

## Kurzbericht

### AdOx Köln

# Umrüstung der Kölner BIOFOR-Flockungsfilter auf Spurenstoffelimination – Phase 2



gerichtet an das:

**Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,  
Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen**



AZ: 54.2-3.3-1893-Wt

## Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben:






### „AdOx Köln – Umrüstung der Kölner BIOFOR-Flockungsfilter auf Spurenstoffelimination – Phase 2“

AZ.: 54.2-3.3-1883-Wt

gerichtet an das

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,  
Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



	 	 	
<b>Unternehmen:</b>	Stadtentwässerungs- betriebe Köln, AöR (kurz: StEB Köln)	Institut für Siedlungswasser- wirtschaft der RWTH Aachen (kurz: ISA)	Hydro-Ingenieure Planungs- gesellschaft für Siedlungs- wasserwirtschaft mbH (kurz: Hydro-Ing.)
<b>Name:</b>	Dipl.-Ing. Otto Schaaf	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp	Dipl.-Ing. Klaus Alt
<b>Autorenteam:</b>			
StEB Köln: Dipl.-Ing. Burkhard Baur, Dipl.-Ing. Manuel Hartenberger, Dr. rer. nat. Andrea Poppe, Dipl.-Ing. (FH) Chemie Anja Bomba			
ISA: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp, Dr.-Ing. Frank Benstöm, M. Sc. Vera Kohlgrüber, M. Sc. Svetlana Schölzel, M. Sc. Miriam Diehle, Dr. Agr. Dipl. Chem. Volker Linnemann, M. Sc. Regina Dolny, Dr.-Ing. David Montag			
Hydro-Ing.: Dipl.-Ing. Hauke Niehoff, Dipl.-Ing. Inge Barnscheidt, Dipl.-Ing. Hubert Maas			

Köln, im April 2021

Im Auftrag

gez. Jörn Kleimann

#### Zitierung:

BAUR, B.; PINNEKAMP, J.; NIEHOFF, H. (2020): Umrüstung der Kölner BIOFOR-Flockungsfilter auf Spurenstoff-  
elimination (AdOx Köln) – Kurzbericht Phase 2, gerichtet an das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur-  
und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW)

## Vorbemerkung

*Bei dem vorliegenden Bericht handelt es sich um eine Kurzversion, welche eine Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse darstellt. Nähere Details können der Langversion des Abschlussberichtes entnommen werden.*

## Inhaltsverzeichnis

1	Projektbeschreibung und Zielsetzung.....	4
2	Vorstellung des Großklärwerks Köln-Stammheim .....	4
3	Vorstellung des Klärwerks Köln-Rodenkirchen.....	5
4	Planungskonzept und Betrieb der Pilotanlage.....	6
5	Wissenschaftliche Untersuchungen und Ergebnisse.....	7
6	Betriebswirtschaftliche Betrachtungen .....	16
7	Bewertung und Gegenüberstellung der Verfahren.....	19
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	22

## 1 Projektbeschreibung und Zielsetzung

Mit dem vom Umweltministerium NRW geförderten Projekt „AdOx Köln“ verfolgen die StEB Köln die Entwicklung einer optimalen verfahrenstechnischen Lösung für das Großklärwerk (GKW) Köln-Stammheim in Bezug auf eine Umrüstung der bestehenden Filteranlage vom Typ „BIOFOR®“ (BIOlogical-Fixed-Oxygen-Reactor®) zu einer Behandlungsstufe mit Spurenstoffelimination. Die praktische Erprobung geeigneter Verfahren soll aus Kostengründen jedoch nicht direkt im GKW Stammheim durchgeführt werden, sondern mit einer Pilotanlage auf dem kleineren Kölner Außenklärwerk Rodenkirchen (KRO) stattfinden, welches ebenfalls über eine BIOFOR®-Filteranlage verfügt. **Das Ziel ist dabei die Ermittlung einer Vorzugsvariante auf Basis der beiden favorisierten Verfahren (GAK-Filtration und Ozonung) unter den Aspekten der Wirksamkeit, Kosteneffizienz und Betriebs-tauglichkeit.**

**Da BIOFOR®-Flockungsfiltrationsanlagen eine verbreitete Technik auf vielen Kläranlagen darstellen, können Erkenntnisse zu deren Umrüstung für andere Kläranlagenbetreiber ebenfalls relevant und wegweisend sein.**

Das Projekt teilt sich in zwei Phasen. Phase 1 umfasst die Vorversuche und Planung zur Integration einer Versuchsanlage für eine GAK-Filtration und eine Ozonung in die vorhandene BIOFOR®-Filtration am Beispiel des Klärwerks Köln-Rodenkirchen. Auf Basis der Ergebnisse der Planung sollen die Verfahren dann verglichen und eins bzw. beide großtechnisch für einen Versuchsbetrieb in Phase 2 umgerüstet werden.

**Aufbauend auf ihren Kompetenzen und Erfahrungen im Umgang mit der Thematik Spurenstoffelimination, wollen die StEB Köln u.a. mit dem Projekt „Adox Köln“ ihrem Motto „Die WasserBesserMacher“ gerecht werden und somit im Rahmen ihrer Möglichkeiten einen Beitrag zur Verbesserung der Gewässerqualität leisten.**

## 2 Vorstellung des Großklärwerks Köln-Stammheim

Das im rechtsrheinischen Kölner Norden gelegene Großklärwerk (GKW) Köln-Stammheim ist mit einer Ausbaugröße von rund von 1.570.000 EW<sub>BSB5,60</sub> das Größte der fünf Kölner Klärwerke und reinigt knapp 80 % des gesamten Abwassers. Das Einzugsgebiet umfasst das Kerngebiet der Stadt Köln. **Bild 1** liefert einen Überblick über die Lage und die Ausmaße des Großklärwerks Köln-Stammheim.



**Bild 1:** Luftbildaufnahme des Großklärwerks (GKW) Köln-Stammheim



Die Anlage ist auf einen maximalen Mischwasserzufluss in Höhe von  $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$  sowie einen Trockenwetterzufluss (Stand 80er Jahre) von  $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$  bemessen. Die 4-straßige mechanische Abwasserreinigung besteht aus einem Rechen und einem belüfteten Sand- und Fettfang. Die biologische Abwasserreinigung erfolgt zweistufig. Die erste biologische Reinigungsstufe (Hochlastbelebung zur C-Elimination) hat ein Gesamtbeckenvolumen von  $11.800 \text{ m}^3$ . Die sich anschließende Zwischenklärung besteht aus 12 Längsbecken. Das Bemessungsschlammalter der ersten Stufe beträgt 1 Tag. Die zweite biologische Reinigungsstufe (Schwachlastbelebung) weist ein Gesamtbeckenvolumen von  $124.000 \text{ m}^3$  auf. Die Nachklärung besteht aus zwei Nachklärbeckengruppen mit insgesamt acht Rundbecken. Im Rahmen der weitergehenden Abwasserreinigung verfügt GWK Köln-Stammheim über eine Filteranlage nach dem BIOFOR®-Verfahren mit einer Gesamtfilterfläche von  $3.500 \text{ m}^2$ , welche zurzeit jedoch nicht betrieben wird. Das gereinigte Abwasser wird in den Rhein geleitet.

### 3 Vorstellung des Klärwerks Köln-Rodenkirchen

Das im linksrheinischen Kölner Süden gelegene Klärwerk Köln-Rodenkirchen (KRO) ist mit einer Ausbaugröße von 88.000 EW (momentane Auslastung: 55.000 E und 20.000 EGW) die zweitkleinste der fünf Kölner Klärwerke. Das Einzugsgebiet umfasst die Stadtteile Rodenkirchen, Godorf, Meschenich, Konraderhöhe, Hahnwald, Sürth und Weiß. **Bild 2** stellt eine Luftbildaufnahme der Anlage dar.



**Bild 2:** Luftbildaufnahme des Klärwerks Köln-Rodenkirchen

Die Abwasserreinigung ist auf einen maximalen Mischwasserzufluss in Höhe von  $587 \text{ l/s}$  sowie einen Trockenwetterzufluss (Stand 80er Jahre) von  $395 \text{ l/s}$  bemessen und erfolgt durch zwei baugleiche Straßen. Die mechanische Reinigungsstufe umfasst einen Filterstufenrechen (Stababstand 3 mm) sowie einen belüfteten Sand-/Fettfang und eine Vorklärung. Die Vorklärung weist ein Gesamtbeckenvolumen von  $2.284 \text{ m}^3$  auf. In der 2-straßigen biologischen Reinigungsstufe, ausgeführt als vorgeschaltete Denitrifikation, kann ggf. auch eine vermehrte biologische P-Elimination erfolgen. Das Gesamtvolumen der Belebungsbecken beträgt  $14.850 \text{ m}^3$  und das Bemessungsschlammalter liegt bei 11 Tagen. Die Nachklärung erfolgt in drei horizontal durchströmten Rundbecken: Zwei Nachklärbecken mit einem Durchmesser von je  $34,7 \text{ m}$  und einem dritten Nachklärbecken mit einem Durchmesser von  $40,0 \text{ m}$ . Die Abwasserfiltration erfolgt, wie in Stammheim, ebenfalls in einem BIOFOR®-Filter, allerdings nur mit sechs Filterzellen und einer Gesamtfilterfläche von  $240 \text{ m}^2$ . Das gereinigte Abwasser wird in den Rhein geleitet.

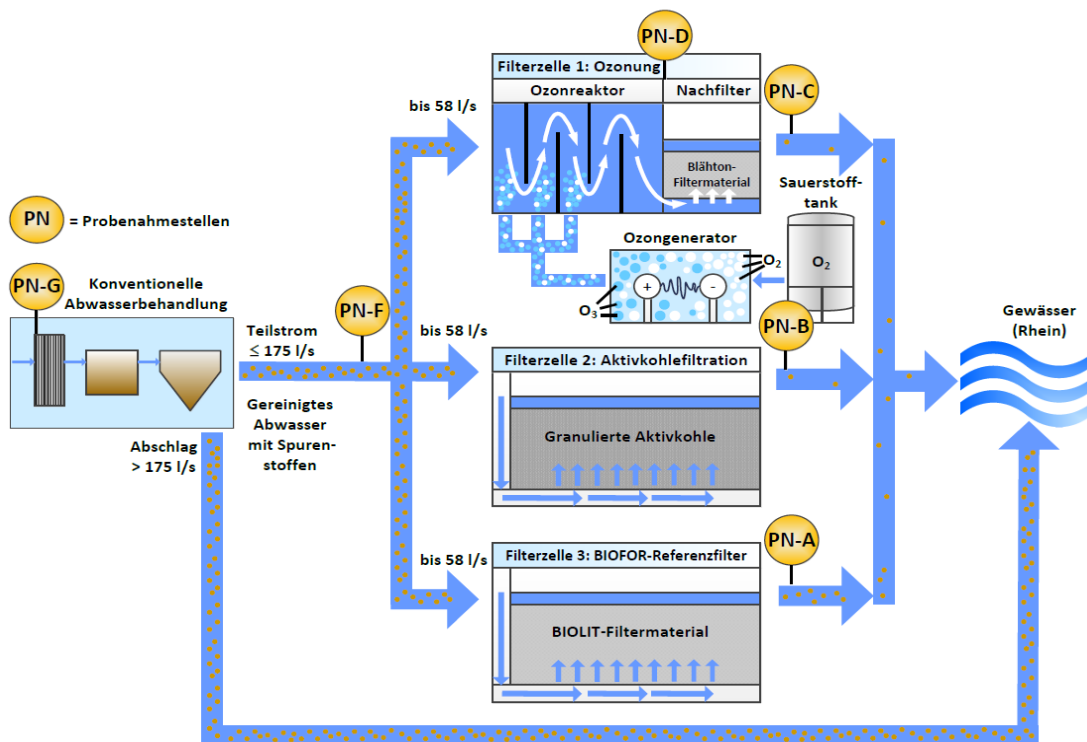
## 4 Planungskonzept und Betrieb der Pilotanlage

Für die großtechnische Umsetzung der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Verfahren zur Spurenstoffelimination (AdOx Köln = **A**dsorption an granulierter Aktivkohle und **O**xidation mittels Ozonung) wurden drei der insgesamt sechs Zellen der BIOFOR®-Filteranlage des Klärwerks Köln-Rodenkirchen parallel genutzt (**Bild 3**).



**Bild 3:** Umgebaute Filteranlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen (links: Seitenansicht, rechts: schräge Draufsicht)

Die Pilotanlage wurde auf die Behandlung im Teilstrombetrieb ausgelegt. Dabei wurde der maximal stündliche Trockenwetterzufluss zugrunde gelegt, um eine Behandlung des spurenstoffbelasteten Schmutzwasserzuflusses zu gewährleisten, während gleichzeitig eine Behandlung von unbelasteten Regenwasser minimiert wird. Die zu behandelnde Teilstrommenge von maximal 175 l/s (heute deutlich niedriger als der Bemessungswert aus den 80er Jahren) wird gleichmäßig auf die drei Versuchszellen verteilt (Verfahrensschema, siehe **Bild 4**). Der max. Zufluss pro Zelle beträgt damit ca. 58 l/s. Nach erfolgter Behandlung wird das Abwasser dem Rhein zugeführt.

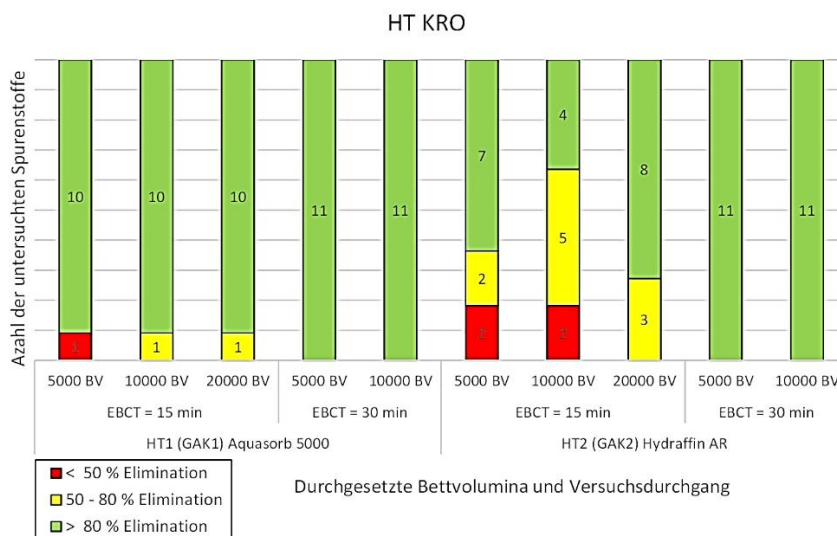


**Bild 4:** Verfahrensschema der Pilotanlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen

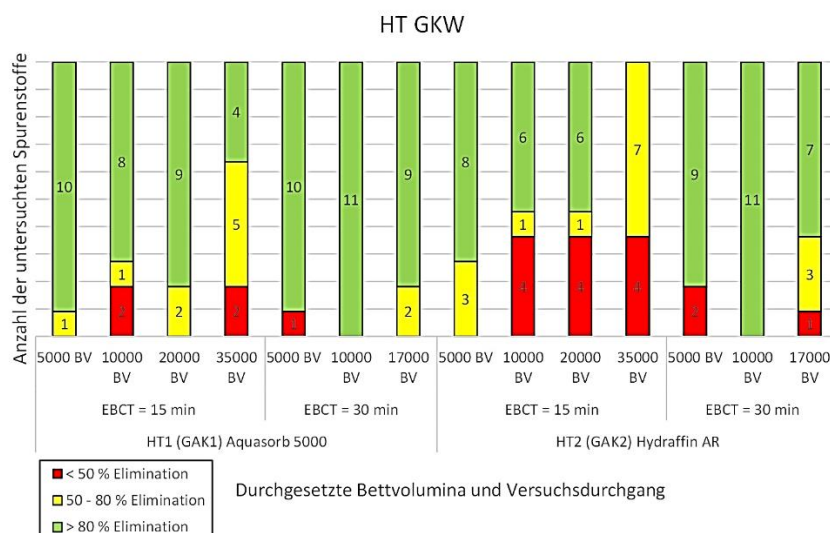


## 5 Wissenschaftliche Untersuchungen und Ergebnisse

Zur Ermittlung eines geeigneten Aktivkohleprodukts für die GAK-Filtration wurden in der vorangegangenen Phase 1 des Forschungsvorhabens AdOx Köln mehrere Kleinsäulenschnellfiltertests durchgeführt, auf deren Basis zwei Aktivkohlen ausgewählt wurden. Die beiden Aktivkohlen („Aquasorb 5000“ von Jacobi Carbons und „Hydarffin AR“ von Donau Carbon) wurden in halbtechnischen Filtersäulensversuchen vergleichend untersucht, sowohl im Klärwerk Köln-Rodenkirchen als auch im GWK Köln-Stammheim. Dabei hat sich die „Aquasorb 5000“ als effektivste und wirtschaftlichste Kohle zur Behandlung des Kölner Abwassers herausgestellt und wurde daher in Phase 2 für die großtechnischen Untersuchungen eingesetzt. Die Ergebnisse aus den Versuchen der Halbtechnik (HT) werden in **Bild 5** und **Bild 6** dargestellt:



**Bild 5:** Anzahl reduzierter Spurenstoffe bei den halbtechnischen GAK-Filtersäulensversuchen in KRO



**Bild 6:** Anzahl reduzierter Spurenstoffe bei den halbtechnischen GAK-Filtersäulensversuchen im GWK

Die Diagramme veranschaulichen die Anzahl der untersuchten Stoffe, welche zu mehr als 80 %, zwischen 50 und 80 % und weniger als 50 % von den Aktivkohlefiltern adsorbiert wurden. Bei höheren durchgesetzten Bettvolumina (BV = m<sup>3</sup> Abwasser / m<sup>3</sup> Aktivkohle) verringert sich die Reinigungsleistung. Dabei wird ersichtlich, dass die Aquasorb 5000 unabhängig vom Standort ein deutlich besseres Adsorptionsergebnis gegenüber Spurenstoffen im Kölner Abwasser liefert als die Hydarffin AR.

Spurenstoffe werden durch Kläranlagen je nach ihrer Beschaffenheit unterschiedlich gut eliminiert. Im Rahmen der großtechnischen Untersuchungen konnte für N-Acetyl-Sulfamethoxazol (100 %) und Ibuprofen (98,8 %) eine sehr gute biologische Elimination innerhalb der konventionellen Abwasserreinigung ermittelt werden. Carbamazepin (10,2 %) und Diclofenac (18,8 %) wurden hingegen schlecht in der biologischen Stufe eliminiert. Insgesamt konnten für die 12 untersuchten Spurenstoffe im Mittel Eliminationen von 45,6 % in der biologischen Stufe ermittelt werden. Die Ergebnisse werden in Bild 7 und Bild 8 veranschaulicht:

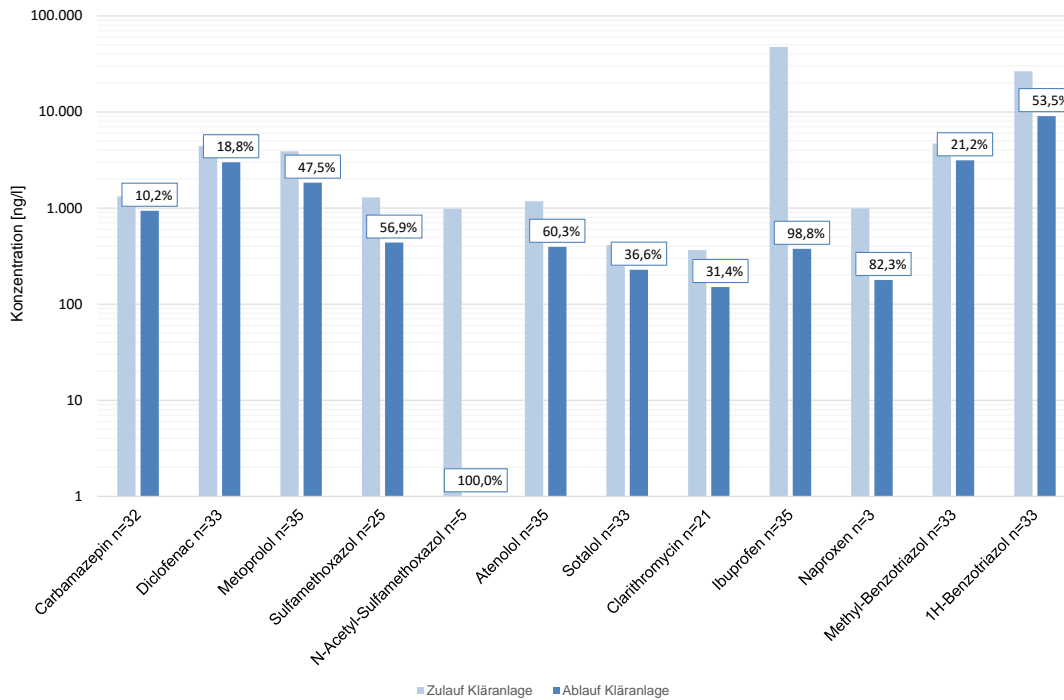


Bild 7: Spurenstoffelimination (Mittelwerte) in der biologischen Stufe des Klärwerks Rodenkirchen

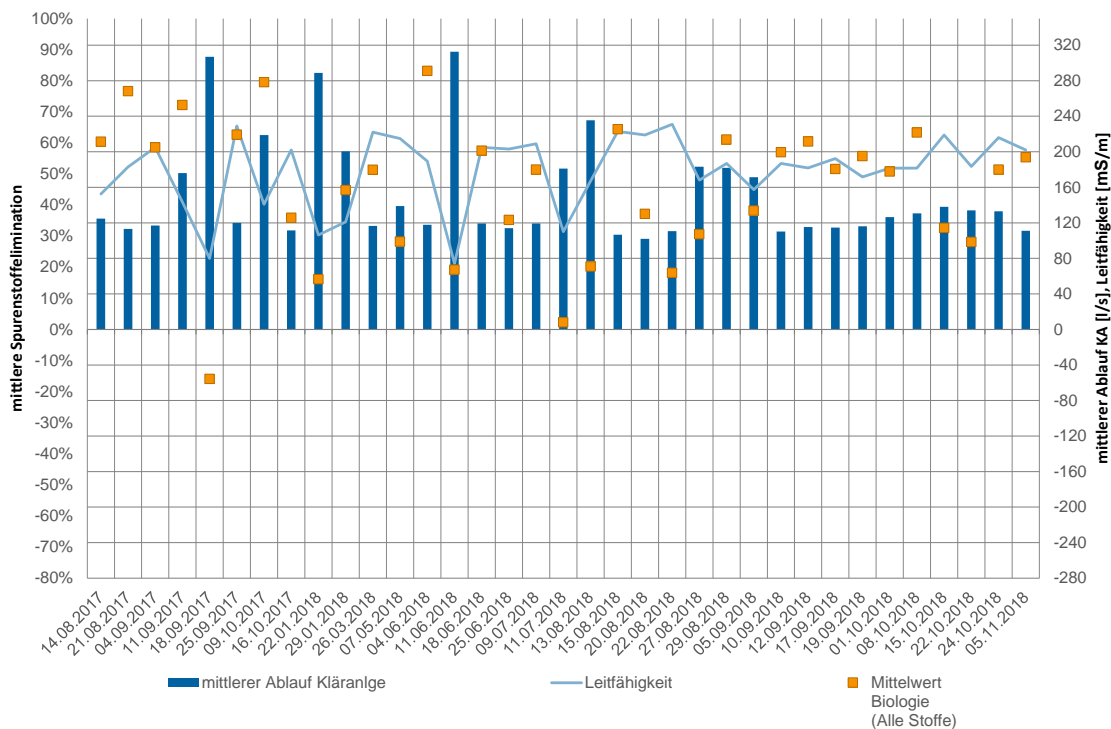
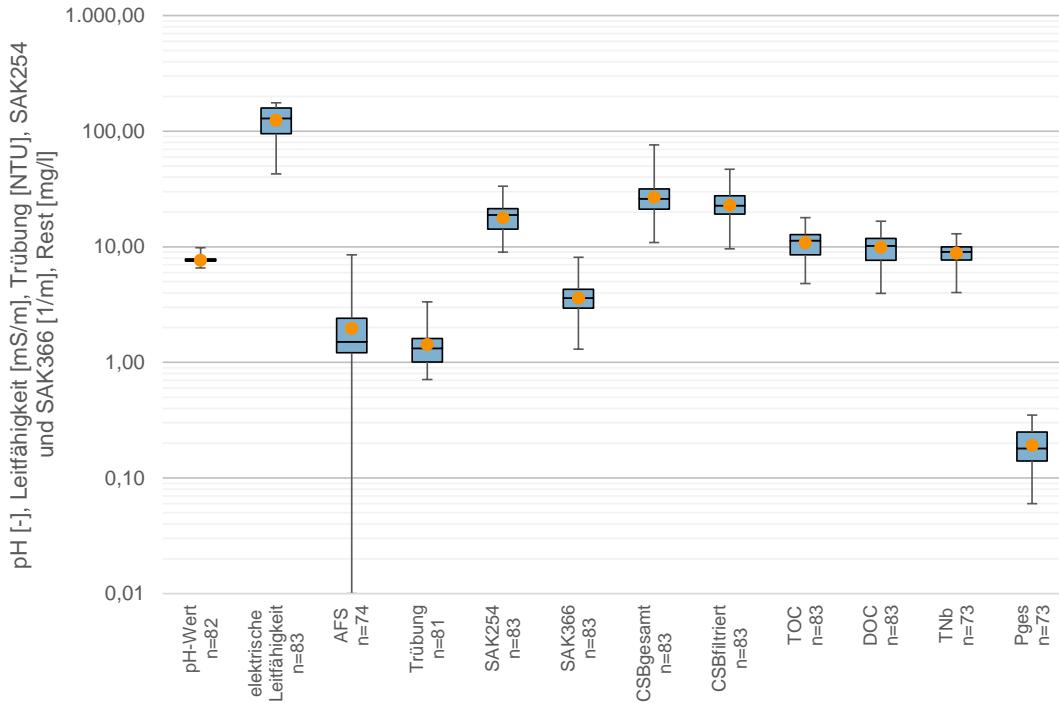


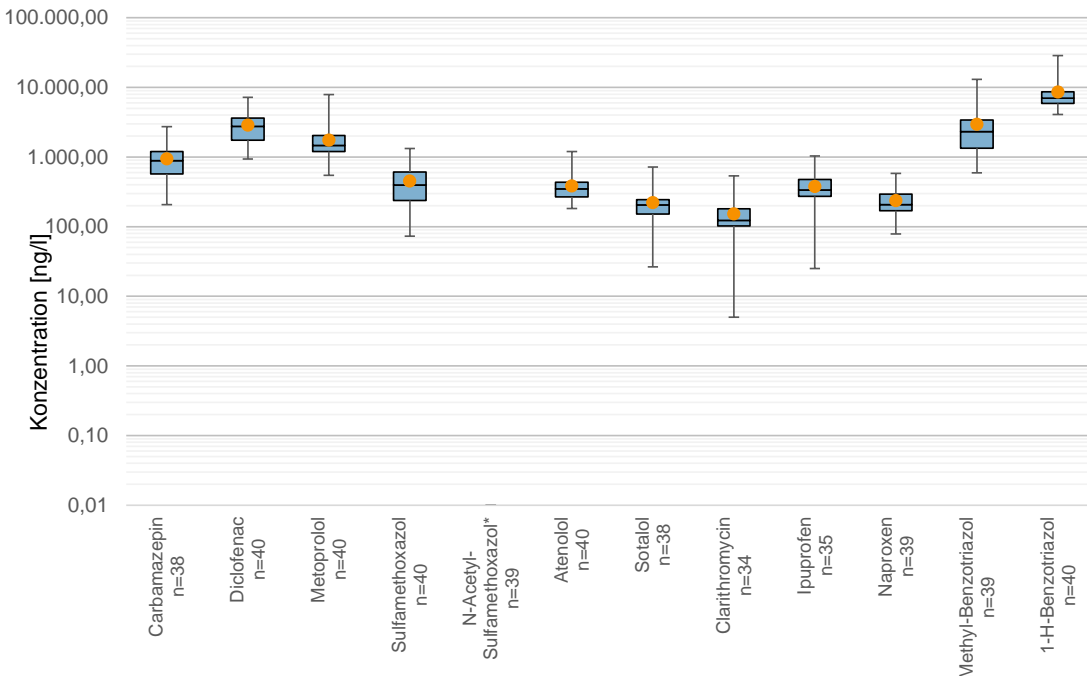
Bild 8: Spurenstoffelimination in der biologischen Stufe in Abhängigkeit der Abwasserzusammensetzung



Die verbleibende Belastung im Ablaufabwasser der Nachklärung bzw. im Zulauf der großtechnischen Pilotanlage kann nachstehend für die Standardparameter (**Bild 9**) und die Spurenstoffkonzentrationen (**Bild 10**) als Box-Plot-Diagramme entnommen werden.



**Bild 9: Standardparameter im Zulauf der großtechnischen Pilotanlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen**



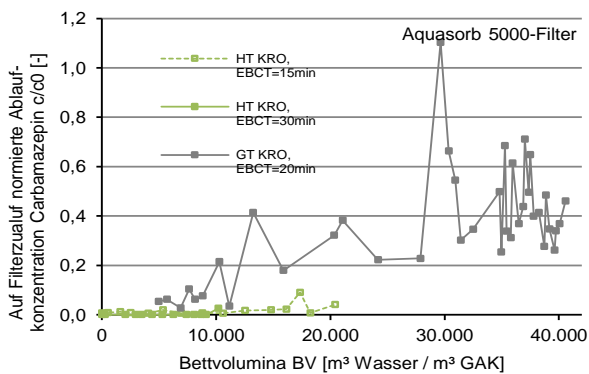
\* N-Acetyl-Sulfamethoxazol konnte im Zulauf der Versuchsanlage nicht nachgewiesen werden

**Bild 10: Spurenstoffe im Zulauf der großtechnischen Pilotanlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen**

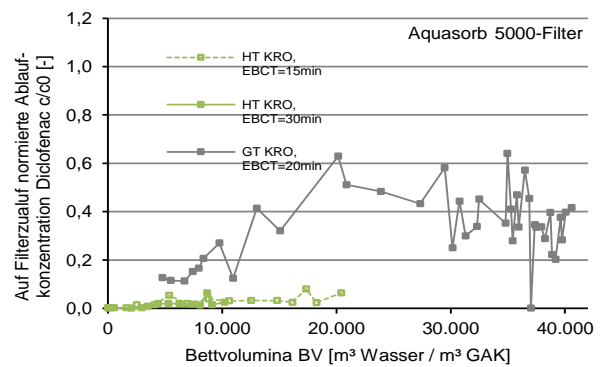
Diese Spurenstoffe gilt es mit einem geeigneten Reinigungsverfahren soweit wie möglich zu reduzieren, damit im Mittel ein Gesamtwirkungsgrad des Klärwerks von 80% erreicht wird.

Für die Betrachtung des Reinigungsverfahrens der Aktivkohlefiltration wurde großtechnisch die granuliert Aktivkohle Aquasorb 5000 der Firma Jacobi Carbons im Klärwerk Köln-Rodenkirchen untersucht. Insgesamt erlangte der aufwärts durchströmte GAK-Filter im Versuchszeitraum vom 14.08.2017 bis 05.11.2018 einen Durchsatz von ca. 40.500 Bettvolumina (BV = m<sup>3</sup>Abwasser / m<sup>3</sup>Aktivkohle), was 32.400 BV pro Jahr entspricht.

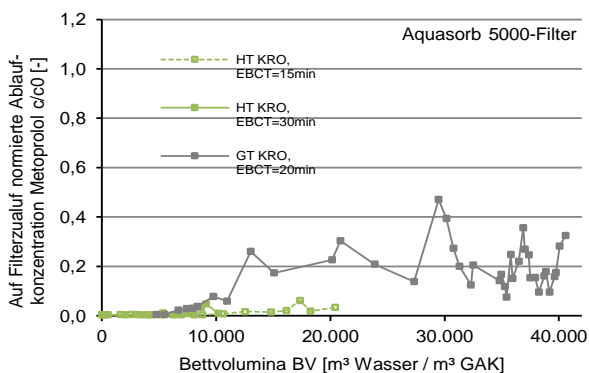
Die Ergebnisse der großtechnischen Filteruntersuchungen im Klärwerk Köln-Rodenkirchen sind nachstehend aufgeführt. Die Auswertung der Adsorptionsleistung erfolgte als grafische Darstellung der Ablaufkonzentration normiert auf die Zulaufkonzentration (c/c<sub>0</sub>). Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der großtechnischen Versuche (graue Kurven) und halbtechnischen Versuche (hellgrüne Kurven), sind in nachstehenden Diagrammen (Bild 11 bis Bild 21) die ermittelten Durchbruchkurven beider Versuchsdurchführungen dargestellt:



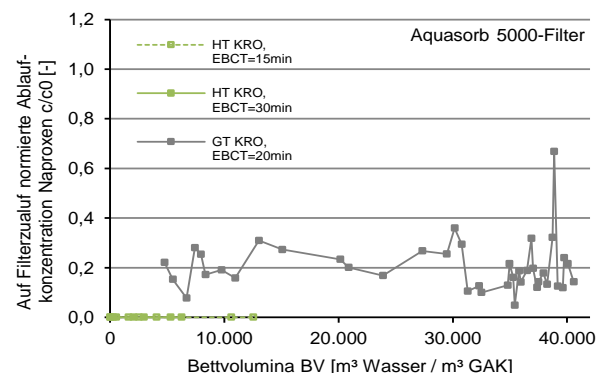
**Bild 11: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Carbamazepin für die Aquasorb 5000-Filter**



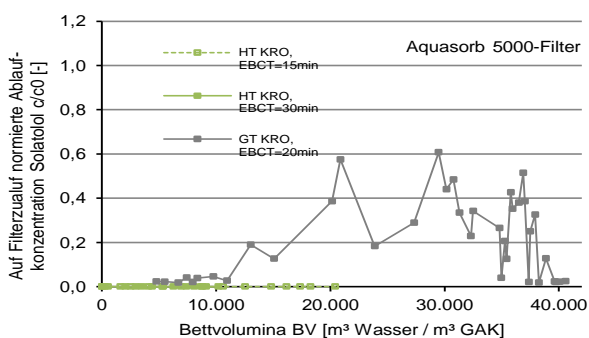
**Bild 12: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Diclofenac für die Aquasorb 5000-Filter**



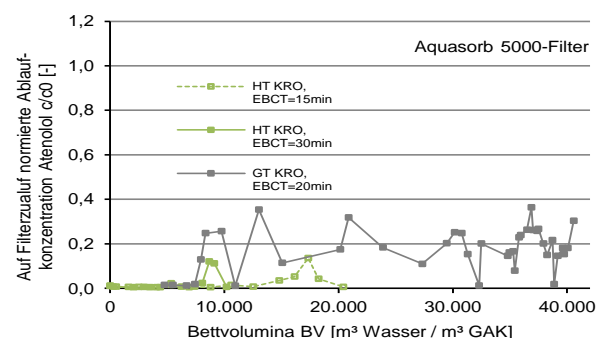
**Bild 13: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Metoprolol für die Aquasorb 5000-Filter**



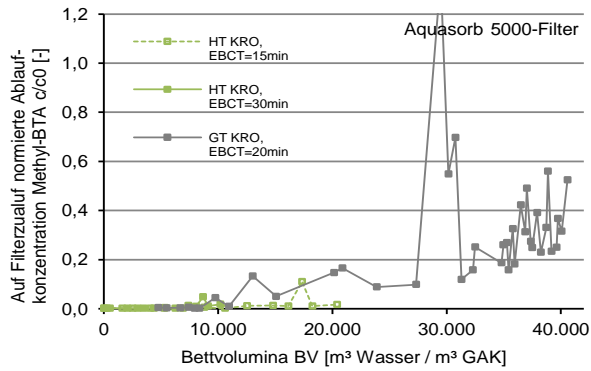
**Bild 14: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Naproxen für die Aquasorb 5000-Filter**



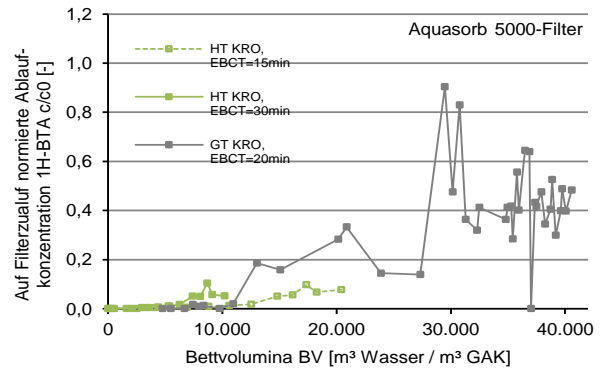
**Bild 15: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Sotalol für die Aquasorb 5000-Filter**



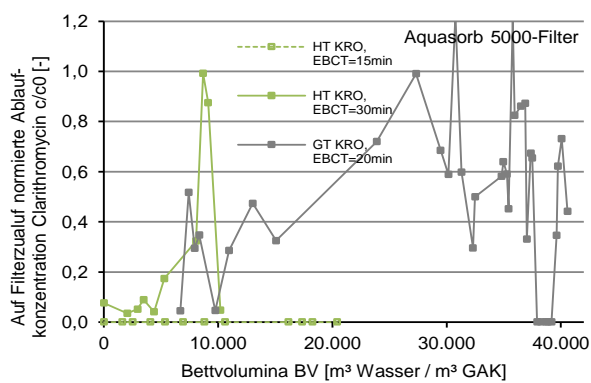
**Bild 16: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Atenolol für die Aquasorb 5000-Filter**



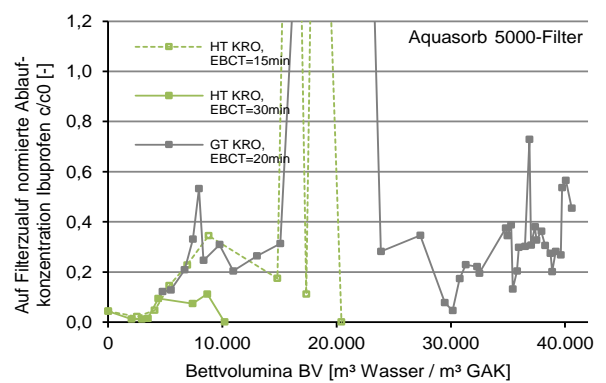
**Bild 17: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Methyl-Benzotriazol für die Aquasorb 5000-Filter**



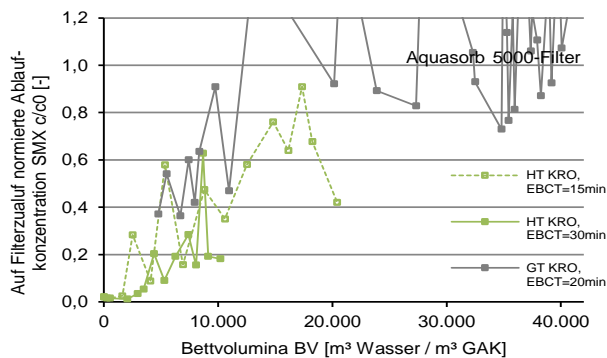
**Bild 18: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration 1H-Benzotriazol für die Aquasorb 5000-Filter**



**Bild 19: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Clarithromycin für die Aquasorb 5000-Filter**



**Bild 20: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Ibuprofen für die Aquasorb 5000-Filter**



**Bild 21: Auf Filterzulauf normierte Ablaufkonzentration Sulfamethoxazol für die Aquasorb 5000-Filter**

Aus den Diagrammen läßt sich entnehmen, dass die Adsorptionsleistung mit steigenden, durchgesetzten Bettvolumina abnimmt. Die Ausprägung des Adsorptionsverlusts (Durchbruch der Kurven bei  $c/c_0 = 0,2$ ) und damit das Unterschreiten der beabsichtigten Reinigungsleistung von 80% variiert je nach Spurenstoff.

In nachstehender Grafik (Bild 22) sind die Ergebnisse der Spurenstoffelimination im großtechnischen GAK-Filter zusammenfassend aufgeführt. Das Diagramm veranschaulicht die Anzahl der untersuchten Stoffe, welche zu mehr als 80 %, zwischen 50 und 80 % und weniger als 50 % vom Aktivkohlefilter eliminiert werden.

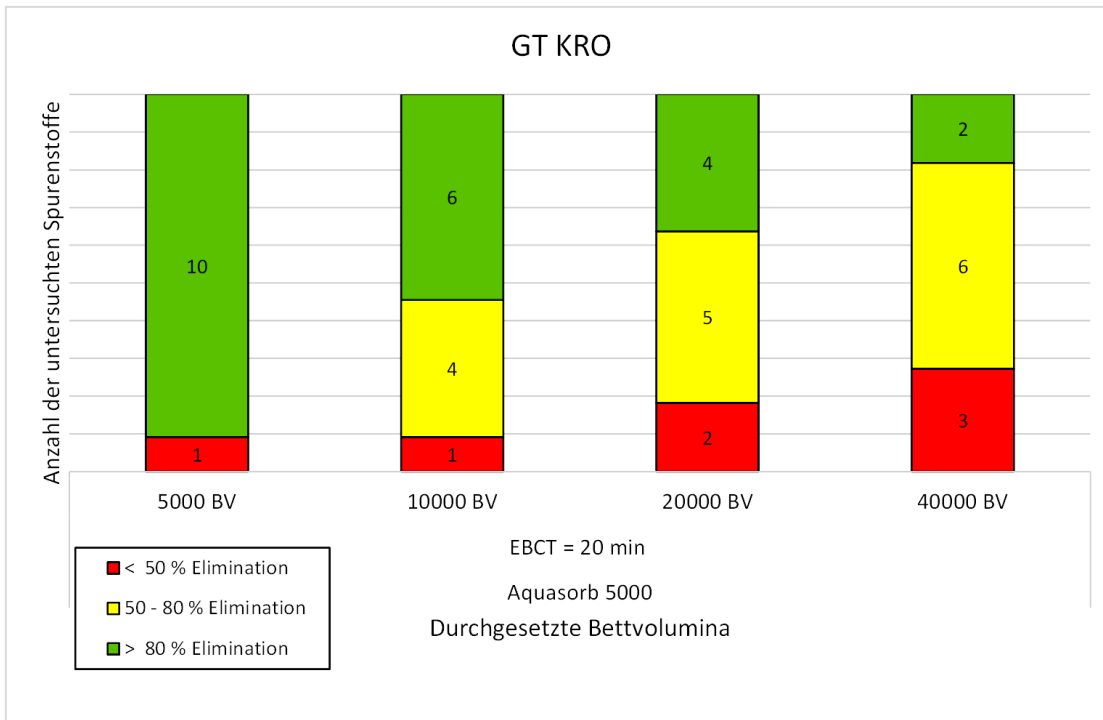


Bild 22: Anzahl der untersuchten Spurenstoffe, die zu < 50 %, 50 – 80 % bzw. > 80 % eliminiert wurden

Bei der GAK-Filtration wird folgende stoffspezifische Effizienz für die Spurenstoffelimination festgestellt:

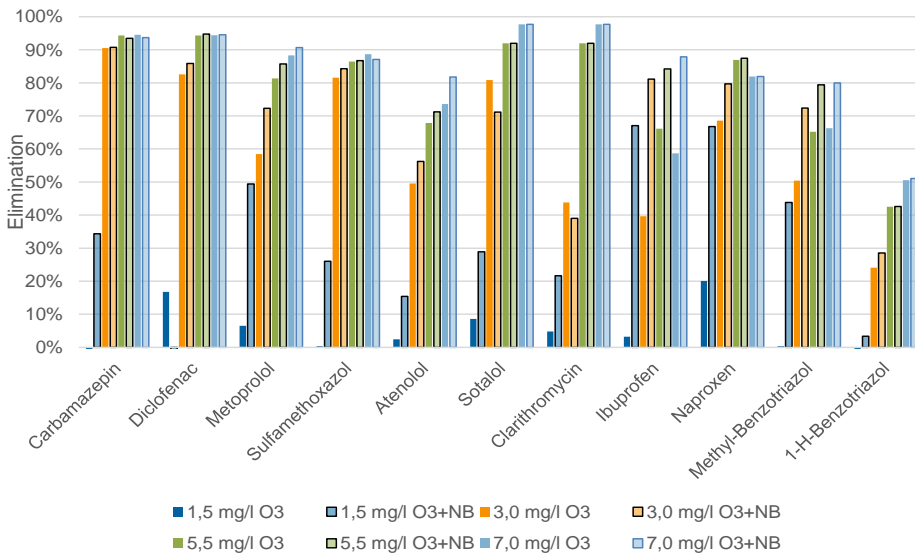
GAK-Filtration	Spurenstoffe
Gut eliminierbar	Metoprolol, Naproxen, Sotalol, Atenolol, Methyl-Benzotriazol, 1H-Benzotriazol
Mäßig eliminierbar	Carbamazepin, Diclofenac
Schlecht eliminierbar	Clarithromycin, Ibuprofen, Sulfamethoxazol

Zudem ließ sich beobachten, dass sich gegenüber dem bisherigen BIOFOR®-Filterbetrieb keine Ablagerungen von Algen und Laub ergaben. In den Eintrittsöffnungen der Filterdüsen haben sich keine Blattstiele verfangen. Die vor dem AdOx-Betrieb vorgenommenen Umbauten an der Nachklärung (Optimierungen Einlaufbauwerk und Ablaufrinne, Abdeckung Ablaufrippen) und der Austausch eines manuellen Rechens gegen ein automatisiertes Trommelsieb stellen eine erkennbare Verbesserung für den Filterbetrieb dar. Zudem wurde bei der Inspektion des Düsenbodenraumes im Januar 2020 nur eine geringe Menge von Ablagerungen (ca. 100-200L) festgestellt. Dies ist deutlich weniger, als von anderem Betreiber mit GAK im BIOFOR® berichtet wird. Die Kombination aus „grober“ Schlitzweite der Filterdüse von 2,5 mm mit einer Stützkohle 4\*8 Mesh sowie ein Spülprogramm mit gestufter „An- und Abfahr-Rampe“ (gestufte Spülgeschwindigkeiten) hat sich darin bewährt, einen Durchschlag der Filterkohle 8\*30 Mesh in den Düsenbodenraum zu vermeiden. Die automatische Spülung wurde im Prozessleitsystem zeitabhängig definiert. Der Aktivkohlefilter wurde zwei Mal wöchentlich automatisch gespült.

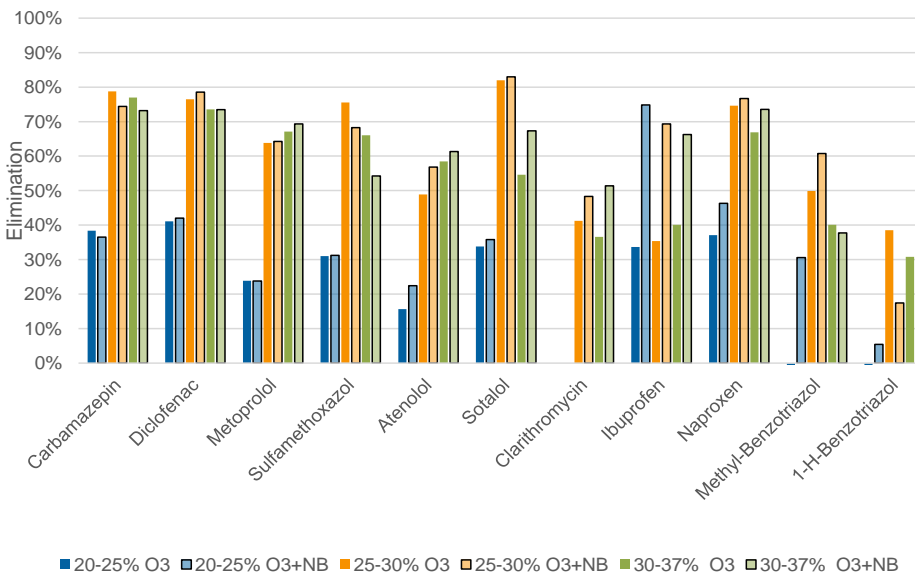
Die in über 8 Monaten Betrieb in 2018 ausgewiesenen, sehr guten Eigenschaften der Kornaktivkohle als Filtermaterial im Aufstrom betriebenen BIOFOR®-Filter haben sich in 2019 für weitere 7 Monate bestätigt. **Die mechanische Standzeit der Kornaktivkohle war zum Ende der Versuche noch nicht ausgereizt, eine mechanische Begrenzung der Laufzeit nicht absehbar – eine positive Überraschung gegenüber den Annahmen bei Start des Projektes.**



Für die Betrachtung des Reinigungsverfahrens der Ozonung wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Einstellungen untersucht. Versuchsreihe 1 beinhaltet eine volumenproportionale Steuerung der Ozondosierung im Bereich zwischen 1,5 und 7,0 mg O<sub>3</sub>/l, während Versuchsreihe 2 auf eine Regelung nach dem Wirkungsgrad eta SAK<sub>254</sub> (gesamt) abzielte. Die Ergebnisse beider Versuchsreihen werden in **Bild 23** und **Bild 24** zusammengefasst, jeweils dargestellt für den Ozonreaktor (O<sub>3</sub>) und die Ozonstufe bestehend aus Ozonreaktor und biologische Nachbehandlung (O<sub>3</sub> + NB).



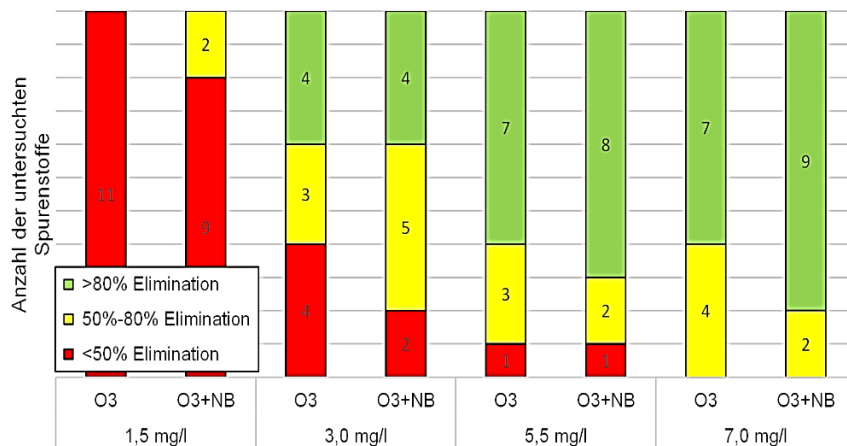
**Bild 23: Spurenstoffelimination der Ozonung bei volumenproportionaler Steuerung**



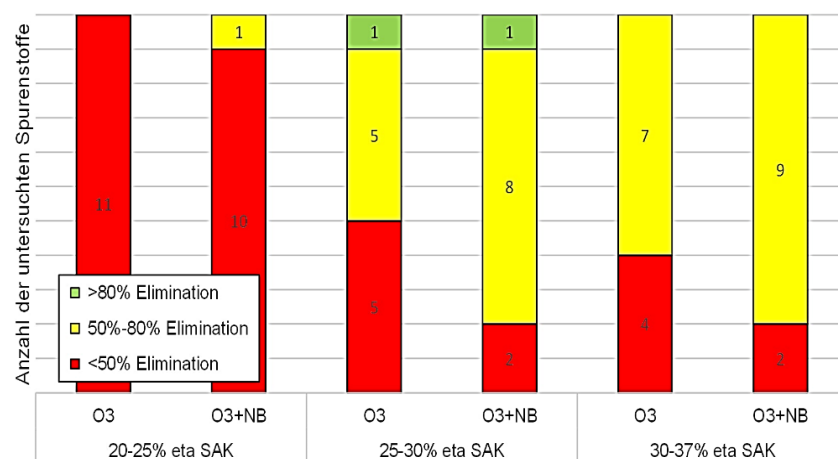
**Bild 24: Spurenstoffelimination der Ozonung bei Regelung nach dem eta SAK<sub>254</sub>**

Insgesamt scheint bei der Anwendung einer volumenproportionalen Steuerung zur Ozondosierung eine Ozondosis zwischen 3,0 und 5,5 mg O<sub>3</sub>/l für eine Spurenstoffelimination zielführend zu sein. Stärkere Schwankungen der Elimination können dadurch erklärt werden, dass insbesondere bei niedrigen Ozondosen die Zehrungseffekte durch die organische Hintergrundmatrix und auch Nitrit stärker ins Gewicht fallen. Bei der Regelung nach eta SAK<sub>245</sub> für eine bedarfsgerechte Ozondosierung ergibt sich eine Zunahme der Spurenstoffelimination mit steigendem eta SAK<sub>254</sub> (20-25% auf 25-30%). Generell zeigt sich bei beiden Versuchsreihen, dass die biologische Nachbehandlung nach der Ozonung einen positiven Effekt auf die Reinigungsleistung ausübt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden vorgestellten Versuchsreihen nochmals kurz zusammengefasst (**Bild 25** und **Bild 26**) und die Steuer- bzw. Regelstrategien bezüglich ihrer Eignung zur Spurenstoffelimination hin bewertet.



**Bild 25:** Anzahl reduzierter Spurenstoffe innerhalb der Ozonung bei volumenproportionaler Steuerung

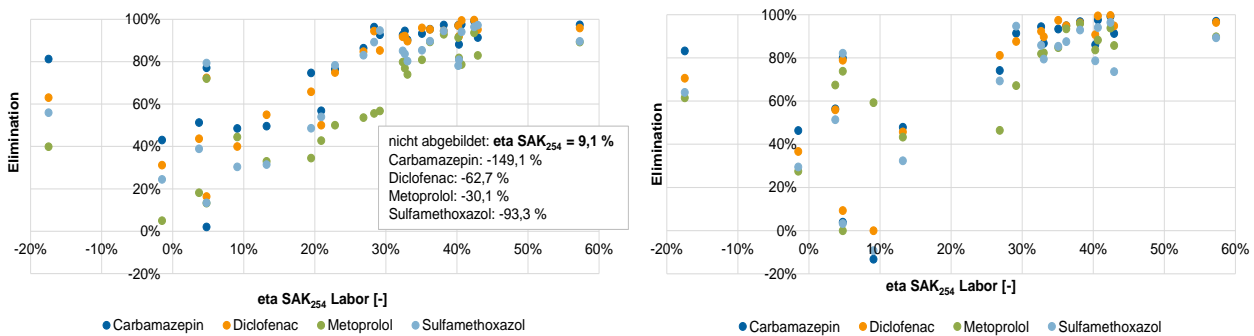


**Bild 26:** Anzahl reduzierter Spurenstoffe innerhalb der Ozonung bei Regelung nach eta SAK<sub>254</sub>

Es zeigt sich, dass eine volumenproportionale Ozondosis von 1,5 mg/l für die Spurenstoffelimination definitiv nicht ausreichend ist. Bei einer Ozondosis von 5,5 mg/l können acht der elf untersuchten Spurenstoffe zu über 80 % eliminiert werden. Für eine Ozondosis von 7,0 mg/l verbessert sich das Ergebnis leicht auf neun Stoffe, die zu über 90 % eliminiert werden und nur zwei Stoffe, die maximal zu 80 % eliminiert werden. Eine leichte Verbesserung durch die biologische Nachbehandlung ist auch in dieser Darstellung für alle Ozondosen erkennbar.

Allgemein wirkt es, als wäre die Spurenstoffelimination bei der Regelung nach dem eta SAK<sub>254</sub> deutlich schlechter als bei der volumenproportionalen Steuerung. Dies liegt aber insbesondere daran, dass während der Regelung nach dem eta SAK<sub>254</sub> im Mittel geringere spezifische Ozondosen zugegeben wurden als in der 1. Versuchsreihe. Die bei der Regelung nach dem eta SAK<sub>254</sub> getesteten Sollwerteinstellungen sind für eine mittlere Elimination der getesteten Spurenstoffe > 80 % nicht ausreichend. Daher sollten weitere Versuche zur Regelung nach eta SAK<sub>254</sub> mit höheren Sollwerteinstellungen erfolgen. Hierbei ist auch der eingesetzte Sonden-typ entscheidend. Mit einem späteren SAK-Sondenwechsel (Meßspalt 50 mm) wurden bessere Ergebnisse erzielt.

Bei der Betrachtung der Elimination der gut mit Ozon zu reduzierenden Spurenstoffe Carbamazepin, Diclofenac Metoprolol und Sulfamethoxazol ergibt sich folgendes **Bild 27**:



**Bild 27: Elimination gut eliminierbarer Spurenstoffe über eta SAK<sub>254</sub>, links: im Ozonreaktor; rechts: in der Ozonstufe**

Die Korrelation zwischen der Spurenstoffelimination und dem eta SAK<sub>254</sub> ist in beiden Diagrammen gut erkennbar, jedoch ergeben sich bei der Ozonstufe (rechtes Diagramm) im Bereich niedrigerer eta SAK<sub>254</sub>-Werte stärkere Streuungen als bei der Betrachtung des Ozonreaktors (linkes Diagramm). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei geringen eta SAK<sub>254</sub>-Werten auch geringere spezifische Ozondosen zudosiert werden und bei geringen Ozondosen biologische Effekte einen stärkeren Einfluss auf die Spurenstoffelimination haben.

Für die Regelung nach dem eta SAK<sub>254</sub> ist ein Sollwert von 30 % bis 35 % zielführend, da ab diesem Wert die gut eliminierbaren Stoffe zuverlässig zu mindestens 80 % umgesetzt werden können.

Allgemein zeigt sich, dass eine Korrelation zwischen dem eta SAK<sub>254</sub> und der Elimination einzelner Spurenstoffe festgestellt werden kann, was die Voraussetzung für die Abschätzung der Spurenstoffelimination über den eta SAK<sub>254</sub> ermöglicht. Unabhängig von der gewählten Steuer- bzw. Regelstrategie kann zukünftig anhand von Messungen des eta SAK<sub>254</sub> die erreichte Spurenstoffelimination abgeschätzt werden. Außerdem unterstützen die gezeigten Ergebnisse den Zusammenhang zwischen eta SAK<sub>254</sub> und Spurenstoffelimination und bestätigen somit auch die Eignung des eta SAK<sub>254</sub> als Regelgröße für eine bedarfsgerechte Ozondosierung.

**Bei der Ozonung wird folgende stoffspezifische Effizienz für die Spurenstoffelimination festgestellt:**

Ozonung	Spurenstoffe
Gut eliminierbar	Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Sulfamethoxazol
Maßig eliminierbar	Atenolol, Sotalol, Clarithromycin, Ibuprofen, Naproxen, Methyl-Benzotriazol, 1-H-Benzotriazol

Während der Ozonung von kommunalem Abwasser reagieren organische Spurenstoffe direkt mit Ozon bzw. mit Hydroxylradikalen. Dabei werden Spurenstoffe nicht vollständig mineralisiert, sondern es kommt zur Bildung sogenannter Transformationsprodukte (TP). Um das Entstehen dieser TP zu untersuchen, wurde im Rahmen des Projektes ein Suspected Target Screening (STS) durchgeführt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse des STS, dass während der Ozonung, wie erwartet, TP gebildet und somit Spurenstoffe nicht vollständig mineralisiert werden.

Es ist ein Trend zur Zunahme der Gesamtzahl an detektierten Transformationsprodukten mit Erhöhung der Ozondosis zu erkennen. Ob sich dieser allerdings mit weiterer Erhöhung der Ozondosis weiter fortsetzt, bleibt ungeklärt. Zudem sind die Konzentrationen der individuellen TP nicht erfassbar. Die in diesem Projekt angewendete biologische Nachbehandlung des ozonbehandelten Abwassers mit Blähton führt zu einer Reduktion der meisten detektierten TP. Allerdings ist sie nicht für den Abbau aller TP geeignet und führt auch nicht zu einer hohen Eliminationsleistung für alle abbaubaren TP. Ergänzend wurden ökotoxikologische Tests durchgeführt, die allerdings weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung festgestellt haben.

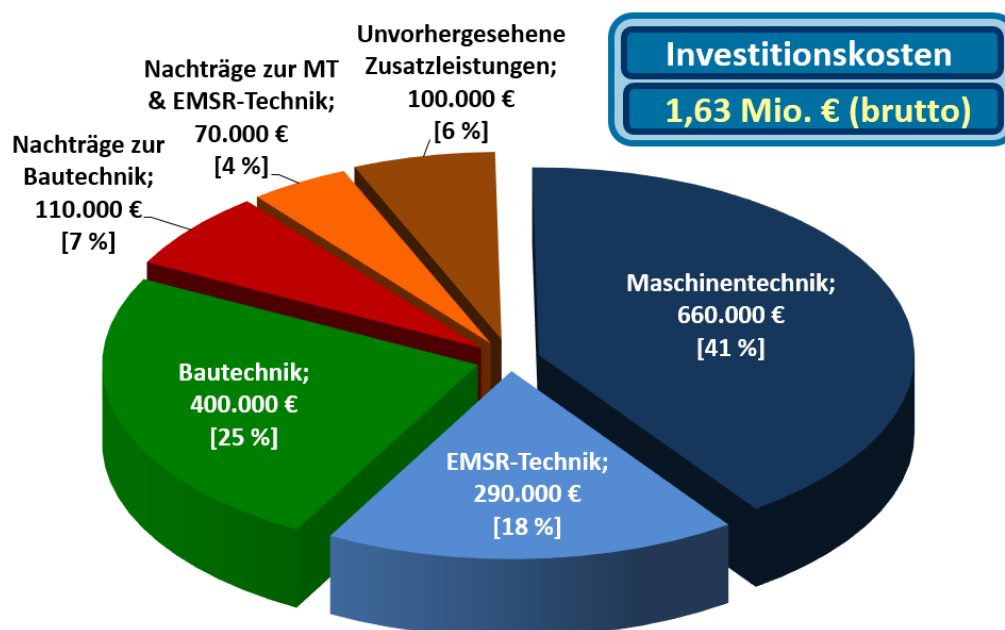
## 6 Betriebswirtschaftliche Betrachtungen

Für die Umrüstung der bestehenden BIOFOR®-Filteranlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen zur „4. Reinigungsstufe“ wurden Investitionskosten in Höhe von knapp 1.63 Mio. € (brutto) getätigt. Die zugehörige Planungsleistung (ca. 490 T€ brutto) des beauftragten Ingenieurbüros, sowie die erbrachte Eigeningenieurleistung sind in den folgenden Betrachtungen der Investitionskosten nicht enthalten. Da die Pilotanlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen auf Teilstrombehandlung ausgelegt wurde, entsprechen die dargestellten Investitionskosten der Herstellung einer Anlage mit je 30.000 EW, jeweils für Aktivkohlefiltration und Ozonung.

Die Aufteilung der Investitionskosten auf die verschiedenen Gewerke verdeutlicht **Tabelle 1** und **Bild 28**:

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Investitionskosten für den Umbau in Rodenkirchen**

Umbau der Filteranlage im Klärwerk Köln-Rodenkirchen	Summe Invest € netto	Summe Invest € brutto	Prozentual	Prozentual
Maschinentechnik	555.000 €	660.000 €	41%	} 83%
EMSR-Technik	244.000 €	290.000 €	18%	
Bautechnik	336.000 €	400.000 €	25%	
Nachträge zur Bautechnik	92.000 €	110.000 €	7%	} 17%
Nachträge zur MT & EMSR-Technik	59.000 €	70.000 €	4%	
Unvorhergesehene Zusatzleistungen	84.000 €	100.000 €	6%	
<b>SUMME:</b>	<b>1.370.000 €</b>	<b>1.630.000 €</b>		



**Bild 28: Aufteilung der Investitionskosten für den Umbau in Rodenkirchen**

Insgesamt sind etwa 17% der Investition in Nachrüstungen (Nachträge und Unvorhergesehenes) eingeflossen, was darauf hindeutet, dass trotz umfangreicher Planung die Errichtung einer 4. Reinigungsstufe immer noch mit einem mäßig bis hohen Aufwand an Nachbesserungen verbunden ist. **Vor dem Hintergrund betriebstauglicher Anwendbarkeit** bedürfen „neue Reinigungsverfahren“ in der Abwassertechnik noch einer entsprechenden „Nachjustierung“, sowohl bei den Herstellern als auch bei Bau und Betrieb, um mit zunehmenden Erkenntnisgewinn zukünftig eine bessere Marktgängigkeit und Harmonisierung der verfahrenstech. Produkte zu erreichen.



Bezogen auf die behandelte Abwassermenge im Teilstrombetrieb (1,47 Mio. m<sup>3</sup>/a) ergeben sich die spezifischen Betriebskosten, welche in Bild 29 dargestellt werden:

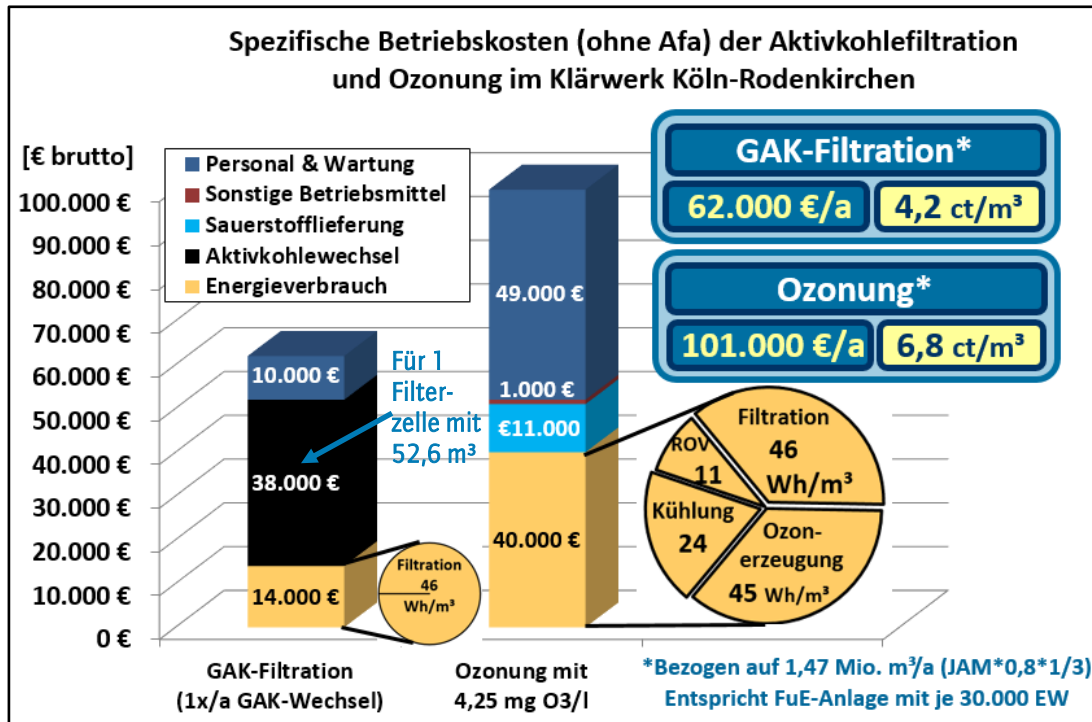


Bild 29: Spezifische Betriebskosten (ohne Afa) der Aktivkohlefiltration und Ozonung im KRO

Für eine Hochrechnung (Skalierung) auf das Großklärwerk Köln-Stammheim werden 49,5 Mio. m<sup>3</sup>/a Frischwasserbezug für eine Filteranlage mit 1,5 Mio. EW im Teilstrombetrieb angenommen. Ohne Betrachtung einer Abschreibung erreichen die abzurechnenden Kosten die folgenden Werte (Bild 30). Genauer kann nur eine Vorplanung für GWK Köln-Stammheim liefern.

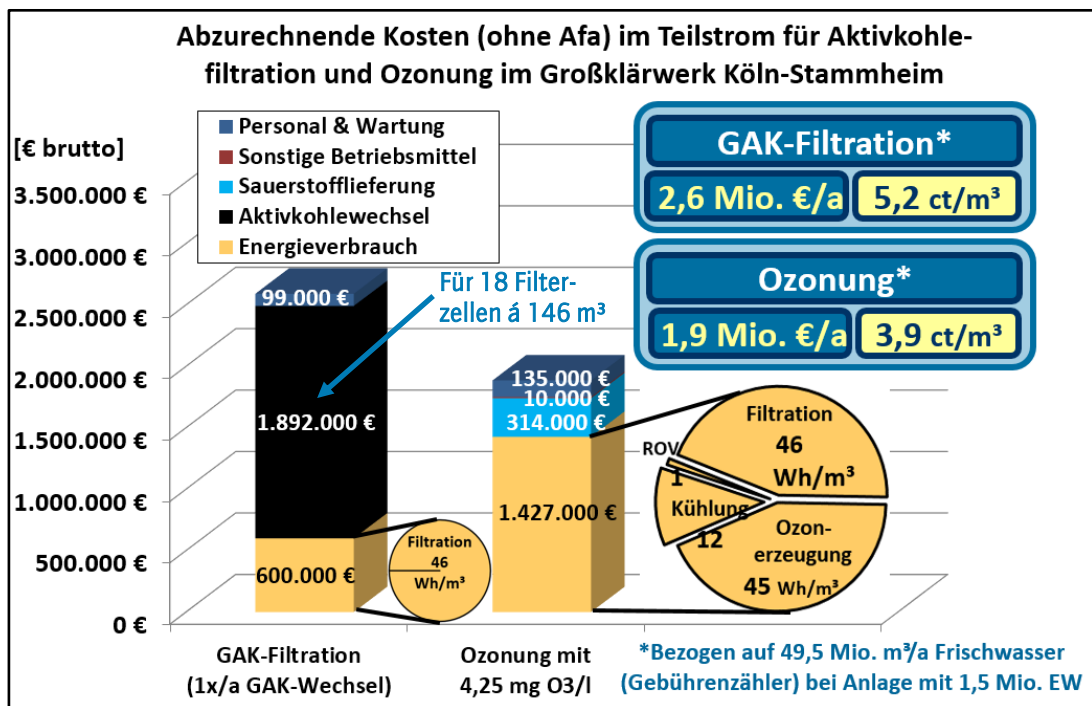


Bild 30: Abzurechnende Kosten (ohne Afa) der Aktivkohlefiltration und Ozonung im GWK

In **Tabelle 2** werden die gesamten Jahreskosten beider Reinigungsverfahren für die Klärwerke Köln-Rodenkirchen und Köln-Stammheim beziffert und miteinander verglichen, wobei die Abschreibungskosten für das Großklärwerk Köln-Stammheim eine ganz grobe Schätzung darstellen.

**Tabelle 2: Jahreskostenvergleich für 4. Reinigungsstufe im Klärwerk Rodenkirchen und im Großklärwerk Stammheim**

Reinigungsverfahren	Klärwerk Köln-Rodenkirchen Pilotanlage (je 30.000 EW)		Großklärwerk Köln-Stammheim Hochskalierte Filteranlage (1,5 Mio. EW)	
	GAK-Filtration	Ozonung	GAK-Filtration	Ozonung
Abschreibung (Afa)	171.000 €/a	171.000 €/a	833.000 €/a	1,83 Mio. €/a
Spez. Betriebskosten	62.000 €/a	101.000 €/a	2,6 Mio. €/a	1,9 Mio. €/a
Afa + spez. Betriebskosten	232.000 €/a	270.000 €/a	3,4 Mio. €/a	3,7 Mio. €/a
Kosten pro m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	15,7 ct/m <sup>3</sup>	18,3 ct/m <sup>3</sup>	5,3 ct/m <sup>3</sup>	5,8 ct/m <sup>3</sup>
Kosten pro m <sup>3</sup> Frischwasser- bezug ohne und mit Afa	5,5 – 20,4 ct/m <sup>3</sup>	8,8 – 23,8 ct/m <sup>3</sup>	5,2 – 6,9 ct/m <sup>3</sup>	3,9 – 7,5 ct/m <sup>3</sup>

Es wird ersichtlich, dass sich für das Klärwerk Rodenkirchen die GAK-Filtration mit Jahreskosten von ca. 232 T€/a brutto wirtschaftlicher gestaltet als die Ozonung, die bei Jahreskosten in Höhe von ca. 270 T€/a brutto liegt.

Für eine hochskalierte Filteranlage im Großklärwerk Köln-Stammheim scheint hingegen die Ozonung von den Betriebskosten her mit ca. 1,9 Mio. €/a brutto gegenüber der Aktivkohlefiltration mit ca. 2,6 Mio. €/a brutto wirtschaftlicher zu sein. Aufgrund des weitaus höheren Invests für die Ozonung und damit größeren Abschreibungssummen, gleichen sich die Jahreskosten beider Verfahren mit 3,4 – 3,7 Mio. €/a brutto auf einem Kostenniveau ähnlicher Größenordnung wieder an.

Für den Gebührenzahler werden mit einer 4. Reinigungsstufe im Großklärwerk Köln-Stammheim voraussichtlich Mehrkosten in Höhe von ca. 3,9 – 7,5 ct/m<sup>3</sup> für die Abwassergebühr prognostiziert.

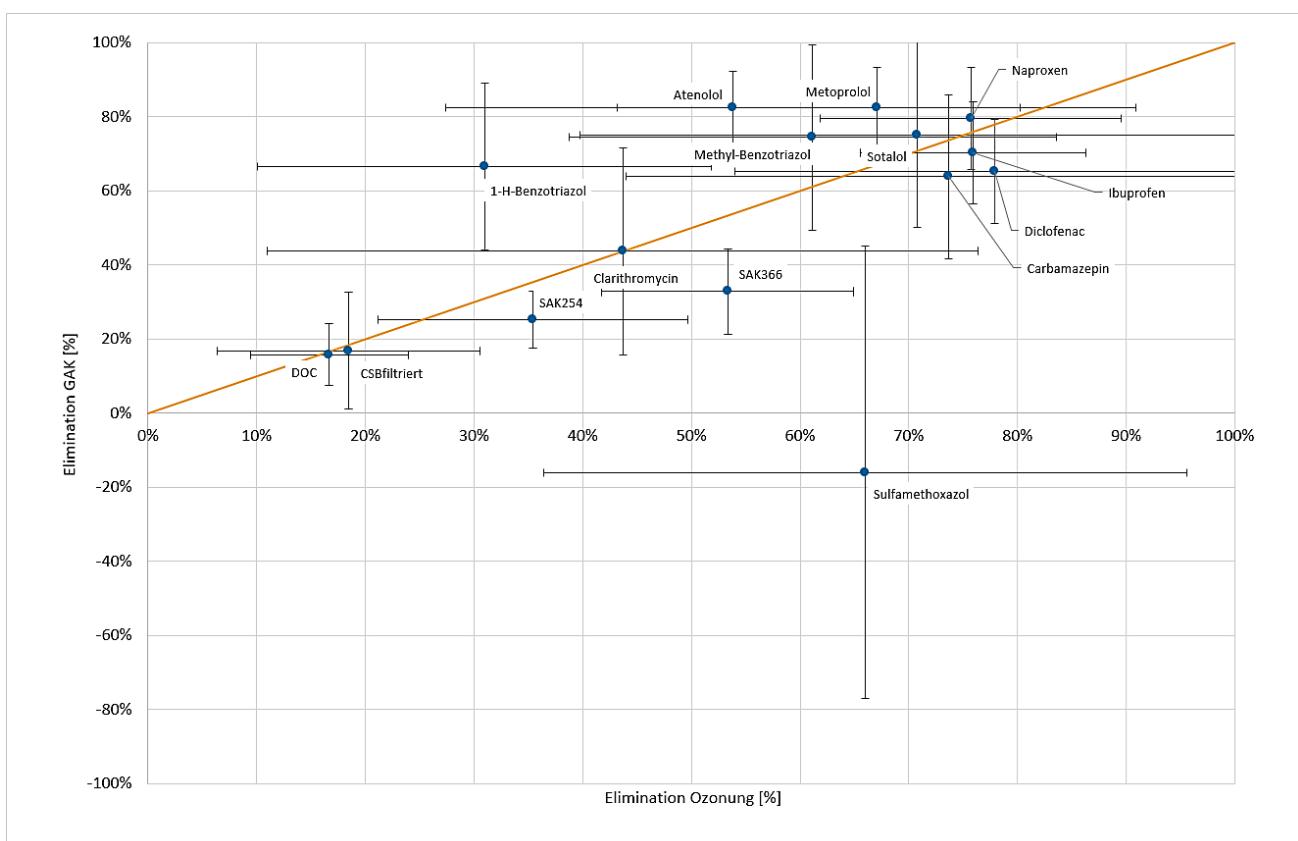
Zusammenfassend kann man sagen, dass für kleinere Klärwerke – wie Köln-Rodenkirchen – aus wirtschaftlicher Sicht die Aktivkohlefiltration favorisiert wird, während für größere Klärwerke – wie Köln-Stammheim – ohne eine konkrete Vorplanung gegenwärtig keine eindeutige Präferenz für eines der beiden untersuchten Reinigungsverfahren erteilt werden kann.

## 7 Bewertung und Gegenüberstellung der Verfahren

Zum Zweck einer Gegenüberstellung der Aktivkohlefiltration und Ozonung wurden beide Verfahren im Projekt „AdOx Köln“ hinsichtlich (A) Wirksamkeit, (B) Kosteneffizienz und (C) Betriebstauglichkeit bewertet.

### Wirksamkeit

**Bild 31** liefert eine zusammenfassende Bewertung der untersuchten Verfahren zur Spurenstoffelimination. Dabei ist auf der X-Achse die Reinigungsleistung der Ozonung und auf der Y-Achse die Reinigungsleistung der Aktivkohlefiltration aufgetragen. **Dabei zeigt sich eine stoffspezifische Wirksamkeit je nach Verfahren. Die Stoffe oberhalb der orangenen Linie sind besser durch GAK eliminierbar, während die Stoffe unterhalb der orangenen Linie sich besser durch die Ozonung eliminieren lassen.**



**Bild 31:** Vergleich der Spurenstoffelimination durch die Ozonung (0,06 – 0,66 mgO<sub>3</sub>/mgDOC) und die Aktivkohlefiltration (4.800 – 40.500 BV), dargestellt als Mittelwerte und Standardabweichung

Im Zuge des Projekts konnte ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Ozondosis und der Spurenstoffelimination mittels Ozon festgestellt werden. Die Elimination ist außerdem abhängig von der Reaktivität der Stoffe. Bei der GAK-Filtration nahm die Spurenstoffelimination mit Zunahme der durchgesetzten Bettvolumina ab. Außerdem konnte für einige Stoffe ein Zusammenhang zwischen einer längeren Kontaktzeit und besserer Elimination festgestellt werden.

**Aufgrund der ökotoxikologischen Wirktests lässt sich keine negative Auswirkung der Verfahren auf die Wasserqualität und somit auf die belebte Natur vermuten.**

**Beide Verfahren sind gleichermaßen für eine Reinigung und Einleitung in ein Gewässer geeignet.**

In Deutschland gibt es derzeit noch keine gesetzliche Regelung bezüglich der Spurenstoffelimination (Stoffe, Konzentration, Frachtreduktion, prozentuale Entlastung der Gewässerfracht). Um bewerten zu können, welche Reinigungsleistung die Pilotanlage erzielen muss, damit ein Gesamtwirkungsgrad von 80% gewährleistet werden kann, wurde im Projekt der Wirkungsgrad der biologischen Stufe des Klärwerks mit betrachtet. In der nachfolgenden **Tabelle 3** wird für unterschiedliche Wirkungsgrade der Biologie die notwendige Reinigungsleistung der Pilotanlage („4.Reinigungsstufe“) dargestellt, um einen Gesamtwirkungsgrad des Klärwerks von 80% zu erreichen. Bei einem Eliminationsgrad von z.B. 45,6% in der Biologie (Szenario 2), müsste die Pilotanlage lediglich einen Wirkungsgrad von 63,2% erzielen, damit das gesetzte Ziel erreicht wird.

**Tabelle 3: Betrachtete Szenarien zur Bewertung der Verfahren**

Varianten für Stoffauswahl „Alle Stoffe“: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Atenolol, Sotalol, N-Acetyl-Sulfamethoxazol, Ibuprofen, Sulfamethoxazol, 1H-Benzotriazol, Methylbenzotriazol	Elimination Biologie	Notwendige Elimination AdOx	Gesamt-elimination (Teilstrom)
1. Elimination Biologie als 25%-Quantil, Ziel Gesamtelimination 80%	31,7%	70,7%	80,0%
2. Elimination Biologie als Mittelwert, Ziel Gesamtelimination 80%	45,6%	63,2%	80,0%
3. Elimination Biologie als 25%- Quantil und Elimination AdOx 80%	31,7%	80,0%	86,3%
4. Elimination Biologie als 75%- Quantil und Elimination AdOx 80%	60,5%	80,0%	92,1%
Varianten für Stoffauswahl „KomS NRW“: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol, Sulfamethoxazol, 1H-Benzotriazol	Elimination Biologie	Notwendige Elimination AdOx	Gesamt-elimination (Teilstrom)
1. Elimination Biologie als 25%- Quantil, Ziel Gesamtelimination 80%	22,1%	74,3%	80,0%
2. Elimination Biologie als Mittelwert, Ziel Gesamtelimination 80%	36,4%	68,6%	80,0%
3. Elimination Biologie als 25%- Quantil und Elimination AdOx 80%	22,1%	80,0%	84,4%
4. Elimination Biologie als 75%- Quantil und Elimination AdOx 80%	52,6%	80,0%	90,5%

Bezüglich der Auswirkungen auf den Rhein wurde nach oben abgeschätzt, dass die Emission des GWK Stammheim die Fracht für Diclofenac und Ibuprofen im Rhein um etwa 9 % erhöhen. Beide Verfahren, Ozonung und Aktivkohlefiltration sind für diese Stoffe wirksam. Mit der Teilstrombehandlung auf Spurenstoffe wird für Stammheim eine Erfassung von 84 % der Fracht aus dem Ablauf der konventionellen Biologie erwartet. **Der Frachtzuwachs durch die Emission von Stammheim in den Rhein könnte durch eine Ozonung oder Aktivkohlefiltration für Diclofenac und Ibuprofen von 9% auf 2-3% gesenkt werden.** An dem Rheinabschnitt „Bad Honnef, Landesgrenze bis Leverkusen“ könnte damit die Überlastung für den gesetzlich nicht verbindl. Orientierungswert des Parameters Diclofenac durch eine Spurenstoffbehandlung in Stammheim vermindert werden, aber nicht eingehalten werden. **Um für den Rhein eine bessere Einstufung nach WRRL zu erreichen, ist es erforderlich, eine Spurenstoffbehandlung in Stammheim in eine länderübergreifende Bewirtschaftung einzubinden.**

Kosteneffizienz:

Bezüglich der Ozonung wird an vielen Stellen betriebskostenseitig noch Optimierungspotenzial gesehen. Je nach Einstellung der Ozonstufe ergibt sich ein unterschiedlicher Energiebedarf für Ozonerzeugung, Kühlung und Restozonvernichtung. Erhebliches Einsparpotenzial wird zudem in der Reduzierung von Förderhöhen gesehen. Darüber hinaus kann durch den zunehmenden, technischen Fortschritt in der Online-Analytik von SAK eine Einsparung erzielt werden. Je flacher der Sondendrift sich einstellt, umso länger kann der Intervall für die Sondenkopfreinigung gestreckt werden. Dies kann sich positiv auf den erforderlichen Personalaufwand auswirken. Alternativ können verbesserte Reinigungssysteme die Reinigungsintervalle verlängern.



Betriebstauglichkeit:

Die Akzeptanz des Betriebspersonals gegenüber neuen Reinigungsstufen bzw. neuen Verfahrenstechniken hängt maßgeblich mit einer Reihe an Kriterien zusammen, die in **Tabelle 4** aufgeführt werden:

**Tabelle 4: Einschätzung seitens des Betriebspersonals**

	Kriterium	Aktivkohlefiltration	Ozonung
1	Betrieblicher Inspektionsaufwand	Gering / Wenig zu inspizieren	Hoch / Viel zu inspizieren
2	Betrieblicher Reinigungsaufwand	Gering / Wenig zu reinigen	Sehr hoch / Sondenreinigung
3	Störanfälligkeit des Prozesses	Gering bei vorgeschalteter Siebanlage und geeigneten Spülintervall des GAK-Filters	Mittel bei gut eingestellter Regelung der Ozonbegasung
4	Überwachungsaufwand	Sehr gering / Wenig Prozessparameter	Hoch / Viele Prozessparameter
5	(Wieder-)Inbetriebnahmeaufwand	Hoch beim Einbau / Austausch der Aktivkohle, Inbetriebnahespülungen, Austrag Floaters	Sehr hoch / Einstellung der Regelung zur Ozonbegasung besonders langwierig
6	Betriebsmittel- / Chemikalieneinsatz	Kein Chemikalieneinsatz, einzig relevantes Betriebsmittel ist die granuliert Aktivkohle	Chemikalieneinsatz für SWAN-Messung und Reinigung der Sonden, Sauerstoffbevorratung
7	Arbeitsschutz	Wenige Punkte zu beachten	Viele Punkte zu beachten
8	Wartungsfreundlichkeit	Wartungsfreundliche Ausführung	Wenig wartungsfreundliche Ausführung
9	Prozesskomplexität	Mittlere Komplexität	Sehr hohe Komplexität
Gesamteindruck des Betriebspersonals		<i>„Unkomplizierte und prozessstabile Filtertechnik, deren Handhabung bereits mit dem BIOFOR®-Filter bekannt war. Einziger Anspruch liegt im Spülprogramm und Filtermaterialwechsel.“</i>	<i>„Komplexe und aufwändige Steuer- und Regelungstechnik, die viel Einarbeitung erfordert. Hoher Reinigungs- und Wartungsaufwand. Viele Überwachungsparameter.“</i>
Fazit:		<b>Hohe Akzeptanz</b>	<b>Erschwerte Akzeptanz</b>

Aufgrund der Tatsache, dass das Betriebspersonal bereits über langjährige Erfahrungen mit einer BIOFOR®-Filteranlage verfügt, waren mit dem Wechsel zu einem anderen Filtermaterial (hier: granuliert Aktivkohle) die grundlegenden Funktionalitäten und neuralgischen Anlagenpunkte bereits bekannt. Charakteristische Betriebspunkte der Aktivkohlefiltration, wie Inbetriebnahespülungen, Spülprogramm und Aktivkohlewechsel stellen einen überschaubaren Aufwand dar. Bei der Ozonung verhält es sich hingegen anders. Es handelte sich für den Klärwerksbetrieb um eine relativ „neue“ Verfahrenstechnik. Der Einarbeitungsaufwand in die Steuerung und Regelung der verschiedenen Anlagenteile bedarf hohem Engagement und ist gleichzeitig sehr zeitintensiv. Während die Aktivkohlefiltration quasi im Automatikbetrieb ohne besonderen Überwachungsbedarf läuft, muss bei der Ozonung eine Vielzahl an Überwachungsparametern ständig im Blick behalten werden. Hinzu kommt ein hoher Reinigungsaufwand (wöchentlich) für die Sonden und ein Handling von diversen Chemikalien, die seitens des Arbeitsschutzes auch erhöhter Aufmerksamkeit bedürfen. **Insgesamt genießt damit die Aktivkohlefiltration derzeit eine höhere Akzeptanz beim Betriebspersonal als die Ozonung.**

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der großtechnischen Untersuchungen im Klärwerk Köln-Rodenkirchen haben gezeigt, dass sowohl die Ozonung als auch die GAK-Filtration sich grundsätzlich als Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination eignen. Dabei werden jedoch diverse, verfahrensspezifische Unterschiede erkannt. Die Spurenstoffelimination in der Ozonanlage ist hauptsächlich von der Ozondosis und der Abwassermatrix abhängig. In der Ozonanlage können in Kombination mit der biologischen Nachbehandlung (Filter mit Blähton) bei spezifischen Ozondosen von 0,5 - 0,7 mg O<sub>3</sub>/mg DOC sieben der elf untersuchten Spurenstoffe zu > 80 % eliminiert werden. Bei einer spezifischen Ozondosis < 0,3 mg O<sub>3</sub>/mg DOC wird kein Spurenstoff zu mehr als 80 % eliminiert. Es zeigte sich, dass 1-H-Benzotriazol selbst bei den höchsten getesteten Ozondosen nur zu < 50 % eliminiert werden konnte. Sehr gut ließen sich in der Ozonungsstufe die Spurenstoffe Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol und Naproxen eliminieren. Bei der Ozonung von Abwasser entstehen Oxidationsnebenprodukte. Als toxikologisch am relevantesten wird Bromat eingestuft, welches aus Bromid gebildet wird. In der Ozonanlage der Kläranlage Köln Rodenkirchen wird Bromat in Abhängigkeit von spezifischer Ozondosis und Bromidkonzentration im Zulauf gebildet, jedoch sind die vorliegenden Messwerte für eine Bewertung des Risikos durch die Bromatbildung nicht ausreichend. Die Eliminationsleistung der GAK-Filtration wird dabei maßgeblich von den durchgesetzten Bettvolumina bestimmt. Bei 5.000 BV wurden zehn der elf untersuchten Stoffe zu > 80 % eliminiert, wohingegen es bei Versuchsende mit rd. 40.500 BV nur noch zwei Spurenstoffe waren, die dieses Kriterium erfüllten. Sulfamethoxazol konnte bereits ab Beginn der Untersuchungen < 50 % eliminiert werden. Atenolol und Sotalol konnten bis zum Versuchsende noch zu über 90 % eliminiert werden. Der vollständige Durchbruch des filtrierten CSB erfolgt bei etwa 10.000 BV und der des DOC bei etwa 13.500 BV ( $c/c_0 \approx 0,8$ ). Danach erfolgt bis zum Versuchsende noch eine Restelimination von etwa 15-20 %. Der BIOFOR®-Referenzfilter eignet sich nicht, um Spurenstoffe ausreichend aus dem Abwasser zu entfernen.

Die ökotoxikologischen Wirkttests fielen sowohl für die GAK-Filtration als auch für die Ozonung negativ aus. Das gereinigte Abwasser zeigte weder eine akute, noch eine chronische Wirkung auf Wasserorganismen, und auch die Embryotoxizität sowie Gentoxizität konnten ausgeschlossen werden. Demnach kann das Abwasser aus den Versuchsanlagen ohne negative Auswirkungen auf die Biozönose in ein Gewässer eingeleitet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass das Betriebspersonal bereits über langjährige Erfahrungen mit einer BIOFOR®-Filteranlage verfügt, waren mit dem Wechsel zu einem anderen Filtermaterial (hier: granuliert Aktivkohle) die grundlegenden Funktionalitäten und neuralgischen Anlagenpunkte bereits bekannt. Während die Aktivkohlefiltration quasi im Automatikbetrieb ohne besonderen Überwachungsbedarf läuft, muss bei der Ozonung eine Vielzahl an Überwachungsparametern ständig im Blick behalten werden. Hinzu kommt ein hoher Reinigungsaufwand (wöchentlich) für die Sonden und ein Handling von diversen Chemikalien, die seitens des Arbeitsschutzes auch erhöhter Aufmerksamkeit bedürfen. Der Einarbeitungsaufwand in die Steuerung und Regelung der verschiedenen Anlagenteile bedarf hohem Engagement und ist gleichzeitig sehr zeitintensiv. Insgesamt genießt damit die Aktivkohlefiltration derzeit eine höhere Akzeptanz beim Betriebspersonal im Klärwerk Köln-Rodenkirchen als die Ozonung.

Unter der Annahme der in Rodenkirchen gegebenen Randbedingungen zum Unbau der Pilotanlage sowie für einen Betriebsaufwand durch einen Kohlewechsel pro Jahr (28.100 BV) bzw. 4,25 mgO<sub>3</sub>/l betragen die spezifischen Kosten für das im Teilstrom behandelte Abwasser: 15,7 Ct/m<sup>3</sup> für die GAK und 18,3 Ct/m<sup>3</sup> für die Ozonung.

Die Vorplanung für Stammheim wurde nicht durchgeführt. Bei einer sehr groben Abschätzung des Investitionsaufwandes sowie unter der Annahme für einen mittleren Betriebsaufwand durch einen Kohlewechsel pro Jahr (24.500 BV) bzw. eine Ozondosis von 4,25 mgO<sub>3</sub>/l betragen die spezifischen Kosten der Teilstrombehandlung pro abrechenbare Kubikmeter Frischwasser: 6,9 Ct/m<sup>3</sup> für die GAK und 7,5 Ct/m<sup>3</sup> für die Ozonung. Werden die Kosten auf das behandelte Abwasser bezogen, auf einen Teilstrom von 80% der Jahresabwassermenge von Stammheim, dann werden die spezifischen Kosten für die Spurenstoffeliminatin mit GAK bzw. Ozonung auf insgesamt 5-6 Cent pro Kubikmeter behandeltes Abwasser abgeschätzt.

**Vor dem Hintegrund der Unschärfe für die Hochrechnung kann aus diesem geringen Kostenunterschied keine Verfahrensempfehlung abgeleitet werden.**

Für mögliche Investitionsentscheidungen im Zusammenhang mit einer 4. Reinigungsstufe im Großklärwerk Köln-Stammheim ist neben weiteren Untersuchungsbedarf (Betrachtung von optimierten GAK-Wechsel, GAK-Reaktivierung, Lebenszyklus-Auswertung, CO<sub>2</sub>-Footprint, Skalierung des Ozonreaktordesigns für eine optimale Begasung, Bereitstellung von Sauerstoff aus Eigenherstellung, mögliche Kombination beider Reinigungsverfahren zur Erschließung von Synergieeffekten etc.) auch eine reguläre Vorplanung erforderlich, um fundierte, effizienz- und wirtschaftlichkeitsbezogene Aussagen treffen zu können.

Was die Auswirkungen auf den Rhein betrifft, so erhöht die Einleitung des GWK Stammheim ohne Behandlung auf Spurenstoffe die Fracht im Rhein an Diclofenac und Ibuprofen nach oben abgeschätzt um jeweils etwa 9%. Durch eine Ozonung kann diese Frachtemission für Diclofenac um 60-80% und für Ibuprofen um 35-75% gesenkt werden. Mit Aktivkohle senkt sich die Frachtemission des GWK Stammheim in den Rhein für Diclofenac und Ibuprofen um 60-70%. Eine Spurenstoffbehandlung in Stammheim vermindert die Überlastung des Wasserkörpers. Um eine bessere Einstufung nach WRRL zu erreichen, ist eine länderübergreifende Bewirtschaftung des Rheines erforderlich.

#### **Fazit:**

**Vor einer betreiberseitigen Investitionsentscheidung zur Ertüchtigung des Großklärwerks Köln-Stammheim auf Spurenstoffentfernung ist eine Entscheidung der Bewirtschaftungsbehörden über das Bewirtschaftungsziel für die in Frage kommenden Spurenstoffe erforderlich, da nur auf dieser Grundlage eine effiziente Verfahrensauswahl mit einem entsprechenden Anlagendesign erfolgen kann.**

#### **Ausblick:**

Bei einer Kombination beider Verfahren (Ozon + GAK) werden Vorteile bei der Spuren- und Kohlenstoffelimination erwartet, da einige Spurenstoffe besser mittels der Ozonung und andere Spurenstoffe besser mittels einer GAK-Filtration eliminiert werden. Neben der verbesserten Spurenstoffelimination ist zu vermuten, dass sich die Standzeit der GAK mit einer vorgeschalteten Ozonung verlängert und sich damit auch betriebswirtschaftliche Vorteile ergeben. Bei einer Kombinationslösung wären geringe spezifische Ozondosen vermutlich ausreichend, sodass die Gefahr der Bildung von Oxidationsnebenprodukten eingeschränkt wäre.

**Die Verfahrenskombination könnte die optimale verfahrenstechnische Lösung zur Spurenstoffelimination für die Kölner Kläranlagen darstellen und sollte weiter untersucht werden.**