Kim, W.; Nishijima, W.; Shoto, E.; Okada, M. (1997): Competitive removal of dissolved organic carbon by adsorption and biodegradation on biological activated carbon. In: *Water Science and Technology* 35 (7), S. 147–153.
- Klaer, Cassandra; Dolny, Regina; Gebhardt, Wilhelm; Hollert, Henner; Kirchner, Kristina; Müller, Yvonne et al. (2017): Pilotierung einer Ozonung zur Realisierung der großtechnischen Demonstrationsanlage Aachen-Soers. In: *50. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft "alles klar?!"* (245), 54/1-54/14.
- Klasmeier, Jörg; Kehrein, Nils; Berlekamp, Jürgen; Matthies, Michael (2011): Mikroverunreinigungen in oberirdischen Gewässern: Ermittlung des Handlungsbedarfs bei kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht (Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt). Hg. v. Universität Osnabrück, Institut für Umweltsystemforschung. Osnabrück.
- Klimenko, N. A.; Savchina, L. A.; Kozyatnik, I. P.; Goncharuk, V. V.; Samsoni-Todorov, A. O. (2009): The effect of preliminary ozonation on the bioregeneration of activated carbon during its long-term service. In: *J. Water Chem. Technol.* 31 (4), S. 220–226.
- Knopp, Gregor; Cornel, Peter (2015): Charakterisierung, Kommunikation und Minimierung von Risiken durch neue Schadstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf - Teilprojekt 4. Schlussbericht des Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 02WRS1275D. Schlussbericht. Technische Universität Darmstadt, IWAR.

Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Hg. v. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW.

KOMS-BW (2018): Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination. Hg. v. Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. Stuttgart.

Kornfeind, L.; Winkelbauer, A.; Schaar, H.; Haslinger, J.; Walder, C.; Saracevic, E.; Kreuzinger, N. (2015): Applying 3D-fluorescence spectroscopy as process control for micropollutant removal by activated carbon and ozonation as advanced wastewater treatment steps. In: *9th IWA Specialist Conference on Assessment and Control of Micropollutants and Hazardous Substances in Water, 22 - 25 November 2015, Singapore (Session 28, MPOL-107)*.

Krappmann, Norbert (2017): Praxisanwendung und Test von zwei online UV-Sonden zur optimierten Ozondosierung und zur Überwachung der Effizienz der Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan –Triesdorf und Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag), Weihenstephan - Triesdorf.

Kraus, Thomas (2018): Anwendung des Suspect- und Non-Target-Screenings bei der weitergehenden Abwasserreinigung durch Ozonierung und nachgeschalteten Filtersystemen mittels Flüssigkeitschromatographie gekoppelt mit hochauflösender Massenspektrometrie (LC-HRMS). Masterarbeit. Hochschule Aalen, Aalen.

Kreuzinger, Norbert; Haslinger, Julia; Kornfried, Lukas; Schaar Heidemarie; Saracevic, Ernis; Winkelbauer, Andreas et al. (2015): KomOzAk - Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe. Abschlussbericht. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, TU Wien. Wien.

Kuch, Bertram; Steinmetz, Heidrun (2015): Problematik bei Probenahme und Analytik von anthropogenen Spurenstoffen. Beitrag zum DWA-Seminar in Berlin "Spurenstoffelimination auf Kläranlagen - Notwendigkeiten, Verfahren, Kosten". In: *DWA-Seminar: Spurenstoffelimination auf Kläranlagen, 17.11.2015, Berlin*.

Kumar, Arun; Xagorarakis, Irene (2010): Human health risk assessment of pharmaceuticals in water: An uncertainty analysis for meprobamate, carbamazepine, and phenytoin. In: *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 57 (2-3), S. 146–156.

Kümmel, Rolf; Worch, Eckhard (1990): Adsorption aus wässrigen Lösungen. Mit 23 Tabellen. 1. Aufl. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.

Kümmerer, Klaus (2010): Neuartige Spurenstoffe im Wasser. Emerging contaminants in waters. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54 (6), S. 349–359.

Kümmerer, Klaus; Schuster, Armin; Längin, Andreas; Happel, Oliver; Thoma, Astrid; Schneider, Klaus et al. (2011): Identifizierung und Bewertung ausgewählter Arzneimittel und ihrer Metaboliten (Ab- und Umbauprodukte) im Wasserkreislauf. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

- Lackner, S.; Fundneider, T.; Alexander, J.; Hembach, N.; Schwarz, T. (2018): Verfahrenskombinationen der 4. Reinigungsstufe – Abundanz von Antibiotikaresistenzen und hygienisch relevanter Bakterien. Spurenstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf (SUK 2018). DECHEMA. Frankfurt am Main, 24.10.2018.
- Lesage, G.; Mozo, I.; Barna, L.; Sperandio, M. (2013): Biological activated carbon process (BAC) for hazardous compound removal: modelling adsorption and bioregeneration. In: *8th IWA Specialized Conference on "Assessment and control of micropollutants and hazardous substances in water"*, Zürich, 16 -20 June, 2013, S. 232–233.
- Levenspiel, Octave (1999): Chemical reaction engineering. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley033/97046872.html>.
- LfU (2016): UmweltWissen: Schadstoffe Spurenstoffe im Wasser. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- Li, L.; Zhu, W.; Zhang, P.; Zhang, Q.; Zhang, Z. (2006): AC/O3-BAC processes for removing refractory and hazardous pollutants in raw water. In: *Journal of Hazardous Materials* 135 (1-3), S. 129–133.
- Liang, Chung-Huei; Chiang, Pen-Chi; Chang, E-E (2007): Modeling the behaviors of adsorption and biodegradation in biological activated carbon filters. In: *Water Research* 41 (15), S. 3241–3250.
- Locher, Christian (2016): Untersuchungsvorhaben zur Spurenstoffentnahme mit Ozon und granulierter Aktivkohle. 2. Kongress Spurenstoffe in der aquatischen Umwelt. DWA; Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. Ulm, 13.06.2016.
- Locher, Christian; Jedele, Klaus; Hertel, Martina; Maurer, Peter; Steinmetz, Heidrun (2015): Einsatz granulierter Aktivkohle zur Entnahme von Mikroverunreinigungen in kontinuierlich arbeitenden Filtern. Abschlussbericht. Hg. v. Gemeinde Emmingen-Liptingen und Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart. Emmingen-Liptingen.
- López-Gutiérrez, Juan C.; Henry, Sonia; Hallet, Stéphanie; Martin-Laurent, Fabrice; Catroux, Gérard; Philippot, Laurent (2004): Quantification of a novel group of nitrate-reducing bacteria in the environment by real-time PCR. In: *Journal of microbiological methods* 57 (3), S. 399–407.
- Luo, Yunlong; Guo, Wenshan; Ngo, Huu Hao; Nghiem, Long Duc; Hai, Faisal Ibney; Zhang, Jian et al. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. In: *Science of The Total Environment* 473-474, S. 619–641.
- Lyko, Sven; Launer, Martin; Jagemann, Peter; Türk, Jochen (2013): Real-Time Monitoring and Automatic Process Control of Secondary Effluent Ozonation Based on Online Sensors for UV254 Absorbance. In: *8th IWA Specialized Conference on "Assessment and control of micropollutants and hazardous substances in water"*, Zürich, 16 -20 June, 2013, S. 56–57.
- Macova, M.; Escher, B. I.; Reungoat, J.; Carswell, S.; Chue, K. Lee; Keller, J.; Mueller, J. F. (2010): Monitoring the biological activity of micropollutants during advanced wastewater treatment with ozonation and activated carbon filtration. In: *Water Research* 44 (2), S. 477–492.

- Maier, Diana; Rault, Magali; Suchail, Séverine; Triebkorn, Rita (2015): Munter wie ein Fisch im Wasser: Spurenstoffelimination und Fischgesundheit. Vortrag und Abstract zur Abschlussveranstaltung des BMBF-Verbundprojektes SchussenAktivplus: "Spurenstoffe und Keime im Wasserkreislauf - Quo vadis?". ÖKONSULT GbR; Institut für Evolution und Ökologie Universität Tübingen. Langenargen, 23.04.2015.
- Marcus, Patrick (2005): Entwicklung und Validierung eines Labor-Schnelltests zur Beurteilung der Adsorbierbarkeit von organischen Einzelstoffen an Aktivkohle. TU Dresden, Dresden.
- Margot, Jonas; Kienle, Cornelia; Magnet, Anoy's; Weil, Mirco; Rossi, Luca; Alencastro, Luiz Felipe de et al. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? In: *Science of The Total Environment* 461-462, S. 480–498.
- Matilainen, Anu; Gjessing, Egil T.; Lahtinen, Tanja; Hed, Leif; Bhatnagar, Amit; Sillanpää, Mika (2011): An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. In: *Chemosphere* 83 (11), S. 1431–1442.
- McDowell, W.H.; Zsolnay, A.; Aitkenhead-Peterson, J.A.; Gregorich, E.G.; Jones, D.L.; Jödemann, D. et al. (2006): A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources. In: *Soil Biology and Biochemistry* 38 (7), S. 1933–1942.
- Meier, Aline (2018): Erfahrungen mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen. 1. Auflage. Hg. v. VSA. Online verfügbar unter [https://www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/02\\_Faktenblaetter/180226\\_Erfahrungen\\_mit\\_UV-Sonden.pdf](https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/02_Faktenblaetter/180226_Erfahrungen_mit_UV-Sonden.pdf).
- Meier, Jan Felix; Austermann-Haun, Ute; Alt, Klaus; Kuhlmann, Silke (2016): Pilotprojekt zur Mikroschadstoffelimination mittels Ozonung auf der ZKA Detmold. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (1), S. 28–36.
- Metzger, Steffen (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Metzger, Steffen; Miehe, Ulf (2018): Stand der Umsetzung von Technologien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen. In: *51. Essener Tagung für Wasserwirtschaft, 14. bis 15.03.2018 in Essen*, 58/1-58/17.
- Miehe, Ulf (2017): Schnelltests zur Abschätzung der Entfernbarkeit von Spurenstoffen aus Abwasser. Infoblatt zum Forschungsprojekt "TestTools". Hg. v. Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. Berlin.
- Miehe, Ulf; Stapf, Michael; Schumann, Pia; Völker, Johannes (2017): Studie über Effekte und Nebeneffekte bei der Behandlung von kommunalem Abwasser mit Ozon. Abschlussbericht (Studie finanziert von der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (Fachbereich Wasserwirtschaft II B 2)). Hg. v. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. Berlin.
- Mieszkin, S.; Yala, J-F; Joubrel, R.; Gourmelon, M. (2010): Phylogenetic analysis of Bacteroidales 16S rRNA gene sequences from human and animal effluents and assessment of

ruminant faecal pollution by real-time PCR. In: *Journal of applied microbiology* 108 (3), S. 974–984.

Montag, Norbert; Knollmann, Jens; Hübner, Holger (2015): Ertüchtigung einer Zentralkläranlage - Elimination von Spurenstoffen. In: *Deutsches Ingenieurblatt* (11), S. 12–19.

Mousel, Danièle; Krebber, Katrin; Palmowski, Laurence; Pinnekamp, Johannes (2015): Energieverbrauch der Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen. In: 48. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Forschung trifft Praxis". Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH (Gewässerschutz, Wasser, Abwasser) (236), 19/1-19/15.

Müller, E. A.; Kobel, B.; Künti, T.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Böcker, K. (1999): Energie in Kläranlagen - Handbuch. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.

Mutz, Daniel; Remy, Christian; Miehe, Ulf; Sperlich, Alexander (2017): Einfluss von Ozonung oder Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Entfernung organischer Spurenstoffe auf den Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer Kläranlage. Ökobilanzielle Bewertung von verschiedenen Varianten der Spurenstoffentfernung in einem Gesamtkonzept zur weitergehenden Abwasserreinigung für ein Modellklärwerk. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (4), S. 310–320.

Nanaboina, Venkateswarlu; Korshin, Gregory V. (2010): Evolution of Absorbance Spectra of Ozonated Wastewater and Its Relationship with the Degradation of Trace-Level Organic Species. In: *Environ. Sci. Technol.* 44 (16), S. 6130–6137.

Nishijima, Wataru; Speitel, Gerald E. (2004): Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon. In: *Chemosphere* 56 (2), S. 113–119.

OGewV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV). vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).

Orawetz, Tom (2018): Technischer Bericht - Untersuchung Gebrauchtkohle im Vergleich zur Frischkohle AS2000 8x30. TR012617 – KA Weißenburg, Testphase bis September 2018. Hg. v. Jacobi Carbons GmbH. Premnitz.

Orlandini, E.; Gebereselassie, T.; Kruithof, J.; Schippers, J. (1997): Effect of ozonation on preloading of background organic matter in granular activated carbon filters. In: *Water Science and Technology* 35 (7), S. 295–302.

Page, Declan; Dillon, Peter (2007): Measurement of the biodegradable fraction of dissolved organic matter relevant to water reclamation via aquifers. Water for a Healthy Country report series. Hg. v. CSIRO Land and Water. Urrbae.

Pei, Ruoting; Kim, Sung-Chul; Carlson, Kenneth H.; Pruden, Amy (2006): Effect of river landscape on the sediment concentrations of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes (ARG). In: *Water Research* 40 (12), S. 2427–2435.

Peschke, Katharina; Triebkorn, Rita; Wilhelm, Sabrina (2018): Vorteile der vierten Reinigungsstufe auf Kläranlagen für Mensch und Umwelt: Finale Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt SchussenAktivplus. In: *Spurenstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf (SUK 2018)*, 23. – 24. Oktober 2018, Frankfurt am Main, S. 21–22.

- Pinnekamp, J.; Mousel, D.; Krebber, K.; Palmowski, L.; Bolle, F.W.; Gredigk-Hoffmann, S. et al. (2015): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Phase II. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. ENVELOLOS – Phase 2 (AZ IV-7-042 600 003 J). Hg. v. RWTH Aachen. Aachen.
- Poddar, Moumita; Nair, A.N. Brijesh; Mahindrakar, Amit B. (2013): A Review on the Use of Rapid Small Scale Column Test (RSSCT) on Predicting Adsorption of Various Contaminants. In: *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* 3 (1), S. 77–85.
- Popp, Wolfgang; Huber, Stefanie; Kexel, Stephanie (2004): Abwasserdesinfektion zur Verbesserung der Badequalität an der Oberen Isar. In: *Wasser Abfall* 6 (5), S. 14–18.
- Prahtel, Marlies (2016): Vergleichende energetische Betrachtung am Beispiel einer Kläranlage mit und ohne vierte Reinigungsstufe. Bachelorarbeit. TU München, München.
- Rattier, M.; Reungoat, J.; Gernjak, W.; Joss, A.; Keller, J. (2012a): Investigating the role of adsorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants during biological activated carbon filtration of treated wastewater. In: *Journal of Water Reuse and Desalination* 2 (3), S. 127–139.
- Rattier, Maxime; Reungoat; Julien; Gernjak, Wolfgang; Keller, Jurg (2012b): Organic Micropollutant Removal by Biological Activated Carbon Filtration: A Review. Technical Report No. 53. Hg. v. Urban Water Security Research Alliance.
- Rattier, Maxime; Reungoat, Julien; Joss, Adriano; Gernjak, Wolfgang; Keller, Jurg (2013): Evaluation of the role of adsorption and biodegradation of micropollutants during biological activated carbon filtration. In: *8th IWA Specialized Conference on "Assessment and control of micropollutants and hazardous substances in water", Zürich, 16 -20 June, 2013*, S. 230–231.
- Reaume, Michael James (2012): Biofiltration Polishing of Ozone Treated Secondary Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent. Electronic Theses and Dissertations, Paper 5375. Dissertation. University of Windsor, Windsor, Kanada.
- Reischer, Georg H.; Kasper, David C.; Steinborn, Ralf; Mach, Robert L.; Farnleitner, Andreas H. (2006): Quantitative PCR method for sensitive detection of ruminant fecal pollution in freshwater and evaluation of this method in alpine karstic regions. In: *Applied and Environmental Microbiology* 72 (8), S. 5610–5614.
- Reungoat, J.; Escher, B. I.; Macova, M.; Argaud, F. X.; Gernjak, W.; Keller, J. (2012a): Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. In: *Water Research* 46 (3), S. 863–872.
- Reungoat, J.; Macova, M.; Escher, B. I.; Carswell, S.; Mueller, J. F.; Keller, J. (2010): Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration. In: *Water Research* 44 (2), S. 625–637.
- Reungoat, Julien; Escher, Beate; Macova, Miroslava; Farre, Marie; Argaud, F. X.; Rattier, Maxime et al. (2012b): Wastewater Reclamation using Ozonation combined with Biological

Activated Carbon Filtration. Technical Report No. 69. Hg. v. Urban Water Security Research Alliance.

Rödel, Sascha (2017a): Innovative Verfahrenskombination zur weitergehenden Abwasserbehandlung – Mehrfachnutzen für die Zukunft? 13. Bayerische Wassertage. KUMAS - Kompetenzzentrum Umwelt e. V. Augsburg, 15.11.2017.

Rödel, Sascha (2017b): Innovative Verfahrenskombination zur weitergehenden Abwasserbehandlung – Mehrfachnutzen für die Zukunft? 13. Münchener Abwassertag. Hach. Unterhaching, 21.11.2017.

Rödel, Sascha; Günthert, F. Wolfgang; Bleisteiner, Stefan (2014): Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen – Strategie für Bayern. In: *gwf Wasser | Abwasser* 155 (5), S. 648–658.

Rödel, Sascha; Günthert, F. Wolfgang; Christ, Oliver; Miller, Eric; Schatz, Regine; Zech, Tosca et al. (2019): Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Betrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg. Teil 2: Handlungsempfehlungen. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 66 (4).

Rödel, Sascha; Günthert, F. Wolfgang; Schaum, Christian; Rehbein, Verena; Schatz, Regine; Zech, Tosca et al. (2017): Pilotprojekt „Vierte Reinigungsstufe“ in Weißenburg. Erfahrungen bei der Planung und wissenschaftlichen Begleitung. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (7), S. 606–615.

Sacher, Frank; Thomas, Astrid; Lehmann, Markus; Scherer, Isabel; Stier, Katrin; Maier, Ursula (2014): Spurenstoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg. Ergebnisse der Beprobung von Fließgewässern und Kläranlagen 2012/2013. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.

Sander Elektroapparatebau GmbH (2016): Das Redoxpotential. Infos aus FAQ. Online verfügbar unter <http://www.aqua-sander.de/service/faq/das-redoxpotential.html>, zuletzt geprüft am 11.05.2016.

Schaar, Heidemarie; Haslinger, Julia; Walder, Christian; Lahnsteiner, Josef; Kreuzinger, Norbert (2017): Vergleich unterschiedlicher Nachbehandlungsstufen einer Ozonung zur weitergehenden Entfernung organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. In: *12. Aachener Tagung Wassertechnologie - Verfahren zur Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 24.-25. Oktober 2017, Aachen*, S. 259–265.

Schachtler, Max (2015): Erfahrungen aus der Praxis: Erste Ozonung in der Schweiz - Betriebserfahrungen. Vortrag im Rahmen der DWA Landesverbandstagung 2015 Baden-Württemberg. KOMS-Technologieforum zur Spurenstoffelimination - Innovationen und Technik. DWA Landesverband Baden-Württemberg. Pforzheim, 16.10.2015.

Schachtler, Max; Hubaux, Nathalie (2016): BEAR: Innovative Regel-Strategie der Ozonung. In: *Aqua & Gas* (5), S. 84–93.

Schrader, Corinna (2007): Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007. München: Oldenbourg Industrieverl. (Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 190).

- Schwaiger, Julia (2014): Auswirkungen von Spurenstoffen auf das aquatische Ökosystem. Seminar „Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf“. DWA Landesverband Bayern. Augsburg, 26.02.2014.
- Schwarzenbach, René P.; Escher, Beate I.; Fenner, Kathrin; Hofstetter, Thomas B.; Johnson, C. Annette; Gunten, Urs von; Wehrli, Bernhard (2006): The challenge of micropollutants in aquatic systems. In: *Science (New York, N.Y.)* 313 (5790), S. 1072–1077.
- Selvy, Ashley (2015): Impacts of Ozone Dose and Empty Bed Contact Time on Total Organic Carbon Removal Through Ozone-Biological Activated Carbon Treatment. Paper 2426. Dissertation. University of Nevada, Las Vegas. Department of Civil and Environmental Engineering and Construction.
- Servais, Pierre; Anzil, Adriana; Ventresque, Claire (1989): Simple Method for Determination of Biodegradable Dissolved Organic Carbon in Water. In: *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 55 (10), S. 2732–2734.
- Servais, Pierre; Billen, Gilles; Hascoet, Marie-Claude (1987): Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. In: *Water Research* 21 (4), S. 445–450.
- Simpson, David R. (2008): Biofilm processes in biologically active carbon water purification. In: *Water Research* 42 (12), S. 2839–2848.
- Sontheimer, H. (1979): Applying Oxidation and Adsorption Techniques: A Summary of Progress. In: *Journal - American Water Works Association* 71 (11), S. 612–617.
- Sontheimer, Heinrich; Fettig, Joachim (Hg.) (1985): Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. Karlsruhe: Eigenverlag.
- Sontheimer, Heinrich; Heilker, Ewald; Jekel, Martin; Nolte, Heinrich; Vollmer H., Franz (1978): The Mülheim Process. In: *Journal - American Water Works Association* 70 (7), S. 393–396.
- Sperlich, Alexander; Altmann, Johannes; Zietzschmann, Frederik; Meinel, Felix; Ruhl, Aki Sebastian; Gnirss, Regina; Jekel, Martin (2014): Schnelle und kostengünstige Testverfahren für Aktivkohle zur Kontrolle der Spurenstoffelimination in der Praxis. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61 (11), S. 989–997.
- Sperlich, Alexander; Gnirss, Regina (2016): Forschungsergebnisse zur weitergehenden Abwasserreinigung (Teil 2). In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* (6), S. 21–26.
- Stapf, Michael (2018): Labor-Ozonversuche mit Proben der Kläranlage Weißenburg. Hg. v. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. Berlin.
- Steffen, Dieter; Wunsch, Hans; Meyer, Lutz; Hölscher, Joseph; Werner, Rainald; Mosch, Eva et al. (2015): Biota-Monitoring in ausgewählten niedersächsischen Gewässern – Untersuchung von Tierarzneimitteln in Fischen. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Hannover (Oberirdische Gewässer, Band 37).
- Strauß, Julian (2017): Beurteilung der Leistungsfähigkeit und der großtechnischen Umsetzung der Verfahrenskombination Ozonung mit biologischer Filtration zur Elimination von

Mikroverunreinigungen auf kommunalen Kläranlagen. Masterarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Fakultät Bauingenieurwesen.

Ternes, Thomas A. (2015): Spurenstoffe und mehr - Blick in die Welt der Transformationsprodukte. Vortrag und Abstract zur Abschlussveranstaltung des BMBF-Verbundprojektes SchussenAktivplus: "Spurenstoffe und Keime im Wasserkreislauf - Quo vadis?". ÖKONSULT GbR; Institut für Evolution und Ökologie Universität Tübingen. Langenargen, 23.04.2015.

Tran, My Huyen (2018): Mikrobiologische Untersuchung auf der Kläranlage Weißenburg. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan –Triesdorf, Weihenstephan - Triesdorf.

Triebskorn, Rita (2017): Weitergehende Abwasserreinigung. Ein wirksames und bezahlbares Instrument zur Verminderung von Spurenstoffen und Keimen im Wasserkreislauf. Gemeinsamer Schlussbericht der Projekte SchussenAktiv, SchussenAktivplus und SchussenAktivplus+. Hg. v. Universität Tübingen. Tübingen.

Umweltbundesamt (2015a): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer. Forschungskennzahl 3712 21 225; UBA-FB 002037. Kurzbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2015b): Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern (Position // März 2015). Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2018): Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Hg. v. Umweltbundesamt, Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden. Dessau-Roßlau.

Urfer, Daniel; Huck, Peter M.; Booth, Stephen D.J.; Coffey, Bradley M. (1997): Biological Filtration for BOM and Particle Removal: A Critical Review. In: *Journal - American Water Works Association* 89 (12), S. 83–98.

Url, Manfred; Hiller, Carolin; Schuhen, Katrin (2016): Detektion von organischen Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagen. Ermittlung eines Scoring-Modells zur Gegenüberstellung der technischen Möglichkeiten. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (2), S. 119–123.

UVEK (2016): Verordnung des UVEK (Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen. 814.201.231, vom 01.12.2016.

Vahala, R.; Alapeijari, T.; Rintala, J.; Laukkanen, R. (1998): Evaluating ozone dose for AOC removal in two-step gac filters. In: *Water Science and Technology* 37 (9), S. 113–120.

van der Hoek, J.; Hofman, J.; Graveland, A. (2000): Benefits of ozone-activated carbon filtration in integrated treatment processes, including membrane systems. In: *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 49 (6), S. 341–356.

van der Kooij, D.; Hijnen, W.A.M.; Kruithof, J.C. (1989): The Effects of Ozonation, Biological Filtration and Distribution on the Concentration of Easily Assimilable Organic Carbon (AOC) in Drinking Water. In: *Ozone: Science & Engineering* 11 (3), S. 297–311.

- van Leeuwen, J.; Prinsloo, J.; van Steenderen, R.A. (1983): The Optimization of Ozonation and Biological Activated Carbon (BAC) in a Water Reclamation Context. In: *Ozone: Science & Engineering* 5 (3), S. 171–181.
- DWA Arbeitsblatt A 198, April 2003: Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen.
- Volk, C.; Renner, C.; Roche, P.; Paillard, H.; Joret, J. C. (1993): Effects Of Ozone On The Production Of Biodegradable Dissolved Organic Carbon (BDOC) During Water Treatment. In: *Ozone: Science & Engineering* 15 (5), S. 389–404.
- Volkman, Holger; Schwartz, Thomas; Bischoff, Petra; Kirchen, Silke; Obst, Ursula (2004): Detection of clinically relevant antibiotic-resistance genes in municipal wastewater using real-time PCR (TaqMan). In: *Journal of microbiological methods* 56 (2), S. 277–286.
- Volkman, Holger; Schwartz, Thomas; Kirchen, Silke; Stofer, Carmen; Obst, Ursula (2007): Evaluation of inhibition and cross-reaction effects on real-time PCR applied to the total DNA of wastewater samples for the quantification of bacterial antibiotic resistance genes and taxon-specific targets. In: *Molecular and cellular probes* 21 (2), S. 125–133.
- Waters, Jan de; DiGiano, Francis A. (1990): The Influence of Ozonated Natural Organic Matter on the Biodegradation of a Micropollutant in a GAC Bed. In: *Journal of the Water Pollution Control Federation* 82 (8), S. 69–75.
- Wieland, Arne (2015): WEDECO Ozon: Entfernung von Mikroschadstoffen. Projekttreffen zum Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe in Bayern. Weißenburg, 03.02.2015.
- Wieland, Arne; Stapel, Harald (2015): Der Oxelia-Prozess zur weitergehenden Abwasserbehandlung. Mit einer Kombination aus Oxidation und biologischer Filtration lassen sich Spurenstoffe im Abwasserbehandlungsprozess wirksam eliminieren. In: *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik* (3), S. 16–19.
- Wildhaber-Schindler, Y.; Mestankova, H.; Schäfer, M.; Schirmer, K.; Salhi, E.; Wunderlin, P.; Gunten, U. von (2015): Novel test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone. In: *9th IWA Specialist Conference on Assessment and Control of Micropollutants and Hazardous Substances in Water, 22 - 25 November 2015, Singapore* (Session 15, MPOL-039).
- Willig, Hans-Peter (2018): Ozon. Hg. v. chemie-schule.de. München. Online verfügbar unter <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Ozon>, zuletzt geprüft am 12.12.2018.
- Wittmer, A.; Heisele, A.; McArdell, C. S.; Böhler, M.; Longree, P.; Siegrist, H. (2015): Decreased UV absorbance as an indicator of micropollutant removal efficiency in wastewater treated with ozone. In: *Water Science & Technology* 71 (7), S. 980–985.
- Wittmer, Anita (2013): UV-Messung zur Regelung der Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung - Labor- und halbtechnische Pilotversuche. Schlussbericht, Projekt-Nr.: 85341. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Eawag. Dübendorf.
- Worch, Eckhard (2012): Adsorption technology in water treatment. Fundamentals, processes, and modeling. Berlin, Boston: De Gruyter.
- Wunderlin, Pascal (2016): Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination. Hg. v. VSA. Dübendorf.

- Wunderlin, Pascal (2017): Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung. Empfehlung. Hg. v. VSA. Online verfügbar unter <https://www.micropoll.ch/de/dokumente/vollzugshilfen/>.
- Wunderlin, Pascal; Joss, Adriano; Fleiner, Julian (2017a): Elimination von Spurenstoffen durch granuliert Aktivkohle (GAK) Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Bülach-Furt. Zwischenbericht, Kurzfassung. Hg. v. Eawag. Dübendorf.
- Wunderlin, Pascal; Meier, Aline; Grelot, Julie (2017b): Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA. Aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen. In: *Aqua & Gas* (11), S. 60–70.
- Wunderlin, Pascal; Mestankova, Hana; Salhi, Elisabeth; Wildhaber-Schindler, Yael; Schärer, Michael; Schirmer, Kristin; Gunten, Urs von (2015): Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon. Testverfahren zur Beurteilung. In: *Aqua & Gas* (7/8), S. 28–37.
- Yapsakli, Kozet; Çeçen, Ferhan (2010): Effect of type of granular activated carbon on DOC biodegradation in biological activated carbon filters. In: *Process Biochemistry* 45 (3), S. 355–362.
- Yapsaklı, Kozet; Çeçen, Ferhan; Aktaş, Özgür; Can, Zehra S. (2009): Impact of Surface Properties of Granular Activated Carbon and Preozonation on Adsorption and Desorption of Natural Organic Matter. In: *Environmental Engineering Science* 26 (3), S. 489–500.
- Zech, Tosca; Schatz, Regine (2015): Kläranlage Weißenburg - Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe. Vorentwurf für die Stadt Weißenburg. Projektnummer: 065/12/14. Hg. v. Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner. Weißenburg.
- Zech, Tosca; Schatz, Regine (2016): Kläranlage Weißenburg - Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe. Entwurf für die Stadt Weißenburg. Projektnummer: 065/12/14. Hg. v. Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner.
- Zhu, Ivan X.; Wang, Jenny; Wieland, Arne (2015): Ozone-Enhanced Biologically Active Filtration for Wastewater Reuse. In: *jawwa* 107 (12), E685-E692.
- Zietzschmann, F.; Mitchell, R.-L.; Jekel, M. (2015a): Impacts of ozonation on the competition between organic micro-pollutants and effluent organic matter in powdered activated carbon adsorption. In: *Water Research* 84, S. 153–160.
- Zietzschmann, F.; Müller, J.; Sperlich, A.; Ruhl, A. S.; Meinel, F.; Altmann, J.; Jekel, M. (2014): Rapid small-scale column testing of granular activated carbon for organic micro-pollutant removal in treated domestic wastewater. In: *Water Science & Technology* 70 (7), S. 1271–1278.
- Zietzschmann, F.; Worch, E.; Müller, J.; Altmann, J.; Sperlich, A.; Meinel, F. et al. (2015b): Welche Fraktionen des organischen Hintergrunds konkurrieren mit Spurenstoffen bei der Aktivkohleadsorption in Kläranlagenablauf? In: *Vom Wasser* 113 (2), S. 50–52.

## Anhang A

## Spurenstoffmessungen 2013

| Probenahmestelle (bei KA jeweils Ablauf) | Probenahmedatum | Gewässer                           |      |      |      |
|--|-----------------|------------------------------------|------|------|------|
| KA Weissenburg                           | 28-Mai-13       | Vorfürder:<br>Schwäbische<br>Rezat | 1000 | 1500 | 1500 |
| KA Weissenburg                           | 26-Jun-13       | Vorfürder:<br>Schwäbische<br>Rezat | 1500 | 1500 | 1500 |
| KA Weissenburg                           | 26-Jun-13       | Schwäbische<br>Rezat               | 1500 | 1600 | 2100 |
| Silbernhöhe                              | 28-Mai-13       | Schwäbische<br>Rezat               | 450  | 650  | 630  |
| Silbernhöhe                              | 26-Jun-13       | Schwäbische<br>Rezat               | 750  | 1000 | 1000 |
|  |                 |                                    | 750  | 1000 | 1000 |
|  |                 |                                    | 330  |      |      |
|  |                 |                                    | 80   |      |      |
|  |                 |                                    | 80   |      |      |
|  |                 |                                    | 150  |      |      |
|  |                 |                                    | 100  |      |      |
|  |                 |                                    | 220  |      |      |
|  |                 |                                    | 660  |      |      |
|  |                 |                                    | <50  |      |      |
|  |                 |                                    | 50   |      |      |
|  |                 |                                    | 100  |      |      |
|  |                 |                                    | 100  |      |      |
|  |                 |                                    | 1500 |      |      |
|  |                 |                                    | 1000 |      |      |
|  |                 |                                    | 90   |      |      |
|  |                 |                                    | <50  |      |      |
|  |                 |                                    | 70   |      |      |
|  |                 |                                    | 320  |      |      |
|  |                 |                                    | 150  |      |      |
|  |                 |                                    | 130  |      |      |
|  |                 |                                    | 70   |      |      |
|  |                 |                                    | 50   |      |      |
|  |                 |                                    | 70   |      |      |
|  |                 |                                    | 35   |      |      |
|  |                 |                                    | 400  |      |      |
|  |                 |                                    | 350  |      |      |
|  |                 |                                    | 30   |      |      |
|  |                 |                                    | 55   |      |      |
|  |                 |                                    | <50  |      |      |
|  |                 |                                    | 150  |      |      |
|  |                 |                                    | 240  |      |      |
|  |                 |                                    | 170  |      |      |
|  |                 |                                    | 280  |      |      |
|  |                 |                                    | 65   |      |      |
|  |                 |                                    | 2400 |      |      |
|  |                 |                                    | 170  |      |      |
|  |                 |                                    | 7000 |      |      |
|  |                 |                                    | 2500 |      |      |
|  |                 |                                    | 2700 |      |      |
|  |                 |                                    | 1000 |      |      |
|  |                 |                                    | 400  |      |      |



| C=[µg/l] |       | Probennr. | Glacoprin-Lactam Comp.A | Glacoprin | Hydroxycarbonylmethyl | Hydroxycarbonyl | Ibuprofen | Lamotrigin | Losartan | Methazolol | Omeprazol | PEHA  | Prindolol | Retin acid | Sulfamethoxazol | Succinyl | Sulindac | Telmisartan | Trimetoprim | Valerian | Vitamin |
|----------|-------|-----------|-------------------------|-----------|-----------------------|-----------------|-----------|------------|----------|------------|-----------|-------|-----------|------------|-----------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|---------|
| 0,32     | 1,1   | <0,05     | 0,76                    | 0,30      | 0,091                 | <0,05           | 0,49      | 0,44       | 0,085    | 0,13       | <0,05     | 0,080 | <0,05     | 0,080      | <0,05           | 0,11     | 0,093    | <0,05       | 0,68        | 0,11     |         |
| <0,05    | 5,0   | <0,5      | 2,0                     | 1,3       | <0,5                  | 2,0             | 1,1       | <0,5       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | <0,5      | <0,5       | <0,5            | <0,5     | 0,80     | <0,05       | 2,0         | <0,5     |         |
| 1,1      | 3,9   | <0,5      | 2,0                     | 0,98      | <0,5                  | <0,5            | 1,2       | 1,1        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | <0,5      | <0,5       | <0,5            | <0,5     | <0,5     | <0,05       | 2,0         | <0,5     |         |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | 0,089       | <0,05    | <0,05   |
| 0,27     | 1,1   | <0,05     | 0,83                    | 0,29      | 0,10                  | <0,05           | 0,49      | 0,48       | 0,086    | 0,17       | <0,05     | 0,11  | 0,095     | 0,11       | <0,05           | 0,11     | <0,05    | 0,54        | 0,11        | <0,05    | 0,11    |
| <0,5     | 5,7   | <0,5      | 2,5                     | 1,3       | <0,5                  | 0,96            | 2,2       | 1,3        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | <0,5      | <0,5       | <0,5            | <0,5     | <0,5     | <0,5        | 1,0         | <0,5     | 0,11    |
| 1,5      | 4,3   | <0,5      | 1,9                     | 1,0       | <0,5                  | <0,5            | 1,3       | 1,3        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | <0,5      | <0,5       | <0,5            | <0,5     | <0,5     | <0,5        | 1,5         | <0,5     | <0,5    |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,052    | 0,052 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,084     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,30     | 1,8   | 0,15      | 0,75                    | 0,35      | 0,20                  | <0,05           | 1,3       | 0,54       | 0,087    | 0,14       | 0,067     | 0,086 | <0,05     | 0,065      | 0,20            | 0,25     | 0,47     | 0,83        |             |          |         |
| <0,5     | 5,5   | 1,3       | 1,9                     | 1,2       | <0,5                  | 0,66            | 1,2       | 0,5        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,74      | 2,6        | 1,7             | 1,3      | 1,7      | 1,3         | 2,3         |          |         |
| <0,5     | 4,4   | 1,2       | 2,1                     | 0,97      | 1,3                   | <0,5            | 5,5       | 1,1        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,56      | 2,3        | 1,2             | 1,3      | 1,2      | 1,2         | 2,4         |          |         |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| <0,05    | 0,12  | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,097     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | 0,11     | <0,05    | <0,05       | 0,068       | 0,11     |         |
| <0,05    | 0,05  | <0,05     | 0,12                    | 0,32      | 0,12                  | 0,11            | <0,05     | 0,73       | 0,18     | <0,05      | <0,05     | 0,062 | <0,05     | 0,33       | 0,13            | 0,11     | 0,21     | 0,34        |             |          |         |
| <0,5     | 5,0   | 1,8       | 0,75                    | 0,76      | 1,1                   | <0,5            | 0,3       | 0,84       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | <0,5      | 2,4        | 1,5             | 0,90     | 0,3      | 2,0         |             |          |         |
| <0,5     | 3,8   | 1,2       | 1,3                     | 0,56      | 1,2                   | <0,5            | 4,9       | 0,58       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,56      | 2,0        | 1,1             | <0,5     | 0,97     | 1,8         |             |          |         |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,11      | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,10     | 1,3   | 0,15      | 0,46                    | 0,20      | 0,17                  | <0,05           | 1,00      | 0,28       | <0,05    | 0,073      | 0,053     | 0,080 | <0,05     | 0,43       | 0,15            | 0,20     | 0,36     | 0,47        |             |          |         |
| <0,5     | 5,6   | 1,7       | 2,0                     | 0,89      | 1,2                   | <0,5            | 6,2       | 0,92       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | 0,91  | 2,4       | 1,8        | 1,5             | 1,0      | 2,2      |             |             |          |         |
| <0,5     | 5,0   | 1,3       | 1,5                     | 0,55      | 1,2                   | <0,5            | 4,7       | 0,71       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,52      | 2,4        | 1,1             | <0,5     | 1,1      | 2,1         |             |          |         |
| 0,25     | 0,25  | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,11      | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,23     | 0,23  | <0,05     | N/A                     | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,070     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | 0,10            | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,27     | 0,27  | 0,08      | 0,16                    | 0,36      | 0,16                  | 0,17            | <0,05     | 0,89       | 0,24     | <0,05      | 0,062     | <0,05 | 0,065     | 0,11       | 0,41            | 0,15     | 0,15     | 0,21        | 0,37        |          |         |
| <0,5     | 5,1   | 1,7       | 1,8                     | 0,95      | 1,00                  | <0,5            | 6,7       | 0,93       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,77      | 2,5        | 1,8             | 0,86     | 1,2      | 2,2         |             |          |         |
| <0,5     | 4,8   | 1,4       | 1,8                     | 0,74      | 1,3                   | <0,5            | 6,0       | 0,87       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,67      | 2,4        | 1,2             | 0,65     | 1,3      | 2,2         |             |          |         |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| <0,05    | <0,05 | <0,05     | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,089     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | 0,10            | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,13     | 1,5   | 0,20      | 0,49                    | 0,26      | 0,17                  | <0,05           | 1,0       | 0,43       | <0,05    | 0,079      | 0,063     | 0,073 | 0,16      | 0,54       | 0,17            | 0,20     | 0,26     | 0,58        |             |          |         |
| <0,5     | 5,9   | 1,8       | 2,3                     | 1,2       | 1,1                   | <0,5            | 7,2       | 1,1        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,90      | 2,7        | 1,7             | 1,2      | 1,4      | 2,4         |             |          |         |
| <0,5     | 5,4   | 1,3       | 2,1                     | 0,77      | 1,4                   | <0,5            | 5,7       | 0,80       | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,76      | 2,4        | 1,2             | 0,85     | 0,89     | 2,3         |             |          |         |
| 0,17     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,071     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,22     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,14      | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | 0,062           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,50     | 0,71  | N/A       | 0,72                    | 0,23      | 0,18                  | <0,05           | 0,72      | 0,42       | 0,067    | 0,12       | <0,05     | <0,05 | 0,094     | 0,28       | 0,18            | 0,15     | 0,42     | 0,31        |             |          |         |
| 1,5      | 4,6   | N/A       | 2,7                     | 0,71      | 0,84                  | <0,5            | 4,1       | 1,3        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,53      | 1,3        | 2,0             | 0,79     | 1,4      | 1,2         |             |          |         |
| N/A      | N/A   | N/A       | 2,3                     | N/A       | N/A                   | N/A             | N/A       | N/A        | N/A      | N/A        | N/A       | N/A   | N/A       | N/A        | N/A             | N/A      | N/A      | N/A         | N/A         | N/A      | N/A     |
| 0,35     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,16     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | 0,071     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | 0,062           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,48     | 0,74  | N/A       | 0,78                    | 0,24      | 0,25                  | <0,05           | 0,66      | 0,50       | 0,063    | 0,10       | 0,066     | <0,05 | 0,066     | 0,28       | 0,20            | 0,15     | 0,39     | 0,31        |             |          |         |
| 2,1      | 5,5   | N/A       | 2,5                     | 0,88      | 0,83                  | <0,5            | 4,6       | 1,7        | <0,5     | 0,53       | <0,5      | <0,5  | 0,59      | 1,4        | 2,2             | 0,87     | 1,6      | 1,6         |             |          |         |
| 2,8      | 4,2   | N/A       | 2,6                     | 0,72      | 1,1                   | <0,5            | 1,00      | 1,6        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,53      | 1,3        | 1,1             | 0,96     | 1,5      | 1,3         |             |          |         |
| 0,20     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,19     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,51     | 0,83  | N/A       | 0,84                    | 0,24      | 0,26                  | <0,05           | 0,71      | 0,50       | 0,079    | <0,05      | 0,066     | 0,060 | 0,090     | 0,31       | 0,21            | 0,17     | 0,45     | 0,35        |             |          |         |
| 2,6      | 5,3   | N/A       | 2,7                     | 0,77      | 1,0                   | <0,5            | 4,6       | 1,5        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,51      | 1,5        | 2,1             | 1,1      | 1,6      | 1,5         |             |          |         |
| 2,4      | 4,6   | N/A       | 2,6                     | 0,80      | 0,91                  | <0,5            | 3,7       | 1,7        | <0,5     | <0,5       | <0,5      | <0,5  | 0,54      | 1,4        | 1,2             | 0,99     | 1,4      | 1,4         |             |          |         |
| 0,20     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,20     | <0,05 | N/A       | <0,05                   | <0,05     | <0,05                 | <0,05           | <0,05     | <0,05      | <0,05    | <0,05      | <0,05     | <0,05 | <0,05     | <0,05      | <0,05           | <0,05    | <0,05    | <0,05       | <0,05       | <0,05    | <0,05   |
| 0,59     | 0,99  | N/A       | 0,98                    | 0,32      | 0,29                  | <0,05           | 0,84      | 0,61       | 0,11     | <0,05      | 0,057     | 0,11  | 0,09      | 0,39       | 0,27            | 0,22     | 0,55     | 0,40        |             |          |         |
| 2,0      | 5,5   | N/A       | 2,5                     | 1,0       | 0,82                  | <0,5            | 4,5       | 1,7</      |          |            |           |       |           |            |                 |          |          |             |             |          |         |

# Anhang C

## Konzentrationen und Eliminationsraten in der vierten Reinigungsstufe

| Sample Name         | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf O3 23.11.17  | 0,82        | 7,8          | 0,65        | 0,53         | 0,35       | 0,08           | 1,8        | 1,6                | 0,53        | 2,3         | 15          | 0,48        |
| Ablauf O3 23.11.17  | 0,06        | 2,7          | 0,16        | 0,05         | 0,025      | 0,05           | 0,05       | 0,10               | 0,16        | 0,43        | 3,5         | 0,09        |
| Sandfilter 23.11.17 | 0,06        | 2,6          | 0,15        | 0,05         | 0,025      | 0,05           | 0,05       | 0,09               | 0,15        | 0,40        | 2,8         | 0,09        |
| BAK-Filter 23.11.17 | 0,025       | 0,025        | 0,06        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,05       | 0,025              | 0,05        | 0,025       | 0,05        | 0,025       |
| Elimination O3      | 92,6829268  | 65,38461538  | 75,3846154  | 90,56603774  | 92,857143  | 37,5           | 97,2222222 | 93,75              | 69,81132075 | 81,30434783 | 76,6666667  | 81,25       |
| Elimination SF      | 0           | 3,703703704  | 6,25        | 0            | 0          | 0              | 0          | 10                 | 6,25        | 6,976744186 | 20          | 0           |
| Elimination O3+SF   | 92,6829268  | 66,66666667  | 76,9230769  | 90,56603774  | 92,857143  | 37,5           | 97,2222222 | 94,375             | 71,69811321 | 82,60869565 | 81,33333333 | 81,25       |
| Elimination BAK     | 58,33333333 | 99,07407407  | 62,5        | 50           | 0          | 0              | 0          | 75                 | 68,75       | 94,18604651 | 98,57142857 | 72,22222222 |
| Elimination O3+BAK  | 96,9512195  | 99,67948718  | 90,7692308  | 95,28301887  | 92,857143  | 37,5           | 97,2222222 | 98,4375            | 90,56603774 | 98,91304348 | 99,66666667 | 94,79166667 |

| Sample Name         | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|---------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ablauf VK 29.11.17  | 0,94       | 11           | 0,69        | 0,38         | 0,36       | 0,56           | 2,0         | 1,9                | 0,74        | 2,3         | 40          | 0,40        |
| Zulauf O3 29.11.17  | 0,55       | 5,1          | 0,47        | 0,34         | 0,32       | 0,10           | 1,2         | 1,2                | 0,48        | 1,8         | 8,0         | 0,43        |
| Ablauf O3 29.11.17  | 0,05       | 0,35         | 0,05        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,025       | 0,025              | 0,05        | 0,05        | 0,10        | 0,025       |
| Sandfilter 29.11.17 | 0,07       | 0,96         | 0,06        | 0,05         | 0,11       | 0,05           | 0,05        | 0,05               | 0,08        | 0,18        | 0,68        | 0,08        |
| BAK-Filter 29.11.17 | 0,05       | 0,05         | 0,05        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,09        | 0,025              | 0,05        | 0,025       | 0,05        | 0,025       |
| Elimination O3      | 90,9090909 | 93,1372549   | 89,3617021  | 92,64705882  | 92,1875    | 50             | 97,91666667 | 97,91666667        | 89,58333333 | 97,22222222 | 98,75       | 94,18604651 |
| Elimination SF      | -40        | -174,2857143 | -20         | -100         | -340       | 0              | -100        | -100               | -60         | -260        | -580        | -220        |
| Elimination O3+SF   | 87,2727273 | 81,17647059  | 87,2340426  | 85,29411765  | 65,625     | 50             | 95,83333333 | 95,83333333        | 83,33333333 | 90          | 91,5        | 81,39534884 |
| Elimination BAK     | 0          | 85,71428571  | 0           | 0            | 0          | 0              | 0           | 0                  | 0           | 0           | 50          | 0           |
| Elimination O3+BAK  | 90,9090909 | 99,01960784  | 89,3617021  | 92,64705882  | 92,1875    | 50             | 92,5        | 97,91666667        | 89,58333333 | 98,61111111 | 99,375      | 94,18604651 |

| Sample Name          | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan   | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wüst 6.12.17   | <0,01      | 0,097        | 0,017       | 0,017        | 0,010      | <0,01          | 0,024       | 0,018              | <0,01        | 0,020       | 0,035       | 0,014       |
| Ablauf VK 6.12.17    | 0,85       | 8,9          | 0,65        | 0,40         | 0,44       | 0,69           | 1,9         | 1,9                | 0,69         | 2,5         | 7,4         | 0,59        |
| Zulauf O3 5/6.12.17  | 1,0        | 7,6          | 0,78        | 0,49         | 0,44       | 0,21           | 2,1         | 2,0                | 0,75         | 2,7         | 5,4         | 0,67        |
| Ablauf O3 5/6.12.17  | 0,07       | 3,4          | 0,26        | 0,025        | 0,11       | 0,05           | 0,09        | 0,21               | 0,27         | 0,76        | 2,0         | 0,15        |
| Sandfilter 5/6.12.17 | 0,07       | 3,6          | 0,26        | 0,025        | 0,11       | 0,05           | 0,05        | 0,22               | 0,27         | 0,77        | 1,9         | 0,14        |
| BAK-Filter 5/6.12.17 | 0,05       | 0,05         | 0,14        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,05        | 0,025              | 0,08         | 0,05        | 0,05        | 0,025       |
| Silbermühle 6.12.17  | 0,018      | 0,46         | 0,042       | 0,015        | 0,019      | <0,01          | 0,034       | 0,038              | 0,028        | 0,078       | 0,27        | 0,022       |
| Elimination O3       | 93         | 55,26315789  | 66,6666667  | 94,89795918  | 75         | 76,19047619    | 95,7142857  | 89,5               | 64           | 71,85185185 | 62,96296296 | 77,6119403  |
| Elimination SF       | 0          | -5,882352941 | 0           | 0            | 0          | 0              | 0           | 44,44444444        | -4,761904762 | 0           | -3,1578947  | 5           |
| Elimination O3+SF    | 93         | 52,63157895  | 66,6666667  | 94,89795918  | 75         | 76,19047619    | 97,6190476  | 89                 | 64           | 71,48148148 | 64,81481481 | 79,10447761 |
| Elimination BAK      | 28,5714286 | 98,52941176  | 46,1538462  | 0            | 77,272727  | 0              | 44,44444444 | 88,0952381         | 70,37037037  | 93,42105263 | 97,5        | 83,33333333 |
| Elimination O3+BAK   | 95         | 99,34210526  | 82,0512821  | 94,89795918  | 94,318182  | 76,19047619    | 97,6190476  | 98,75              | 89,33333333  | 98,14814815 | 99,07407407 | 96,26865672 |

| Sample Name          | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wüst 12.12.17  | 0,025      | 0,025        | 0,025       | 0,025        | 0,025      | <0,01          | 0,025       | 0,025              | 0,025       | 0,025       | 0,025       | 0,025       |
| Ablauf VK 12.12.17   | 0,07       | 1,1          | 0,38        | 0,31         | 0,67       | 0,05           | 0,43        | 1,9                | 0,67        | 2,2         | 1,3         | 0,51        |
| Zulauf O3 12.12.17   | 0,56       | 4,0          | 0,35        | 0,29         | 0,27       | 0,07           | 1,2         | 0,90               | 0,36        | 1,4         | 7,0         | 0,31        |
| Ablauf O3 12.12.17   | 0,025      | 1,5          | 0,08        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,05        | 0,025              | 0,10        | 0,17        | 1,0         | 0,025       |
| Sandfilter 12.12.17  | 0,025      | 1,1          | 0,08        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,025       | 0,025              | 0,09        | 0,15        | 0,74        | 0,025       |
| BAK-Filter 12.12.17  | 0,025      | 0,025        | 0,05        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,025       | 0,025              | 0,05        | 0,025       | 0,05        | 0,025       |
| Silbermühle 12.12.17 | 0,046      | 0,45         | 0,040       | 0,033        | 0,026      | <0,01          | 0,10        | 0,087              | 0,031       | 0,13        | 0,58        | 0,034       |
| Elimination O3       | 95,5357143 | 62,5         | 77,1428571  | 91,37931034  | 90,740741  | 28,57142857    | 95,83333333 | 97,22222222        | 72,22222222 | 87,85714286 | 85,71428571 | 91,93548387 |
| Elimination SF       | 0          | 26,66666667  | 0           | 0            | 0          | 0              | 0           | 10                 | 11,76470588 | 0           | 26          | 0           |
| Elimination O3+SF    | 95,5357143 | 72,5         | 77,1428571  | 91,37931034  | 90,740741  | 28,57142857    | 97,91666667 | 97,22222222        | 75          | 89,28571429 | 89,42871429 | 91,93548387 |
| Elimination BAK      | 0          | 98,33333333  | 37,5        | 0            | 0          | 0              | 0           | 50                 | 85,29411765 | 0           | 95          | 0           |
| Elimination O3+BAK   | 95,5357143 | 99,375       | 85,7142857  | 91,37931034  | 90,740741  | 28,57142857    | 97,91666667 | 97,22222222        | 86,11111111 | 98,21428571 | 99,28571429 | 91,93548387 |

| Sample Name              | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|--------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wüst 4.1.18        | <0,01      | 0,054        | <0,01       | <0,01        | <0,01      | <0,01          | <0,01       | <0,01              | <0,01       | 0,011       | 0,016       | <0,01       |
| Ablauf VK 4.1.18         | 0,42       | 4,1          | 0,34        | 0,19         | 0,08       | 0,19           | 0,84        | 0,90               | 0,32        | 0,75        | 1,3         | 0,18        |
| Zulauf O3 4.1.18         | 0,32       | 3,3          | 0,30        | 0,20         | 0,14       | 0,30           | 0,76        | 0,88               | 0,32        | 1,1         | 1,3         | 0,23        |
| Ablauf O3 4.1.18         | 0,05       | 1,8          | 0,12        | 0,025        | 0,05       | 0,17           | 0,025       | 0,10               | 0,14        | 0,36        | 0,57        | 0,05        |
| Sandfilter 4.1.18        | 0,05       | 1,6          | 0,13        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,05        | 0,025              | 0,16        | 0,25        | 0,41        | 0,05        |
| BAK-Filter 4.1.18        | 0,05       | 0,05         | 0,05        | 0,025        | 0,025      | 0,22           | 0,025       | 0,025              | 0,05        | 0,05        | 0,05        | 0,05        |
| Gesamtablauf 4.1.18      | 0,24       | 2,7          | 0,19        | 0,14         | 0,09       | 0,15           | 0,47        | 0,65               | 0,20        | 0,71        | 1,1         | 0,18        |
| Silbermühle 4.1.18       | 0,082      | 0,85         | 0,076       | 0,046        | 0,024      | <0,01          | 0,17        | 0,19               | 0,069       | 0,22        | 0,33        | 0,046       |
| Elimination O3           | 84,375     | 45,45454545  | 60          | 87,5         | 64,285714  | 43,33333333    | 96,7105263  | 88,63636364        | 56,25       | 67,27272727 | 56,15384615 | 78,26086957 |
| Elimination SF           | 0          | 11,11111111  | -8,33333333 | 0            | 0          | 0              | 0           | 0                  | 75          | -14,2857143 | 30,55555556 | 28,07017544 |
| Elimination O3+SF        | 84,375     | 51,51515152  | 56,66666667 | 87,5         | 82,142857  | 83,33333333    | 93,42105263 | 97,15909091        | 50          | 77,27272727 | 68,46153846 | 78,26086957 |
| Elimination BAK          | 0          | 97,22222222  | 50          | 0            | 0          | -29,41176471   | 0           | 75                 | 64,28571429 | 86,11111111 | 91,22807018 | 0           |
| Elimination O3+BAK       | 84,375     | 98,48484848  | 80          | 87,5         | 82,142857  | 26,66666667    | 96,7105263  | 97,15909091        | 84,375      | 95,45454545 | 96,15384615 | 78,26086957 |
| Elimination Gesamtablauf | 42,8571429 | 34,14634146  | 44,1176471  | 26,31578947  | -12,5      | 21,05263158    | 44,047619   | 27,77777778        | 37,5        | 5,333333333 | 15,38461538 | 0           |

| Sample Name         | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|---------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wüst 8.1.18   | <0,01      | 0,023        | <0,01       | <0,01        | <0,01      | <0,01          | 0,018      | <0,01              | 0,025       | <0,01       | <0,01       | <0,01       |
| Ablauf VK 8.1.18    | 0,79       | 11           | 0,71        | 0,31         | 0,24       | 0,32           | 2,7        | 1,7                | 0,96        | 1,6         | 3,1         | 0,34        |
| Zulauf O3 7/8.1.18  | 0,28       | 3,3          | 0,30        | 0,17         | 0,11       | 0,11           | 0,86       | 0,89               | 0,31        | 0,99        | 0,65        | 0,26        |
| Ablauf O3 7/8.1.18  | 0,05       | 2,4          | 0,17        | 0,025        | 0,05       | 0,09           | 0,025      | 0,21               | 0,20        | 0,45        | 0,29        | 0,09        |
| Sandfilter 7/8.1.18 | 0,05       | 2,2          | 0,17        | 0,025        | 0,05       | 0,09           | 0,025      | 0,18               | 0,19        | 0,43        | 0,24        | 0,08        |
| BAK-Filter 7/8.1.18 | 0,05       | 0,05         | 0,11        | 0,025        | 0,025      | 0,09           | 0,025      | 0,025              | 0,08        | 0,05        | 0,05        | 0,05        |
| Gesamtablauf 8.1.18 | 0,27       | 3,1          | 0,28        | 0,17         | 0,12       | 0,10           | 0,78       | 0,88               | 0,28        | 0,99        | 0,55        | 0,29        |
| Silbermühle 8.1.18  | 0,022      | 0,36         | 0,032       | 0,015        | 0,012      | <0,01          | 0,052      | 0,069              | 0,029       | 0,088       | 0,053       | 0,025       |
| Elimination O3      | 82,1428571 | 27,27272727  | 43,33333333 | 85,29411765  | 54,545455  | 18,18181818    | 97,0930233 | 76,40449438        | 35,48387097 | 54,54545455 | 55,38461538 | 65,38461538 |
| Elimination SF      | 0          | 8,333333333  | 0           | 0            | 0          | 0              | 0          | 14,28571429        | 5           | 4,444444444 | 17,24137931 | 11,11111111 |
| Elimination O3+SF   | 82,1428571 | 33,33333333  | 43,33333333 | 85,29411765  | 54,545455  | 18,18181818    | 97,0930233 | 79,7752809         | 38,70967742 | 56,56565657 | 63,07692308 | 69,23076923 |
| Elimination BAK     | 0          | 97,91666667  | 35,2941176  | 0            | 0          | 0              | 0          | 88,0952381         | 60          | 88,88888889 | 82,75862069 | 44,4        |

| Sample Name             | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wuest 23.1.18     | <0,01       | 0,037        | <0,01       | <0,01        | 0,025      | <0,01          | <0,01       | 0,025              | <0,01       | <0,01       | 0,01        | 0,01        |
| Ablauf VK 23.1.18       | 0,05        | 6,2          | 0,19        | 0,18         | 0,22       | 0,05           | 0,20        | 0,74               | 0,30        | 0,76        | 9,7         | 0,16        |
| Zulauf O3 23.1.18       | 0,23        | 2,9          | 0,26        | 0,20         | 0,11       | 0,07           | 0,64        | 0,63               | 0,27        | 0,69        | 2,8         | 0,15        |
| Ablauf O3 23.1.18       | 0,09        | 2,0          | 0,18        | 0,025        | 0,07       | 0,06           | 0,06        | 0,29               | 0,19        | 0,43        | 1,5         | 0,08        |
| Sandfilter 23.1.18      | 0,09        | 2,0          | 0,17        | 0,025        | 0,06       | 0,05           | 0,05        | 0,30               | 0,18        | 0,41        | 1,3         | 0,08        |
| BAK-Filter 23.1.18      | 0,05        | 0,025        | 0,14        | 0,025        | 0,025      | 0,05           | 0,05        | 0,025              | 0,12        | 0,05        | 0,05        | 0,05        |
| Gesamttafel 23.1.18     | 0,05        | 1,8          | 0,10        | 0,10         | 0,11       | 0,05           | 0,05        | 0,26               | 0,20        | 0,48        | 2,7         | 0,09        |
| Silbermühle 23.1.18     | 0,028       | 0,39         | 0,035       | 0,020        | 0,010      | <0,01          | 0,071       | 0,071              | 0,032       | 0,076       | 0,53        | 0,014       |
| Elimination O3          | 60,8695652  | 31,03448276  | 30,7692308  | 87,5         | 36,363636  | 14,28571429    | 90,625      | 53,96825397        | 29,62962963 | 37,68115942 | 46,42857143 | 46,66666667 |
| Elimination SF          | 0           | 0            | 5,55555556  | 0            | 14,285714  | 16,66666667    | 16,66666667 | -3,448275862       | 5,263157895 | 4,651162791 | 13,33333333 | 0           |
| Elimination O3+SF       | 60,8695652  | 31,03448276  | 34,6153846  | 87,5         | 45,454545  | 28,57142857    | 92,1875     | 52,38095238        | 33,33333333 | 40,57971014 | 53,57142857 | 46,66666667 |
| Elimination BAK         | 44,44444444 | 98,75        | 22,22222222 | 0            | 64,285714  | 16,66666667    | 16,66666667 | 91,37931034        | 36,84210526 | 88,37209302 | 96,66666667 | 37,5        |
| Elimination O3+BAK      | 78,2608696  | 99,13793103  | 46,1538462  | 87,5         | 77,272727  | 28,57142857    | 92,1875     | 96,03174603        | 55,55555556 | 92,75362319 | 98,21428571 | 66,66666667 |
| Elimination Gesamttafel | 0           | 70,96774194  | 47,3684211  | 44,44444444  | 50         | 0              | 75          | 64,86486486        | 33,33333333 | 36,84210526 | 72,16494845 | 43,75       |

| Sample Name             | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram  | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sped. Wuest 29.1.18     | <0,01       | 0,024        | <0,01       | <0,01        | 0,025       | <0,01          | <0,01       | 0,025              | <0,01       | <0,01       | 0,01        | <0,01       |
| Ablauf VK 29.1.18       | 1,5         | 10           | 0,96        | 0,48         | 0,24        | 0,20           | 2,4         | 2,1                | 1,2         | 2,2         | 9,8         | 0,40        |
| Zulauf O3 28/29.1.18    | 0,54        | 5,8          | 0,62        | 0,48         | 0,18        | 0,12           | 1,7         | 1,4                | 0,62        | 1,6         | 3,9         | 0,34        |
| Ablauf O3 28/29.1.18    | 0,18        | 4,5          | 0,44        | 0,05         | 0,10        | 0,06           | 0,06        | 0,76               | 0,44        | 1,1         | 2,6         | 0,20        |
| Sandfilter 28/29.1.18   | 0,18        | 4,3          | 0,40        | 0,05         | 0,09        | 0,06           | 0,06        | 0,69               | 0,40        | 1,0         | 2,5         | 0,18        |
| BAK-Filter 28/29.1.18   | 0,05        | 0,025        | 0,29        | 0,025        | 0,025       | 0,05           | 0,05        | 0,025              | 0,23        | 0,07        | 0,07        | 0,05        |
| Gesamttafel 29.1.18     | 0,26        | 2,7          | 0,45        | 0,13         | 0,09        | 0,07           | 0,47        | 0,65               | 0,41        | 0,79        | 1,6         | 0,20        |
| Silbermühle 29.1.18     | 0,066       | 0,59         | 0,10        | 0,049        | 0,016       | <0,01          | 0,16        | 0,17               | 0,079       | 0,19        | 0,35        | 0,043       |
| Elimination O3          | 66,6666667  | 22,4137931   | 29,0322581  | 89,58333333  | 44,444444   | 50             | 96,4705882  | 45,71428571        | 29,03225806 | 31,25       | 33,33333333 | 41,17647059 |
| Elimination SF          | 0           | 4,44444444   | 9,09090909  | 0            | 10          | 0              | 0           | 9,210526316        | 9,090909091 | 9,090909091 | 3,846153846 | 10          |
| Elimination O3+SF       | 66,6666667  | 25,86206897  | 35,483871   | 89,58333333  | 50          | 50             | 96,4705882  | 50,71428571        | 35,48387097 | 37,5        | 35,89743599 | 47,05882353 |
| Elimination BAK         | 72,22222222 | 99,44444444  | 34,0909091  | 50           | 75          | 16,66666667    | 16,66666667 | 96,71052632        | 47,72727273 | 93,63636364 | 97,60769231 | 75          |
| Elimination O3+BAK      | 90,7407407  | 99,56896552  | 53,2258065  | 94,79166667  | 86,11111111 | 58,33333333    | 97,0588235  | 98,21428571        | 62,90122581 | 65,936264   | 85,29411765 | 85,29411765 |
| Elimination Gesamttafel | 82,6666667  | 73           | 53,125      | 72,91666667  | 62,5        | 65             | 80,4166667  | 69,04761905        | 65,83333333 | 64,09090909 | 83,67346939 | 50          |

| Sample Name         | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| Zulauf O3 3/4.2.18  | 0,71        | 6,9          | 0,63        | 0,43         | 0,26       | 0,23           | 1,7         | 1,5                | 0,62        | 2,0        | 6,5         | 0,47        |
| Ablauf O3 3/4.2.18  | 0,42        | 5,9          | 0,50        | 0,05         | 0,19       | 0,11           | 0,09        | 1,1                | 0,48        | 1,6        | 5,0         | 0,35        |
| Sandfilter 3/4.2.18 | 0,41        | 5,6          | 0,47        | 0,05         | 0,17       | 0,10           | 0,08        | 1,1                | 0,47        | 1,6        | 4,3         | 0,33        |
| BAK-Filter 3/4.2.18 | 0,07        | 0,18         | 0,35        | 0,025        | 0,05       | 0,08           | 0,05        | 0,08               | 0,26        | 0,16       | 0,15        | 0,11        |
| Elimination O3      | 40,8450704  | 14,49275362  | 20,6349206  | 88,37209302  | 26,923077  | 52,17391304    | 94,7058824  | 26,66666667        | 22,58064516 | 20         | 23,07692308 | 25,53191489 |
| Elimination SF      | 2,38095238  | 5,084745763  | 6           | 0            | 10,526316  | 9,090909091    | 11,11111111 | 0                  | 2,083333333 | 0          | 14          | 5,714285714 |
| Elimination O3+SF   | 42,2535211  | 18,84057971  | 25,3968254  | 88,37209302  | 34,6153846 | 56,52173913    | 95,2941176  | 26,66666667        | 24,19354839 | 20         | 33,84615385 | 29,78723404 |
| Elimination BAK     | 83,33333333 | 96,94915254  | 30          | 50           | 73,684211  | 27,27272727    | 44,44444444 | 92,72727273        | 45,83333333 | 90         | 97          | 68,57142857 |
| Elimination O3+BAK  | 90,1408451  | 97,39130435  | 44,44444444 | 94,18604651  | 80,769231  | 65,2173913     | 97,0588235  | 94,66666667        | 58,06451613 | 92         | 97,69230769 | 76,59574468 |

| Sample Name             | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BAK-Filter 15.2.18      | 0,10        | 0,22         | 0,44        | 0,025        | 0,025      | 0,13           | 0,16       | 0,10               | 0,35        | 0,18        | 0,30        | 0,15        |
| Sandfilter 15.2.18      | 0,93        | 8,7          | 0,64        | 0,12         | 0,33       | 0,15           | 0,48       | 1,4                | 0,66        | 2,4         | 12          | 0,56        |
| Ablauf O3 15.2.18       | 0,84        | 8,2          | 0,60        | 0,05         | 0,36       | 0,15           | 0,14       | 1,3                | 0,62        | 2,3         | 12          | 0,55        |
| Zulauf O3 15.2.18       | 1,4         | 10           | 0,80        | 0,49         | 0,49       | 0,22           | 2,1        | 1,8                | 0,85        | 2,9         | 15          | 0,70        |
| Gesamttafel 15.2.18     | 0,52        | 4,6          | 0,56        | 0,05         | 0,22       | 0,13           | 0,20       | 0,80               | 0,50        | 1,4         | 6,5         | 0,38        |
| Vorklärung 15.2.18      | 3,2         | 12           | 1,2         | 0,52         | 0,63       | 0,43           | 2,7        | 2,3                | 1,4         | 3,9         | 18          | 0,70        |
| Silbermühle 15.2.18     | 0,16        | 1,4          | 0,17        | 0,02         | 0,068      | 0,020          | 0,10       | 0,23               | 0,12        | 0,42        | 1,8         | 0,11        |
| Spedition Wuest 15.2.18 | <0,01       | 0,046        | <0,01       | <0,01        | 0,025      | 0,012          | <0,01      | 0,025              | <0,01       | 0,014       | 0,015       | <0,01       |
| Elimination O3          | 40          | 18           | 25          | 89,79591837  | 26,530612  | 31,81818182    | 93,3333333 | 27,77777778        | 27,05882353 | 20,68955147 | 20          | 21,42857143 |
| Elimination SF          | -10,7142857 | -6,097560976 | -6,66666667 | -140         | 8,33333333 | 0              | -242,85714 | -7,692307692       | -6,4516129  | -4,34782609 | 0           | -1,81818182 |
| Elimination O3+SF       | 33,57142861 | 13           | 20          | 75,51020408  | 32,653061  | 31,81818182    | 77,1428571 | 22,22222222        | 22,35294118 | 17,24137931 | 20          | 20          |
| Elimination BAK         | 88,0952381  | 97,31707317  | 26,66666667 | 50           | 93,055556  | 13,33333333    | -14,285714 | 92,30769231        | 43,5483871  | 92,17391304 | 97,5        | 72,72727273 |
| Elimination O3+BAK      | 92,8571429  | 97,8         | 45          | 94,89795918  | 94,897959  | 40,90909091    | 92,3809524 | 94,44444444        | 58,2352941  | 93,79310345 | 98          | 78,57142857 |
| Elimination Gesamttafel | 83,75       | 61,66666667  | 53,33333333 | 90,38461538  | 65,079365  | 69,7644486     | 92,5925926 | 65,2173913         | 64,28571429 | 64,1025641  | 63,88888889 | 45,71428571 |

| Sample Name           | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac  | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BAK-Filter 19/20.2.18 | 0,16       | 0,27         | 0,52        | 0,05         | 0,025      | 0,15           | 0,46        | 0,14               | 0,42        | 0,29        | 0,27        | 0,21        |
| Sandfilter 19/20.2.18 | 0,92       | 6,5          | 0,61        | 0,21         | 0,35       | 0,17           | 0,98        | 1,4                | 0,60        | 2,4         | 5,6         | 0,57        |
| Ablauf O3 19/20.2.18  | 1,1        | 7,7          | 0,71        | 0,23         | 0,38       | 0,19           | 1,0         | 1,5                | 0,69        | 2,6         | 8,5         | 0,63        |
| Zulauf O3 19/20.2.18  | 1,3        | 8,1          | 0,78        | 0,43         | 0,44       | 0,23           | 2,1         | 1,6                | 0,75        | 2,8         | 8,8         | 0,71        |
| Elimination O3        | 15,3846154 | 4,938271605  | 8,97435897  | 46,51162791  | 13,636364  | 17,39130435    | 52,3809524  | 6,25               | 8           | 7,142857143 | 3,409090909 | 11,26760563 |
| Elimination SF        | 16,3636364 | 15,58441558  | 14,084507   | 8,695652174  | 7,8947368  | 10,52631579    | 2           | 6,66666667         | 13,04347826 | 7,692307692 | 34,11764706 | 9,523809524 |
| Elimination O3+SF     | 29,2307692 | 19,75308642  | 21,7948718  | 51,1627907   | 20,454545  | 26,0895652     | 53,33333333 | 12,5               | 20          | 14,28571429 | 36,36363636 | 19,71830986 |
| Elimination BAK       | 85,4545455 | 96,49350649  | 26,7605634  | 78,26086957  | 93,4210523 | 21,05263158    | 54          | 90,66666667        | 39,13043478 | 88,84651385 | 96,82352941 | 66,66666667 |
| Elimination O3+BAK    | 87,6923077 | 96,66666667  | 33,33333333 | 88,37209302  | 94,318182  | 34,7826087     | 78,0952381  | 91,25              | 44          | 84,64285714 | 96,93181818 | 70,42253521 |

| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BAK-Filter 25/26.2.18 | 0,15        | 0,30         | 0,54        | 0,025        | 0,025      | 0,13           | 0,17       | 0,13               | 0,42        | 0,31        | 0,25        | 0,21        |
| Sandfilter 25/26.2.18 | 1,0         | 7,1          | 0,73        | 0,11         | 0,36       | 0,15           | 0,36       | 1,5                | 0,68        | 2,7         | 5,3         | 0,63        |
| Ablauf O3 25/26.2.18  | 1,1         | 7,2          | 0,75        | 0,13         | 0,39       | 0,14           | 0,40       | 1,5                | 0,70        | 2,8         | 5,7         | 0,67        |
| Zulauf O3 25/26.2.18  | 1,5         | 8,0          | 0,89        | 0,51         | 0,51       | 0,18           | 2,1        | 1,9                | 0,83        | 3,2         | 6,2         | 0,78        |
| Elimination O3        | 26,6666667  | 10           | 15,7303371  | 74,50980392  | 23,529412  | 22,22222222    | 80,952381  | 21,05263158        | 15,6626506  | 12,5        | 8,064516129 | 14,1025641  |
| Elimination SF        | 9,09090909  | 1,388888889  | 2,66666667  | 15,38461538  | 7,6923077  | -7,142857143   | 10         | 0                  | 2,857142857 | 3,571428571 | 7,01754386  | 5,970149254 |
| Elimination O3+SF     | 33,33333333 | 11,25        | 17,9775281  | 78,43137255  | 29,411765  | 16,66666667    | 82,8571429 | 21,05263158        | 18,07228916 | 15,625      | 14,51612903 | 19,23076923 |
| Elimination BAK       |             |              |             |              |            |                |            |                    |             |             |             |             |

| Sample Name              | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|--------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 23.4./24.4.18  | n.a.       | 14           | n.a.        | 1,4          | 0,94       | 1,1            | 4,6        | n.a.               | 1,2         | 3,6         | 2,2         | 1,4         |
| Ablauf 03 23.4./24.4.18  | n.a.       | 5,6          | n.a.        | 0,025        | 0,33       | 0,60           | 0,025      | n.a.               | 0,26        | 1,0         | 6,7         | 0,33        |
| Sandfilter 23.4./24.4.18 | n.a.       | 3,0          | n.a.        | 0,025        | 0,31       | 0,59           | 0,025      | n.a.               | 0,050       | 0,58        | 3,6         | 0,24        |
| BAK-Filter 23.4./24.4.18 | n.a.       | 0,25         | n.a.        | 0,025        | 0,28       | 0,59           | 0,025      | n.a.               | 0,025       | 0,050       | 0,19        | 0,14        |
| Elimination O3           | #WERT!     | 58,71762709  | #WERT!      | 98,16446402  | 65,069223  | 45,71948998    | 99,4545058 | #WERT!             | 78,29716194 | 71,41673571 | 69,31199852 | 77,26008345 |
| Elimination SF           | #WERT!     | 45,66577301  | #WERT!      | 0            | 4,5731707  | 1,342281879    | 0          | #WERT!             | 80,76923077 | 44,34782609 | 45,69496619 | 27,21712538 |
| Elimination O3+SF        | #WERT!     | 77,5695418   | #WERT!      | 98,16446402  | 66,666667  | 46,44808743    | 99,4545058 | #WERT!             | 95,8263773  | 84,09279205 | 83,33487042 | 83,44923505 |
| Elimination BAK          | #WERT!     | 95,47810545  | #WERT!      | 0            | 14,939024  | 0,33557047     | 0          | #WERT!             | 90,38461538 | 95,16908213 | 97,08489857 | 55,96330275 |
| Elimination O3+BAK       | #WERT!     | 98,13325463  | #WERT!      | 98,16446402  | 70,28754   | 45,90163934    | 99,4545058 | #WERT!             | 97,91318865 | 98,61916598 | 99,10541363 | 89,98609179 |

| Sample Name              | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|--------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 25.4./26.4.18  | n.a.       | 8,5          | n.a.        | 0,69         | 0,61       | 0,73           | 2,6        | n.a.               | 0,54        | 2,1         | 1,8         | 0,82        |
| Ablauf 03 25.4./26.4.18  | n.a.       | 5,6          | n.a.        | 0,025        | 0,32       | 0,60           | 0,025      | n.a.               | 0,23        | 1,1         | 10,0        | 0,35        |
| Sandfilter 25.4./26.4.18 | n.a.       | 4,3          | n.a.        | 0,025        | 0,31       | 0,60           | 0,025      | n.a.               | 0,097       | 0,84        | 7,3         | 0,29        |
| BAK-Filter 25.4./26.4.18 | n.a.       | 0,17         | n.a.        | 0,025        | 0,28       | 0,59           | 0,025      | n.a.               | 0,025       | 0,050       | 0,18        | 0,14        |
| Elimination O3           | #WERT!     | 33,9174409   | #WERT!      | 96,36627907  | 48,208469  | 18,66485014    | 99,0380916 | #WERT!             | 56,26168224 | 48,55655466 | 44,11337209 | 57,73447016 |
| Elimination SF           | #WERT!     | 24,18579818  | #WERT!      | 0            | 2,5157233  | -0,67001675    | 0          | #WERT!             | 58,54700855 | 22,99908004 | 26,78803619 | 15,56195965 |
| Elimination O3+SF        | #WERT!     | 49,90003528  | #WERT!      | 96,36627907  | 49,511401  | 18,11989101    | 99,0380916 | #WERT!             | 81,86915888 | 60,38807383 | 59,08430233 | 63,31181486 |
| Elimination BAK          | #WERT!     | 97,06353444  | #WERT!      | 0            | 12,264151  | 1,172529313    | 0          | #WERT!             | 89,31623932 | 95,40018399 | 98,23947184 | 59,07780998 |
| Elimination O3+BAK       | #WERT!     | 98,05950841  | #WERT!      | 96,36627907  | 54,560261  | 19,61852861    | 99,0380916 | #WERT!             | 95,3271028  | 97,63369617 | 99,01610018 | 82,70401949 |

| Sample Name              | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|--------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 22.5./23.5.18  | n.a.       | 7,1          | n.a.        | 0,62         | 0,59       | 0,71           | 2,3        | n.a.               | 0,71        | 2,5         | 5,7         | 0,76        |
| Ablauf 03 22.5./23.5.18  | n.a.       | 3,9          | n.a.        | 0,025        | 0,33       | 0,61           | 0,025      | n.a.               | 0,20        | 1,1         | 2,9         | 0,32        |
| Sandfilter 22.5./23.5.18 | n.a.       | 3,7          | n.a.        | 0,025        | 0,32       | 0,59           | 0,025      | n.a.               | 0,20        | 1,0         | 2,5         | 0,29        |
| BAK-Filter 22.5./23.5.18 | n.a.       | 0,14         | n.a.        | 0,025        | 0,28       | 0,59           | 0,025      | n.a.               | 0,025       | 0,050       | 0,071       | 0,13        |
| Elimination O3           | #WERT!     | 44,59724951  | #WERT!      | 95,96122779  | 44,273504  | 14,28571429    | 98,9261168 | #WERT!             | 71,46892655 | 56,89312674 | 48,91608392 | 58,49802372 |
| Elimination SF           | #WERT!     | 6,129685917  | #WERT!      | 0            | 2,4539877  | 3,104575163    | 0          | #WERT!             | 0,495049505 | 5,622119816 | 14,57905544 | 6,666666667 |
| Elimination O3+SF        | #WERT!     | 47,9932641   | #WERT!      | 95,96122779  | 45,641026  | 16,94677871    | 98,9261168 | #WERT!             | 71,61016949 | 59,3166468  | 56,36363636 | 61,26482213 |
| Elimination BAK          | #WERT!     | 96,35258359  | #WERT!      | 0            | 14,723926  | 4,08496732     | 0          | #WERT!             | 87,62376238 | 95,39170507 | 97,50175073 | 59,04761905 |
| Elimination O3+BAK       | #WERT!     | 97,97923099  | #WERT!      | 95,96122779  | 52,478632  | 17,78711485    | 98,9261168 | #WERT!             | 96,46892655 | 98,01350814 | 98,75874126 | 83,00395257 |

| Sample Name                  | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 03.06./04.06.2018  | 0,67        | 7,0          | 0,84        | 0,59         | n.a.       | n.a.           | 2,6        | 2,0                | 0,85        | 2,2         | 5,3         | 0,85        |
| Ablauf 03 03.06./04.06.2018  | 0,16        | 2,9          | 0,20        | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,058      | 0,19               | 0,31        | 0,65        | 1,7         | 0,29        |
| Sandfilter 03.06./04.06.2018 | 0,16        | 2,9          | 0,20        | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,067      | 0,20               | 0,32        | 0,65        | 1,6         | 0,29        |
| BAK-Filter 03.06./04.06.2018 | 0,15        | 0,099        | 0,059       | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,061      | 0,025              | 0,10        | 0,10        | 0,088       | 0,22        |
| Elimination O3               | 76,6467066  | 58,11781609  | 76,2892709  | 95,75551783  | #WERT!     | #WERT!         | 97,7832983 | 90,47381546        | 63,59338061 | 70,77995055 | 68,04133396 | 66,13569322 |
| Elimination SF               | -3,28205128 | -0,480274443 | -1          | 0            | #WERT!     | #WERT!         | -15,517241 | -6,282722513       | -2,27272727 | 0,307692308 | 3,409758965 | -2,43902439 |
| Elimination O3+SF            | 76,3473054  | 57,91666667  | 76,0521636  | 95,75551783  | #WERT!     | #WERT!         | 97,4393273 | 89,87531172        | 62,76595745 | 70,8698584  | 69,13104744 | 65,30973451 |
| Elimination BAK              | 3,20512821  | 96,60377358  | 70,5        | 0            | #WERT!     | #WERT!         | -5,1724138 | 86,91099476        | 67,53246753 | 84          | 94,8265726  | 22,29965157 |
| Elimination O3+BAK           | 77,3952096  | 98,57758621  | 93,0053349  | 95,75551783  | #WERT!     | #WERT!         | 97,6686413 | 98,75311721        | 88,17966903 | 95,32479209 | 98,34664162 | 73,68731563 |

| Sample Name                  | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|------------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 11.06./12.06.2018  | 0,61       | 6,1          | 0,62        | 0,50         | n.a.       | n.a.           | 1,9        | 1,463              | 0,77        | 1,7         | 6,5         | 0,68        |
| Ablauf 03 11.06./12.06.2018  | 0,31       | 4,2          | 0,38        | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,22       | 0,80               | 0,50        | 1,1         | 4,2         | 0,43        |
| Sandfilter 11.06./12.06.2018 | 0,30       | 4,2          | 0,37        | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,20       | 0,81               | 0,50        | 1,1         | 4,0         | 0,42        |
| BAK-Filter 11.06./12.06.2018 | 0,15       | 0,16         | 0,29        | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,11       | 0,25               | 0,27        | 0,12        | 0,12        | 0,24        |
| Elimination O3               | 49,0968801 | 30,71293479  | 39,3548387  | 94,95967742  | #WERT!     | #WERT!         | 88,2509304 | 45,18113465        | 34,93819128 | 35,01689593 | 35,01689593 | 36,88823959 |
| Elimination SF               | 2,25806452 | 0,023736055  | 1,06382979  | 0            | #WERT!     | #WERT!         | 11,3122172 | -1,246882793       | 1           | 2,607913669 | 5,993840322 | 3,240740741 |
| Elimination O3+SF            | 50,2463054 | 30,72938081  | 40          | 94,95967742  | #WERT!     | #WERT!         | 89,5800106 | 44,49760766        | 35,58880937 | 37,29009844 | 38,91155415 | 38,93352812 |
| Elimination BAK              | 50,3225806 | 96,60377358  | 22,0744681  | 0            | #WERT!     | #WERT!         | 50,678733  | 96,88279302        | 46,4        | 89,56834532 | 97,18076285 | 44,44444444 |
| Elimination O3+BAK           | 74,7126437 | 97,35219143  | 52,7419355  | 94,95967742  | #WERT!     | #WERT!         | 94,20521   | 98,2911825         | 65,12687053 | 93,28314997 | 98,16796244 | 64,93791088 |

| Sample Name                  | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 18.06./19.06.2018  | 0,84        | 8,7          | 0,96        | 0,53         | n.a.       | n.a.           | 2,6        | 2,1725             | 1,0         | 2,5         | 9,3         | 0,88        |
| Ablauf 03 18.06./19.06.2018  | 0,15        | 2,1          | 0,059       | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,055      | 0,025              | 0,23        | 0,22        | 1,00        | 0,23        |
| Sandfilter 18.06./19.06.2018 | 0,15        | 2,0          | 0,061       | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,052      | 0,025              | 0,22        | 0,25        | 0,94        | 0,23        |
| BAK-Filter 18.06./19.06.2018 | 0,15        | 0,090        | 0,025       | 0,025        | n.a.       | n.a.           | 0,050      | 0,025              | 0,084       | 0,098       | 0,060       | 0,22        |
| Elimination O3               | 81,958457   | 76,06640535  | 93,879668   | 95,23809524  | #WERT!     | #WERT!         | 97,8902954 | 98,84925201        | 77,24374693 | 90,97165992 | 89,28032752 | 74,2338252  |
| Elimination SF               | -3,31578947 | 2,215799615  | -3,38983051 | 0            | #WERT!     | #WERT!         | 5,45454545 | 0                  | 3,448275862 | -9,86547085 | 5,427135678 | -0,44052863 |
| Elimination O3+SF            | 81,7210682  | 76,59672585  | 93,8721992  | 95,23809524  | #WERT!     | #WERT!         | 98,0053702 | 98,84925201        | 78,02844532 | 90,08097166 | 89,86209869 | 74,12031782 |
| Elimination BAK              | 1,31578947  | 95,66473988  | 57,6271186  | 0            | #WERT!     | #WERT!         | 9,09090909 | 0                  | 63,79310345 | 56,05381166 | 93,96984925 | 3,964757709 |
| Elimination O3+BAK           | 82,1958457  | 98,96241642  | 97,406639   | 95,23809524  | #WERT!     | #WERT!         | 98,0820867 | 98,84925201        | 91,76066699 | 96,03238866 | 99,35358759 | 75,2553916  |

| Sample Name                  | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf 03 25.06./26.06.2018  | 1,50        | 9,0          | 1,30        | 0,90         | 0,7        | 0,4            | 3,0        | 2,4                | 0,6         | 4,8         | 11,7        | 1,50        |
| Ablauf 03 25.06./26.06.2018  | 0,09        | 2,1          | 0,195       | 0,025        | 0,124      | 0,119          | 0,025      | 0,025              | 0,24        | 0,49        | 1,67        | 0,12        |
| Sandfilter 25.06./26.06.2018 | 0,10        | 2,1          | 0,186       | 0,025        | 0,129      | 0,137          | 0,025      | 0,05               | 0,22        | 0,47        | 1,39        | 0,13        |
| BAK-Filter 25.06./26.06.2018 | 0,09        | 0,136        | 0,106       | 0,025        | 0,115      | 0,129          | 0,000      | 0,025              | 0,050       | 0,099       | 0,066       | 0,10        |
| Elimination O3               | 93,9333333  | 74,47777778  | 85          | 97,22222222  | 82,285714  | 70,25          | 99,1539763 | 98,95833333        | 60,30308022 | 89,79166667 | 85,73504274 | 92,06666667 |
| Elimination SF               | -7,69230769 | 9,447104919  | 4,61538462  | 0            | -0,0322581 | -15,12605042   | 0          | -100               | 7,883817427 | 4,081632653 | 16,65668065 | -7,56302521 |
| Elimination O3+SF            | 93,4666667  | 76,88888889  | 85,6923077  | 97,22222222  | 81,571429  | 65,75          | 99,1539763 | 97,91666667        | 63,4327129  | 90,20833333 | 88,11111111 | 91,46666667 |
| Elimination BAK              | 3,2967033   | 94,07923378  | 45,6410256  | 0            | 7,2580645  | -8,403361345   | 100        | 0                  | 79,25311203 | 79,79591837 | 96,04553625 | 15,96638655 |
| Elimination O3+BAK           | 94,13333333 | 98,48888889  | 91,8461538  | 97,22222222  | 83,571429  | 67,75          | 100        | 98,95833333        | 91,76412453 | 97,9375     | 99,43589744 | 93,33333333 |

| Sample Name                 | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan | Metoprolol | Tolytriazol | Venlafaxin |
|-----------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Zulauf 03 02.07./03.07.2018 | 1,30       | 8,2          | 1,10        | 0,90         | 0,6        | 0,4            | 2,6        | 2                  | 1,1        | 4,2        | 8,4         | 1,20       |
| Ablauf 03 02.07./03.07.2018 | 0,47       | 4,1          | 0,470       | 0,306        | 0,264      | 0,188          | 0,934      | 0,658              | 0,54       | 1,         |             |            |

| Sample Name                  | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|------------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf O3 09.07./10.07.2018  | 1,30       | 6,2          | 0,93        | 0,66         | 0,54       | 0,32           | 2,3        | 2,4                | 0,9         | 4,2         | 7,0         | 1,10        |
| Ablauf O3 09.07./10.07.2018  | 0,03       | 1,6          | 0,140       | 0,025        | 0,065      | 0,067          | 0,025      | 0,05               | 0,18        | 0,36        | 0,87        | 0,05        |
| Sandfilter 09.07./10.07.2018 | 0,05       | 1,5          | 0,134       | 0,025        | 0,05       | 0,068          | 0,025      | 0,025              | 0,18        | 0,35        | 0,81        | 0,05        |
| BAK-Filter 09.07./10.07.2018 | 0,03       | 0,120        | 0,105       | 0,025        | 0,025      | 0,078          | 0,025      | 0,025              | 0,061       | 0,025       | 0,056       | 0,05        |
| Elimination O3               | 98,0769231 | 74,62903226  | 84,9462366  | 96,21212121  | 87,962963  | 79,0625        | 98,9130435 | 97,91666667        | 80,21978022 | 91,35714286 | 87,51428571 | 95,45454545 |
| Elimination SF               | -100       | 5,594405594  | 4,28571429  | 0            | 23,076923  | -1,492537313   | 0          | 50                 | 2,22222222  | 3,856749311 | 7,437070938 | -8          |
| Elimination O3+SF            | 96,1538462 | 76,0483871   | 85,5913978  | 96,21212121  | 90,7407411 | 78,75          | 98,9130435 | 98,95833333        | 80,65934066 | 91,69047619 | 88,44285714 | 95,09090909 |
| Elimination BAK              | 0          | 92,3712651   | 25          | 0            | 61,538462  | -16,41791045   | 0          | 50                 | 66,11111111 | 93,11294766 | 93,59267735 | 0           |
| Elimination O3+BAK           | 98,0769231 | 98,06451613  | 88,7096774  | 96,21212121  | 95,37037   | 75,625         | 98,9130435 | 98,95833333        | 93,2967033  | 99,4047619  | 99,2        | 95,45454545 |

| Sample Name           | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf O3 18.07.2018  | 1,57       | 7,7          | 1,00        | 0,71         | 0,574      | 0,52           | 2,2        | 1,8385             | 1,0         | 4,3         | 15,2        | 1,05        |
| Ablauf O3 18.07.2018  | 0,05       | 1,9          | 0,158       | 0,025        | 0,068      | 0,071          | 0,025      | 0,05               | 0,20        | 0,39        | 2,14        | 0,06        |
| Sandfilter 18.07.2018 | 0,06       | 1,9          | 0,162       | 0,025        | 0,149      | 0,082          | 0,025      | 0,05               | 0,20        | 0,50        | 2,10        | 0,10        |
| BAK-Filter 18.07.2018 | 0,05       | 0,169        | 0,11        | 0,025        | 0,055      | 0,093          | 0,025      | 0,025              | 0,077       | 0,072       | 0,138       | 0,05        |
| Elimination O3        | 96,8213605 | 74,90755757  | 84,2629482  | 96,47639183  | 88,15331   | 86,34615385    | 98,8436633 | 97,28039162        | 79,32083122 | 90,94044682 | 85,96825605 | 94,64627151 |
| Elimination SF        | -26        | 2,637021717  | -2,53164557 | 0            | -119,11765 | -15,49295775   | 0          | 0                  | 0,490196078 | -26,142132  | 1,8735363   | -75         |
| Elimination O3+SF     | 95,9949142 | 75,56925073  | 83,8645418  | 96,47639183  | 74,041812  | 84,23076923    | 98,8436633 | 97,28039162        | 79,4221997  | 88,57208554 | 86,23114587 | 90,63097514 |
| Elimination BAK       | 0          | 91,26163392  | 30,3797468  | 0            | 19,117647  | -30,98591549   | 0          | 50                 | 62,25490196 | 81,72588832 | 93,53629977 | 10,71428571 |
| Elimination O3+BAK    | 96,8213605 | 97,80733052  | 89,0438247  | 96,47639183  | 90,418118  | 82,11538462    | 98,8436633 | 98,64019581        | 92,19462747 | 98,344447   | 99,09303013 | 95,21988528 |

| Sample Name           | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
|-----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Zulauf O3 25.07.2018  | 0,95       | 8,4          | 1,24        | 0,70         | 0,517      | 0,302          | 2,7        | 1,994              | 1,0         | 3,6         | 15,3         | 0,91        |
| Ablauf O3 25.07.2018  | 0,03       | 2,2          | 0,194       | 0,025        | 0,05       | 0,068          | 0,025      | 0,05               | 0,25        | 0,27        | 1,90         | 0,05        |
| Sandfilter 25.07.2018 | 0,05       | 2,2          | 0,211       | 0,025        | 0,229      | 0,102          | 0,050      | 0,054              | 0,27        | 0,39        | 2,00         | 0,09        |
| BAK-Filter 25.07.2018 | 0,05       | 0,181        | 0,182       | 0,025        | 0,056      | 0,107          | 0,096      | 0,05               | 0,152       | 0,056       | 0,160        | 0,05        |
| Elimination O3        | 97,3767051 | 74,14836795  | 84,3925986  | 96,44381223  | 90,32882   | 77,48344371    | 99,0849195 | 98,74623872        | 79,44760357 | 92,58445482 | 87,57849294  | 94,4812362  |
| Elimination SF        | -108       | -1,331496786 | -8,7628866  | 0            | -358       | -50            | -100       | -116               | -7,11462451 | -42,5925926 | -5,371248025 | -76         |
| Elimination O3+SF     | 94,5435467 | 73,8041543   | 83,0249397  | 96,44381223  | 55,705996  | 66,22516556    | 98,1698389 | 97,29187563        | 77,98537774 | 89,42598187 | 86,91130298  | 90,28697572 |
| Elimination BAK       | -100       | 91,68962351  | 6,18556701  | 0            | -12        | -57,35294118   | -284       | -100               | 39,92094862 | 79,25925926 | 91,5745129   | 0           |
| Elimination O3+BAK    | 94,7534103 | 97,85163205  | 85,3580048  | 96,44381223  | 89,168279  | 64,56953642    | 96,4860908 | 97,49247743        | 87,65231519 | 98,461961   | 98,95342752  | 94,4812362  |

| Sample Name              | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
|--------------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Ablauf VK 01.08.2018     | 2,26       | 12,20        | 2,09        | 1,41         | 0,70       | 0,79           | 3,24       | 3,04               | 2,27        | 7,83        | 23,92        | 1,49        |
| Zulauf O3 01.08.2018     | 1,25       | 10,0         | 1,81        | 1,30         | 0,648      | 0,349          | 3,5        | 2,577              | 1,8         | 4,6         | 17,5         | 1,45        |
| Ablauf O3 01.08.2018     | 0,03       | 3,6          | 0,427       | 0,025        | 0,05       | 0,092          | 0,025      | 0,116              | 0,51        | 0,78        | 4,13         | 0,09        |
| Sandfilter 01.08.2018    | 0,13       | 3,9          | 0,526       | 0,025        | 0,197      | 0,084          | 0,250      | 0,31               | 0,60        | 1,10        | 4,40         | 0,24        |
| BAK-Filter 01.08.2018    | 0,03       | 0,231        | 0,311       | 0,025        | 0,05       | 0,1            | 0,079      | 0,05               | 0,216       | 0,054       | 0,189        | 0,05        |
| Gesamtablauf 01.08.2018  | 0,12       | 2,082        | 0,425       | 0,106        | 0,126      | 0,108          | 0,263      | 0,229              | 0,411       | 0,628       | 2,613        | 0,16        |
| Elimination O3           | 98,0063796 | 63,92310003  | 76,4348786  | 98,07098765  | 92,283951  | 73,63896848    | 99,2851015 | 95,49864183        | 71,16357504 | 83,12863607 | 76,37340651  | 94,06077348 |
| Elimination SF           | -428       | -8,021093533 | -23,1850117 | 0            | 294        | 8,695652174    | -900       | -167,2413793       | -16,7641326 | -40,8684547 | -6,339220905 | -179,069767 |
| Elimination O3+SF        | 89,4736842 | 61,02933814  | 70,9713024  | 98,07098765  | 69,598765  | 75,93123209    | 92,8510152 | 87,97050834        | 66,32939854 | 76,23357035 | 74,87566455  | 83,42541436 |
| Elimination BAK          | 0          | 93,5886761   | 27,1662763  | 0            | 0          | -8,695652174   | -216       | 56,89655172        | 57,89473684 | 93,10344828 | 95,42705057  | 41,86046512 |
| Elimination O3+BAK       | 98,0063796 | 97,68699309  | 82,8366446  | 98,07098765  | 92,283951  | 71,34670487    | 97,7409208 | 98,05975941        | 87,85834739 | 98,83645766 | 98,91956783  | 96,54661333 |
| Elimination Gesamtablauf | 94,9002217 | 82,94001967  | 79,6747967  | 92,47159091  | 81,948424  | 86,34639697    | 91,8726823 | 92,46710526        | 81,91021127 | 91,97546639 | 89,07654362  | 96,8503937  |

| Sample Name           | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
|-----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Zulauf O3 09.08.2018  | 3,0        | 11           | 2,0         | 1,4          | 1,0        | 0,48           | 3,4        | 2,4                | 2,2         | 8,9         | 22           | 2,7         |
| Ablauf O3 09.08.2018  | 0,050      | 3,8          | 0,48        | 0,025        | 0,060      | 0,10           | 0,025      | 0,091              | 0,63        | 1,5         | 5,0          | 0,16        |
| Sandfilter 09.08.2018 | 0,23       | 4,0          | 0,54        | 0,050        | 0,30       | 0,15           | 0,14       | 0,20               | 0,68        | 1,9         | 5,3          | 0,41        |
| BAK-Filter 09.08.2018 | 0,054      | 0,26         | 0,33        | 0,025        | 0,082      | 0,15           | 0,070      | 0,050              | 0,22        | 0,13        | 0,21         | 0,084       |
| Elimination O3        | 98,3530962 | 64,48301605  | 76,453202   | 98,1897176   | 94,157741  | 79,20997921    | 99,271774  | 96,17164493        | 71,44790257 | 83,07397384 | 76,99871347  | 93,88826397 |
| Elimination SF        | -350       | -5,832895428 | -12,7615063 | -100         | -393,33333 | -53            | -464       | -118,6813187       | -6,79304897 | -26,3824117 | -5,733120256 | -150,920245 |
| Elimination O3+SF     | 92,5889328 | 62,41134752  | 73,4482759  | 96,37943519  | 71,178189  | 68,19126819    | 95,8928051 | 91,62810265        | 69,50834461 | 78,60847993 | 75,68002205  | 84,66441695 |
| Elimination BAK       | -8         | 93,27377824  | 30,7531381  | 0            | -36,666667 | -47            | -180       | 45,05494505        | 64,96223317 | 91,40572951 | 95,72512984  | 48,46625767 |
| Elimination O3+BAK    | 98,2213439 | 97,6110489   | 83,6945813  | 98,1897176   | 92,015579  | 69,43866944    | 97,9609671 | 97,8965082         | 89,9864682  | 98,54533153 | 99,01672487  | 96,8503937  |

| Sample Name           | Amisulprid | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
|-----------------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Zulauf O3 17.08.2018  | 2,8        | 10           | 1,9         | 1,4          | 1,3        | 0,97           | 3,7        | 2,5                | 1,9         | 8,5         | 22           | 2,2         |
| Ablauf O3 17.08.2018  | 0,050      | 4,5          | 0,54        | 0,025        | 0,083      | 0,13           | 0,025      | 0,25               | 0,61        | 2,1         | 6,7          | 0,30        |
| Sandfilter 17.08.2018 | 0,31       | 4,7          | 0,61        | 0,083        | 0,54       | 0,17           | 0,19       | 0,38               | 0,67        | 2,6         | 7,0          | 0,54        |
| BAK-Filter 17.08.2018 | 0,063      | 0,96         | 0,43        | 0,025        | 0,050      | 0,17           | 0,12       | 0,050              | 0,32        | 0,18        | 0,35         | 0,088       |
| Elimination O3        | 98,2400563 | 56,11084103  | 71,5498938  | 98,16983895  | 93,396977  | 86,92070031    | 99,3202828 | 89,73322555        | 67,48531767 | 75,06794281 | 69,54241273  | 86,26023658 |
| Elimination SF        | -514       | -4,674346478 | -13,0597015 | -232         | -546,98795 | -34,64566929   | -656       | -50,78740157       | -9,68801314 | -21,8009479 | -4,082541568 | -80,1324503 |
| Elimination O3+SF     | 89,1939458 | 54,05930967  | 67,8343949  | 93,9238653   | 57,279236  | 82,38928939    | 94,8613377 | 84,51899757        | 64,33529098 | 69,63251802 | 68,29896907  | 75,2022748  |
| Elimination BAK       | -26        | 78,73283119  | 19,2164179  | 0            | 39,759036  | -33,85826772   | -384       | 80,31496063        | 46,96223317 | 91,56398104 | 94,74465558  | 67,54968887 |
| Elimination O3+BAK    | 97,782471  | 90,66601847  | 77,0169851  | 98,16983895  | 96,022275  | 82,492276      | 96,7101686 | 97,97898141        | 82,7549386  | 97,8972693  | 98,39934889  | 95,54140127 |

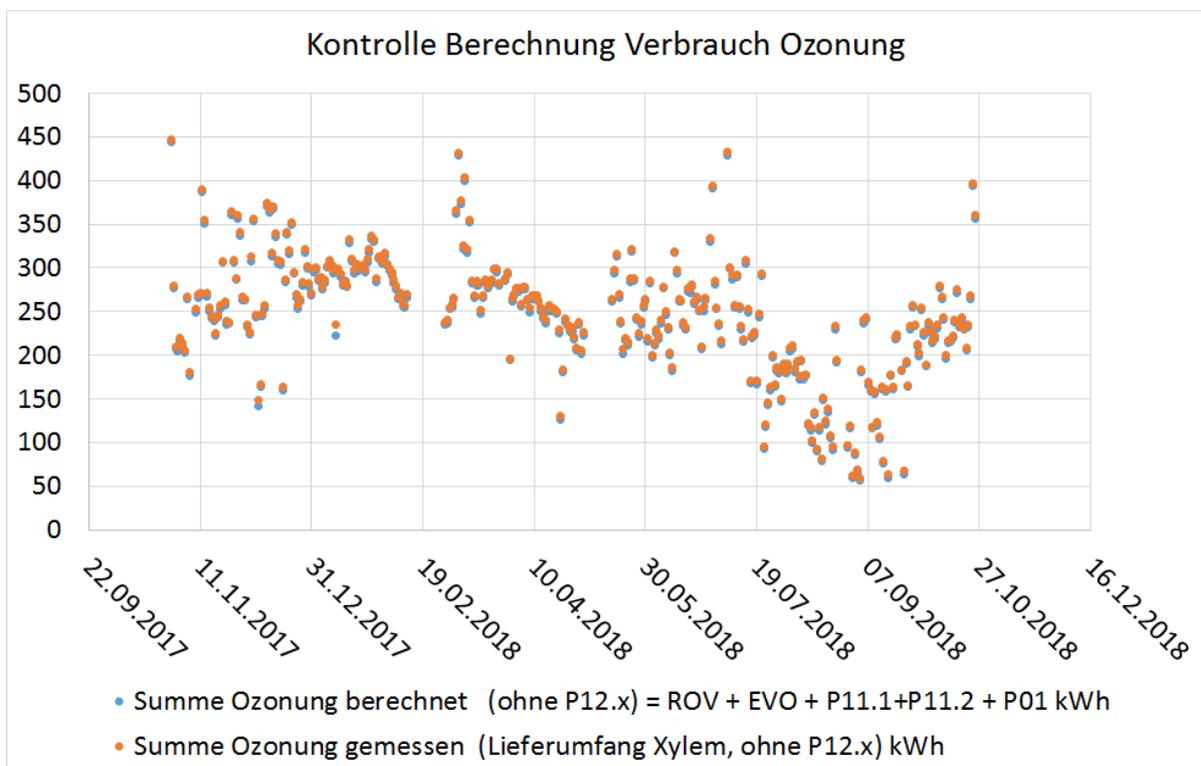
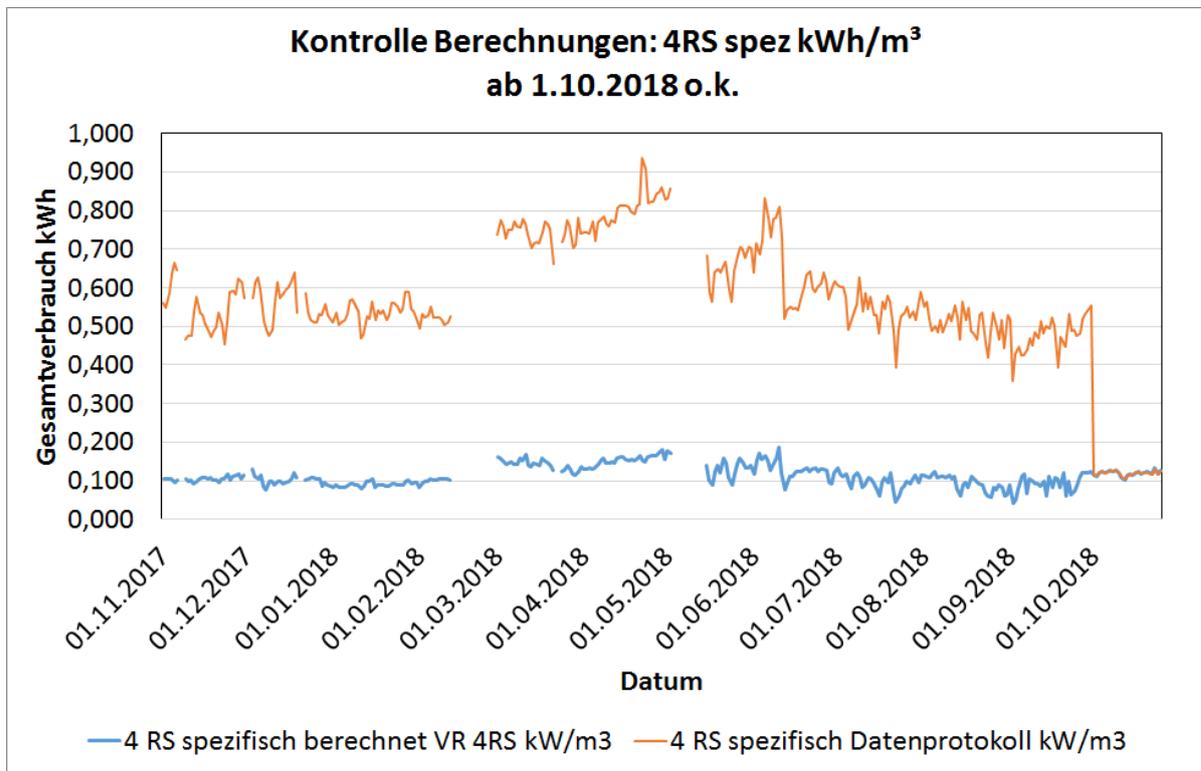
  

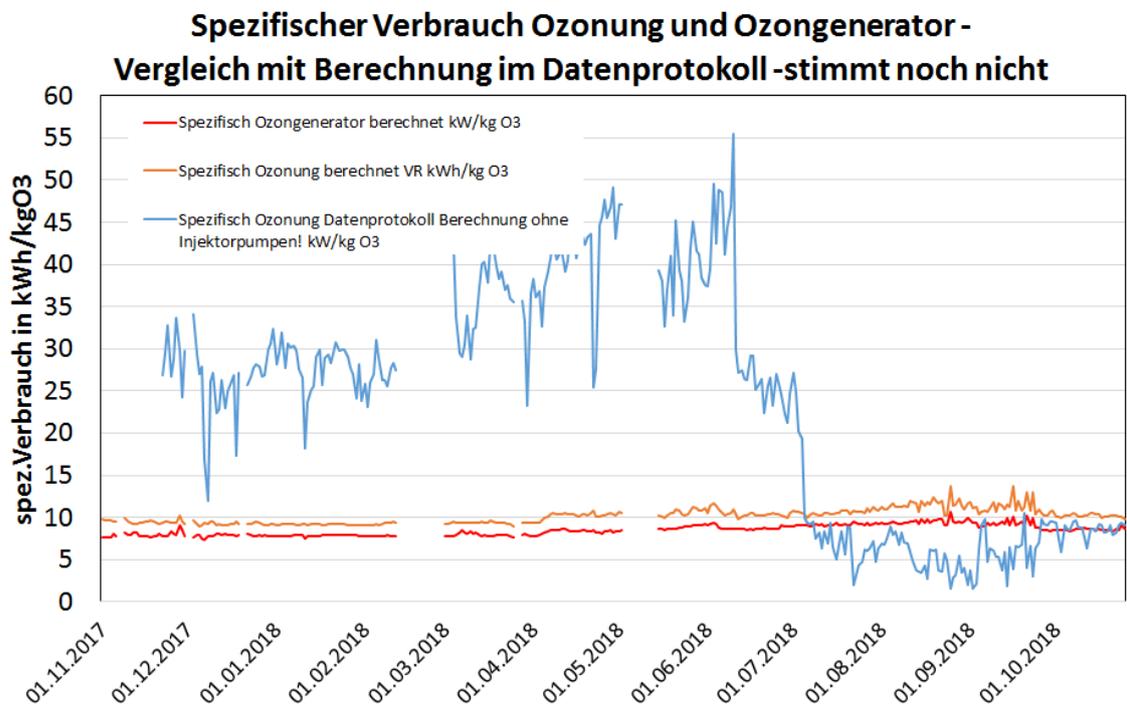
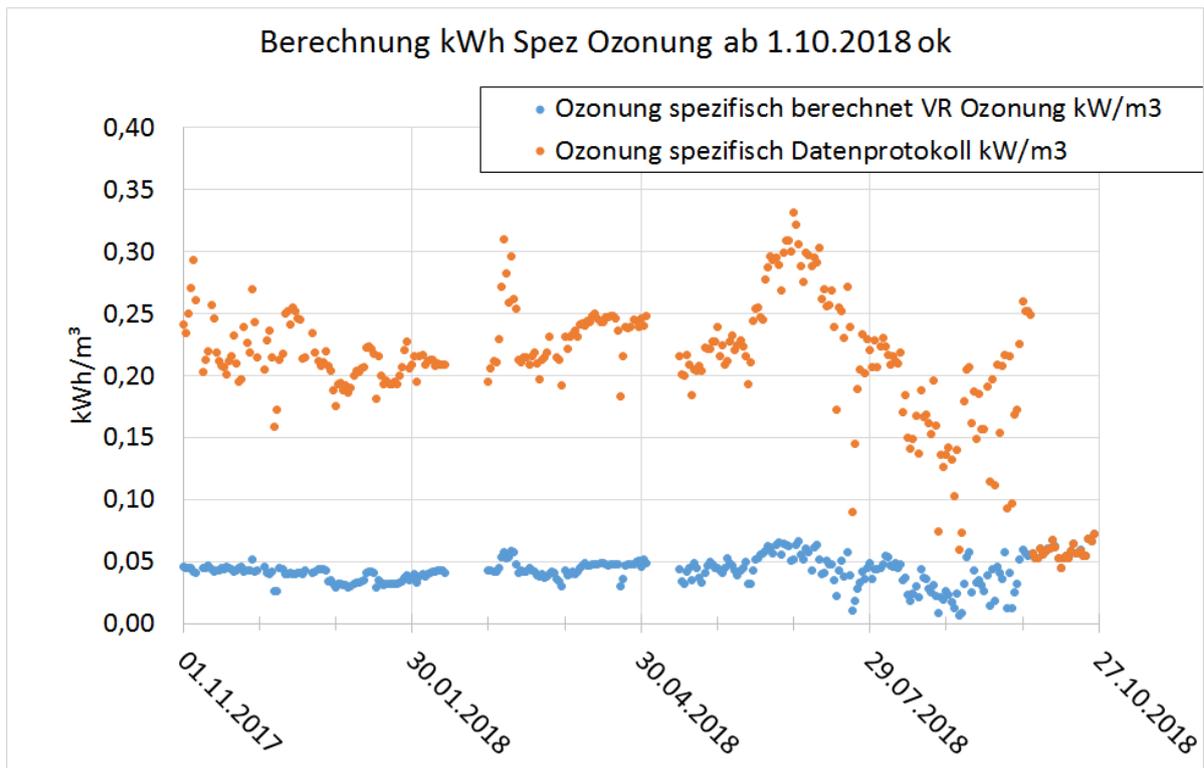
| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol | Venlafaxin  |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Zulauf O3 23.08.2018  | 1,9         | 7,6          | 1,1         | 0,86         | 0,51       | 0,35           | 2,2        | 1,6                | 1,3         | 5,3         | 14          | 1,4         |
| Ablauf O3 23.08.2018  | 1,4         | 6,5          | 0,88        | 0,35         | 0,43       | 0,22           | 0,66       | 1,2                | 0,97        | 4,2         | 12          | 1,0         |
| Sandfilter 23.08.2018 | 1,4         | 6,7          | 0,94        | 0,37         | 0,38       | 0,25           | 0,68       | 1,3                | 1,0         | 4,4         | 11          | 1,1         |
| BAK-Filter 23.08.2018 | 0,12        | 0,35         | 0,79        | 0,063        | 0,11       | 0,18           | 0,32       | 0,098              | 0,73        | 0,24        | 0,33        | 0,23        |
| Elimination O3        | 29,8399587  | 14,33809087  | 22,8671944  | 59,64912281  | 15,594542  | 36,70520231    | 70,0677201 | 22,45024876        | 23,68214005 | 20,44084401 | 19,51945714 | 26,12214864 |
| Elimination SF        | -1,83958793 | -1,803729746 | -6,95553022 | -7,536231884 | 12,240185  | -14,61187215   | -2,5641026 | -6,335204491       | -5,77319588 | -5,16220696 | 1,961627807 | -8,46613546 |
| Elimination O3+SF     | 28,549303   | 12,79298154  | 17,5        |              |            |                |            |                    |             |             |             |             |

| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Zulauf O3 30.08.2018  | 0,80        | 5,7          | 0,89        | 0,69         | 0,37       | 0,17           | 1,5        | 1,2                | 1,0         | 2,5         | 13           | 0,56        |
| Ablauf O3 30.08.2018  | 0,066       | 3,1          | 0,34        | 0,025        | 0,089      | 0,065          | 0,061      | 0,31               | 0,43        | 0,90        | 5,3          | 0,15        |
| Sandfilter 30.08.2018 | 0,57        | 5,0          | 0,71        | 0,42         | 0,29       | 0,14           | 0,90       | 0,98               | 0,82        | 2,0         | 9,0          | 0,45        |
| BAK-Filter 30.08.2018 | 0,050       | 0,26         | 0,50        | 0,050        | 0,081      | 0,084          | 0,24       | 0,099              | 0,41        | 0,11        | 0,34         | 0,069       |
| Elimination O3        | 91,75       | 46,54870357  | 61,8568233  | 96,35568513  | 76,075269  | 61,98830409    | 95,9789057 | 73,79543533        | 56,72981057 | 63,2628153  | 58,39610797  | 73,29749104 |
| Elimination SF        | -760,606061 | -63,97902327 | -107,917889 | -1592        | -225,8427  | -115,3846154   | -1377,0492 | -214,8387097       | -88,2488479 | -116,943522 | -68,80422482 | -199,328859 |
| Elimination O3+SF     | 29          | 12,35108619  | 20,6935123  | 38,33819242  | 22,043011  | 18,12865497    | 40,6064601 | 17,49788673        | 18,5443669  | 20,30105777 | 29,77087257  | 20,07168459 |
| Elimination BAK       | 24,2424242  | 91,47820387  | -47,8005865 | -100         | 8,988764   | -29,23076923   | -290,16393 | 68,06451613        | 5,529953917 | 88,26135105 | 93,66276877  | 53,69127517 |
| Elimination O3+BAK    | 93,75       | 95,44498949  | 43,6241611  | 92,71137026  | 78,225806  | 50,87719298    | 84,3111404 | 91,63144548        | 59,1226321  | 95,68755085 | 97,36346516  | 87,6344086  |
| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
| Zulauf O3 05.09.2018  | 0,76        | 8,4          | 0,82        | 0,46         | 0,39       | 0,59           | 1,5        | 1,2                | 0,92        | 2,4         | 9,2          | 0,64        |
| Ablauf O3 05.09.2018  | 0,025       | 2,2          | 0,13        | 0,025        | 0,065      | 0,077          | 0,025      | 0,050              | 0,20        | 0,28        | 1,5          | 0,050       |
| Sandfilter 05.09.2018 | 0,050       | 1,9          | 0,13        | 0,025        | 0,11       | 0,063          | 0,025      | 0,050              | 0,18        | 0,27        | 1,2          | 0,055       |
| BAK-Filter 05.09.2018 | 0,025       | 0,16         | 0,11        | 0,025        | 0,054      | 0,050          | 0,025      | 0,025              | 0,10        | 0,053       | 0,11         | 0,050       |
| Elimination O3        | 96,6974901  | 73,86377192  | 83,5985312  | 95,63699825  | 83,116883  | 83,22440087    | 98,3454666 | 95,951417          | 78,80434783 | 88,07106599 | 83,97261762  | 91,74917492 |
| Elimination SF        | -100        | 14,74212688  | 6,71641791  | 0            | -69,230769 | 18,18181818    | 0          | 0                  | 9,230769231 | 3,191489362 | 20,40677966  | -10         |
| Elimination O3+SF     | 93,3949802  | 77,71680783  | 84,7001224  | 95,63699825  | 71,428571  | 86,2745098     | 98,3454666 | 95,951417          | 80,76086957 | 88,45177665 | 87,24329023  | 90,92409241 |
| Elimination BAK       | 0           | 92,65175719  | 17,9104478  | 0            | 16,923077  | 35,06493506    | 0          | 50                 | 48,20512821 | 81,20567376 | 92,54237288  | 0           |
| Elimination O3+BAK    | 96,6974901  | 98,0794465   | 86,5361077  | 95,63699825  | 85,974026  | 89,10675381    | 98,3454666 | 97,9757085         | 89,02173913 | 97,75803723 | 98,80473759  | 91,74917492 |
| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
| 25% SAK Zulauf O3     | 0,68        | 5,9          | 0,74        | 0,58         | 0,39       | 0,46           | 1,5        | 1,2                | 1,0         | 2,2         | 12           | 0,63        |
| 25% SAK Ablauf O3     | 0,050       | 2,5          | 0,21        | 0,025        | 0,068      | 0,106          | 0,025      | 0,21               | 0,33        | 0,59        | 3,9          | 0,11        |
| 25% SAK Sandfilter    | 0,05        | 2,4          | 0,20        | 0,03         | 0,09       | 0,06           | 0,03       | 0,22               | 0,32        | 0,6         | 3,4          | 0,13        |
| 25% SAK BAK-Filter    | 0,050       | 0,23         | 0,16        | 0,025        | 0,066      | 0,080          | 0,03       | 0,025              | 0,21        | 0,06        | 0,21         | 0,050       |
| Elimination O3        | 92,6900585  | 57,22070845  | 72,0053836  | 95,65972222  | 82,152231  | 82,15488215    | 98,7244898 | 87,42586002        | 68,22612086 | 73,49128297 | 67,60155539  | 81,99052133 |
| Elimination SF        | 0           | 5,931528662  | 4,32692308  | 0            | -35,294118 | 41,50943396    | 0          | -3,773584906       | 1,840490798 | -2,19224283 | 12,9979571   | -12,2807018 |
| Elimination O3+SF     | 92,6900585  | 59,75817439  | 73,2166891  | 95,65972222  | 75,853018  | 89,56228956    | 98,7244898 | 86,95136418        | 68,81091618 | 72,91014752 | 71,81269132  | 79,77883096 |
| Elimination BAK       | 0           | 91,04299363  | 21,1538462  | 0            | 2,9411765  | 24,52830189    | 0          | 88,20754717        | 34,96932515 | 89,2074199  | 94,63738509  | 56,14035088 |
| Elimination O3+BAK    | 92,6900585  | 96,16825613  | 77,9273217  | 95,65972222  | 82,677165  | 86,53198653    | 98,7244898 | 98,51720047        | 79,33723197 | 97,13902548 | 98,26259618  | 92,10110585 |
| Sample Name           | Amisulprid  | Benzotriazol | Candesartan | Carbamazepin | Citalopram | Clarithromycin | Diclofenac | Hydrochlorothiazid | Irbesartan  | Metoprolol  | Tolytriazol  | Venlafaxin  |
| 30% SAK Zulauf O3     | 0,64        | 6,3          | 0,77        | 0,46         | 0,36       | 0,55           | 1,8        | 1,3                | 1,0         | 2,3         | 12           | 0,64        |
| 30% SAK Ablauf O3     | 0,025       | 2,5          | 0,19        | 0,025        | 0,050      | 0,094          | 0,025      | 0,09               | 0,32        | 0,54        | 3,5          | 0,09        |
| 30% SAK Sandfilter    | 0,05        | 2,2          | 0,19        | 0,03         | 0,08       | 0,07           | 0,03       | 0,11               | 0,29        | 0,5         | 2,9          | 0,10        |
| 30% SAK BAK-Filter    | 0,050       | 0,19         | 0,15        | 0,025        | 0,056      | 0,075          | 0,03       | 0,025              | 0,18        | 0,05        | 0,18         | 0,050       |
| Elimination O3        | 96,0691824  | 60,87299086  | 74,6736292  | 95,68221071  | 85,915493  | 83,03249097    | 98,6134221 | 92,87356322        | 69,74063401 | 76,74317887 | 71,98220065  | 86,13707165 |
| Elimination SF        | -100        | 11,3169553   | 4,63917526  | 0            | -68        | 25,53191489    | 0          | -16,12903226       | 6,984126984 | 5,2141527   | 17,70141496  | -7,86516854 |
| Elimination O3+SF     | 92,1383648  | 65,30097699  | 75,848564   | 95,68221071  | 76,338028  | 87,36462094    | 98,6134221 | 91,72413793        | 71,85398655 | 77,95582503 | 76,94174757  | 85,04672897 |
| Elimination BAK       | -100        | 92,18687072  | 21,6494845  | 0            | -12        | 20,21276596    | 0          | 73,11827957        | 44,12698413 | 89,94413408 | 94,68668784  | 43,82022472 |
| Elimination O3+BAK    | 92,1383648  | 96,94295619  | 80,156658   | 95,68221071  | 84,225352  | 86,46209386    | 98,6134221 | 98,08429119        | 83,09317963 | 97,66132525 | 98,51132686  | 92,21183801 |

## Anhang D

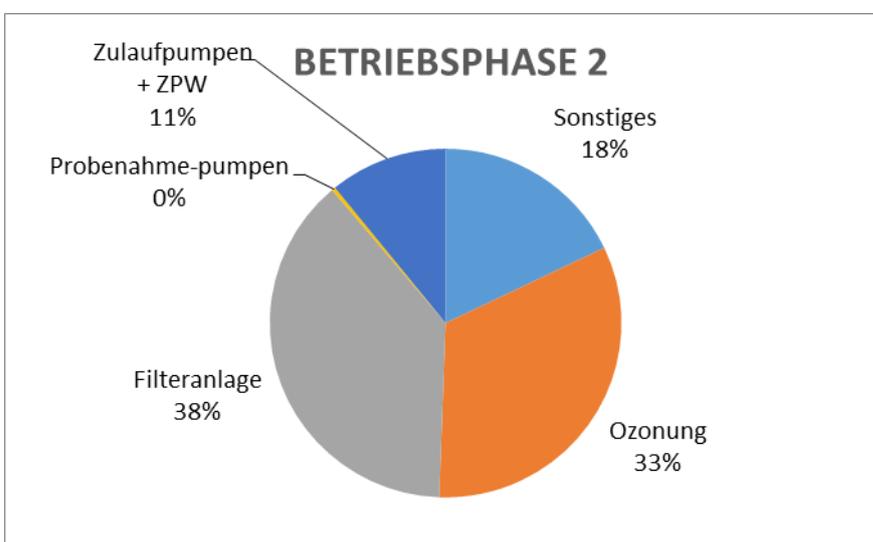
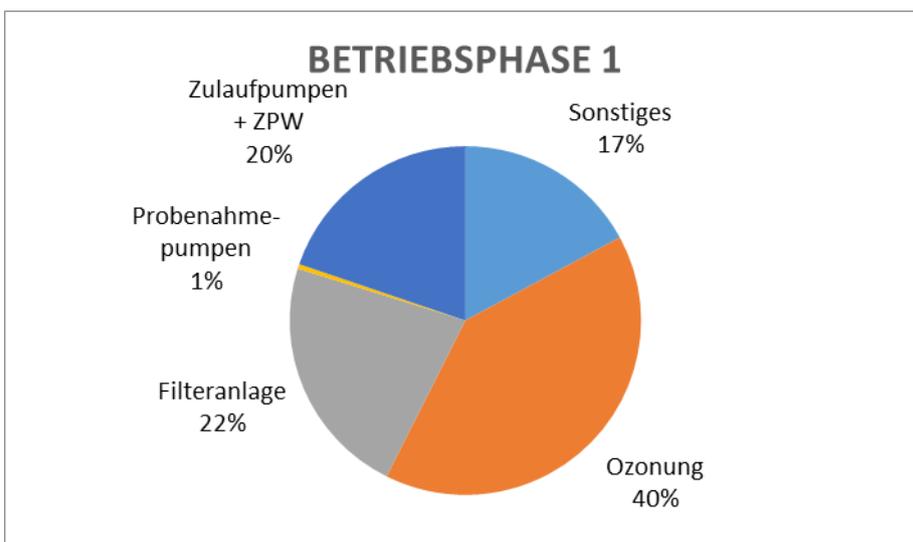
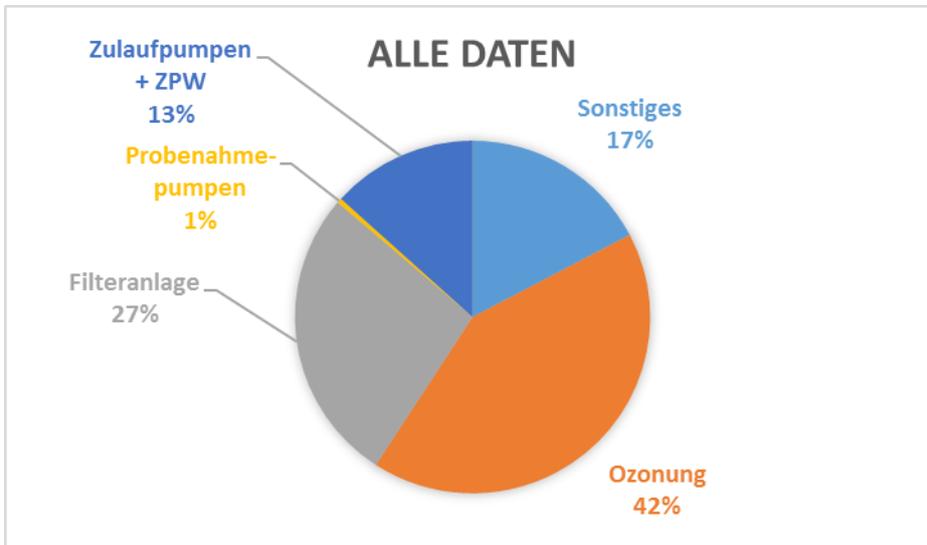
### Abbildungen zur Kontrolle der Berechnungen aus Datenprotokoll

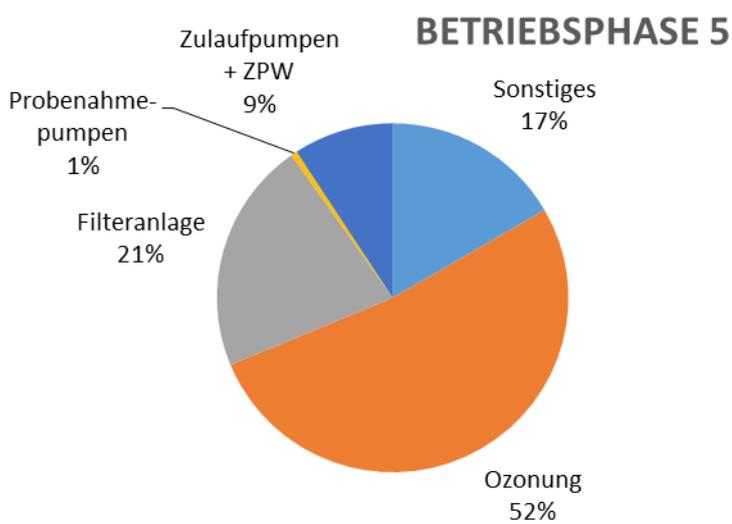
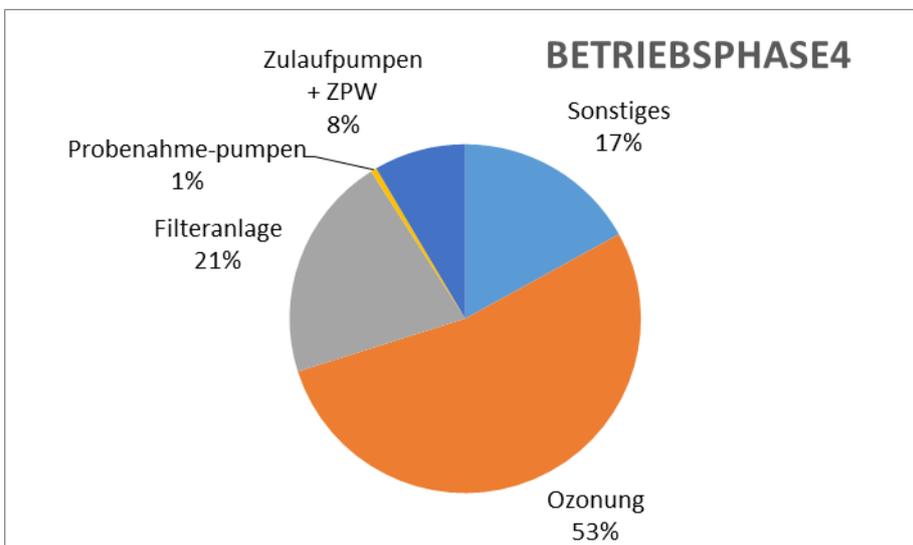
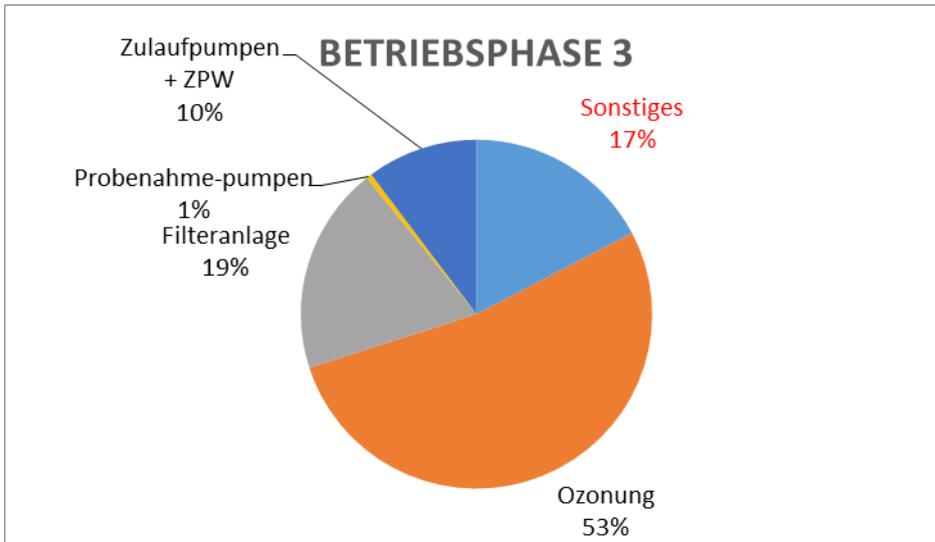




## Anhang E

### Abbildungen zur Aufteilung des Stromverbrauches





## Anhang F

### Ergebnisse Krankheitserreger

*Text und Ergebnisse: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 77*

Im Kläranlagenzulauf wurden sowohl *Campylobacter* als auch die beiden Bakteriophagen in deutlichen Konzentrationen nachgewiesen. Salmonellen, die nur halbquantitativ bestimmt wurden, waren in 10 ml des Kläranlagenzulaufs vorhanden (siehe Tabelle 1). Im Zulauf zur Ozonung (nach der konventionellen Reinigung) waren Salmonellen noch in 100 ml nachweisbar. Im Verlauf der weitergehenden Reinigungsstufen war keine weitere Reduktion zu beobachten. Für *Campylobacter* war bereits während der konventionellen Reinigung eine hohe Reduktion festzustellen, die mehr als 3 log-Stufen betrug. Daher war im Zulauf zur Ozonung nur noch eine sehr geringe Konzentration messbar. Nach der Ozonung lagen die Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,3 MPN/l. Die somatischen Coliphagen und die F-spezifischen RNA-Bakteriophagen wurden während der konventionellen Reinigung um ca. 1,5 log-Stufen reduziert. Die vierte Reinigungsstufe bewirkte bei den somatischen Coliphagen nur noch eine mäßige weitere Reduktion um weniger als eine Zehnerpotenz. Für die F-spezifischen RNA-Bakteriophagen lag die Reduktionsrate etwas höher und betrug ca. 1,5 log-Stufen im Ablauf der Ozonung. Nach dem Sandfilter war keine weitere Reduktion festzustellen. Wie bereits erwähnt, sind diese Ergebnisse aufgrund der Stillstandzeiten bei der Ozonung jedoch nur eingeschränkt zu beurteilen. Bei funktionierendem Betrieb könnten die Reduktionsraten (insbesondere für die somatischen Coliphagen) durchaus noch höher liegen.

**Tabelle 1: Reduktion abwasserrelevanter Krankheitserreger innerhalb der verschiedenen Stufen der weitergehenden Abwasserreinigung in der Kläranlage Weißenburg**

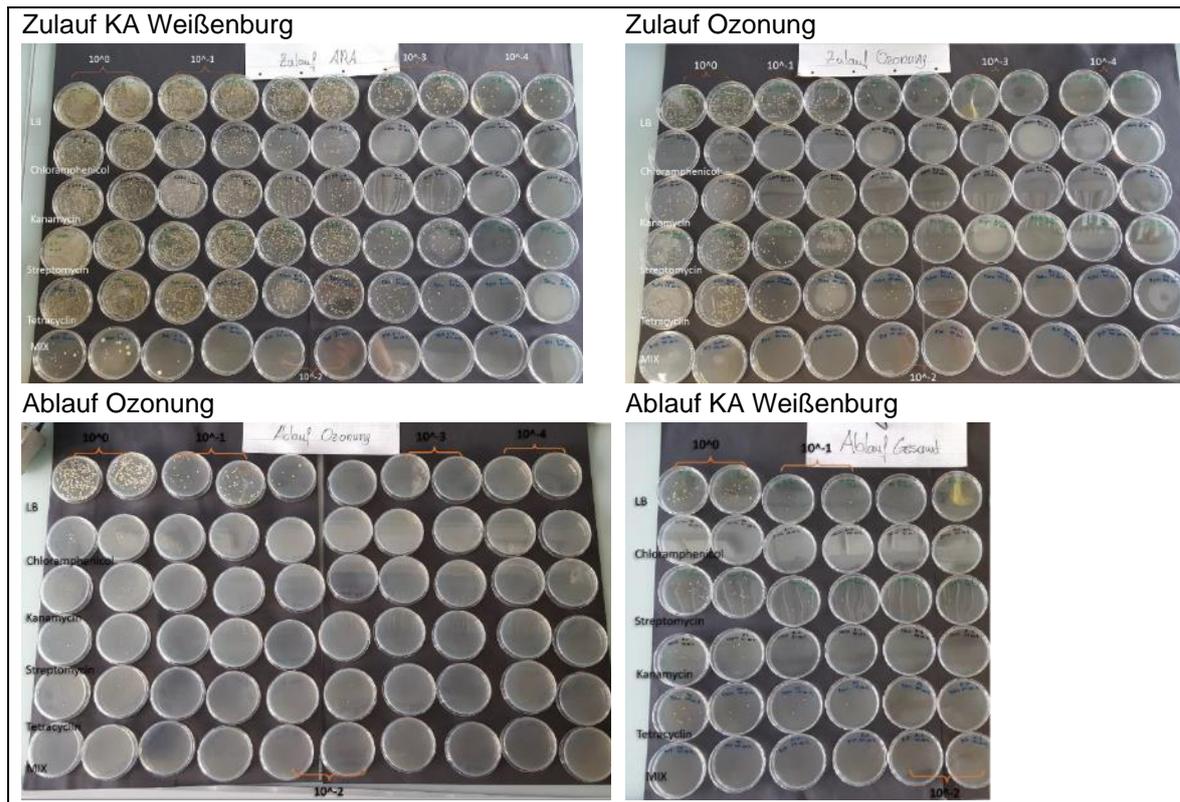
| 26.02.2018                 | Einheit    | Zulauf KA                                | Zulauf Ozonung                           | Ablauf Ozonung                           | Ablauf Sanfilter                         |
|----------------------------|------------|--|--|--|--|
| Campylobacter              | pro l      | > 1100                                   | 0.61                                     | < 0.30                                   | < 0.30                                   |
| Somatische Coliphagen      | pro 100 ml | 88000                                    | 3255                                     | 957                                      | 534                                      |
| F-spez. RNA-Bakteriophagen | pro 100 ml | 3100                                     | 162                                      | 5  | 12                                       |
| Salmonellen                |            | < 100 / 100 ml<br>(Nachweisbar in 10 ml) | < 10 / 100 ml<br>(Nachweisbar in 100 ml) | < 10 / 100 ml<br>(Nachweisbar in 100 ml) | < 10 / 100 ml<br>(Nachweisbar in 100 ml) |

## Anhang G

### Vorhandensein von antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) auf der Kläranlage Weißenburg

In Bild 1 ist die Vermehrung der Bakterien nach zwei Tagen Inkubationszeit in Agarplatten dargestellt. In dieser Abbildung ist zu erkennen auf welcher Agarplatte und bei welcher Verdünnungsstufe die Bakterien noch heranwachsen können. Von links nach rechts befinden sich die verschiedenen Verdünnungsreihen. Im Vergleich zu Streptomycin und Tetracyclin wachsen weniger Bakterien auf den beimpften Agarplatten mit Chloramphenicol, was auf eine deutlichere Sensitivität gegenüber diesem Antibiotikum hinweist. Die Agarplatten in Bild 1 zeigen weiterhin Bakterien, welche nach der mechanisch-biologischen Reinigung in der Kläranlage (Zulauf Ozonung, oben rechts) noch vorhanden sind. Grundsätzlich ist jedoch eine deutliche Reduktion durch die mechanisch-biologische Abwasserreinigung feststellbar.

Im Ablauf der Ozonung ist deutlich zu erkennen (unten links in Bild 1), dass sich die Lebendzellzahl (LB) nach der Ozonung stark verringert hat. Weiterhin konnte vereinzelt eine reduzierte KBE/ml im Gesamtablauf der Kläranlage festgestellt werden. Diese Feststellung trifft jedoch nicht auf alle aufgezeigten Agarplatten in Bild 1 zu. Es ist zu vermuten, dass die biologische Aktivität in den beiden Filterstraßen (Biofilmbildung) und die erhöhte Bioverfügbarkeit der Hintergrundorganik nach der Ozonung (AOC erhöht sich durch Ozon, vgl. Vahala et al., 1998) ein Wachstum von Bakterien begünstigen kann. Ein Austrag von Bakterien über die Filterabläufe ist somit nicht auszuschließen. Dabei können auch ARB ausgetragen werden, welche gegen mehrere Antibiotika resistent sind (Czekalski, 2015; Czekalski et al., 2016).



**Bild 1: Vermehrung der Bakterien nach zwei Tagen Inkubationszeit (Tran, 2018)**

In Bild 2 ist die durchschnittliche Gesamtzahl der KBE/ml der Abwasserprobe aus dem Zulauf zur Kläranlage Weißenburg dargestellt. Demnach konnten ca.  $2,9 \cdot 10^6$  KBE/ml bestimmt werden. Davon sind  $1,6 \cdot 10^5$  KBL/ml gegenüber Chloramphenicol,  $1,0 \cdot 10^6$  KBL/ml gegen Streptomycin und  $4,3 \cdot 10^5$  KBL/ml gegen Tetracyclin resistent.  $1,6 \cdot 10^3$  KBE/ml sind gegen alle in dieser Untersuchung gewählten Antibiotika resistent.

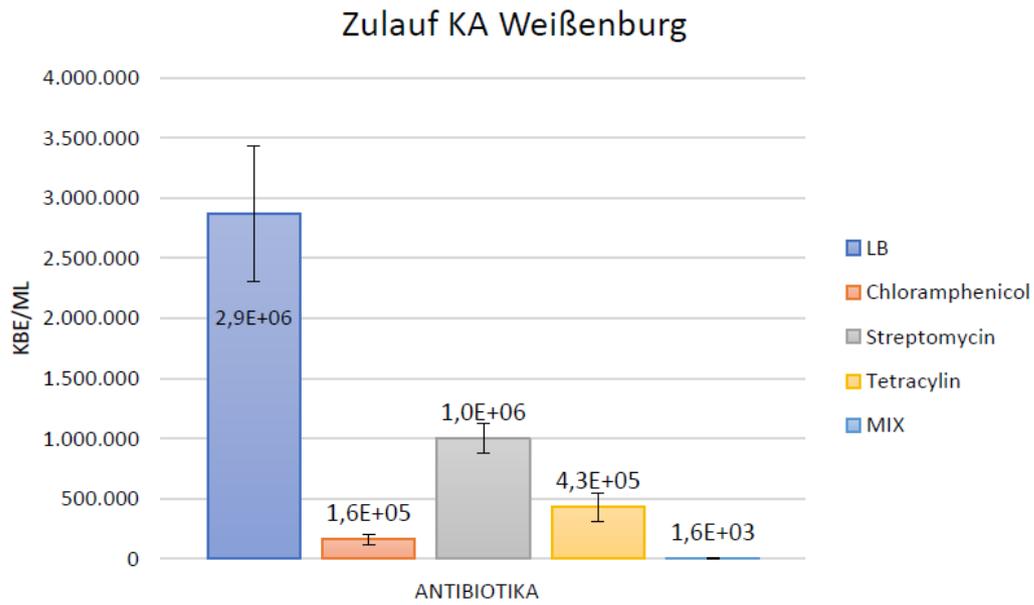
Das Diagramm in Bild 3 zeigt die noch vorhandene Lebendzellzahl pro ml der Abwasserprobe nach der mechanisch-biologischen Reinigung. Die ermittelte Reduktion der Lebendzellzahl beträgt in der mechanisch-biologischen Reinigungsstufe rund 99,5 %. Bei Chloramphenicol resistenten Bakterien beträgt die Reduktion 99,65 %, bei Streptomycin-resistenten Bakterien 96,81 % und bei Tetracyclin-resistenten Bakterien wurde eine Reduktion von 99,40 % ermittelt.

Mit der Auswertung der Abwasserprobe aus dem Ablauf der Ozonung konnte eine weitere Reduktion der Lebendzellzahl durch die Ozonung festgestellt werden. Bild 4 zeigt die noch vorhandenen KBE/ml im Abwasser nach der mechanisch-biologischen Reinigung und nach der Ozonung. Im Ablauf der Ozonung wurden  $2,6 \cdot 10^3$  KBE/ml ermittelt. Das entspricht einer Reduktion von ca. 82,5 % durch die Ozonung. Bezogen auf den Zulauf der Kläranlage wurden unter den Trockenwetterbedingungen nach der Ozonung ca. 99,9 % der in dieser Bachelorarbeit betrachteten Keime reduziert. Bei den in der Bachelorarbeit untersuchten Abwasserproben und den am 09.04.2018 gefahrenen Anlageneinstellungen (Ozondosis, Zufluss, Aufenthaltszeiten etc.) waren nach der Ozonung fast keine ARB (Bakterien mit einer Resistenz gegen Chloramphenicol, Streptomycin und Tetracyclin) mehr nachweisbar. Nur eine geringe Anzahl an Chloramphenicol- und Tetracyclin-resistenten Bakterien konnten noch im ozonierten Abwasser festgestellt werden.

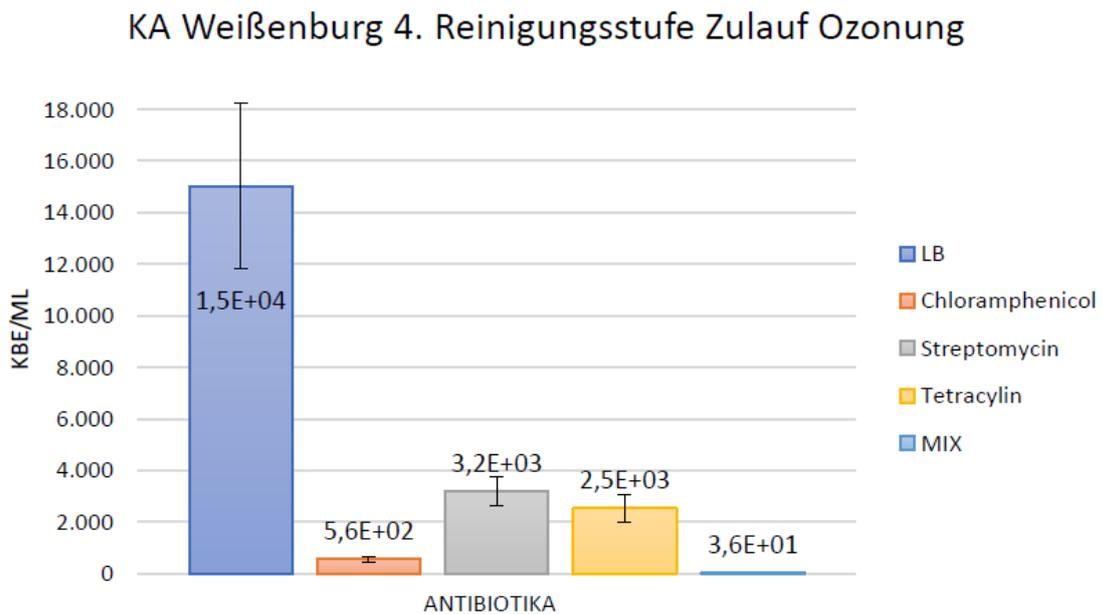
Eine signifikante Erhöhung oder Reduktion der Lebendzellzahl im Gesamtablauf der Kläranlage Weißenburg im Vergleich zum Ozonungsablauf konnte für die untersuchten Abwasserproben nicht nachgewiesen werden (Bild 5). Beide Filterstraßen nach der Ozonung bewirken daher keine zusätzliche Reduktion der Lebendzellzahl (Umfahrung der vierten Reinigungsstufe nicht aktiv, da Zufluss bei Trockenwetterbedingungen).

In dieser Arbeit wurde bei den analysierten Abwasserproben eine Zunahme Kanamycin-resistenter Bakterien nach der Ozonung und nach der Filtration (Gesamtablauf Kläranlage) festgestellt. Eine Interpretation und Bewertung dieser Ergebnisse ist aufgrund fehlender Versuchswiederholungen nicht möglich. Theoretisch kann hier wird vermutet, dass eine Ozonbehandlung (auch abhängig von der Ozondosis) nicht auf jede Bakterienart gleich wirksam ist. Für die Untersuchungen in Weißenburg kann diese Vermutung jedoch nicht belegt werden. Erkenntnisse zur Wirksamkeit von Ozon- und Filtrationsverfahren bezüglich ARB werden z.B. in Czekalski et al. (2016), Czekalski et al. (2012), Czekalski (2015) und Böhler et al. (2017a) vorgestellt.

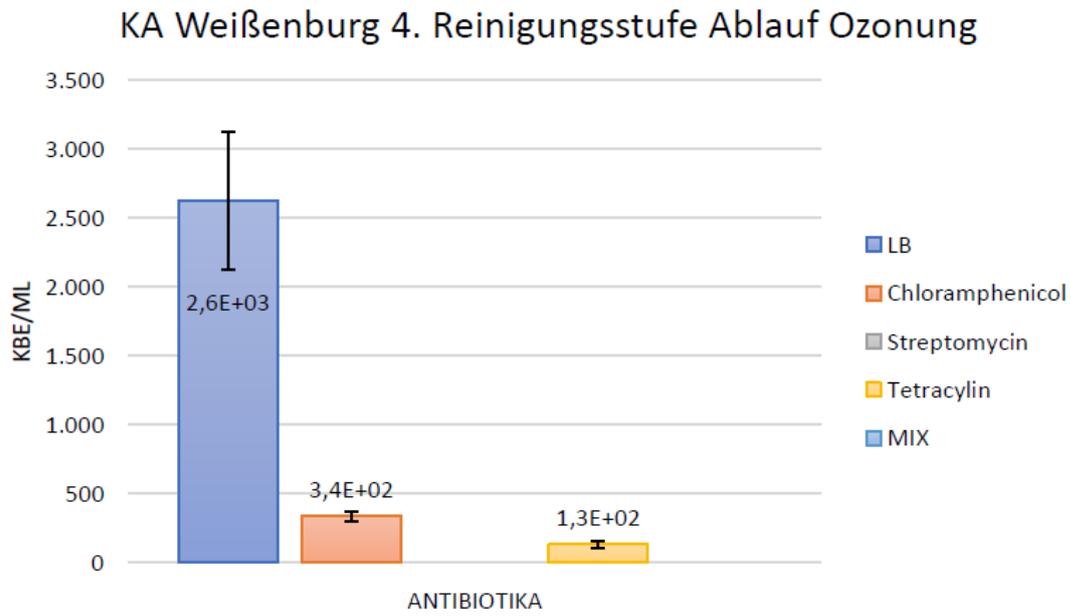
In Czekalski et al. (2016) wird berichtet, dass nach der Ozonung Zellen, die abgetötet worden sind, einen Teil ihrer Resistenzgene freisetzen, die dann durch andere Bakterien aufgenommen und in ihrem Erbgut eingebaut werden können. Zusätzlich wird in Czekalski et al. (2016) und Czekalski (2015) vermutet, dass durch eine Ozonbehandlung Mutationen entstehen können, die Bakterien ermöglichen neue Antibiotikaresistenzen oder sogar Resistenzen gegenüber Ozon zu bilden. In Böhler et al. (2017a) wird diesbezüglich berichtet, dass bei einer Ozonung mit einer Nachbehandlung mittels Sandfilter keine vollständige Reduktion von antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) und Resistenzgenen (ARG) erfolgte. Hier konnte mit einer Ozondosis von 0,45 – 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC eine Reduktion der Lebendzellzahl, inklusive ARB um 1,5 log-Stufen erzielt werden. In der Nachbehandlung konnte eine Erhöhung von ARB im Sandfilter dokumentiert werden (0,8 - 1 Log-Stufe). Dies weist auf Auswaschungsprozesse von bakterieller Biomasse (Aufwuchs an Filteroberfläche durch biologische Aktivität) aus den Filtersystemen hin. Lackner et al. (2018) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Verfahren und Verfahrenskombinationen, welche auf die Reduktion von anthropogenen Spurenstoffen ausgelegt werden, nur teilweise in der Lage sind Pathogene, antibiotikaresistente Bakterien (ARB) sowie Resistenzgene (ARG) weitergehend zu reduzieren.



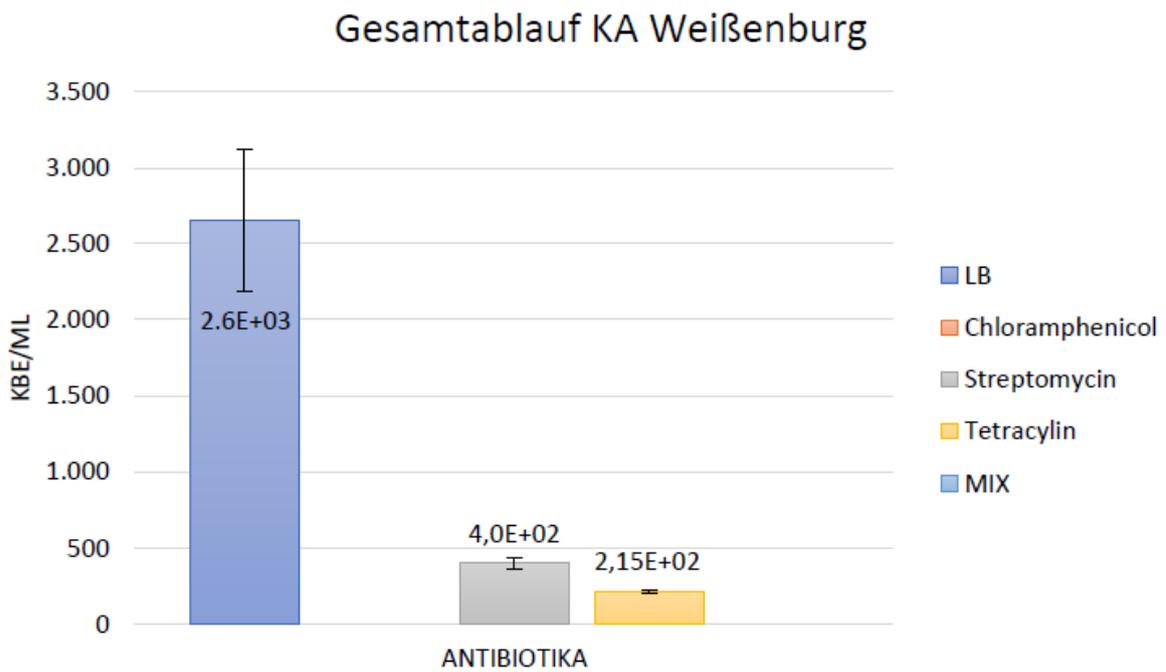
**Bild 2:** Auswertung KBE/ml im Zulauf der Kläranlage Weißenburg (Tran, 2018)



**Bild 3:** Auswertung KBE/ml im Zulauf Ozonung der KA Weißenburg (Tran, 2018)



**Bild 4:** Auswertung KBE/ml im Ablauf der Ozonung (Tran, 2018)



**Bild 5:** Auswertung KBE/ml im Gesamtablauf der Kläranlage Weißenburg (Tran, 2018)