

MV-STUFEN STABIL BETREIBEN

HILFREICHE BETRIEBSPARAMETER

Der Reinigungseffekt für Mikroverunreinigungen wird von ARA über periodische Messungen der Leitsubstanzen bestimmt. Für den täglichen Betrieb lassen sich zusätzlich anhand von UV-Messungen sowie anhand der dosierten Mengen an Ozon oder Aktivkohle zeitnahe Aussagen zur Reinigungsleistung machen.

Aline Brander, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Pascal Wunderlin, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Rebekka Gulde, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Marc Anton Böhler, Eawag

RÉSUMÉ

EXPLOITER DE MANIÈRE STABLE LES ÉTAPES DE TRAITEMENT DES MICROPOLLUANTS: DE PRÉCIEUX PARAMÈTRES D'EXPLOITATION

Les STEP comprenant une étape de traitement des micropolluants (ci-après MP) déterminent leur taux d'épuration à l'aide d'analyses en laboratoire des 12 substances indicatrices. Les résultats ne sont connus qu'après 1 à 2 semaines. La STEP doit cependant respecter à tout moment le taux d'épuration requis de 80%. Comment réussit-elle à le respecter de manière stable et comment le contrôle-t-elle lors de l'exploitation sans mesures de MP? La plateforme VSA «Techniques de traitement des MP» explore ces questions. Pour ce faire, elle a rassemblé et analysé les expériences et données d'exploitation des 10 premières STEP suisses ayant une étape de traitement des MP. Pendant 1 an ou 2, les exploitants optimisent l'étape MP. Ils adaptent la stratégie d'exploitation et les quantités de dosage de charbon actif (CA) et d'ozone en permanence et génèrent par là des données d'exploitation importantes. Pour l'exploitation quotidienne, la plupart de ces STEP utilisent des mesures UV d'une longueur d'onde de 254 nm. Il apparaît que ces sondes sont utiles mais qu'elles présentent également certaines limites. Sur les installations d'ozonation, elles peuvent être utilisées efficacement par temps sec pour la commande et la régulation, mais en cas de précipitations, des interventions manuelles peuvent s'avérer nécessaires. Sur les installations au

BEREITS ÜBER 20 ARA AUSGEBAUT

Ausgewählte Abwasserreinigungsanlagen (ARA) bauen bis 2040 eine zusätzliche Reinigungsstufe (MV-Stufe), um Mikroverunreinigungen in ihren Abwässern zu eliminieren. Es werden bereits über 20 MV-Stufen in der Schweiz betrieben (Stand November 2023) und zahlreiche Projekte sind in Planung oder im Bau (Fig. 1). Insgesamt sollen gemäss den vier derzeit geltenden Kriterien der Gewässerschutzverordnung (GSchV) rund 120 ARA Massnahmen zur Reduktion von MV treffen. Weitere Anlagen werden voraussichtlich dazukommen, damit wegen ARA-Ausläufen keine stoffspezifischen Grenzwerte in den Gewässern überschritten werden [1].

Die gesetzliche Überprüfung des Reinigungseffekts erfolgt 6 bis 24 Mal pro Jahr mit Analysen der 12 Leitsubstanzen in externen Labors. Die Resultate liegen meist erst ein bis zwei Wochen nach der Beprobung vor. Die ARA muss aber den gesetzlich geforderten Reinigungseffekt von 80% jederzeit einhalten. Daher braucht es Ersatzparameter. Damit könnten ARA-Betreiberinnen und Betreiber im Idealfall jederzeit überprüfen, ob ihre MV-Stufe den gesetzlich vorgegebenen Reinigungseffekt einhält. Ozon und Aktivkohle könnten noch bedarfsgerechter dosiert werden.

Kontakt: pascal.wunderlin@vsa.ch

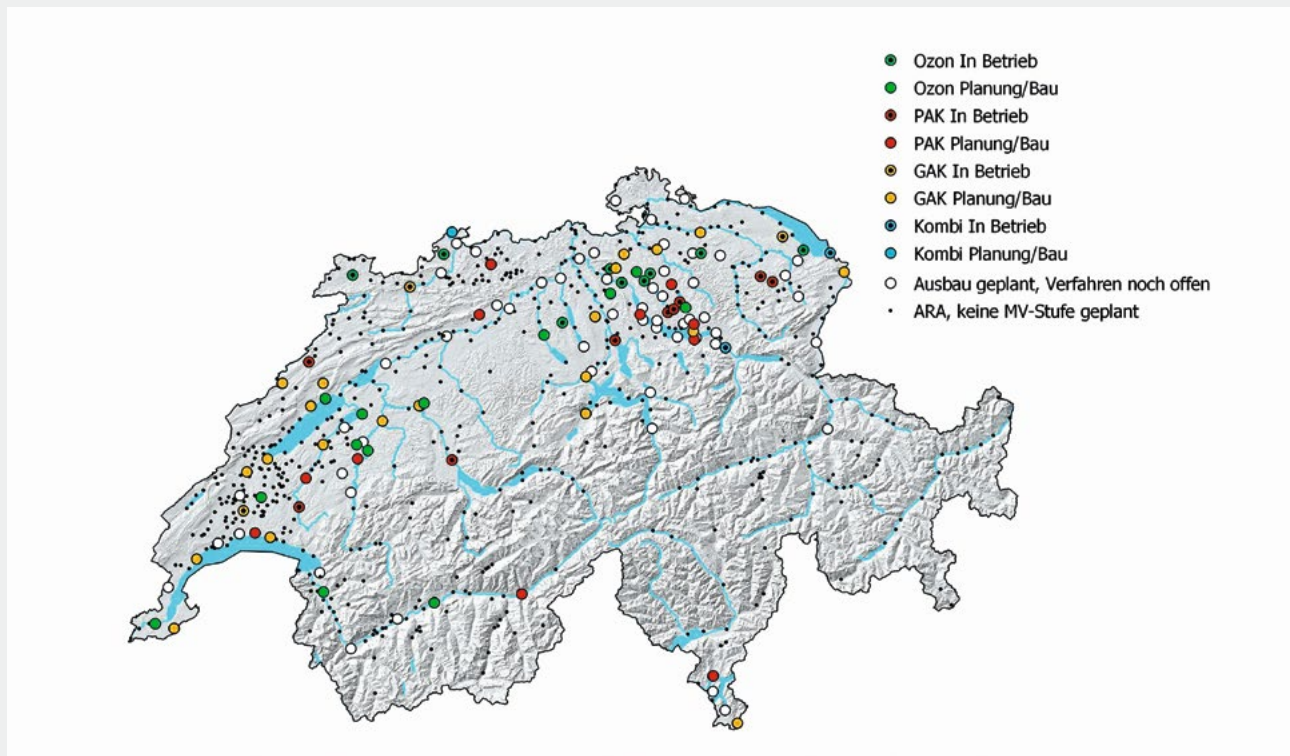


Fig. 1 Übersichtskarte ARA-Ausbau mit einer MV-Stufe gemäss den derzeit geltenden Kriterien der GSchV.

Sind wir bereits bei diesem Idealzustand angekommen? Wie gelingt es der ARA, den Reinigungseffekt stabil einzuhalten, und wie überprüft sie diesen täglich ohne MV-Messungen? Diesen Fragen ging die VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» nach und wertete dazu die Betriebserfahrungen und Betriebsdaten der ersten zehn Schweizer ARA mit MV-Stufe aus. Es handelt sich um einen ersten Überblick, der in den kommenden Jahren mit weiteren Anlagen ergänzt werden soll.

ERFAHRUNGEN UND DATEN VON 10 ARA ANALYSIERT

Zu den analysierten ARA gehören fünf Aktivkohleanlagen, vier Ozonungen und eine Verfahrenskombination (Ozonung mit GAK-Filtration). Weitere Informationen zu diesen Anlagen enthält *Tabelle 1*. Der über mehrere Jahre reichende Datensatz umfasst pro ARA 6 bis 96 Leitsubstanzenanalysen sowie folgende Betriebsdaten: UV-Messungen, Dosiermenge Ozon respektive Aktivkohle, Durchfluss, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) respektive gelöster chemischer Sauerstoffbedarf ($CSB_{gelöst}$) und Nitrit (bei Ozonungen). Von diesen Betriebsdaten wurden jeweils Tagesmittelwerte der Tage verwendet, für die auch MV-Messungen vorlagen. Daraus resultiert ein

begrenzter Datenausschnitt. Als Ergänzung flossen zusätzlich die Jahresdaten der verwendeten Betriebsmittelmengen von Aktivkohle und Ozon ein. Die Daten sind zwischen den ARA grundsätzlich vergleichbar, wobei folgende Überlegungen zu berücksichtigen sind:

- Spezifische Verbrauchsmengen von Ozon und Aktivkohle bezogen auf den DOC sind vergleichbar. Die DOC-Kon-

zentration im Ablauf der Nachklärung musste bei einzelnen ARA über den $CSB_{gelöst}$ abgeschätzt werden. Bei anderen ARA waren nur für wenige MV-Messungen DOC-Daten vorhanden. Zudem ist der DOC im Ablauf der Nachklärung bei ARA mit Pulveraktivkohle-(PAK)-Dosierung und Rückführung in die Biologie bereits durch PAK reduziert, was die spezifische Dosiermenge

ARA	Verfahren	Voll-/Teilstrom	Bemerkungen (Anzahl Datenpunkte und Zeitraum)
Thunersee	PAK-Dosierung mit Sedimentation und Sandfiltration	Teilstrom	Mit PAK-Rückführung in die Belebtschlammbiologie (55, 2018–2021)
Herisau	PAK-Dosierung mit Sedimentation und Sandfiltration	Teilstrom	Bedeutende Industrie-einleitungen, Einleitbedingung für Farbigkeit und weitere gegenüber der GSchV verschärfte Grenzwerte. Mit PAK-Rückführung in die Belebtschlammbiologie (42, 2017–2021)
Schönau	PAK-Dosierung vor Sandfiltration	Vollstrom	Mit PAK-Rückführung in die Belebtschlammbiologie (34, 2020/2021)
Wetzikon	PAK-Dosierung in die Belebtschlammbiologie	Vollstrom	Einstufiges Verfahren (51, 2020/2021)
Penthaz	GAK im Schwebbett	Teilstrom	Einstufiges Verfahren (19, 2019–2021)
Altenrhein	Ozonung und GAK-Filtration	Teilstrom	Teilozonung, Aktivkohleverbrauch aufgrund der kurzen Laufzeit noch nicht quantifizierbar (31, 2020/2021)
Werdhölzli	Ozonung und Sandfiltration	Vollstrom	[96 davon 54 mit Delta-UV, 2020–2022]
Neugut	Ozonung und Sandfiltration	Vollstrom	(58, 2017–2021)
Bassersdorf	Ozonung und Sandfiltration	Vollstrom	(20, 2020/2021)
Reinach	Ozonung und Sandfiltration	Vollstrom	(6, 2021)

Tab. 1 Informationen zu den ARA, deren Daten ausgewertet wurden.

Ergänzung zur Angabe Voll-/Teilstrom: Der Reinigungseffekt bezieht sich jeweils auf den Gesamtablauf.

tendenziell überschätzt. Wenn die PAK direkt in die Biologie dosiert wird, sind lediglich grobe Schätzungen der spezifischen Dosiermengen möglich.

- Aktivkohleprodukte können sich in ihrer Eliminationsleistung voneinander unterscheiden. Auch innerhalb eines Kohletypes kann es Qualitätsschwankungen geben. Dies kann sich auf den spezifischen Aktivkohleverbrauch und somit auf die Vergleichbarkeit mit anderen ARA auswirken.
- Die Auswahl der Leitsubstanzen beeinflusst den resultierenden Reinigungseffekt [2]. Es wurden jeweils die Reinigungseffekte verwendet, welche die Kantone ermittelt haben.
- Die ARA beproben ihren Zu- und Ablauf gleichzeitig. Beim Übergang von Trocken- zu Regenwetter oder umgekehrt kann diese Art der Probenahme den ermittelten Reinigungseffekt beeinflussen, da nicht das gleiche Wasserpaket beprobt wird. Zudem spielt es eine Rolle, dass die Proben für MV-Messungen im Zulauf zur ARA respektive Ablauf der Vorklärung genommen werden, wobei UV-Messungen im Zulauf zur MV-Stufe erfolgen. Dazwischen liegen 10 bis 20 Stunden Aufenthaltszeit in der Biologie.

MV-ANALYSEN LIEFERN WICHTIGE INFORMATIONEN

Sowohl Ozon- als auch Aktivkohleanlagen erreichen in aller Regel den gesetzlich ge-

forderten Reinigungseffekt von 80% (Fig. 2). Im analysierten Zeitraum lag bei fast 90% aller Probenahmen der Reinigungseffekt über 80%. Bei der ARA Herisau und der ARA Altenrhein lag er mit rund 95% sogar deutlich höher. Die Gründe dafür sind folgende: Die ARA Herisau hat aufgrund bedeutender Industrieleitungen verschärfte Einleitungsanforderungen, unter anderem für DOC und die Restfärbigkeit. Daher setzt die ARA Herisau tendenziell mehr Aktivkohle ein als andere ARA, was zu einem höheren Reinigungseffekt führt. Die ARA Altenrhein betreibt eine Verfahrenskombination aus einer Teil-Ozonung und einer GAK-Filtration. Im analysierten Zeitraum war die verwendete GAK noch relativ neu und deren Eliminationsleistung daher hoch. Trotz minimaler Ozondosis führte das zu einem mittleren Reinigungseffekt von über 95%. Es kommt ebenfalls vor, dass der Reinigungseffekt unter 80% liegt (siehe Fig. 2). Einzelne ARA überschritten auch schon die Anzahl zulässiger Abweichungen und haben somit die gesetzlichen Anforderungen für das entsprechende Jahr nicht erfüllt [3]. Das hat zur Folge, dass zusätzliche MV-Messungen im nachfolgenden Jahr nötig sind.

Auf einer ARA führte das zu nachträglichen baulichen Anpassungen im Ozonreaktor. Denn Tracerversuche zeigten Kurzschlussströmungen an, was dazu führte, dass bei hohen Durchflüssen Ozon über den Ablauf des Ozonreaktors in die Umgebung entwich und somit

nicht genügend Ozon für die Elimination zur Verfügung stand. Zudem kam es bei dieser ARA zu Ablagerungen im Ozonreaktor – sowohl auf dem Eintragsystem als auch auf anderen Einbauten. Der Ozoneintrag ging deswegen über die Zeit stark zurück, sodass die ARA den Reinigungseffekt nicht mehr einhielt. Seither leert die ARA den Ozonreaktor periodisch und säubert ihn. Den Reinigungseffekt von 80% hält sie nun zuverlässig ein.

Für alle MV-Stufen ist Regenwetter betrieblich anspruchsvoll und kann dazu führen, dass der Reinigungseffekt unterschritten wird. Eine Übersicht über betriebliche Schwierigkeiten und Lösungsansätze sind in den folgenden Publikationen enthalten [4–6].

In den ersten ein bis zwei Jahren optimieren die Betreiberinnen und Betreiber ihre MV-Stufe und legen die Basis für einen stabilen und optimierten Betrieb. Sie passen anhand der periodischen MV-Analysen die Betriebsstrategie und die Mengen an dosierter Aktivkohle und Ozon laufend an und generieren dadurch wichtige Betriebserfahrung. Die vorgeschriebene doppelte Anzahl MV-Analysen im ersten Jahr ist somit sinnvoll. Damit sammeln sie auch Erfahrungswerte mit verschiedenen Betriebszuständen wie Trocken- und Regenwetter. In dieser Phase kann es vorkommen, dass einzelne Proben den Reinigungseffekt von 80% unterschreiten. Es ist während der Inbetriebnahme hilfreich, auch tiefere Dosiermengen zu testen, um so Erfahrungswerte über die Dosis/Wirkungsbeziehung und die korrespondierenden UV-Werte (siehe nachfolgend) zu erhalten.

Bei Aktivkohleanlagen kommt dazu, dass verschiedene Aktivkohleprodukte unterschiedlich gut MV eliminieren. Wechselt die ARA das Aktivkohleprodukt, muss sie die optimale Aktivkohledosis bei den verschiedenen Betriebszuständen erst wieder neu ermitteln.

UV-MESSUNG HILFREICH FÜR DEN TÄGLICHEN BETRIEB

Ergänzend zu den periodischen Messungen der Leitsubstanzen nutzen ARA mit einer MV-Stufe meist die Messung der Absorbanz des Abwassers bei einer Wellenlänge von 254 nm (UV-Messung) mittels Photometer, um den Reinigungseffekt abzuschätzen. Die UV-Absorbanz-Abnahme gibt Auskunft über die

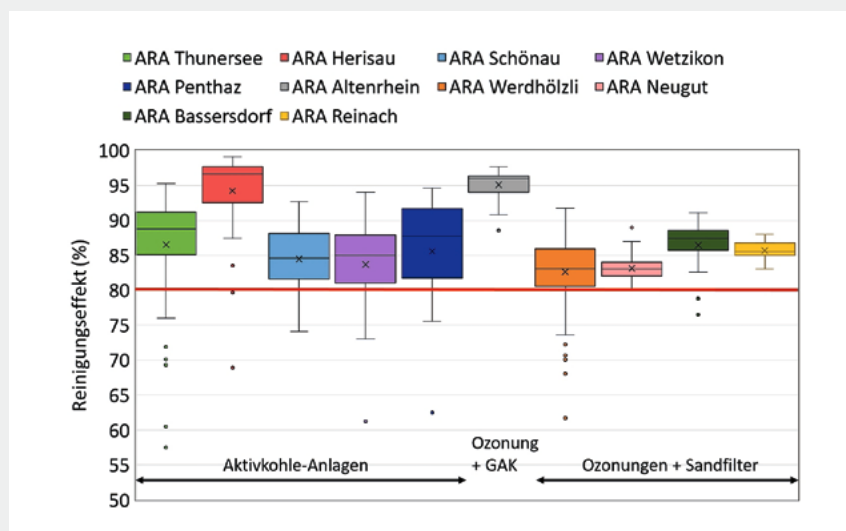


Fig. 2 Ergebnisse für den Reinigungseffekt jeder untersuchten ARA basierend auf Analysen der 12 Leitsubstanzen und berechnet durch die Kantone. Box = Bereich zwischen dem 25%- und dem 75%-Quartil (enthält 50% der Werte), waagerechter Strich in der Box = Median, Kreuz = Mittelwert, senkrechter Strich mit waagerechten kurzen Strichen = Werte, die in die Auswertung einfließen mit Minimum und Maximum aussen, Punkte ausserhalb = Ausreisser.

ANGABEN ZU DEN UV-MESSUNGEN

Bei Ozonungen sind die UV-Sonden idealerweise im Zu- und Ablauf des Ozonreaktors installiert – also vor dem Sandfilter – und bei Aktivkohleanlagen im Zu- und Ablauf der MV-Stufe. Teilweise werden bei Aktivkohleanlagen unfiltrierte Zulaufproben mit Proben im Ablauf von Sandfiltrationen verglichen. Dadurch können grosse Diskrepanzen in den Resultaten entstehen. Der optimale Umgang mit den UV-Sonden braucht zu Beginn viel Zeit. Nötig dazu sind eine Optimierung des Probenstroms, des Intervalls für manuelle und automatische Reinigung und Vergleichsmessungen im Labor für die Qualitätssicherung. Das optimale Delta-UV kann sich zudem über die Zeit verändern.

Box 1

Verschmutzung mit organischen Mikroverunreinigungen. Denn in Laborversuchen und auch bei grosstechnischen Stufenversuchen korreliert dieses Delta-UV sehr gut mit der Elimination von MV. Dieser Ersatzparameter kann zeitnah mittels Online-Sonden oder im Labor erhoben werden [7-11]. Genauere Angaben zu den UV-Messungen der untersuchten Anlagen sind in *Box 1* zu finden.

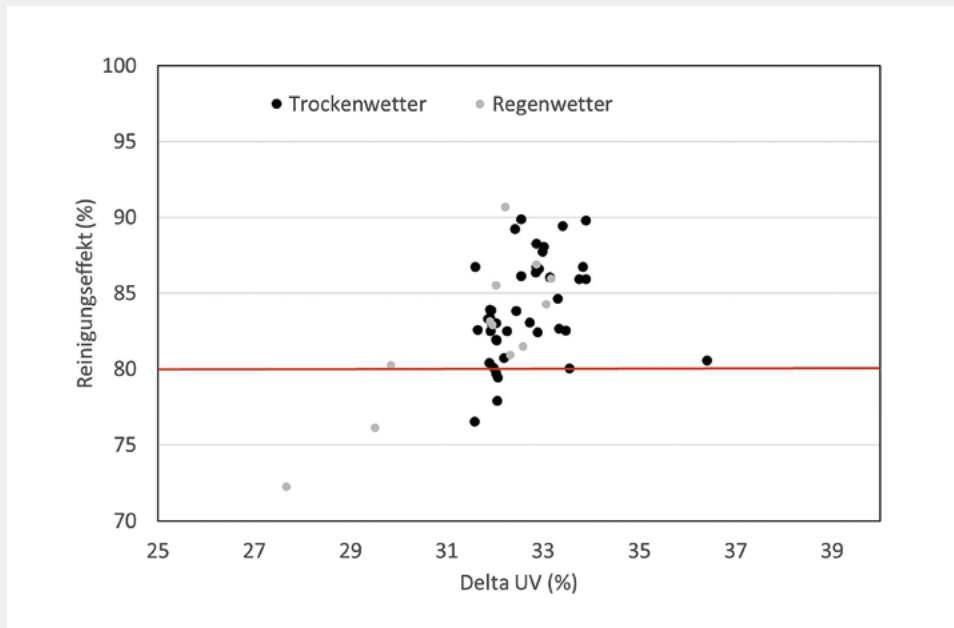


Fig 3 Beispiel Daten ARA Werdhölzli, Delta-UV – gemessen mit Sonden im Zu- und Ablauf des Ozonreaktors – verglichen mit dem Reinigungseffekt, berechnet anhand der 12 Leitsubstanzen durch den Kanton. Regenwetter = Durchflüsse grösser als 200 000 m³/d; rote Linie = gesetzliche Mindestvorgabe zum Reinigungseffekt.

Demgegenüber ist in den analysierten Daten der ARA mit MV-Stufe kein deutlicher Zusammenhang erkennbar (siehe beispielhaft Fig. 3). Das gilt sowohl für Ozonungen als auch Aktivkohleanlagen. Gründe für diese schlechter korrelierenden Daten sind unter anderem:

- Der Reinigungseffekt liegt in den betrachteten Fällen in einem engen Bereich zwischen 80% bis 90%, also in einem beschränkten Betrachtungsfens-

ter. Zusätzliche Datenpunkte aus etwaigen Stufenversuchen – siehe *Box 2* – flossen nicht in unsere Auswertung ein.

- Zudem ist zu beachten, dass es zu Fehlern in der Probenahme, Probenaufbereitung und bei der Analytik der Mikroverunreinigungen kommen kann. Diese Fehler beeinflussen die Korrelation zwischen dem Reinigungseffekt und dem Delta-UV negativ.

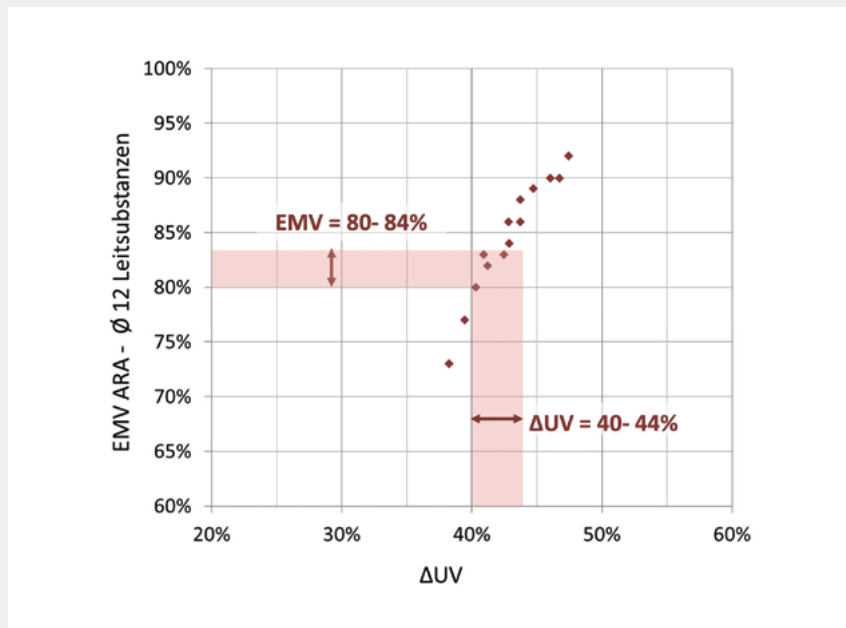


Fig. 4 Stufenversuch ARA Neugut bei Trockenwetter, durchgeführt mit gezielten O₃-Dosierungen und UV-Sonden ohne Drift. EMV = Elimination der Mikroverunreinigungen über die gesamte ARA; 24h-Mischproben. Grafik aus [12].

STUFENVERSUCHE

Stufenversuche dienen dazu, die UV-Abnahme einem entsprechenden Reinigungseffekt zuzuordnen (siehe Fig. 4). Mit der geringsten, spezifischen Ozon- oder Pulveraktivkohle-Dosis wird gestartet und diese dann stufenweise erhöht. Bei jeder Stufe werden die UV-Abnahme und die MV-Elimination ermittelt. Idealerweise deckt der Stufenversuch einen Reinigungseffekt-Bereich zwischen 50% bis 90% ab. Mit Ozonanlagen sind Stufenversuche einfach umsetzbar. Bei PAK-Anlagen mit einer Rückführung der Aktivkohle in die Biologie muss der Stufenversuch zwingend beim Einfahren der Anlage erfolgen. Zudem brauchen PAK-Anlagen jeweils einige Wochen pro Stufe, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Für GAK-Raumfilter sind keine Stufenversuche möglich.

Box 2

- Abhängig vom Alter der UV-Sonden kann sich die Korrelation zwischen der UV- und der MV-Messung einer ARA über die Zeit verändern.
- Bei Aktivkohle-Anlagen mit einer abschliessenden Filtration misst die UV-Sonde im ARA-Ablauf filtriertes Abwasser, während im Zulauf zur MV-Stufe die Abwasserprobe nicht filtrierte ist. Dies wirkt sich auf die Resultate aus [7]. Auch beim Vergleich von Online-UV-Werten (meist unfiltriert) und Labor-UV-Werten (filtriert) ist dies der Fall.
- Auf der ARA Neugut sind mehrere UV-Sonden mit unterschiedlichen korrespondierenden Delta-UV im Einsatz. Je nachdem, welches Sondenpaar gerade zur Regelung im Einsatz ist, ist ein anderer Faktor erforderlich, damit alle UV-Sonden dasselbe Endergebnis liefern. Die Stufenversuche ergaben eine sehr gute Korrelation ($R^2=0,96$) über die Ozonung (Vergleich Zu- und Ablauf Ozonung; siehe Fig. 4).
- Der Reinigungseffekt wird zwischen ARA-Zu- und Ablauf ermittelt, während das Delta-UV nur über die MV-Stufe bestimmt wird. Das heisst, die biologische Stufe trägt zusätzlich zum Reinigungseffekt bei. Auch wenn der Einfluss in der Summe gering ist, kann es zu gewissen Verschiebungen kommen.
- Die gewählte Strategie der Ozon-Dosierung hat ebenso einen Einfluss auf die Bandbreite des Delta-UV-Ergebnisses wie auch der zeitliche Aufbau sowie die Entfernung des Biofilms in den UV-Sonden.

UV-MESSUNG MEIST HILFREICH - MIT GEWISSEN EINSCHRÄNKUNGEN

Trotz schlechter Korrelation in den erhobenen Daten lassen sich Ozonungen gemäss den Erfahrungen der Betreiberinnen und Betreiber bei Trockenwetter stabil mit UV-Sonden steuern respektive regeln. Bei Regenwetter hingegen stösst dieser Parameter bei den meisten Ozonungen bis anhin an seine Grenzen, vermutlich, weil sich die Abwasserzusammensetzung schnell ändert und damit auch das Verhältnis zwischen DOC und Absorbanz. Auf der ARA Neugut funktioniert die Regelung mit dem Delta-UV auch bei Regenwetter zuverlässig [4]. Warum es bei den anderen Ozonungen noch nicht immer funktioniert, ist unklar. Bei Aktivkohleanlagen kommt das UV-Signal ebenfalls zum Einsatz. Die Erfah-

rungen zeigen aber, dass dieses Signal hier eher eine Richtgrösse darstellt. Es zeigt beispielsweise Betriebsstörungen zuverlässig an. Das UV-Signal wird also nicht zum Steuern/Regeln verwendet, weil Aktivkohle-Anlagen sehr träge auf Dosieränderungen reagieren, insbesondere wenn sie die PAK in die Biologie zurückführen. Die Aufenthaltszeit der Aktivkohle im System beträgt dann mehrere Tage. Der Reinigungseffekt ändert sich somit nicht unmittelbar, wenn kurzfristig mehr oder weniger Aktivkohle zugegeben wird. Für kleine bis mittelgrosse ARA sind daher Tagesmittelwerte des Delta-UV ausreichend.

Einen Spezialfall stellt die Aktivkohledosierung in die Biologie dar, wie es zum Beispiel auf der ARA Wetzikon umgesetzt ist. Dieses Verfahren müsste eine UV-Messung im Ablauf des Vorklärbeckens durchführen. In vorgeklärtem Abwasser ist der DOC quantitativ und qualitativ anders als nach der biologischen Behandlung des Abwassers. Daher ist die UV-Messung in diesem Fall nicht hilfreich.

Die Steuerung der Aktivkohledosierung erfolgt somit unabhängig vom Delta-UV meistens durchflussproportional. Die ARA Herisau dosiert etwas anders, nämlich jeweils eine konstante Menge Aktivkohle über den Tag verteilt mittels Tagesganglinie.

Für weitere Optimierungen bei Ozon- und Aktivkohleanlagen besteht noch Bedarf an weiteren Messkonzepten. Ein vielversprechendes Messkonzept stellt beispielsweise die sogenannte *Electrone Donating Capacity* (EDC) dar, welche die UV-Messung ergänzen könnte. Die Messung wurde bei der Ozonung auf der ARA Werdhölzli erfolgreich getestet [13]. Es bräuchte jedoch die Unterstützung von Messtechnik-Herstellern und interessierten ARA, um das Messkonzept für die Praxis weiterzuentwickeln. Ein weiteres Verfahren ist das laserinduzierte Fluoreszenzverfahren, das auf der ARA Neugut getestet wurde und vergleichbare Ergebnisse zu den UV-Sonden lieferte.

DAS DELTA-UV IST VON ARA ZU ARA VERSCHIEDEN

Wie stark das UV-Signal über die MV-Stufe abnimmt, unterscheidet sich bei den untersuchten ARA (Fig. 5). Je nach Abwasserzusammensetzung variiert die mittlere UV-Abnahme zwischen 23% (ARA Penthaz) und 45% (ARA Bassersdorf). Die anderen untersuchten ARA liegen dazwischen. Einen Spezialfall stellt die ARA Altenrhein dar: Die gezeigte UV-Absorbanz-Abnahme bezieht sich lediglich auf die Ozonung - die GAK-Stufe ist nicht enthalten.

Mithilfe eines Stufenversuchs (siehe Box 2) kann jede ARA für ihr Abwasser

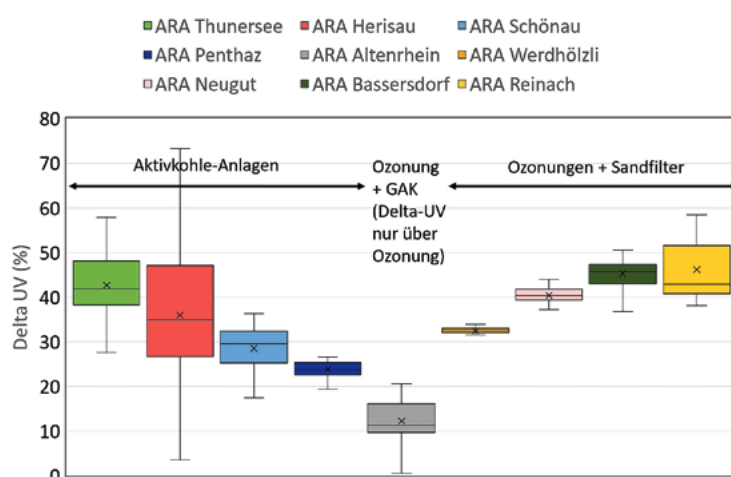


Fig 5 Delta-UV von neun ARA (ohne ARA Wetzikon), gemessen mit Sonden und auf Tageswerte gemittelt, Ausnahme ARA Schönau: Laboranalysen. Die ARA Neugut hatte mehrere Sondenpaare im Einsatz, weshalb das Delta-UV stärker variiert als mit nur einem Sondenpaar. Box = Bereich zwischen dem 25%- und dem 75%-Quartil (enthält 50% der Werte), waagerechter Strich in der Box = Median, Kreuz = Mittelwert, senkrechter Strich mit waagerechten kurzen Strichen = Werte, welche in die Auswertung einfließen mit Minimum und Maximum aussen, Punkte ausserhalb = Ausreisser.

den Reinigungseffekt dem jeweiligen Delta-UV zuordnen. Weicht die UV-Abnahme später im Betrieb von den ermittelten ARA-spezifischen Werten ab, sind genauere Abklärungen sinnvoll.

Damit die Ozonzugabe bei einer Regelung anhand des Delta-UV stabil und zuverlässig funktioniert, sollte das UV-Signal möglichst wenig variieren (Drift vermeiden). Bei den ARA Bassersdorf, Werdhölzli und Neugut ist das gemäss Experteneinschätzung der Fall. Die Box in *Figur 5* ist für diese ARA schmal – der Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Quartil liegt beim Mittelwert plus minus 0,5 bis 2,5 Prozentpunkte. Bei der ARA Reinach streuen die Daten stärker verglichen mit den anderen Ozon-Anlagen. Es sind allerdings nur sechs Messwerte in die Analyse eingeflossen.

Bei Aktivkohleanlagen variieren die UV-Abnahmen tendenziell stärker als bei den Ozonanlagen, vor allem bei der ARA Herisau wegen der starken Industrieinflüsse.

DOSIERMENGEN DIENEN ALS ERGÄNZUNG

Ergänzend zu den MV- und UV-Messungen helfen die Dosiermengen an Ozon und Aktivkohle, um den momentanen Reinigungseffekt einzuordnen. Insbesondere für Aktivkohleanlagen stellt das eine wichtige Information dar. Weichen die aktuellen Dosiermengen von den Erfahrungswerten ab, sind genauere Abklärungen sinnvoll.

ÜBLICHE DOSIERMENGEN AN AKTIVKOHLE

Die untersuchten Aktivkohleanlagen der ARA Thunersee, Schönau, Wetzikon und Penthaz benötigen zwischen 7 mg/l und 17 mg/l Aktivkohle; 50% der Daten lagen in diesem Bereich. Die ARA Herisau benötigt mehr Aktivkohle aufgrund der spezifischen Anforderungen. Die Dosiermengen unterscheiden sich erwartungsgemäss zwischen den ARA. Das ist unter anderem auf die unterschiedliche Abwasserzusammensetzung zurückzuführen. Zudem finden sich unter den fünf untersuchten ARA vier verschiedene Aktivkohleverfahren (siehe *Tab. 1*). Das kann ein weiterer Grund sein für die variierenden Dosiermengen. Überdies setzen diese ARA unterschiedliche PAK-Produkte ein. Etwas besser vergleichbar werden die spezifischen Dosiermengen, wenn sie sich auf den DOC beziehen. Die ARA Thunersee, Schönau und Penthaz be-

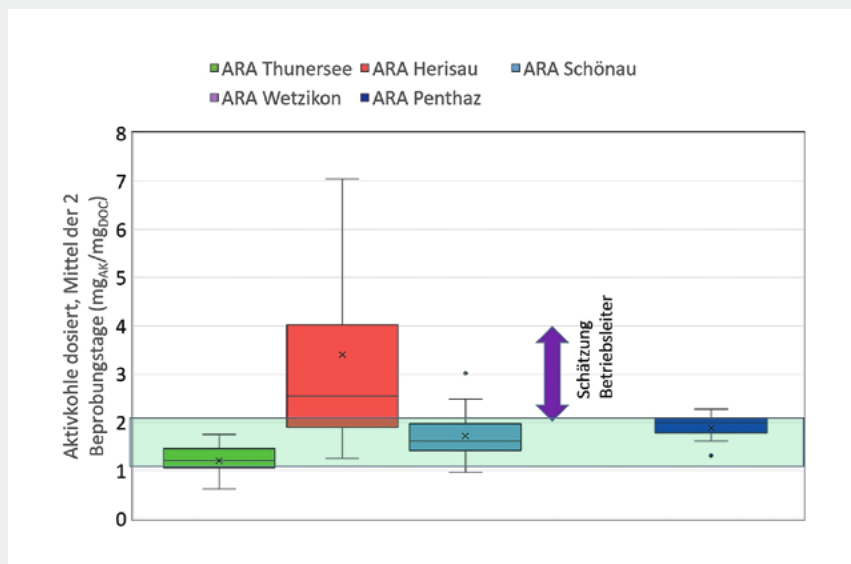


Fig. 6 Aktivkohledosiermengen pro DOC im Zulauf zur MV-Stufe, dargestellt sind die Datenpunkte mit MV-Messungen. Grünes Band = 50% der Datenpunkte der repräsentativen Anlagen, unterstes 25%-Quartil bis oberstes 75%-Quartil; Box = Bereich zwischen dem 25% und dem 75% Quartil (enthält 50% der Werte), waagerechter Strich in der Box = Median, Kreuz = Mittelwert, senkrechter Strich mit waagerechten kurzen Strichen = Werte, die in die Auswertung einfließen mit Minimum und Maximum aussen, Punkte ausserhalb = Ausreisser

nötigen rund 1 bis 2 mg AK/mg DOC (*Fig. 6*, grünes Band). Die Werte der ARA Herisau liegen aufgrund verschärfter Anforderungen deutlich höher bei einer mittleren spezifischen Dosis von etwa 3,5 mg AK/mg DOC.

Das Verfahren mit Dosierung der PAK in die Biologie stellt einen Spezialfall dar. Der DOC im Ablauf der Nachklärung ist stark durch die vorangehende PAK-Behandlung beeinflusst. Das trifft zwar auch auf ARA mit einer Rückführung der PAK in die Biologie zu, wie beispielsweise die ARA Thunersee oder Schönau. Der Effekt ist dort aber weniger stark ausgeprägt, weil die Aktivkohle bereits teilbeladen ist. Die ARA Wetzikon schätzt ihren spezifischen Aktivkohleverbrauch anhand von Erfahrungswerten auf 2 bis 4 mg AK/mg DOC. Weil die Mehrstufigkeit fehlt, liegt der spezifische PAK-Verbrauch höher als bei Ablaufbehandlungen wie beim Ulmer Verfahren oder der PAK-Dosierung vor den Sandfilter.

Bisher wurden lediglich Tage betrachtet, an denen die ARA MV-Analysen durchge-

führt haben. Die mittleren Dosiermengen in *Tabelle 2* berücksichtigen hingegen alle Betriebstage und dienen als Ergänzung. Sie wurden mit einer jährlich verbrauchten totalen Betriebsmittelmenge berechnet. Es resultieren Jahresmittel von 7 bis 15 mg AK/l respektive 1,3 bis 1,7 mg AK/mg DOC (ohne Herisau und Wetzikon). Diese Angaben decken sich gut mit den vorher ermittelten spezifischen Verbräuchen an Tagen mit MV-Analyse. Zudem stimmen die Werte auch gut mit den entsprechenden Angaben der Anlagen aus Deutschland überein.

Eine grosse Unsicherheit bei der Aktivkohledosierung ist, dass die Qualität innerhalb eines Aktivkohleprodukts variiert, was sich auf die Eliminationsleistung auswirkt. Ein praxistauglicher Test zur Bestimmung der Qualität der Aktivkohle würde den Betrieb vereinfachen. Hierzu sind Forschungsprojekte nötig.

ÜBLICHE DOSIERMENGEN AN OZON

Die vier untersuchten Ozonanlagen benötigen im Mittel zwischen 1,8 und

ARA	Jahresmittel mg AK/l	Jahresmittel mg AK/mg DOC	Berücksichtigter Zeitraum
Thunersee	8,3 – 10,3	1,5 – 1,6	2019 und 2020
Herisau	14,4 – 20,3	2,1 – 3,2	2016 – 2020
Schönau	7,0 – 9,2	1,3 – 1,7	2020 und 2021
Wetzikon	12,7 – 15,2	2,0 – 4,0 (Schätzung Betreiber)	2020 – 2022
Penthaz	12,0 – 12,2	1,7	2019 und 2020

Tab. 2 Mittlere Dosiermengen an Aktivkohle, berechnet aus der totalen jährlich verbrauchten Menge.

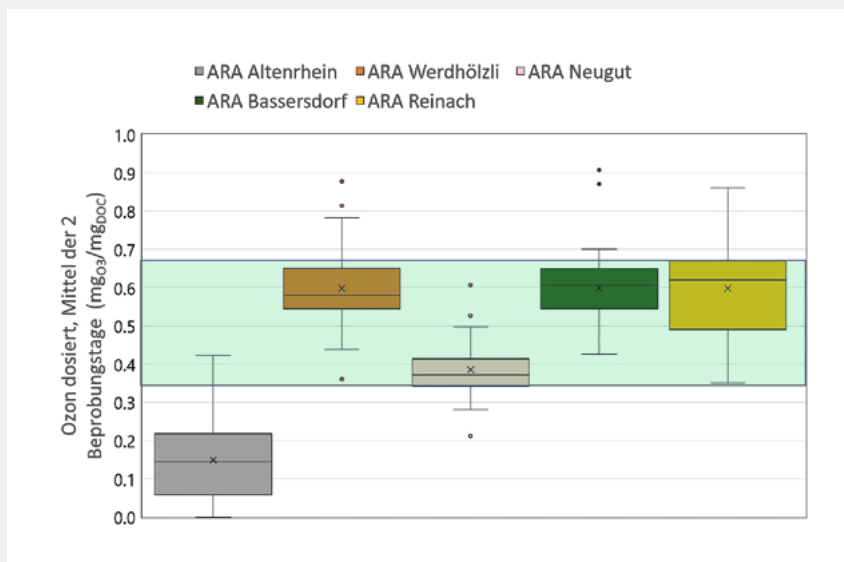


Fig. 7 Spezifische Ozondosiermengen pro DOC, dargestellt sind die Datenpunkte mit MV-Messung. Grünes Band = 50% der Datenpunkte der repräsentativen Anlagen, unterstes 25%-Quartil bis oberstes 75%-Quartil; Box = Bereich zwischen dem 25%- und dem 75%-Quartil (enthält 50% der Werte), waagerechter Strich in der Box = Median, Kreuz = Mittelwert, senkrechter Strich mit waagerechten kurzen Strichen = Werte, die in die Auswertung einfließen mit Minimum und Maximum aussen, Punkte ausserhalb = Ausreisser.

4 mg/l Ozon. 50% der Werte liegen in diesem Bereich.

Die Unterschiede zwischen den ARA reduzieren sich deutlich, wenn die Dosiermenge auf den DOC bezogen wird. Denn damit wird wiederum der unterschiedlichen Abwassermatrix Rechnung getragen. Die ARA Werdhölzli, Neugut, Bassersdorf und Reinach benötigen rund 0,4 bis 0,7 mgO₃/mgDOC (Fig. 7, grünes Band). Die Werte der ARA Altenrhein liegen aufgrund der Teil-Ozonung deutlich tiefer.

Werden Dosiermengen betrachtet, die aus der totalen jährlichen dosierten Ozonmenge berechnet wurden, resultieren Jahresmittel von 1,9 bis 3,9 mgO₃/l respektive 0,35 bis 0,59 mgO₃/mgDOC (Tab. 3, ohne Altenrhein). Diese Angaben decken sich gut mit den vorher ermittelten spezifischen Verbräuchen an Tagen mit MV-Analyse.

HILFREICHE ÜBERGEORDNETE DATEN

Die Kantone prüfen, ob die MV-Stufen fachgerecht betrieben werden und den gesetzlich geforderten Reinigungseffekt einhalten. Dabei stützen sie sich auf die periodischen Messungen der Leitsubstanzen, können aber auch weitere Betriebsdaten hinzuziehen. Hilfreich sind neben den UV-Messungen (siehe Kapitel «UV-Messungen hilfreich für den täglichen

Betrieb»), auch folgende Betriebsdaten:

- Anzahl Betriebsstunden der wichtigen Aggregate (z.B. Ozongenerator, Aktivkohledosierung) und Filterlaufzeiten bei GAK-Filtern.
- Austauschintervalle der Aktivkohle in den einzelnen GAK-Zellen (hierzu liegen bisher noch keine Erfahrungswerte vor).
- Anzahl und Art der aufgetretenen Störungen der wichtigen Aggregate.
- Monatlicher Stromverbrauch der MV-Stufe. Um diesen einordnen zu können, braucht es Erfahrungswerte der ersten Betriebsjahre.
- Monatliche Verbräuche an Ozon und Aktivkohle.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den Betriebserfahrungen und den Betriebsdaten der ersten zehn MV-Stufen lässt sich Folgendes lernen:

- ARA mit MV-Stufen halten in der Regel den gesetzlich geforderten Reinigungs-

effekt von 80% ein. Dabei geben die MV-Messungen den ARA-Betreiberinnen und Betreibern eine periodische Standortbestimmung. Auf diese Weise generieren sie in den ersten ein bis zwei Betriebsjahren wichtige Erfahrungswerte in Bezug auf die Dosierung von Ozon oder Aktivkohle und den Umgang mit den UV-Sonden.

- Für den täglichen Betrieb sind UV-Messungen bei 254 nm insbesondere bei Ozonanlagen (Zulauf/Ablauf Ozonung) sehr hilfreich. Bei Regenwetter funktioniert dies teilweise etwas weniger zuverlässig. Bei Aktivkohleanlagen stellt die UV-Abnahme lediglich eine Richtgrösse dar und zeigt beispielsweise Betriebsstörungen zuverlässig an.
- Die absolute Absorbanz-Abnahme der UV-Messung ist bei jeder ARA anders, abhängig von der spezifischen Abwassermatrix und den eingesetzten UV-Sonden respektive deren Einstellungen. Es empfiehlt sich daher, im Rahmen eines sogenannten Stufenversuchs die Abnahme der Absorbanz dem entsprechenden Reinigungseffekt zuzuordnen. Solche Stufenversuche erfolgen während der Einfahrphase, sobald die UV-Sonden stabil messen.
- Die Ozondosierung basierend auf dem UV-Signal oder dem Delta-UV bedarf einer möglichst präzisen Messung der Absorbanz mit wenig Drift. Daher hat die Pflege der Sonden einen hohen Stellenwert im Betrieb der Anlagen.
- Die dosierte Menge an Ozon und Aktivkohle gibt einen zusätzlichen Anhaltspunkt in Bezug auf den momentanen Reinigungseffekt. Das ist insbesondere für Aktivkohleanlagen wichtig, da das Delta-UV zu ungenau ist. Weichen die aktuellen Dosiermengen von den Erfahrungswerten ab, sind vertiefte Abklärungen sinnvoll. Um die Unsicherheiten bei der Aktivkohledosierung weiter zu reduzieren, braucht es Forschungsprojekte zur Entwicklung praxistauglicher Instrumente für die Qualitätssicherung der Aktivkohle.

ARA	Jahresmittel mg O ₃ /l	Jahresmittel mg O ₃ /mg DOC	Berücksichtigte Jahre
Altenrhein (Kombi-Anlage)	0,9	0,11 – 0,12	2020 und 2021
Werdhölzli	3,5 – 3,9	0,51 – 0,56	2019 – 2022
Neugut	1,9 – 2,2	0,35 – 0,45	2017 – 2020
Bassersdorf	2,7 – 2,8	0,56 – 0,59	2020 und 2021
Reinach	Fehlende repräsentative Jahresdaten		

Tab. 3 Mittlere Dosiermengen an Ozon, berechnet aus der totalen jährlich verbrauchten Menge.

DANK

Wir danken allen ARA-Betriebsleiterinnen und Betriebsleitern dafür, dass sie uns ihre Daten zur Verfügung gestellt und mit uns ihre Erfahrungen geteilt haben. Zudem haben uns die Diskussionen in unserer Plattform-Arbeitsgruppe sehr geholfen. Speziell danken wir *Max Schachtler* (step-ara GmbH), *Christian Abegglen* (ERZ), *Thomas Klaus* (ARA Schönau), *Valentin Lanz* (Kanton AR), *Ingo Schoppe* (ARA Thunersee), *Stefan Vogel* (Endress + Hauser), *Damian Dominguez* (BAFU) und *Daniel Urfer* (RWB) für die Mitarbeit beim Artikel. Das Projekt wurde durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

- Um zu überprüfen, ob die MV-Stufe ganzjährig gelaufen ist, sind folgende ergänzende Parameter hilfreich: Anzahl Betriebsstunden und Anzahl sowie Art der Störungen der wichtigen Aggregate (unter anderem Ozongenerator und Aktivkohledosierung), Laufzeiten der GAK-Filterzellen, monatlicher Stromverbrauch der MV-Stufe und monatliche Verbräuche an Ozon und Aktivkohle.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Regazzi, F.; Schmid, M.; Walti, B., (2020): Motion 20.4262 Massnahmen zur Elimination von Mikroverunreinigungen für alle Abwasserreinigungsanlagen. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20204262>, zuletzt besucht 11.10.23

- [2] Wunderlin, P.; Gulde, R.; Bosshard, J. (2024): Mikroverunreinigungen aus dem häuslichen Abwasser entfernen: Erkenntnisse aus sieben Jahren Überprüfung Reinigungseffekt. *Aqua & Gas* 1/2024: 46–53
- [3] BAFU (2023): Abwasserfinanzierung/Abwasserfonds. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/abwasserreinigung/abwasserfinanzierung_abwasserfonds.html, zuletzt besucht 24.7.23
- [4] Schachtler, M., Otto, J.; Thomann, M. (2020): Spurenstoffelimination bei Regenwetter. *Aqua & Gas* 2/2020: 20–25
- [5] VSA (2022): Betrieb von Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination auf ARA bei Regenwetter. www.micropoll.ch, zuletzt besucht 24.7.23
- [6] Böhler, M.A. et al. (2023): Spurenstoffelimination bei stark verdünnter Abwassermatrix – Erfahrungen, Kenntnisstand und Herausforderungen. 15. Aachener Tagung Wassertechnologie. Eawag, Dübendorf, Schweiz.
- [7] Wittmer, A. et al. (2013): UV-Messung zur Regelung der Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung. Eawag, Dübendorf, Schweiz.
- [8] VSA (2017): Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination – Faktenblatt. www.micropoll.ch, zuletzt besucht 24.07.23
- [9] Schachtler, M.; Hubaux, N.; Götz, C. (2017): Eignung von UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination, Korrespondenz *Abwasser* 64: 889–904
- [10] VSA (2018): Erfahrungen mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen – Faktenblatt. www.micropoll.ch, zuletzt besucht 24.07.23
- [11] McArdell, C.S. et al. (2020): Pilotversuche zur erweiterten Abwasserbehandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teilozonung

(O₂/GAK) auf der ARA Glarnerland (AVG), Ergänzende Untersuchungen zur PAK-Dosierung in die biologische Stufe mit S::Select®-Verfahren in Kombination mit nachfolgender GAK. Schlussbericht Eawag, Dübendorf, Schweiz.

- [12] Schachtler, M., Hubaux, N. (2016): BEAR: Innovative Regelstrategie der Ozonung – UV-Messtechnik für Regelung und Überwachung der Elimination von Mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas* 5/2016: 84–93
- [13] Walpen, N. (2022): Application of UV absorbance and electron-donating capacity as surrogates for micropollutant abatement during full-scale ozonation of secondary-treated wastewater. *Water Research* 209:117858

> SUITE DU RÉSUMÉ

CA la baisse des UV ne représente qu'une valeur indicative et signale p. ex. des dérangements d'exploitation de manière fiable. Les valeurs absolues de la baisse des UV varient d'une STEP à l'autre. Outre la mesure UV, le dosage d'ozone et de CA fournit un point de repère en ce qui concerne la capacité d'épuration actuelle. C'est important en particulier pour les installations à CA, car la mesure UV ne peut pas être utilisée pour la commande ou la régulation. Si les quantités de dosage réelles diffèrent des valeurs empiriques, il est pertinent de procéder à des investigations plus précises sur les causes de cet écart.



Die Zukunft fliesst sauber – mit Hawle Abwasserarmaturen
www.hawle.ch