

# **ARA-Ausbau zur Erfüllung der Motion 20.4262: Zusätzliche Massnahmen zur Einhaltung der numerischen Anforderungen und deren Kosten**

Analyse von Massnahmen zur Einhaltung der numerischen Anforderungen (Anhang 2 Ziffer 11 GSchV) bei der Elimination von Mikroverunreinigungen in ARA und deren Auswirkungen auf die Ausbaurkosten



Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Hochschule für Life Sciences  
Institut für Ecopreneurship  
Hofackerstrasse 30  
4132 Muttenz

Datum: 20.06.2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

## Impressum

### Empfohlene Zitierweise

Autor: Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Titel: ARA-Ausbau zur Erfüllung der Motion 20.4262: Zusätzliche Massnahmen zur Einhaltung der numerischen Anforderungen und deren Kosten  
Untertitel: Analyse von Massnahmen zur Einhaltung der numerischen Anforderungen (Anhang 2 Ziffer 11 GSchV) bei der Elimination von Mikroverunreinigungen in ARA und deren Auswirkungen auf die Ausbau-Kosten  
Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt  
Ort: Bern und MuttENZ  
Datum: 20.06.2024

### Begleitung seitens Bund

Damian Dominguez (Projektleitung, BAFU)  
Fabian Soltermann (BAFU)

### Projektteam FHNW

Bartosz Kawecki  
Michael Thomann

**Titelbild:** Biologische Abwasserbehandlung Yverdon-les-Bains (Foto Bartosz Kawecki).

**Danksagung:** Wir möchten uns herzlich bei Sven Bressmer von der Heusser AG für die Zurverfügungstellung von Kostendaten für UV-Anlagen bedanken.

**Haftungsausschluss:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellung	5
2	Biologische Diclofenac Elimination	8
3	Diclofenac Elimination in ARA mit Ozonung	9
4	Diclofenac Elimination in ARA mit PAK-Verfahren	9
5	Diclofenac Elimination in ARA mit GAK-Verfahren	11
6	Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination	12
7	Kosten zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in 54 ARA	13
8	UV-Bestrahlung als alternative Massnahme	20
9	Schlussfolgerung	22
10	Literaturverzeichnis	23
Anhang		

## Zusammenfassung

Gemäss Gewässerschutzverordnung Anhang 2 dürfen Konzentrationen von ausgewählten Spurenstoffen bestimmte Grenzwerte in Oberflächengewässern nicht überschreiten. Zu den ausgewählten Spurenstoffen gehört unter anderem das Arzneimittel Diclofenac. Diclofenac ist besonders problematisch, da es häufig im Rohabwasser vorkommt, schlecht in ARA eliminiert wird und sich bereits bei tiefen Konzentrationen negativ auf das aufnehmende Gewässer auswirken kann. Diclofenac muss in ARA so weit eliminiert werden, dass der Grenzwert von 0.05 µg/l im aufnehmenden Gewässer nicht überschritten wird (GSchV Anhang 2). Gemäss dem Stoffflussmodell der VSA-Plattform Verfahrenstechnik besteht bei 54 Schweizer ARA das Risiko, dass trotz der Implementierung einer Stufe zur Elimination von Spurenstoffen und Einhaltung der Verordnung des UVEK, der Diclofenac Grenzwert im aufnehmenden Gewässer überschritten wird. ARA, welche eine Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer verursachen, müssen zusätzliche Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination treffen. Hauptziel dieser Studie war Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in ARA zu identifizieren und abzuschätzen wie viel die Umsetzung dieser Massnahmen in den 54 ARA kosten würde. In einem ersten Schritt wurde eine Literaturstudie zur Diclofenac Elimination in ARA, welche über eine Stufe zur Elimination von Spurenstoffen verfügen, durchgeführt. Im Rahmen der Literaturstudie wurde untersucht, welchen Einfluss die Ozondosierung, PAK-Dosierung und GAK-Austauschfrequenz auf die Diclofenac Elimination haben und welche Diclofenac Eliminationsraten in ARA erreicht werden, wenn eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK angestrebt wird. In einem zweiten Schritt wurden Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in ARA identifiziert und Kosten für die Umsetzung dieser Massnahmen in den 54 ARA geschätzt. Zusätzlich wurde geprüft, ob die UV-Bestrahlung von gereinigtem Abwasser als alternative Massnahme zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in Frage kommt.

Die Literaturstudie zeigt, dass Diclofenac in ARA mit Ozonungen in der Regel zu 95-99% und in ARA mit Aktivkohleverfahren in der Regel zu 60-90% eliminiert wird, wenn der Betrieb darauf ausgerichtet ist, eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK zu erreichen. Zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in ARA mit Aktivkohleverfahren wurden folgende Massnahmen identifiziert: Erhöhung der PAK-Dosierung bzw. GAK-Austauschfrequenz, Ozonung zusätzlich zum bestehenden PAK- oder GAK-Verfahren, zweite GAK-Stufe zum bestehenden GAK-Verfahren, PAK-Anlage zusätzlich zum bestehenden GAK-Verfahren. Investitionskosten für die Implementierung dieser Massnahmen in den 54 ARA wurden auf ungefähr 70-300 Mio. CHF inkl. MwSt. geschätzt. Würden hauptsächlich betriebliche Massnahmen implementiert werden (Erhöhung der PAK-Dosierung bzw. GAK-Austauschfrequenz), wäre mit Investitionskosten von ungefähr 75 Mio. CHF inkl. MwSt. und zusätzlichen Betriebskosten von ungefähr 7 Mio. CHF/a inkl. MwSt. zu rechnen. Würden hauptsächlich zusätzliche Ozonungen gebaut werden, wäre mit Investitionskosten von ungefähr 280 Mio. CHF inkl. MwSt. und zusätzlichen Betriebskosten von ungefähr 6 Mio. CHF/a inkl. MwSt. zu rechnen. Welche Massnahmen sich auf welchen ARA am besten eignen, konnte im Rahmen von dieser Studie nicht abschliessend beurteilt werden, da unterschiedliche Faktoren wie z.B. Platzverhältnisse auf dem ARA-Areal, Kapazität in der Biologie für PAK-Dosierung oder persönliche Präferenzen des ARA-Betriebs eine Rolle spielen. Die UV-Bestrahlung von gereinigtem Abwasser könnte in ARA, in welchen eine Installation von inline UV-Anlagen ohne massgebliche bauliche Anpassungen möglich ist, eine kostengünstige Alternative zur Erhöhung der Diclofenac Elimination darstellen. Ein Nachteil der UV-Bestrahlung ist, dass keine Breitbandwirkung bei der Elimination von Mikroverunreinigungen erreicht wird, da nur photoreaktive Substanzen wie z.B. Diclofenac abgebaut werden. Des Weiteren können bei der UV-Bestrahlung von Diclofenac-haltigem Wasser toxische Abbauprodukte entstehen, weshalb im Voraus geprüft werden sollte, ob UV-Anlagen so betrieben werden können, dass keine toxischen Abbauprodukte entstehen.

# 1 Einleitung und Fragestellung

Am 1. Januar 2016 trat eine Änderung der schweizerischen Gewässerschutzverordnung in Kraft, welche bestimmte ARA, basierend auf der Anzahl angeschlossener Einwohner und der Eigenschaften des aufnehmenden Gewässers, zur Elimination von Spurenstoffen verpflichtet (GSchV Anhang 3.1). Die betroffenen ARA müssen eine Stufe zur Elimination von Spurenstoffen implementieren und nachweisen, dass ein bestimmter Reinigungseffekt erreicht wird. Zur Überprüfung des Reinigungseffekts sind gemäss Verordnung des UVEK vom 3. November 2016 Konzentrationen von 12 Leitsubstanzen zu messen. Die Berechnung des Reinigungseffekts hat aufgrund von mindestens 6 Leitsubstanzen zu erfolgen. Der Mittelwert der prozentualen Eliminationen dieser Substanzen muss mindestens 80% betragen, damit die Anforderungen erfüllt sind. Am 1. April 2020 trat eine weitere Änderung der schweizerischen Gewässerschutzverordnung in Kraft, in welcher neue Anforderungen an die Wasserqualität in oberirdischen Gewässern definiert wurden (GSchV, Anhang 2, Ziffer 11, Nr. 3 & 4). Seither dürfen Konzentrationen von ausgewählten Spurenstoffen bestimmte Grenzwerte in Oberflächengewässern nicht mehr überschreiten. Zu den ausgewählten Spurenstoffen gehören die Arzneimittel Diclofenac, Clarithromycin und Azithromycin sowie dreizehn Pestizide. Diclofenac ist in ARA besonders problematisch, da es häufig im Rohabwasser vorkommt, schlecht in ARA eliminiert wird und sich bereits bei tiefen Konzentrationen negativ auf das aufnehmende Gewässer auswirken kann. Diclofenac muss in ARA so weit eliminiert werden, dass der Grenzwert von 0.05 µg/l im aufnehmenden Gewässer nicht überschritten wird. Grenzwertüberschreitungen werden insbesondere durch ARA, welche viel Abwasser in kleine Fließgewässer einleiten bzw. zu einem hohen Abwasseranteil im Fließgewässer führen, verursacht. Je nach Abwasseranteil im Gewässer muss Diclofenac teilweise um mehr als 95% eliminiert werden, damit der Grenzwert von 0.05 µg/l eingehalten wird (Abbildung 1). ARA, welche viel Abwasser in kleine Fließgewässer einleiten, können trotz der Implementierung einer Stufe zur Elimination von Spurenstoffen, eine Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer verursachen. Betroffen sind vor allem ARA, welche ein Aktivkohleverfahren implementiert haben, da Diclofenac mit Aktivkohle verhältnismässig schlecht eliminiert wird (Böhler et al., 2020). Die VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen hat 54 Schweizer ARA identifiziert, welche trotz der Implementierung einer Aktivkohlestufe, eine Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer verursachen können (Tabelle 1). Bei der Identifizierung der ARA wurde unter anderem berücksichtigt, dass teilweise mehrere ARA in das gleiche Fließgewässer einleiten und sich die Diclofenac Konzentration kumulieren kann.

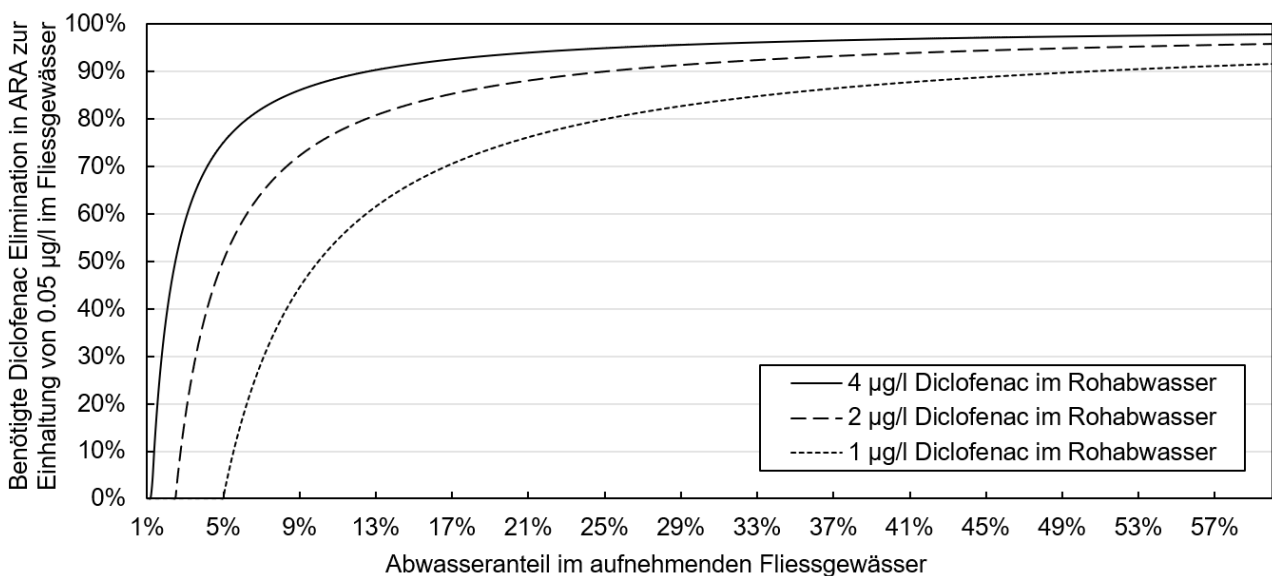


Abbildung 1: Benötigte Diclofenac Elimination in ARA, welche in ein Fließgewässer einleiten.

Tabelle 1: Schweizer ARA (anonymisiert), welche gemäss Stoffflussmodell der VSA Plattform Verfahrenstechnik trotz einer EMV-Stufe eine Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer verursachen können (Projektstand, Verfahren und E<sub>ang</sub> von BAFU zur Verfügung gestellt, Stand Januar 2024).

ARA (anonymisiert)	Anzahl E <sub>ang</sub> 2022	Abwasseranteil Q <sub>347, lokal</sub>	Projektstand EMV	Verfahrenswahl EMV
ARA 1	140403	53%	Anhörung	GAK-Filter
ARA 2	61907	3%	Zusicherung	GAK-Filter
ARA 3	9693	83%	Zusicherung	GAK-Filter
ARA 4	27242	100%	Anhörung	GAK-Filter
ARA 5	22971	100%	Anhörung	GAK-Filter
ARA 6	9211	20%	Anhörung	GAK-Filter
ARA 7	12042	100%	Zusicherung	GAK-Filter
ARA 8	21916	92%	In Betrieb	Dynasand-GAK
ARA 9	18731	100%	Zusicherung	Mikro-GAK
ARA 10	41877	4%	Zusicherung	Mikro-GAK
ARA 11	36482	20%	Anhörung	Mikro-GAK
ARA 12	9828	20%	In Betrieb	Mikro-GAK
ARA 13	10048	32%	Anhörung	Mikro-GAK
ARA 14	36728	7%	In Betrieb	Mikro-GAK
ARA 15	15578	19%	Anhörung	PAK in Biologie
ARA 16	31266	72%	In Betrieb	PAK in Biologie
ARA 17	28678	100%	Anhörung	PAK in Biologie
ARA 18	12956	100%	In Betrieb	PAK vor Filter
ARA 19	12895	100%	In Betrieb	PAK vor Filter
ARA 20	145042	25%	In Betrieb	PAK vor Filter
ARA 21	21022	26%	In Betrieb	PAK vor Filter
ARA 22	16752	21%	Anhörung	PAK vor Filter
ARA 23	29314	100%	Anhörung	PAK vor Filter
ARA 24	124010	60%	Anhörung	PAK vor Filter
ARA 25	26000	14%	Anhörung	PAK vor Filter
ARA 26	35134	unbekannt	In Betrieb	PAK vor Filter
ARA 27	30482	53%	In Betrieb	Ulmer
ARA 28	9816	62%	Zusicherung	Ulmer
ARA 29	16155	55%	In Betrieb	Ulmer
ARA 30	4015	35%	-	unbekannt
ARA 31	8249	90%	-	unbekannt
ARA 32	10404	41%	-	unbekannt
ARA 33	7471	32%	-	unbekannt
ARA 34	18921	48%	-	unbekannt
ARA 35	41303	36%	-	unbekannt
ARA 36	4479	52%	-	unbekannt
ARA 37	7512	100%	-	unbekannt
ARA 38	12523	60%	-	unbekannt
ARA 39	9887	53%	-	unbekannt
ARA 40	31261	18%	-	unbekannt
ARA 41	13988	32%	-	unbekannt
ARA 42	15256	12%	-	unbekannt
ARA 43	24641	4%	-	unbekannt
ARA 44	38254	60%	-	unbekannt
ARA 45	15068	100%	-	unbekannt
ARA 46	38005	10%	-	unbekannt
ARA 47	13396	54%	-	unbekannt
ARA 48	21619	24%	-	unbekannt
ARA 49	12498	63%	-	unbekannt
ARA 50	29605	57%	-	unbekannt
ARA 51	40000	71%	-	unbekannt
ARA 52	3751	16%	-	unbekannt
ARA 53	30000	8%	-	unbekannt
ARA 54	39564	18%	-	unbekannt

Bei den 54 ARA handelt es sich um 29 ARA, welche ein Aktivkohleverfahren implementiert haben oder implementieren werden und um 25 ARA, bei welchen noch keine Verfahrenswahl getroffen wurde. Unter den 54 ARA befinden sich keine ARA, welche eine Ozonung implementiert haben oder bei welchen klar ist, dass sie eine Ozonung implementieren werden, da Diclofenac mit Ozon in der Regel zu >95% eliminiert wird (Abegglen et al., 2009; Fleiner et al., 2015). Einige der 54 identifizierten ARA, werden mit grösster Wahrscheinlichkeit zusätzliche Massnahmen treffen müssen, um den Diclofenac-Grenzwert im aufnehmenden Gewässer einzuhalten. Das BAFU die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) damit beauftragt zu prüfen:

- a) Welche Diclofenac-Elimination in ARA, welche über eine Stufe zur Elimination von Spurenstoffen verfügen, erreicht wird (unter anderem wenn eine Elimination der Leitsubstanzen, gemäss Verordnung des UVEK, angestrebt wird).
- b) Welche Massnahmen in ARA, welche über eine Aktivkohlestufe zur Elimination von Spurenstoffen verfügen, getroffen werden können, um die Diclofenac Elimination zu erhöhen.
- c) Welche Kosten in den 54 ARA anfallen würden, wenn die unter b) identifizierte Massnahmen, umgesetzt werden.
- d) Ob eine UV-Bestrahlung des gereinigten Abwassers, als eine alternative Massnahme zur Erhöhung der Diclofenac Elimination, in Frage kommt.

Diese Fragestellungen wurden im Rahmen von dieser Studie so weit wie möglich beantwortet und werden in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

## 2 Biologische Diclofenac Elimination

Die biologische Diclofenac Elimination in ARA liegt in der Regel im Bereich von 1-50% (Abbildung 2). In Ausnahmefällen werden auch höhere Eliminationsraten beobachtet. Auf der ARA Bad Ragaz, welche über ein hybrides Wirbelbett verfügt, wird eine biologische Diclofenac Elimination von mehr als 80% beobachtet (Jewell et al., 2016). Die zugrundeliegenden mikrobiologischen Ursachen für den höheren Abbau sind jedoch eine offene Frage (Jewell et al., 2016).

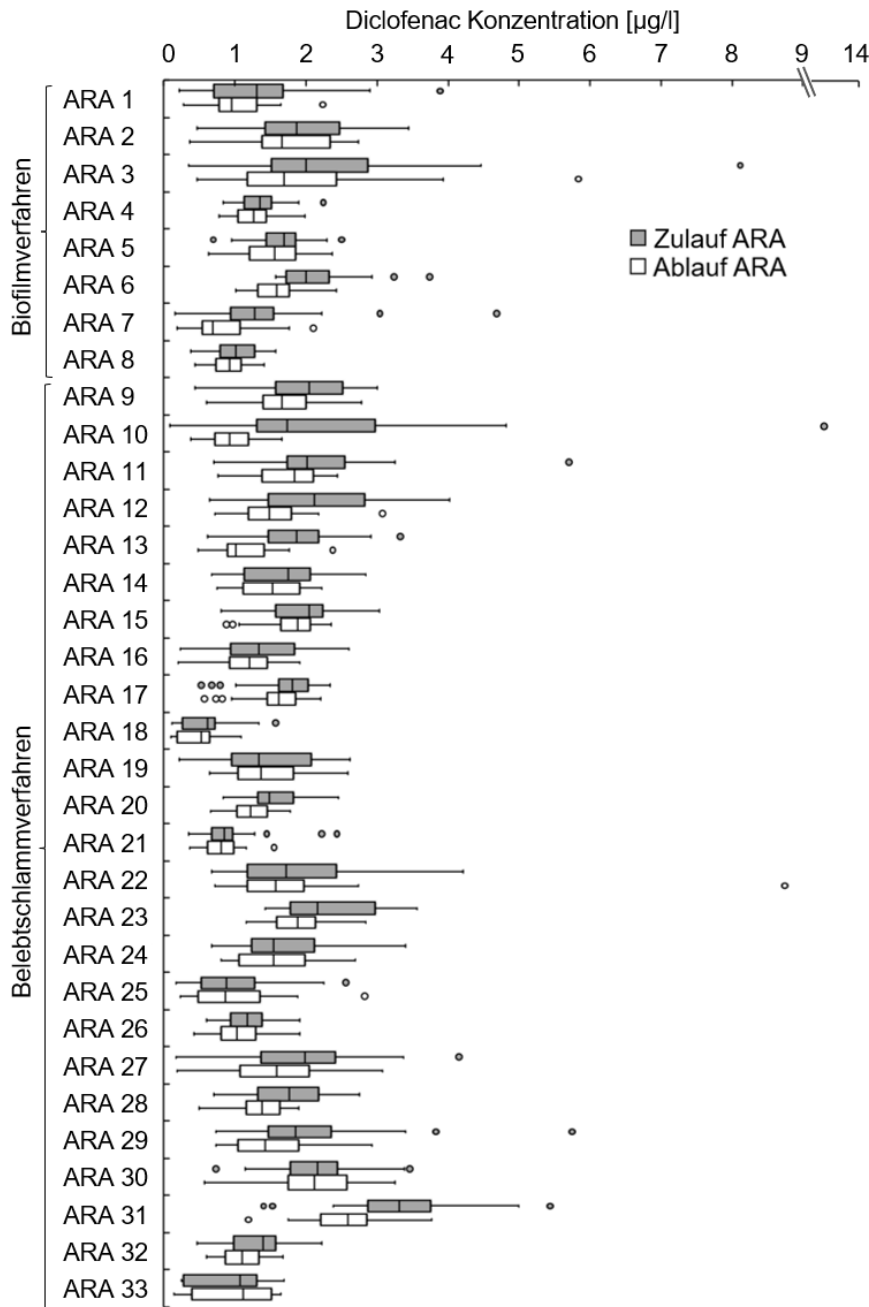


Abbildung 2: Diclofenac Konzentrationen Zulauf und Ablauf von 33 Schweizer ARA ohne Stufe zur Elimination von Spurenstoffen (Daten von Messkampagne des Kantons Waadt, Zeitraum 2014-2022).



### 3 Diclofenac Elimination in ARA mit Ozonung

Diclofenac wird bei einer Ozondosis von 0.4 - 0.7 g<sub>O3</sub>/g<sub>DOC</sub>, welche zur Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK eingesetzt wird (Abegglen, 2020; Fleiner et al., 2015), zu 95-99% eliminiert (Abbildung 3). ARA, welche über eine Ozonung verfügen, dürften in der Regel zu keiner Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer führen.

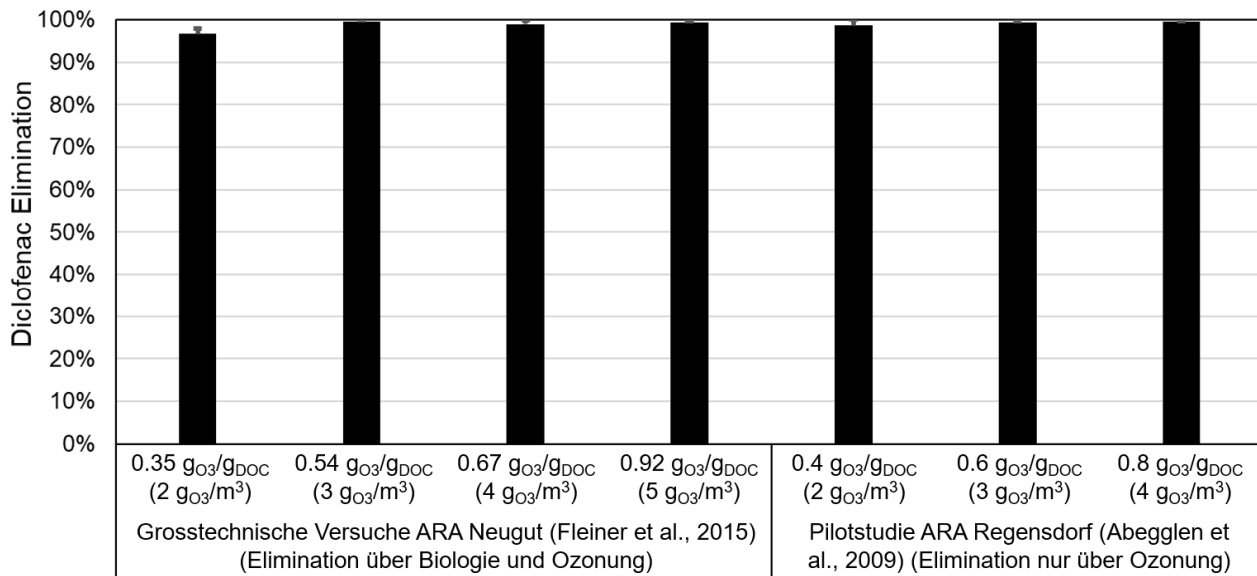


Abbildung 3: Diclofenac Elimination in ARA mit Ozonung.

### 4 Diclofenac Elimination in ARA mit PAK-Verfahren

#### 4.1 PAK im Ulmerverfahren (mit PAK-Rückführung in Biologie)

Die Diclofenac Elimination in ARA mit PAK im Ulmerverfahren hängt unter anderem von der PAK-Dosis, den PAK-Eigenschaften und der Zusammensetzung des Abwassers ab. Der grosstechnische Betrieb des Ulmerverfahrens auf der ARA Herisau und der ARA Thunersee mit PAK-Rückführung in die Biologie zeigt, dass eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK mit einer PAK-Dosis von ungefähr 10 mgPAK/l erreicht werden kann (Bangerter, 2019; Butz, 2018). Bei dieser PAK-Dosis wird eine Diclofenac Elimination von ungefähr 80-90% erreicht (Bangerter, 2019; Zwickenpflug et al., 2010). Eine Pilotstudie an der Eawag hat gezeigt, dass mit 15 mgPAK/l eine Elimination von 98% (± 1%) erreicht werden kann (Zwickenpflug et al., 2010).

#### 4.2 PAK vor Sandfilter (mit PAK-Rückführung in Biologie)

Die Diclofenac Elimination in ARA mit PAK vor Sandfilter hängt unter anderem von der PAK-Dosis, den PAK-Eigenschaften und der Zusammensetzung des Abwassers ab. Grosstechnische Versuche auf der ARA Kloten/Opfikon, bei welchen PAK vor den Sandfilter dosiert und in die Biologie rückgeführt wurde, zeigen, dass eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK mit einer PAK-Dosis von ungefähr 10-15 mgPAK/l erreicht werden kann (Böhler et al., 2011). Bei einer PAK-Dosis von 15 mgPAK/l wurde auf der ARA Kloten/Opfikon eine Diclofenac Elimination von ungefähr 97% gemessen (Böhler et al., 2011).

### 4.3 PAK-Direktdosierung in Biologie

Die Diclofenac Elimination in ARA mit PAK-Direktdosierung in die Biologie hängt unter anderem von der PAK-Dosis, den PAK-Eigenschaften und der Zusammensetzung des Abwassers ab. Pilotstudien, in welchen die PAK-Direktdosierung untersucht wurde, zeigen, dass eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK in kommunalen ARA ab einer PAK-Dosis von ungefähr 15 mgPAK/l erreicht werden kann (Bhend, 2021; Rössler & Metzger, 2015). Bei dieser PAK-Dosis ist mit einer Diclofenac Elimination von 65-85% zu rechnen (Abbildung 4). Eine Pilotstudie an der Eawag hat gezeigt, dass Eliminationsraten im Bereich von 90% erreicht werden können, wenn viel PAK dosiert wird (Abbildung 4).

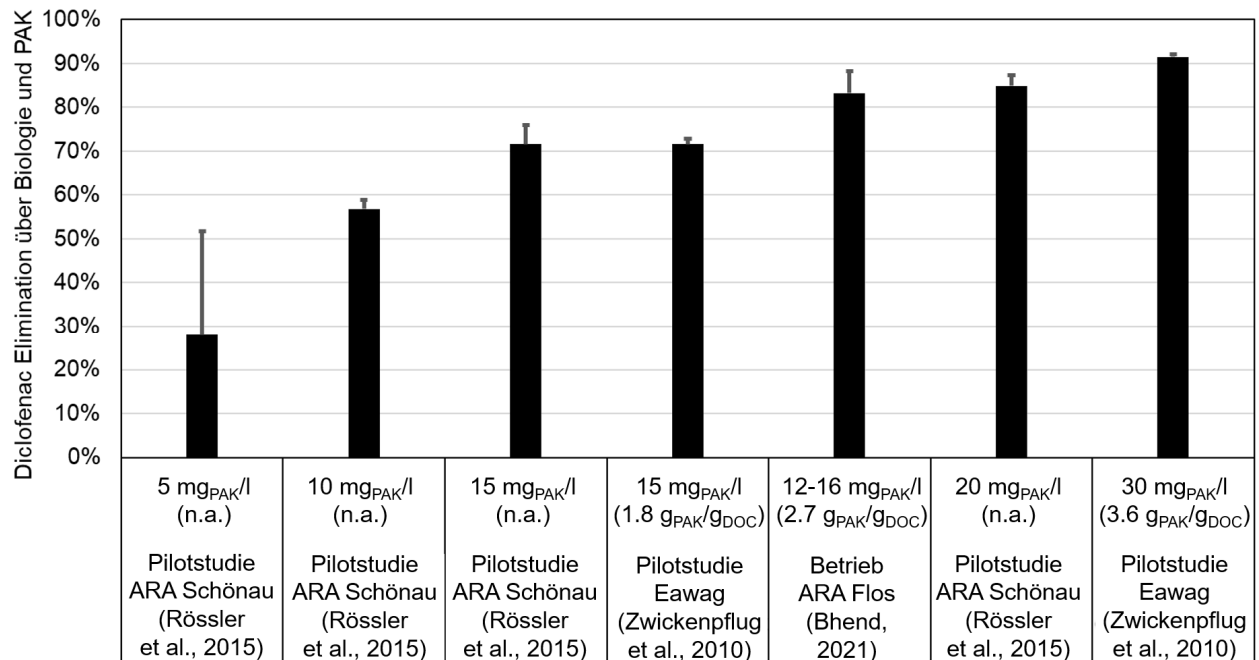


Abbildung 4: Diclofenac Elimination mit PAK-Direktdosierung in die Biologie.

### 4.4 SPAK in Kontaktreaktor vor Membranen (mit SPAK-Rückführung in Biologie)

Die Dosierung von superfeiner PAK (SPAK) in einen Kontaktreaktor vor Membranen mit SPAK-Rückführung in die Biologie wurde bis heute wenig untersucht und scheint auch noch nicht grosstechnisch realisiert worden zu sein. Auf der ARA Châteauneuf in Sitten wurden zwar Pilotversuche mit SPAK durchgeführt, jedoch wurden keine Daten zu Diclofenac publiziert (Bonvin et al., 2021). Des Weiteren wurde SPAK in diesen Pilotversuchen nicht in die Biologie rückgeführt. Die Elimination von Diclofenac mit SPAK konnte im Rahmen von dieser Studie aufgrund von fehlenden Daten nicht weiter untersucht werden.

## 5 Diclofenac Elimination in ARA mit GAK-Verfahren

### 5.1 GAK-Filtration

Die Diclofenac Elimination in ARA mit GAK-Filtern hängt unter anderem von der GAK-Austauschfrequenz, den GAK-Eigenschaften und der Zusammensetzung des Abwassers ab. Die GAK-Filtration hat sich in der Schweiz im Parallelbetrieb etabliert, wobei mehrere GAK-Filterzellen parallel mit Abwasser beschickt werden (Kessler et al., 2022; VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2023). Im Parallelbetrieb muss das GAK-Material nach ungefähr 20'000-30'000 behandelten Leerbettvolumina (LBV) ausgetauscht werden, um eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK zu erreichen (Kessler et al., 2022; VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2023). Die Diclofenac Elimination über eine einzelne GAK-Filterzelle liegt nach 20'000 behandelten Leerbettvolumina bei ungefähr 50% (Abbildung 5). Würden z.B. fünf GAK-Filterzellen parallel betrieben und das GAK-Material nach 20'000 Leerbettvolumina ausgetauscht werden, wäre über alle Filterzellen eine Diclofenac Elimination von 70-80% zu erwarten (LBV in den fünf GAK-Filterzellen kurz vor GAK-Austausch theoretisch bei 4'000 LBV, 8'000 LBV, 12'000 LBV, 16'000 LBV, 20'000 LBV). Analog wäre bei einem Austausch nach 5'000-10'000 LBV mit einer Diclofenac Elimination von 90-100% zu rechnen. Zu beachten ist, dass bei diesen Rechenbeispielen die Elimination über die Biologie nicht mitberücksichtigt wurde.

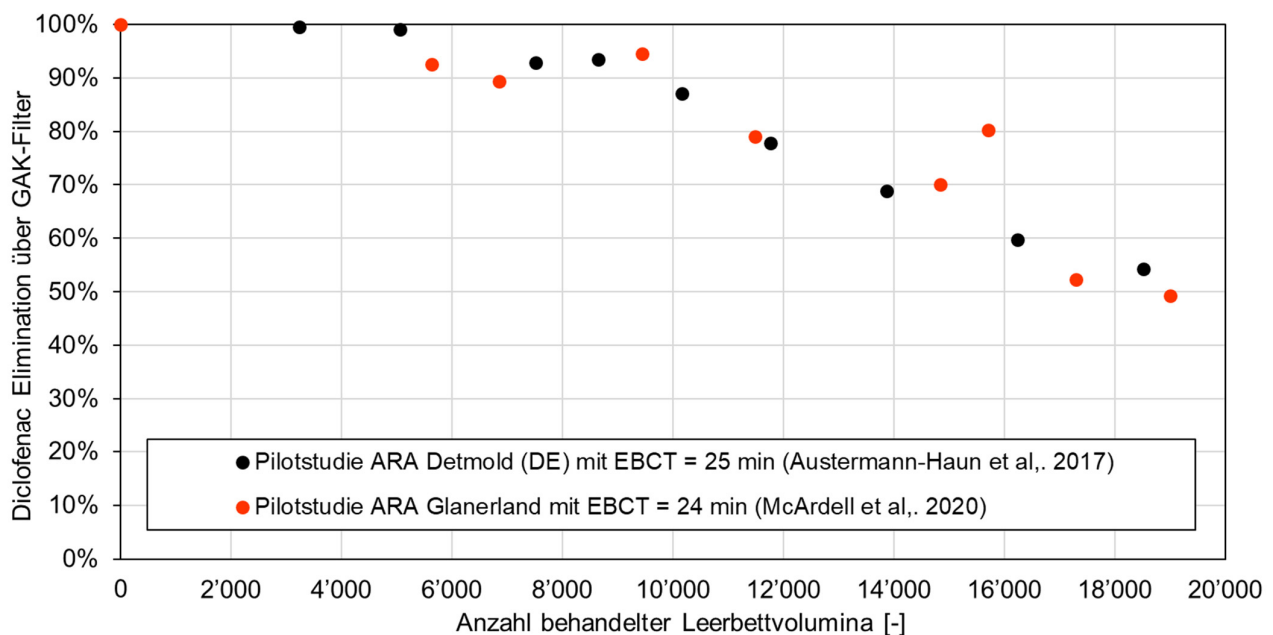


Abbildung 5: Diclofenac Elimination über einer GAK-Filterzelle in Abhängigkeit der Anzahl behandelte LBV.

### 5.2 GAK-Schwebebett

Die Diclofenac Elimination in ARA mit GAK-Schwebebetten hängt unter anderem von der GAK-Dosis, den GAK-Eigenschaften und der Zusammensetzung des Abwassers ab. Pilotversuche auf der ARA Penthaz mit einem GAK-Schwebebett sowie die darauffolgende grosstechnische Realisierung zeigen, dass die Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK ab einer GAK-Dosis von 15 mgGAK/l eliminiert werden können (Grelot et al., 2021; Horisberger et al., 2019). Welche Diclofenac Elimination auf der ARA Penthaz erreicht wurde, ist unklar, da keine Daten zu Diclofenac publiziert wurden. In einer Pilotstudie auf der ARA Seine wurde Diclofenac über ein GAK-Schwebebett (exkl. Elimination in biologischer

Behandlung) im Mittel zu  $63 \pm 11\%$  (10 mgGAK/l) und  $82 \pm 10\%$  (20 mgGAK/l) eliminiert (Mailler et al., 2016). Welche Diclofenac Eliminationsraten bei höheren GAK-Dosen erreicht werden, ist unklar.

## 6 Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination

In den vorangehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass Diclofenac in ARA, welche ein PAK oder GAK-Verfahren implementiert haben, zu 60-90% eliminiert wird, wenn der Betrieb darauf ausgerichtet ist, eine Elimination der Leitsubstanzen gemäss Verordnung des UVEK zu erreichen. In ARA, welche viel Abwasser in verhältnismässig kleine Fliessgewässer einleiten, reicht diese Elimination teilweise nicht aus, um den Diclofenac Grenzwert im Fliessgewässer einzuhalten. In diesen ARA werden Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination notwendig sein. Je nach bestehendem PAK- oder GAK-Verfahren und dem Abwasseranteil im aufnehmenden Gewässer kann eine Erhöhung der PAK- oder GAK-Dosierung ausreichen, um den Diclofenac Grenzwert einzuhalten. Sollte eine Erhöhung der PAK- oder GAK-Dosierung nicht ausreichen oder sich nicht eignen (z.B. aus Wirtschaftlichkeits- oder Nachhaltigkeitsgründen oder weil keine Kapazität in der Biologie vorhanden ist) könnte eine zusätzliche Reinigungsstufe notwendig sein (z.B. zusätzliche Ozonung). Unter Berücksichtigung von verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Aspekten, werden mögliche Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in ARA mit bestehendem Aktivkohleverfahren vorgeschlagen (Tabelle 2). Für ARA mit Ulmerv Verfahren wird nur eine Erhöhung der Dosierung vorgeschlagen, da Diclofenac bereits bei einer geringen Erhöhung der PAK-Dosierung zu mehr als 95% eliminiert werden dürfte (siehe Kapitel 4.1).

Tabelle 2: Mögliche Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in ARA.

Bestehendes Aktivkohleverfahren	Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination			
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
PAK Ulmer (10 mgPAK/l)	Erhöhung PAK-Dosierung um 5-10 mgPAK/l			
PAK in Biologie (15 mgPAK/l)	Erhöhung PAK-Dosierung um 10-15 mgPAK/l	Ozonung zusätzlich		
PAK vor Sandfilter (15 mgPAK/l)	Erhöhung PAK-Dosierung um 5-10 mgPAK/l	Ozonung zusätzlich		
GAK-Filter (20'000-30'000 LBV)	GAK-Austausch nach 5'000-10'000 LBV	Ozonung zusätzlich	Zweiter nachgeschalteter GAK-Filter (20'000 LBV)	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)
GAK-Schwebebett (15 mgGAK/l)	Erhöhung GAK-Dosierung um 10-15 mgGAK/l	Ozonung zusätzlich	Zweites nachgeschaltetes GAK-Schwebebett (15 mgGAK/l)	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)

## 7 Kosten zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in 54 ARA

Investitions- und Betriebskosten für die Umsetzung der im vorangehenden Kapitel definierten Massnahmen in den 54 identifizierten ARA wurden geschätzt.

### 7.1 Grundlagen Investitionskosten

Als Grundlage für die Investitionskostenschätzung dienten voraussichtlich abgeltungsberechtigte Kosten aus Schweizer ARA, welche vom BAFU zur Verfügung gestellt wurden (siehe Anhang) und eine Kostenstudie für Kleinanlagen der Hunziker Betatech AG (Joller et al., 2023). Basierend auf diesen Grundlagen wurden Investitionskosten für verschiedene Verfahren in Abhängigkeit der ARA-Grösse geschätzt (Tabelle 3). Für die effektive Kostenschätzung wurden jeweils mittlere Investitionskosten verwendet (z.B. 100 CHF/E<sub>ang</sub> bei Investitionskostenbereich von 50 - 150 CHF/E<sub>ang</sub> in Tabelle 3).

Tabelle 3: Erwartete Investitionskosten in Schweizer ARA basierend auf voraussichtlich abgeltungsberechtigten Kosten des BAFU und einer Kostenstudie für Kleinanlagen der Hunziker Betatech AG (Joller et al., 2023). Die Investitionskosten wurden anhand vom Schweizer Baupreisindex auf das Jahr 2023 normiert.

Massnahme	ARA-Grösse [E <sub>ang</sub> ]	Erwartete Investitionskosten inkl. MwSt. [CHF/E <sub>ang</sub> ]
Ozonung zusätzlich (2 - 5 gO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> , O <sub>2</sub> -Anlieferung)	3'000 – 9'000	400 - 1'500
	9'000 – 20'000	200 - 600
	20'000 – 50'000	100 - 200
	> 50'000	50 - 150
Ozonung zusätzliche + Sandfilter (2 - 5 gO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> , O <sub>2</sub> -Anlieferung)	3'000 – 9'000	600 - 2'500
	9'000 – 20'000	200 - 800
	20'000 – 50'000	200 - 600
	> 50'000	150 - 400
PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	3'000 – 9'000	200 - 600
	9'000 – 20'000	50 - 200
	20'000 – 50'000	25 - 100
	> 50'000	25 - 100
Zweites GAK-Schwebebett (15 mgGAK/l)	3'000 – 9'000	600 - 1'500
	9'000 – 20'000	400 - 600
	20'000 – 50'000	200 - 500
	> 50'000	100 - 400
Zweiter GAK-Filter (20'000 LBV)	3'000 – 9'000	600 - 1'500
	9'000 – 20'000	300 - 600
	20'000 – 50'000	300 - 600
	> 50'000	200 - 400

### 7.2 Grundlagen Betriebskosten

Als Grundlage für die Betriebskostenschätzung dienten theoretische Berechnung und Literaturwerte. Berücksichtigt wurden Kosten für Betriebsmittel, Strom und Schlamm Entsorgung (Tabelle 4).

Tabelle 4: Betriebskostenberechnung.

Kostenstelle		Berechnung
Betriebsmittel	PAK	<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = Dosis * Q<sub>spez</sub> * K<sub>spez</sub></p> <p>Dosis = Aktivkohledosis [t/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>]</p> <p>Q<sub>spez</sub> = Spez. behandelte Abwassermenge inkl. Regenereignisse [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a]</p> <p>K<sub>spez</sub> = Spez. Kosten Aktivkohle [CHF/t]</p>
	μGAK	<p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>K<sub>spez,PAK</sub> ≈ 2'600 CHF/t<sub>PAK</sub> (Angaben ARA Herisau und ARA Thunersee)</p> <p>K<sub>spez,GAK</sub> ≈ 2'500 CHF/t<sub>GAK</sub> (Angaben ARA Delemont)</p>
	GAK	<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = 1/LBV * ρSch * Q<sub>spez</sub> * K<sub>spez</sub></p> <p>LBV = Anzahl behandelte Leerbettvolumina [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub>]</p> <p>ρSch = Schüttdichte GAK [t<sub>GAK</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub>]</p> <p>Q<sub>spez</sub> = Spez. behandelte Abwassermenge inkl. Regenereignisse [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a]</p> <p>K<sub>spez</sub> = Spez. Kosten Aktivkohle [CHF/t]</p> <p>ρSch ≈ 0.380 – 0.450 t<sub>GAK</sub>/m<sup>3</sup><sub>GAK</sub> (Böhler et al., 2020; McArdell et al., 2020)</p> <p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>K<sub>spez,GAK</sub> ≈ 2'500 CHF/t<sub>GAK</sub> (Böhler et al., 2020; McArdell et al., 2020)</p>
	Flüssigsauerstoff (O <sub>2</sub> )	<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = O<sub>2,spez</sub> * O<sub>3,spez</sub> * Q<sub>spez</sub> * K<sub>O2</sub></p> <p>O<sub>2,spez</sub> = Spez. Sauerstoffverbrauch [gO<sub>2</sub>/gO<sub>3</sub>]</p> <p>O<sub>3,spez</sub> = Spez. Ozondosis [gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>]</p> <p>Q<sub>spez</sub> = Spez. behandelte Abwassermenge inkl. Regenereignisse [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a]</p> <p>K<sub>O2</sub> = Kosten Flüssigsauerstoff [CHF/gO<sub>2</sub>]</p> <p>O<sub>2,spez</sub> ≈ 10 – 15 gO<sub>2</sub>/gO<sub>3</sub> (Pinnekamp et al., 2015)</p> <p>O<sub>3,spez</sub> ≈ 2 – 5 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub> (Abegglen, 2020; Schachtler &amp; Hubaux, 2016)</p> <p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>K<sub>O2</sub> ≈ 0.0002 CHF/gO<sub>2</sub> (Joller et al., 2023)</p>
Strom	Hebewerk GAK-Verfahren, Sandfilter	<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = SV * h * Q<sub>spez</sub> * SK</p> <p>SV = Stromverbrauch Hebewerk [kWh/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>]</p> <p>h = Förderhöhe [m]</p> <p>Q<sub>spez</sub> = Spez. behandelte Abwassermenge inkl. Regenereignisse [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a]</p> <p>SK = Stromkosten [CHF/kWh]</p> <p>SV ≈ 0.005 kWh/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub> (VSA, 2008)</p> <p>h ≈ 5 m (Annahme basierend auf Filterbetthöhen)</p> <p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>SK ≈ 0.2 – 0.4 CHF/kWh (EICOM, 2024)</p>
	Ozonung (ohne O <sub>2</sub> -«Herstellung»)	<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = SV * Q<sub>spez</sub> * SK</p> <p>SV = Stromverbrauch Ozonung bei Dosis von 2-5 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> [kWh/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>] (Berücksichtigt werden: Ozonerzeugung, Restozonvernichtung, Ozonein- und -austrag, Pumpen, HLK)</p> <p>SV ≈ 0.05 – 0.10 kWh/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub> (Abegglen, 2020; Pinnekamp et al., 2015)</p> <p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>SK ≈ 0.2 – 0.4 CHF/kWh (EICOM, 2024)</p>
Schlammentsorgung aufgrund von PAK		<p>Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a] = Dosis * Q<sub>spez</sub> * K<sub>Schlamm</sub></p> <p>Dosis = PAK-Dosis [t<sub>PAK</sub>/m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>]</p> <p>K<sub>Schlamm</sub> = Entsorgungskosten Schlamm [CHF/t<sub>TS</sub>] bzw. [CHF/t<sub>PAK</sub>]</p> <p>Q<sub>spez</sub> = Spez. behandelte Abwassermenge inkl. Regenereignisse [m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a]</p> <p>Q<sub>spez</sub> ≈ 120 – 160 m<sup>3</sup><sub>Abw</sub>/E<sub>ang</sub>/a (Betriebsdaten ARA ZH inkl. Regen)</p> <p>K<sub>Schlamm</sub> ≈ 500 CHF/t<sub>TS</sub> = 500 CHF/t<sub>PAK</sub> (McArdell et al., 2020)</p>

Basierend auf den theoretischen Berechnungen und Literaturwerten, welche in Tabelle 4 aufgeführt sind, wurden zusätzliche Betriebskosten pro Massnahme abgeschätzt (Tabelle 5). Kosten für Wartung und Unterhalt wurden mit einem Prozentsatz der Investitionskosten berücksichtigt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Geschätzte zusätzliche Betriebskosten [CHF/E<sub>ang</sub>/a], welche bei der Umsetzung von Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination anfallen (Kostentand 2023).

Massnahme		Zusätzliche Betriebskosten inkl. MwSt. [CHF/E <sub>ang</sub> /a]			
		Betriebsmittel (PAK, GAK, O <sub>2</sub> )	Strom	Schlammmentsor- gung	Wartung und Unterhalt
Ozonung zusätzlich (2 - 5 gO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> , O <sub>2</sub> -Anlieferung)		0.6	2.1	-	1% der Investitions- kosten pro Jahr
Ozonung zusätzlich + Sandfilter (2 - 5 gO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> , O <sub>2</sub> -Anlieferung)		0.6	3.2	-	
PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)		5.5	-	1.1	
Zweites GAK-Schwebebett (15 mgGAK/l)		5.3	1.1	-	
Zweiter GAK-Filter (20'000 LBV)		7.5	1.1	-	
Erhöhung der PAK-Dosierung um	5 mgPAK/l	1.8	-	0.4	-
	10 mgPAK/l	3.6	-	0.7	-
	15 mgPAK/l	5.5	-	1.1	-
Erhöhung der GAK-Dosierung um	5 mgGAK/l	1.8	-	-	-
	10 mgGAK/l	3.5	-	-	-
	15 mgGAK/l	5.3	-	-	-
GAK-Austausch nach X LBV an- statt nach 20'000- 30'000 LBV	15'000 LBV	4	-	-	-
	10'000 LBV	9	-	-	-
	5'000 LBV	24	-	-	-

### 7.3 Kostenschätzung

Je nach ARA und je nach bestehendem Aktivkohleverfahren kommen unterschiedliche Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in Frage. Welche Massnahme sich auf welcher ARA am besten eignen, ist unklar, da lokale Faktoren wie Platzverfügbarkeit und Kapazität in der Biologie für PAK-Dosierung eine Rolle spielen. Um unterschiedliche Massnahmen abzudecken, wurden Kosten für drei Szenarien geschätzt (zur Vereinfachung wurde angenommen, dass die Implementierung einer Ozonung auf jeder ARA theoretisch möglich wäre):

- Szenario 1: Auf jeder ARA wird die wirtschaftlichste Massnahme in Bezug auf die gesamten Jahreskosten gewählt (es ergibt sich ein Fokus auf die Erhöhung der PAK- und GAK-Dosierung).
- Szenario 2: Auf jeder ARA wird die wirtschaftlichste Massnahme in Bezug auf die gesamten Jahreskosten gewählt, wobei auf ARA mit einem lokalen Abwasseranteil  $Q_{347} > 22\%$  eine zweite Stufe zur Elimination von Spurenstoffen implementiert wird (Ozonung, PAK-Anlage, zweite GAK-Stufe).
- Szenario 3: Auf allen ARA mit Aktivkohleverfahren werden zusätzliche Ozonungen implementiert.

Da in 25 der 54 ARA noch kein Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen gewählt wurde, wurde diesen ARA zufällig ein Verfahren zugeteilt (Ozonung, GAK-Filter, GAK-Schwebebett, PAK vor Filter oder PAK in Biologie) und eine Monte Carlo Simulation durchgeführt. In den Tabellen 7-9 ist zur Illustration für jedes Szenario jeweils ein Monte Carlo run dargestellt. Die mittleren Investitionskosten für die drei Szenarien wurden mit Hilfe der Monte Carlo Simulation auf 75 Mio. CHF, 161 Mio. CHF und 281 Mio. CHF inkl. MwSt. geschätzt (Tabelle 6). Pro angeschlossenen Einwohner ergeben sich für die drei Szenarien Investitionskosten inkl. MwSt. von 50 CHF/ $E_{ang}$ , 107 CHF/ $E_{ang}$  und 187 CHF/ $E_{ang}$ . Die mittleren Betriebskosten, welche zusätzlich anfallen würden, wurden unabhängig vom Szenario auf ungefähr 6-7 Mio. CHF/a inkl. MwSt. geschätzt (Tabelle 6). Gemäss abgeltungsberechtigten Kosten des BAFU werden ungefähr 1'400 Mio. CHF inkl. MwSt. für die Elimination von Spurenstoffen in Schweizer ARA investiert (Stand Januar 2024). Die geschätzten Investitionskosten für die Erhöhung der Diclofenac Elimination in 54 ARA entsprechen somit ungefähr 5-20% der bisherigen und geplanten Investitionen.

Tabelle 6: Kostenschätzung für die Umsetzung von Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in 54 Schweizer ARA (Kostentand 2023, 400 Monte Carlo runs pro Szenario).

Kosten in 54 ARA inkl. MwSt.		Monte Carlo Simulation (Mittelwert ± Standardabweichung)		
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitionskosten	[Mio. CHF]	75 ± 6	161 ± 8	281 ± 11
Kapitalkosten*	[Mio. CHF/a]	6 ± 0.7	13 ± 0.8	22 ± 0.8
Betriebskosten zusätzlich	[Mio. CHF/a]	7 ± 0.3	7 ± 0.3	6 ± 0.2
Jahreskosten total	[Mio. CHF/a]	13 ± 1	20 ± 1	28 ± 1

\* Investitionskosten wurden anhand der Annuitätenmethode in Kapitalkosten umgerechnet. Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass Investitionen zu 40% auf bauliche Massnahmen, zu 40% auf Ausrüstung und zu 20% auf EMSRL zurückzuführen sind und bauliche Massnahmen über 30 Jahre, Ausrüstung über 15 Jahre und EMSRL über 10 Jahre abgeschrieben werden. Es wurde ein Zinssatz von 3% angenommen. Zu beachten ist, dass diese Annahmen mit einer hohen Unsicherheit verbunden sind und eher konservativ gewählt wurden.



Tabelle 7: Ein beliebiger Monte Carlo run für Szenario 1.

ARA (anonymisiert)	Eang (2022)	Abwasseran- teil lokal Q347	Verfahren	Massnahme	Investitionskosten inkl. MwSt		Betriebskosten zusätzlich inkl. MwSt	Jahreskosten inkl. MwSt
					[Mio. CHF]	[Mio. CHF/a]		
ARA 1	140403	53%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	14.04	1.09	0.51	1.60
ARA 2	61907	3%	GAK-Filter	GAK-Austausch nach 15'000 LBV	0.00	0.00	0.25	0.25
ARA 3	9693	83%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.21	0.09	0.08	0.17
ARA 4	27242	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.70	0.13	0.19	0.33
ARA 5	22971	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.44	0.11	0.16	0.27
ARA 6	9211	20%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.15	0.09	0.07	0.16
ARA 7	12042	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.51	0.12	0.09	0.21
ARA 8	21916	92%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.37	0.11	0.16	0.26
ARA 9	18731	100%	GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	2.34	0.18	0.15	0.33
ARA 10	41877	4%	GAK-Schwebbett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.07	0.07
ARA 11	36482	20%	GAK-Schwebbett	GAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgGAK/l	0.00	0.00	0.19	0.19
ARA 12	9828	20%	GAK-Schwebbett	GAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgGAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 13	10048	32%	GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.26	0.10	0.08	0.18
ARA 14	36728	7%	GAK-Schwebbett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.06	0.06
ARA 15	15578	19%	PAK in Biologie	PAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgPAK/l	0.00	0.00	0.10	0.10
ARA 16	31266	72%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.69	0.36	0.13	0.49
ARA 17	28678	100%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich + Sandfilter	11.47	0.89	0.22	1.11
ARA 18	12956	100%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.06	0.06
ARA 19	12895	100%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.06	0.06
ARA 20	145042	25%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.63	0.63
ARA 21	21022	26%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.09	0.09
ARA 22	16752	21%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.07	0.07
ARA 23	29314	100%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.13	0.13
ARA 24	124010	60%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.54	0.54
ARA 25	26000	14%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.11	0.11
ARA 26	35134	unbekannt	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.15	0.15
ARA 27	30482	53%	PAK Ulmer	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.13	0.13
ARA 28	9816	62%	PAK Ulmer	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.04	0.04
ARA 29	16155	55%	PAK Ulmer	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.07	0.07
ARA 30	4015	35%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.02	0.02
ARA 31	8249	90%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.04	0.04
ARA 32	10404	41%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 33	7471	32%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	GAK-Austausch nach 5'000 LBV	0.00	0.00	0.18	0.18
ARA 34	18921	48%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.08	0.08
ARA 35	41303	36%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	6.20	0.48	0.17	0.65
ARA 36	4479	52%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.02	0.02
ARA 37	7512	100%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	7.14	0.55	0.09	0.64
ARA 38	12523	60%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 39	9887	53%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.24	0.10	0.08	0.17
ARA 40	31261	18%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	PAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgPAK/l	0.00	0.00	0.20	0.20
ARA 41	13988	32%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	5.60	0.43	0.09	0.53
ARA 42	15256	12%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	GAK-Austausch nach 10'000 LBV	0.00	0.00	0.14	0.14
ARA 43	24641	4%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	PAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgPAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 44	38254	60%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	2.39	0.18	0.27	0.46
ARA 45	15068	100%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.88	0.15	0.12	0.26
ARA 46	38005	10%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.16	0.16
ARA 47	13396	54%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	5.36	0.41	0.09	0.50
ARA 48	21619	24%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	3.24	0.25	0.09	0.34
ARA 49	12498	63%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebbett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.56	0.12	0.10	0.22
ARA 50	29605	57%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 51	40000	71%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	2.50	0.19	0.29	0.48
ARA 52	3751	16%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.02	0.02
ARA 53	30000	8%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebbett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 54	39564	18%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.17	0.17
<b>Total</b>	<b>1'505'849</b>	<b>-</b>			<b>79.3</b>	<b>6.1</b>	<b>7.2</b>	<b>13.4</b>

Tabelle 8: Ein beliebiger Monte Carlo run für Szenario 2.

ARA (anonymisiert)	Eang (2022)	Abwasseran- teil lokal Q347	Verfahren	Massnahme	Investitionskosten inkl. MwSt		Betriebskosten zusätzlich inkl. MwSt	Jahreskosten inkl. MwSt
					[Mio. CHF]	[Mio. CHF/a]		
ARA 1	140403	53%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	14.04	1.09	0.51	1.60
ARA 2	61907	3%	GAK-Filter	GAK-Austausch nach 15'000 LBV	0.00	0.00	0.25	0.25
ARA 3	9693	83%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.21	0.09	0.08	0.17
ARA 4	27242	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.70	0.13	0.19	0.33
ARA 5	22971	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.44	0.11	0.16	0.27
ARA 6	9211	20%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.15	0.09	0.07	0.16
ARA 7	12042	100%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.51	0.12	0.09	0.21
ARA 8	21916	92%	GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.37	0.11	0.16	0.26
ARA 9	18731	100%	GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	2.34	0.18	0.15	0.33
ARA 10	41877	4%	GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.07	0.07
ARA 11	36482	20%	GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgGAK/l	0.00	0.00	0.19	0.19
ARA 12	9828	20%	GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgGAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 13	10048	32%	GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.26	0.10	0.08	0.18
ARA 14	36728	7%	GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.06	0.06
ARA 15	15578	19%	PAK in Biologie	PAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgPAK/l	0.00	0.00	0.10	0.10
ARA 16	31266	72%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.69	0.36	0.13	0.49
ARA 17	28678	100%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich + Sandfilter	11.47	0.89	0.22	1.11
ARA 18	12956	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.18	0.40	0.09	0.49
ARA 19	12895	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.16	0.40	0.09	0.48
ARA 20	145042	25%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	14.50	1.12	0.53	1.65
ARA 21	21022	26%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.15	0.24	0.09	0.33
ARA 22	16752	21%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.07	0.07
ARA 23	29314	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	4.40	0.34	0.12	0.46
ARA 24	124010	60%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	12.40	0.96	0.45	1.41
ARA 25	26000	14%	PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.11	0.11
ARA 26	35134	unbekannt	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.27	0.41	0.15	0.55
ARA 27	30482	53%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	4.57	0.35	0.13	0.48
ARA 28	9816	62%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	3.93	0.30	0.07	0.37
ARA 29	16155	55%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	6.46	0.50	0.11	0.61
ARA 30	4015	35%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.81	0.30	0.05	0.34
ARA 31	8249	90%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	3.30	0.26	0.09	0.34
ARA 32	10404	41%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.30	0.10	0.08	0.18
ARA 33	7471	32%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	7.10	0.55	0.09	0.64
ARA 34	18921	48%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 35	41303	36%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 36	4479	52%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.26	0.33	0.05	0.38
ARA 37	7512	100%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	7.14	0.55	0.09	0.64
ARA 38	12523	60%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.57	0.12	0.10	0.22
ARA 39	9887	53%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.24	0.10	0.08	0.17
ARA 40	31261	18%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 15 mgGAK/l	0.00	0.00	0.16	0.16
ARA 41	13988	32%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	PAK-Anlage zusätzlich (15 mgPAK/l)	1.75	0.14	0.11	0.24
ARA 42	15256	12%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgPAK/l	0.00	0.00	0.03	0.03
ARA 43	24641	4%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	GAK-Austausch nach 15'000 LBV	0.00	0.00	0.10	0.10
ARA 44	38254	60%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.74	0.44	0.16	0.60
ARA 45	15068	100%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	6.03	0.47	0.10	0.57
ARA 46	38005	10%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgPAK/l	0.00	0.00	0.08	0.08
ARA 47	13396	54%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.36	0.41	0.09	0.50
ARA 48	21619	24%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	3.24	0.25	0.09	0.34
ARA 49	12498	63%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.00	0.39	0.08	0.47
ARA 50	29605	57%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 51	40000	71%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 52	3751	16%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 53	30000	8%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	GAK-Dosierung Erhöhung um 5 mgGAK/l	0.00	0.00	0.05	0.05
ARA 54	39564	18%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	PAK-Dosierung Erhöhung um 10 mgPAK/l	0.00	0.00	0.17	0.17
<b>Total</b>	<b>1'505'849</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>164.0</b>	<b>12.7</b>	<b>6.4</b>	<b>19.1</b>

Tabelle 9: Ein beliebiger Monte Carlo run für Szenario 3.

ARA (anonymisiert)	Eang (2022)	Abwasseran- teil lokal Q347	Verfahren	Massnahme	Investitionskosten inkl. MwSt		Betriebskosten zusätzlich inkl. MwSt	Jahreskosten inkl. MwSt
					[Mio. CHF]	[Mio. CHF/a]		
ARA 1	140403	53%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	14.04	1.09	0.51	1.60
ARA 2	61907	3%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	6.19	0.48	0.23	0.71
ARA 3	9693	83%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	3.88	0.30	0.06	0.36
ARA 4	27242	100%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	4.09	0.32	0.11	0.43
ARA 5	22971	100%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	3.45	0.27	0.10	0.36
ARA 6	9211	20%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	3.68	0.29	0.06	0.35
ARA 7	12042	100%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	4.82	0.37	0.08	0.45
ARA 8	21916	92%	GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	3.29	0.25	0.09	0.35
ARA 9	18731	100%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	7.49	0.58	0.12	0.70
ARA 10	41877	4%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	6.28	0.49	0.17	0.66
ARA 11	36482	20%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	5.47	0.42	0.15	0.58
ARA 12	9828	20%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	3.93	0.30	0.07	0.37
ARA 13	10048	32%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	4.02	0.31	0.07	0.38
ARA 14	36728	7%	GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	5.51	0.43	0.15	0.58
ARA 15	15578	19%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich + Sandfilter	7.79	0.60	0.14	0.74
ARA 16	31266	72%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.69	0.36	0.13	0.49
ARA 17	28678	100%	PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich + Sandfilter	11.47	0.89	0.22	1.11
ARA 18	12956	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.18	0.40	0.09	0.49
ARA 19	12895	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.16	0.40	0.09	0.48
ARA 20	145042	25%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	14.50	1.12	0.53	1.65
ARA 21	21022	26%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.15	0.24	0.09	0.33
ARA 22	16752	21%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	6.70	0.52	0.11	0.63
ARA 23	29314	100%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	4.40	0.34	0.12	0.46
ARA 24	124010	60%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	12.40	0.96	0.45	1.41
ARA 25	26000	14%	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.90	0.30	0.11	0.41
ARA 26	35134	unbekannt	PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.27	0.41	0.15	0.55
ARA 27	30482	53%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	4.57	0.35	0.13	0.48
ARA 28	9816	62%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	3.93	0.30	0.07	0.37
ARA 29	16155	55%	PAK Ulmer	Ozonung zusätzlich	6.46	0.50	0.11	0.61
ARA 30	4015	35%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.81	0.30	0.05	0.34
ARA 31	8249	90%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	7.84	0.61	0.10	0.71
ARA 32	10404	41%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	4.16	0.32	0.07	0.39
ARA 33	7471	32%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	7.10	0.55	0.09	0.64
ARA 34	18921	48%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	7.57	0.59	0.13	0.71
ARA 35	41303	36%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 36	4479	52%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	4.26	0.33	0.05	0.38
ARA 37	7512	100%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	7.14	0.55	0.09	0.64
ARA 38	12523	60%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.01	0.39	0.08	0.47
ARA 39	9887	53%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 40	31261	18%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	4.69	0.36	0.13	0.49
ARA 41	13988	32%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	5.60	0.43	0.09	0.53
ARA 42	15256	12%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	6.10	0.47	0.10	0.57
ARA 43	24641	4%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	3.70	0.29	0.10	0.39
ARA 44	38254	60%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.74	0.44	0.16	0.60
ARA 45	15068	100%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	6.03	0.47	0.10	0.57
ARA 46	38005	10%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	5.70	0.44	0.16	0.60
ARA 47	13396	54%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	Ozonung zusätzlich	5.36	0.41	0.09	0.50
ARA 48	21619	24%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	3.24	0.25	0.09	0.34
ARA 49	12498	63%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	Ozonung zusätzlich	5.00	0.39	0.08	0.47
ARA 50	29605	57%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.44	0.34	0.12	0.47
ARA 51	40000	71%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 52	3751	16%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 53	30000	8%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	Ozonung zusätzlich	4.50	0.35	0.12	0.47
ARA 54	39564	18%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	Ozonung zusätzlich	5.93	0.46	0.16	0.62
<b>Total</b>	<b>1'505'849</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>288.6</b>	<b>22.3</b>	<b>6.7</b>	<b>29.0</b>

## 8 UV-Bestrahlung als alternative Massnahme

### 8.1 Diclofenac Abbau

Bei der UV-Bestrahlung von gereinigtem Abwasser wird Diclofenac photolytisch abgebaut (Miklos et al., 2018; Salgado et al., 2013). Miklos et al. (2018) haben gezeigt, dass der Abbau einer Kinetik pseudo erster Ordnung folgt, gemäss:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -k_{UV}F' \quad k_{UV} = \text{Reaktionsrate} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{mJ}}\right] \quad F' = \text{Fluence oder "UVDosis"} \left[\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}\right]$$

Die beobachtete Reaktionsrate  $k_{UV}$  liegt für Diclofenac bei ungefähr  $67 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{mJ}$  (Miklos et al., 2018). Die UV-Dosis ergibt sich aus der Bestrahlungsintensität und der Bestrahlungsdauer. Bei der herkömmlichen UV-Abwasserdesinfektion wird eine UV-Dosis von ungefähr 20 - 60  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  eingesetzt (Tchobanoglous et al., 2014). Bei dieser UV-Dosis wäre ein Diclofenac Abbau von ungefähr 10-35% zu erwarten. Für einen höheren Abbau wäre eine höhere UV-Dosis notwendig (z.B. 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  für Abbau von >70%).

### 8.2 Toxische Abbauprodukte

Die UV-Bestrahlung von Diclofenac haltigem Wasser kann zur Bildung von toxischen Abbauprodukten führen. Diniz et al., (2015) haben gezeigt, dass die Toxizität von Trinkwasser, welchem Diclofenac zugegeben wurde, zunehmen kann, wenn dieses mit UV-Licht bestrahlt wird. Die UV-Dosis könnte eine Rolle spielen, da bestimmte Abbauprodukte von Diclofenac bei anhaltender UV-Bestrahlung weiter abgebaut werden (Salgado et al., 2013). Würde die UV-Bestrahlung zur Diclofenac Elimination weiterverfolgt werden, müsste geprüft werden, ob und bei welchen Bedingungen sich toxische Abbauprodukte bilden können.

### 8.3 Kostenschätzung und Fazit

Um zu prüfen, ob die UV-Bestrahlung als alternative Massnahme zur Erhöhung der Diclofenac Elimination in Frage kommt, wurde eine grobe Kostenschätzung für den Einsatz von inline UV-Anlagen in den 54 identifizierten ARA durchgeführt. Inline UV-Anlagen werden in bestehende Rohrleitung integriert, unter Druck betrieben und könnten z.B. vor dem Sandfilter, dem GAK-Filter oder dem GAK-Schwebebett installiert werden, insofern ein Pumpwerk davor besteht. Die Heusser AG hat im Rahmen von dieser Studie inline UV-Anlagen vom Typ Wedeco LBX 1500e zur Elimination von Diclofenac empfohlen (UV-Dosis 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , max. Durchfluss 440  $\text{m}^3/\text{h}$ ). Eine UV-Anlage Wedeco LBX 1500e kostet gemäss Angaben der Heusser AG ungefähr 250'000 CHF exkl. MwSt. (beinhaltet Transport, Anpassung der Rohrleitungen, Montage, Inbetriebnahme und EMSRL). Der Stromverbrauch liegt bei ungefähr 0.05  $\text{kWh}/\text{m}^3$  und ist somit ähnlich wie bei der Ozonung. Die Kostenschätzung wurde analog zum vorangehenden Kapitel mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation durchgeführt (Tabelle 10). Investitionskosten für alle 54 ARA wurden im Mittel auf  $50 \pm 2$  Mio. CHF inkl. MwSt. geschätzt. Die Jahreskosten wurden auf  $7.4 \pm 0.2$  Mio. CHF/a inkl. MwSt. geschätzt. Die Kosten fallen im Vergleich zur Kostenschätzung im vorangehenden Kapitel etwas tiefer aus. Die UV-Bestrahlung von gereinigtem Abwasser könnte somit in ARA, in welchen eine Installation von inline UV-Anlagen ohne massgebliche bauliche Anpassungen möglich ist, eine kostengünstige Alternative zur Elimination von Diclofenac darstellen. Nachteilig gegenüber einer zusätzlichen Ozonung oder einem zusätzlichen Aktivkohleverfahren ist insbesondere die geringere Breitbandwirkung (es werden nur Spurenstoffen eliminiert die photoreaktiv sind).

Tabelle 10: Ein beliebiger Monte Carlo run für Szenario UV.

ARA (anonymisiert)	Eang (2022)	Abwasseranteil lokal Q347	Verfahren	Massnahme	Investitionskosten inkl. MwSt		Betriebskosten zusätzlich inkl. MwSt	Jahreskosten inkl. MwSt
					[Mio. CHF]	[Mio. CHF/a]		
ARA 1	140403	53%	GAK-Filter	16 x UV-Anlage LBX 1500e	4.31	0.33	0.34	0.67
ARA 2	61907	3%	GAK-Filter	8 x UV-Anlage LBX 1500e	2.15	0.17	0.15	0.32
ARA 3	9693	83%	GAK-Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 4	27242	100%	GAK-Filter	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.07	0.15
ARA 5	22971	100%	GAK-Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.06	0.12
ARA 6	9211	20%	GAK-Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.02	0.07
ARA 7	12042	100%	GAK-Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 8	21916	92%	GAK-Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.05	0.12
ARA 9	18731	100%	GAK-Schwebebett	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.05	0.11
ARA 10	41877	4%	GAK-Schwebebett	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.10	0.21
ARA 11	36482	20%	GAK-Schwebebett	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.09	0.19
ARA 12	9828	20%	GAK-Schwebebett	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 13	10048	32%	GAK-Schwebebett	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 14	36728	7%	GAK-Schwebebett	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.09	0.19
ARA 15	15578	19%	PAK in Biologie	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.04	0.08
ARA 16	31266	72%	PAK in Biologie	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.08	0.16
ARA 17	28678	100%	PAK in Biologie	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.07	0.15
ARA 18	12956	100%	PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 19	12895	100%	PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 20	145042	25%	PAK vor Filter	17 x UV-Anlage LBX 1500e	4.58	0.35	0.35	0.70
ARA 21	21022	26%	PAK vor Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.05	0.11
ARA 22	16752	21%	PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.04	0.08
ARA 23	29314	100%	PAK vor Filter	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.07	0.16
ARA 24	124010	60%	PAK vor Filter	15 x UV-Anlage LBX 1500e	4.04	0.31	0.30	0.61
ARA 25	26000	14%	PAK vor Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.06	0.13
ARA 26	35134	unbekannt	PAK vor Filter	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.08	0.17
ARA 27	30482	53%	PAK Ulmer	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.07	0.16
ARA 28	9816	62%	PAK Ulmer	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 29	16155	55%	PAK Ulmer	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.04	0.08
ARA 30	4015	35%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	1 x UV-Anlage LBX 1500e	0.27	0.02	0.01	0.03
ARA 31	8249	90%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	1 x UV-Anlage LBX 1500e	0.27	0.02	0.02	0.04
ARA 32	10404	41%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 33	7471	32%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	1 x UV-Anlage LBX 1500e	0.27	0.02	0.02	0.04
ARA 34	18921	48%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.05	0.11
ARA 35	41303	36%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.10	0.20
ARA 36	4479	52%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	1 x UV-Anlage LBX 1500e	0.27	0.02	0.01	0.03
ARA 37	7512	100%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	1 x UV-Anlage LBX 1500e	0.27	0.02	0.02	0.04
ARA 38	12523	60%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 39	9887	53%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 40	31261	18%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.08	0.16
ARA 41	13988	32%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.08
ARA 42	15256	12%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.04	0.08
ARA 43	24641	4%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.06	0.12
ARA 44	38254	60%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.09	0.20
ARA 45	15068	100%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.04	0.08
ARA 46	38005	10%	zufallsgeneriert: GAK-Filter	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.09	0.20
ARA 47	13396	54%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.08
ARA 48	21619	24%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	3 x UV-Anlage LBX 1500e	0.81	0.06	0.05	0.12
ARA 49	12498	63%	zufallsgeneriert: GAK-Schwebebett	2 x UV-Anlage LBX 1500e	0.54	0.04	0.03	0.07
ARA 50	29605	57%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 51	40000	71%	zufallsgeneriert: PAK in Biologie	5 x UV-Anlage LBX 1500e	1.35	0.10	0.10	0.20
ARA 52	3751	16%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
ARA 53	30000	8%	zufallsgeneriert: PAK vor Filter	4 x UV-Anlage LBX 1500e	1.08	0.08	0.07	0.16
ARA 54	39564	18%	zufallsgeneriert: Ozonung	-	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>1'505'849</b>				<b>51.2</b>	<b>4.0</b>	<b>3.5</b>	<b>7.5</b>

## 9 Schlussfolgerung

Diclofenac wird in Schweizer ARA, welche über ein Aktivkohleverfahren zur Elimination von Spurenstoffen verfügen, teilweise ungenügend eliminiert. In der Schweiz wurden 54 ARA identifiziert, welche trotz der Implementierung einer Aktivkohlestufe eine Überschreitung des Diclofenac Grenzwerts im aufnehmenden Gewässer verursachen können. In diesen ARA müssen mit grösster Wahrscheinlichkeit Massnahmen zur Erhöhung der Diclofenac Elimination getroffen werden. Je nach bestehendem Aktivkohleverfahren und je nach Verdünnung des gereinigten Abwassers im aufnehmenden Gewässer kommen unterschiedliche Massnahmen in Frage. Im Rahmen von dieser Studie wurden folgende Massnahmen identifiziert: 1. Erhöhung der PAK-Dosierung bzw. GAK-Austauschfrequenz, 2. Ozonung zusätzlich zum bestehenden PAK- oder GAK-Verfahren, 3. zweite GAK-Stufe zum bestehenden GAK-Verfahren, 4. PAK-Anlage zusätzlich zum bestehenden GAK-Verfahren. Investitionskosten für die Umsetzung dieser Massnahmen in den 54 identifizierten ARA wurden auf ungefähr 70-300 Mio. CHF inkl. MwSt. geschätzt. Betriebskosten, welche bei der Umsetzung der Massnahmen in den 54 ARA zusätzlich anfallen würden, wurden auf 6-7 Mio. CHF/a inkl. MwSt. geschätzt. Die Höhe der Investitionskosten hängt insbesondere davon ab, ob betriebliche oder bauliche Massnahmen implementiert werden. Welche Massnahmen sich auf welchen ARA am besten eignen, konnte im Rahmen von dieser Studie nicht abschliessend beurteilt werden, da unterschiedliche Faktoren wie z.B. Platzverhältnisse auf dem ARA-Areal, Kapazität in der Biologie für PAK-Dosierung oder persönliche Präferenzen des ARA-Betriebs eine Rolle spielen. Die UV-Bestrahlung von gereinigtem Abwasser könnte in ARA, in welchen eine Installation von inline UV-Anlagen ohne massgebliche bauliche Anpassungen möglich ist, eine kostengünstige Alternative zur Erhöhung der Diclofenac Elimination darstellen. UV-Anlagen haben jedoch nur eine geringe Breitbandwirkung beim Abbau von Mikroverunreinigungen. Zu prüfen ist, ob sich bei der UV-Bestrahlung toxische Abbauprodukte bilden können.

## 10 Literaturverzeichnis

- Abegglen, C. (2020). Betriebserfahrungen Klärwerk Werdhölzli Zürich.
- Abegglen, C., Escher, B., Hollender, J., Koepke, S., Ort, C., Peter, A., Siegrist, H., von Gunten, U., Zimmermann, S., Koch, M., Niederhauser, P., Schärer, M., Braun, C., Gälli, R., Junghans, M., Brocker, S., Moser, R., & Rensch, D. (2009). Ozonung von gereinigtem Abwasser, Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf.
- 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.
- Bangerter, B. (2019). Elimination von organischen Spurenstoffen, Ergebnisse zum 1. Betriebsjahr ARA Thunersee.
- Bhend, T. (2021). PEAK-VSA Kurs V51/21, PAK Direktdosierung ins Belebungsbecken, ARA Flos.
- Böhler, M., Hernandez, A., Baggenstos, M., McArde, C. S., Siegrist, H., & Joss, A. (2020). Elimination von Spurenstoffen durch granulierten Aktivkohle-Filtration (GAK): Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Furt, Bülach.
- Böhler, M., Zwicklenpflug, B., Grassi, M., Behl, M., Neuenschwander, S., Siegrist, H., Dorusch, F., Hollender, J., & Sinnet, B. (2011). Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon, ergänzende Untersuchungen zum Projekt Strategie MicroPoll.
- Bonvin, F., Bonvin, C., Mota, J., Dessimoz, J.-J., Bonvin, E., Decrey, L., Lochmatter, S., & Kohn, T. (2021). COUPLAGE DE CAP SUPER-FIN À L'ULTRAFILTRATION – PILOTAGE À LA STEP DE CHÂTEAUNEUF-SION.
- Butz, H. (2018). ARA Bachwis, Herisau, Neue PAK-Stufe: Betriebserfahrungen 2015—2017.
- Diniz, M. S., Salgado, R., Pereira, V. J., Carvalho, G., Oehmen, A., Reis, M. A. M., & Noronha, J. P. (2015). Ecotoxicity of ketoprofen, diclofenac, atenolol and their photolysis byproducts in zebra-fish (*Danio rerio*). *Science of The Total Environment*, 505, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.103>
- ElCom. (2024, Januar 8). Strompreise Schweiz. <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/?period=2023>
- Fleiner, J., Wittmer, A., Böhler, M., McArde, C. S., Teichler, R., Bourgin, M., Schachtler, M., & Siegrist, H. (2015). Ozonung ARA Neugut, Dübendorf—Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung, Schlussbericht BAFU.
- Grelot, J., Horisberger, M., & Casazza, R. (2021). Elimination des micropolluants par CAG en lit fluidisé, Expériences d'exploitation de la STEP de Penthaz.
- Horisberger, M., Casazza, R., Grelot, J., & Joss, A. (2019). Elimination von Mikroverunreinigungen, Pilotversuche: Einsatz von granulierter Aktivkohle im Wirbelbett auf der ARA Penthaz.
- Jewell, K. S., Falås, P., Wick, A., Joss, A., & Ternes, T. A. (2016). Transformation of diclofenac in hybrid biofilm-activated sludge processes. *Water Research*, 105, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.002>
- Joller, N., Meyer, A., & Hug, T. (2023). Kostenstudie EMV-Kleinanlagen.
- Kessler, M., Böhler, M., Löwenberg, J., & Strebel, P. (2022). NEUE REINIGUNGSSTUFE FÜR DIE ARA MURI. Aqua und Gas N 12.
- Mailler, R., Gasperi, J., Coquet, Y., Buleté, A., Vulliet, E., Deshayes, S., Zedek, S., Mirande-Bret, C., Eudes, V., Bressy, A., Caupos, E., Moillon, R., Chebbo, G., & Rocher, V. (2016). Removal of a wide range of emerging pollutants from wastewater treatment plant discharges by micro-grain activated carbon in fluidized bed as tertiary treatment at large pilot scale. *Science of The Total Environment*, 542, 983–996. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.153>

- McArdell, C. S., Böhler, M., Hernandez, A., Oltramare, C., Büeler, A., & Siegrist, H. (2020). Pilotversuche zur erweiterten Abwasser-behandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teilozonung (O3/GAK) auf der ARA Glarnerland (AVG).
- Miklos, D. B., Hartl, R., Michel, P., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). UV/H2O2 process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 136, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.044>
- Pinnekamp, J., Mousel, D., Krebber, K., Palmowski, L., Bolle, F.-W., Gredigk-Hoffmann, S., Genzowsky, K., Miethig, S., Krüger, M., Eckers, S., Simsheuser, C., Lyko, S., & Thöle, D. (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.
- Rössler, A., & Metzger, S. (2015). Untersuchungen zur Spurenstoffelimination mittels simultaner Pulveraktivkohle-dosierung auf der ARA Schöna.
- Salgado, R., Pereira, V. J., Carvalho, G., Soeiro, R., Gaffney, V., Almeida, C., Cardoso, V. V., Ferreira, E., Benoit, M. J., Ternes, T. A., Oehmen, A., Reis, M. A. M., & Noronha, J. P. (2013). Photodegradation kinetics and transformation products of ketoprofen, diclofenac and atenolol in pure water and treated wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 244–245, 516–527. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.039>
- Schachtler, M., & Hubaux, N. (2016). Die erste Anlage der Schweiz zur Elimination von Mikroverunreinigungen, ARA Neugut—Erste grosstechnische Umsetzung.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering, Treatment and Resource Recovery, Metcalf & Eddy I* AECOM (Fifth Edition).
- VSA. (2008). Leitfaden: Energie in ARA.
- VSA Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. (2023, November 23). VSA Micropoll, Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. VSA Micropoll. <https://micropoll.ch/>
- Zwickenpflug, B., Böhler, M., Sterkele, B., Joss, A., Siegrist, H., Traber, J., Gujer, W., Behl, M., Dorush, F., Hollender, J., Ternes, T., & Fink, G. (2010). Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser.



## Anhang

Tabelle A: Voraussichtlich abgeltungsberechtigte Investitionskosten für EMV-Stufen in Schweizer ARA (Daten wurden vom BAFU zur Verfügung gestellt, Stand Januar 2024, ARA anonymisiert)

ARA (anonymisiert)	E <sub>ang</sub> 2022	Verfahren abgeltungs- berechtigt	Projektstand	Vsl. abgeltungs- berechtigt (Mio. CHF inkl. MwSt.)	Jahr Kostenschätzung
ARA 56	15496	Ozon	Anhörung	7.61	2017
ARA 57	11061	Ozon	Anhörung	4.95	2022
ARA 58	15899	Ozon Sandfilter	In Betrieb	5.29	2022
ARA 59	16154	Ozon+Sandfilter	In Betrieb	4.27	2018
ARA 60	39622	Ozon	In Betrieb	3.63	2014
ARA 61	25069	Ozon	Zusicherung	4.07	2021
ARA 62	40718	Ozon	Zusicherung	7.34	2021
ARA 63	42310	Ozon	Zusicherung	4.91	2022
ARA 64	32480	Ozon	Anhörung	5.01	2020
ARA 65	436725	Ozon	In Betrieb	33.31	2019
ARA 66	12042	GAK-Filter	Zusicherung	5.04	2022
ARA 67	9211	GAK-Filter	Anhörung	2.58	2019
ARA 68	9693	GAK-Filter	Zusicherung	4.09	2019
ARA 69	31389	GAK-Filter	Zusicherung	16.72	2023
ARA 70	22971	GAK-Filter	Anhörung	8.70	2022
ARA 71	27242	GAK-Filter	Anhörung	9.80	2021
ARA 72	61907	GAK-Filter	Zusicherung	16.86	2020
ARA 73	140403	GAK-Filter	Anhörung	35.54	2019
ARA 74	18731	GAK-Schwebebett	Zusicherung	9.23	2022
ARA 75	10048	GAK-Schwebebett	Anhörung	5.30	2021
ARA 76	9828	GAK-Schwebebett	In Betrieb	3.90	2016
ARA 77	41877	GAK-Schwebebett	Zusicherung	18.39	2022
ARA 78	28005	GAK-Schwebebett		11.85	2020
ARA 79	36482	GAK-Schwebebett	Anhörung	16.40	2022
ARA 80	43596	GAK-Schwebebett	Zusicherung	16.89	2021
ARA 81	28617	GAK-Schwebebett	Anhörung	13.00	2022
ARA 82	36728	GAK-Schwebebett	In Betrieb	8.25	2022
ARA 83	49000	GAK-Schwebebett	Zusicherung	12.85	2022
ARA 84	51767	GAK-Schwebebett	Zusicherung	15.16	2021
ARA 85	187427	GAK-Schwebebett	Grundsätze	30.92	2023
ARA 86	224716	GAK-Schwebebett	Zusicherung	50.08	2022
ARA 87	12895	PAK vor Filter	In Betrieb	1.34	2019
ARA 88	12956	PAK vor Filter	In Betrieb	1.61	2021
ARA 89	31266	PAK in Biologie	In Betrieb	0.91	2017
ARA 90	29314	PAK vor Filter	Anhörung	1.87	2017
ARA 91	124010	PAK vor Filter	Anhörung	8.73	2019
ARA 92	145042	PAK vor Filter	In Betrieb	10.16	2019