



Universität Stuttgart

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Effiziente und kostengünstige Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Renchen mittels Mikro-Granulataktivkohle

– Abschlussbericht –

Juli 2024

Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

Eine Kooperation von

DWA Landesverband Baden-Württemberg • Hochschule Biberach • Universität Stuttgart

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

„Effiziente und kostengünstige Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Renchen mittels Mikro-Granulataktivkohle“

Gefördert vom



Verbundpartner:

Abwasserverband Vorderes Renchtal	HOLINGER Ingenieure GmbH	Techfina SA	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

AutorInnen:

Abwasserverband Vorderes Renchtal: Christian Spinner, Lukas Lindemann

HOLINGER Ingenieure GmbH: Johanna Neef, Tobias Kamm

Techfina SA: Julian Fleiner

KomS: Philipp Hofmann, Katrin Merkler, Rico Rachel, Birthe Stricker, Maximilian Waibel, Vera Kohlgrüber

Stuttgart, im Juli 2024

Zitierung:

Spinner, C.; Neef, J.; Fleiner, J.; Kohlgrüber, V. (2024): Effiziente und kostengünstige Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Renchen mittels Mikro-Granulataktivkohle – Abschlussbericht, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	7
1 Einleitung.....	8
2 Grundlagen	10
2.1 Spurenstoffe im Ablauf von Kläranlagen	10
2.2 Aktivkohleverfahren in der Abwasserreinigung	12
2.3 Aktivkohle und ihre Eigenschaften	15
2.4 Wirbelbettverfahren in der biologischen Abwasserreinigung	17
2.5 Mikro-GAK-Verfahren.....	19
3 Material und Methoden.....	22
3.1 Kläranlage Renchen.....	22
3.2 Halbtechnische Versuchsanlage	25
3.3 Betrieb der Versuchsanlage	29
3.4 Mikro-GAK-Produkte	30
3.5 Versuchshistorie.....	31
3.6 Probenahme und Analytik	34
3.6.1 SAK ₂₅₄ / Δ SAK ₂₅₄	35
3.6.2 Trübung.....	35
3.6.3 Standardparameter	35
3.6.4 Spurenstoffe.....	36
3.6.5 Gradienten-Verfahren	38
4 Ergebnisse und Diskussion.....	39
4.1 Auswertung des Betriebs der Versuchsreaktoren	39
4.2 Spurenstoffentnahme der Kläranlage Renchen ohne 4. Reinigungsstufe	43
4.3 Spurenstoffentnahme des Mikro-GAK-Verfahrens	44
4.4 Einsatz von Surrogatparametern für die Betriebsoptimierung	49
4.5 Einsatz von Sonden zur Überwachung des Betriebs.....	51
4.5.1 SAK ₂₅₄ und Δ SAK ₂₅₄	51
4.5.2 Trübung.....	53
4.6 Einfluss der Betriebsgrößen auf die Entnahmeleistung des Mikro-GAK-Verfahrens	54
4.6.1 Durchflussmenge	54
4.6.2 Kontaktzeit	54
4.6.3 Mikro-GAK-Dosiermenge	56
4.7 Optimierung der Dosierstrategie.....	58
4.8 Feststofffreiheit des Ablaufs der Versuchsanlage	61
4.8.1 Trübungswerte für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs	61
4.8.2 Sichtfilterscheiben für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs	62
4.8.3 Gradienten-TOC-Verfahren für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs	63
4.9 Einfluss auf die Phosphorelimination.....	66

4.10 Einfluss auf pH, Leitfähigkeit und Redoxpotential	68
4.11 Reduktion organische Belastung	69
4.12 Durchflussproportionaler Betrieb	71
4.13 Reaktivierung der Mikro-GAK	73
4.14 Betriebsmittelverbrauch	74
4.15 Betriebskostenabschätzung	75
5 Fazit und Ausblick	77
Literaturverzeichnis	80
Anhang	84
I. Vergleichswerte Liste A	84
II. Spurenstoffkonzentrationen an den verschiedenen Probenahmestellen (Liste B)	86
III. Spurenstoffkonzentrationen an den verschiedenen Probenahmestellen (Liste A)	88
IV. Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Verfahren (Liste A)	89
V. Surrogatparameter – Korrelation DOC und Spurenstoffentnahme	91
VI. Abhängigkeit des Mikro-GAK-Verfahrens von verschiedenen Betriebsgrößen	92
VII. Trübungsverläufe für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs	95
VIII. Filtersichtscheiben	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Kläranlagen in Baden-Württemberg, die über eine Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination verfügen (Stand: April 2024).....	11
Abbildung 2-2:	Verfahren von GAK und PAK zum Einsatz zur gezielten Spurenstoffentnahme	13
Abbildung 2-3:	Verfahrensweisen der GAK Filtration (Grafik: Weber-Ingenieure GmbH aus DWA-AG KA-8.6, 2021)	14
Abbildung 2-4:	Grundbegriffe der Adsorption, Porenbezeichnung und Porentextur von granulierter Aktivkohle (Fundneider, 2020).....	15
Abbildung 2-5:	Visueller Vergleich von GAK (links) und PAK (rechts) (Ausschnitt aus DWA-AG KA-8.6, 2021).....	16
Abbildung 2-6:	Schematische Darstellung eines Schwebebettreaktor für an aerobe und anoxisch/ anaerobe Prozesse und ein Modell an einsetzbaren Kunststoff-Aufwuchskörper (Ødegaard, 1999)	17
Abbildung 2-7:	Schematische Darstellung der Vorgänge an einem GAK-Korn (Benstöm, 2017)...	18
Abbildung 2-8:	Schema des in der Schweiz angewandten Mikro-GAK-Verfahrens (VSA, 2024) ...	20
Abbildung 3-1:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Renchen	22
Abbildung 3-2:	Abbildungen der halbtechnischen Versuchsanlage // oben links: Ansicht der Versuchsanlage // oben rechts: Zulaufleitungen zu den Reaktoren // unten links: Überlaufschwelle an der Oberkante eines Reaktors // unten rechts: Schaltschrank zur Steuerung der Pumpentechnik und Mehrkanal-Controller	25
Abbildung 3-3:	Vereinfachtes R&I-Schema eines Reaktors der Versuchsanlage	26
Abbildung 3-4:	Eingebaute transparente Zwischenstücke als Sichtfenster nach dem Umbau	27
Abbildung 3-5:	Bodenverteilersystem vor dem Umbau (links) und nach dem Umbau (rechts).....	27
Abbildung 3-6:	Zeitlicher Verlauf der Betriebseinstellungen der Versuchsanlage und Benennung des jeweiligen Untersuchungsziels.....	33
Abbildung 4-1:	Kontaktzeit während des Versuchsbetriebs auf der Kläranlage Renchen	40
Abbildung 4-2:	Mittlere Mikro-GAK-Dosis in den verschiedenen Versuchsphasen.....	41
Abbildung 4-3:	Entnahme der 7 BW Substanzen durch die mechanische und biologische Stufe der Kläranlage Renchen	43
Abbildung 4-4:	Entnahme unterschiedlicher Humanarzneimittel in den Mikro-GAK-Reaktoren (Gestrichelte Balken stellen eine Entnahme des Spurenstoffs bis unter die Bestimmungsgrenze dar)	45
Abbildung 4-5:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 1 (Kohle A).....	46
Abbildung 4-6:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 1 (Kohle C)	47
Abbildung 4-7:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 2 (Kohle B), am 15.07. fand keine Spurenstoffmessung in Reaktor 2 statt.....	48
Abbildung 4-8:	Korrelation des ΔSAK_{254} und der mittleren Spurenstoffentnahme der 7 BW Substanzen.....	50
Abbildung 4-9:	Darstellung der Bereinigung der Sondenmesswerte	51
Abbildung 4-10:	Korrelation des SAK_{254} gemessen aus der 24h-Mischprobe (Labor) und dem über 24 Stunden gemittelten Wert der Onlinesonde (Sensor)	52
Abbildung 4-11:	Korrelation des ΔSAK_{254} berechnet aus den im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe ermittelten Werten (Labor) und den aus den über 24 Stunden gemittelten Onlinemesswerten (Sensor) berechneten Werten	52
Abbildung 4-12:	Korrelation der Trübung gemessen aus der 24h-Mischprobe (Labor) und dem über 24 Stunden gemittelten Wert der Onlinesonde (Sensor)	53

Abbildung 4-13:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen getesteten Kohleprodukten in Abhängigkeit des Soll-Durchflusses (Auswahl der Daten: Dosis > 2,8 und < 5,2 g/m ³); Fehlerbalken stellen Max und Min-Werte dar	54
Abbildung 4-14:	Entnahme des SAK ₂₅₄ und des DOC in den Reaktoren in Abhängigkeit der Kontaktzeit	55
Abbildung 4-15:	Entnahme von 1H-Benzotriazol (gut adsorbierbar) und Candesartan (mäßig adsorbierbar) in den Reaktoren in Abhängigkeit der Kontaktzeit	55
Abbildung 4-16:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen getesteten Kohleprodukten in Abhängigkeit der Dosiermenge; Fehlerbalken stellen Max und Min-Werte dar	56
Abbildung 4-17:	Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen Mikro-GAK-Produkten in Abhängigkeit der Mikro-GAK-Dosis	57
Abbildung 4-18:	Δ SAK ₂₅₄ im Zeitraum von 06. September bis zum 09. November 2023 während der Optimierungsphase der Dosierung im Reaktor 1 mit Kohle C	58
Abbildung 4-19:	Δ SAK ₂₅₄ im Zeitraum von 06. September bis zum 09. November 2023 während der Optimierungsphase der Dosierung im Reaktor 2 mit Kohle B	59
Abbildung 4-20:	Spurenstoffentnahme durch Reaktor 1 mit Kohle C und Reaktor 2 mit Kohle B im September 2023 (rosa Bereich in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19)	60
Abbildung 4-21:	Mittlere, sowie maximale und minimale Trübung im Ablauf der Nachklärung (=Zulauf Versuchsanlage) und im Ablauf der Versuchsanlage (Laborwerte)	62
Abbildung 4-22:	Aktivkohle-Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage in verschiedenen Zeitschritten nach Dosierung von frischer Mikro-GAK	64
Abbildung 4-23:	Aktivkohle-Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage in verschiedenen Zeitschritten nach Dosierung von frischer Mikro-GAK	65
Abbildung 4-24:	Schematische Darstellung der P-Fractionen im Abwasser (DWA-AG KA-8.3, 2023)	66
Abbildung 4-25:	Verlauf des Δ SAK ₂₅₄ während des durchflussproportionalen Betriebs	72
Abbildung 4-26:	Betriebskostenvergleich für verschiedene Verfahren der Spurenstoffentfernung...	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vergleich des Rohstoffbedarfs, primären fossilen Energieverbrauchs und CO ₂ -Fußabdrucks für frische Aktivkohle (AK) und Reaktivat (modifiziert nach DWA-AG KA-8.6, 2016).....	15
Tabelle 2-2:	Eigenschaften von granulierter und Pulveraktivkohle im Vergleich (Metcalf & Eddy, 2014).....	16
Tabelle 2-3:	Kenngößen aus der Praxis für Mikro-GAK-Verfahren in der Schweiz (VSA, 2024)	20
Tabelle 3-1:	Charakterisierung der Kläranlagenablaufs der Kläranlage Renchen für die Jahre 2017 bis 2019	24
Tabelle 3-2:	Abfiltrierbare Stoffe im Ablauf der Kläranlage Renchen im November 2020	24
Tabelle 3-3:	Technische Daten der Versuchsanlage	28
Tabelle 3-4:	An der Versuchsanlage installierte Messtechnik	28
Tabelle 3-5:	Produktspezifikationen gemäß Hersteller der verwendeten Mikro-GAK-Produkten	30
Tabelle 3-6:	Übersicht über die durchgeführten Probenahmen in den einzelnen Versuchsphasen	34
Tabelle 3-7:	Substanzen der KomS Spurenstoffliste A	37
Tabelle 3-8:	Substanzen der KomS Spurenstoffliste B, mit * sind die Substanzen gekennzeichnet, die zur Berechnung der erforderlichen, mittleren Spurenstoffentnahme in Baden-Württemberg herangezogen werden	38
Tabelle 4-1:	Mittlere und spezifische Mikro-GAK-Dosis in den verschiedenen Versuchsphasen	41
Tabelle 4-2:	Zusammenfassung des Betriebs der Versuchsreaktoren während der einzelnen Versuchsphasen	42
Tabelle 4-3:	Beschreibung der Sichtfilterscheiben und Vergleich mit den Ergebnissen der Trübungsmessung	63
Tabelle 4-4:	Konzentrationen der Phosphorfractionen	67
Tabelle 4-5:	Messwerte des pH-Wertes, der Leitfähigkeit und des Redoxpotentials	68
Tabelle 4-6:	DOC-Konzentration in den verschiedenen Versuchsphasen	69
Tabelle 4-7:	DOC-Elimination in den verschiedenen Versuchsphasen (grün: Entnahme > 20 %, gelb: Entnahme > 10 %)	70
Tabelle 4-8:	Eigenschaften der Mikro-GAK-Proben vor der Reaktivierung	73
Tabelle 4-9:	Iod- und Melassezahl der reaktivierten Kohle, sowie die im Produktdatenblatt für das frische Produkt angegebenen Spezifikationen	73
Tabelle 4-10:	Einheitspreise für Betriebskosten für die Kläranlage Renchen (netto)	75
Tabelle 4-11:	Dosiermengen für weitere Verfahren zur Spurenstoffentfernung	75

1 Einleitung

In Deutschland ist Baden-Württemberg Vorreiter auf dem Gebiet der gezielten Spurenstoffelimination aus kommunalen Abwässern. Von aktuell insgesamt 50 weitergehenden Abwasserreinigungsstufen zur Spurenstoffelimination befinden sich 30 in Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 2-1). Eingesetzt werden dazu verschiedene Verfahren: die oxidative Elimination mittels Ozonung und die adsorptive Entnahme mit Pulveraktivkohle (PAK) oder granulierter Aktivkohle (GAK). Zusätzlich kommen Kombinationen aus oxidativen Verfahren (Ozonung) und adsorptiven Verfahren (GAK) zum Einsatz. Während in Baden-Württemberg Ozonung allein oder in Kombination mit GAK auf vier Anlagen eingesetzt wird, setzt der überwiegende Teil der Kläranlagenbetreiber auf Aktivkohle. Von diesen wird auf acht Anlagen GAK eingesetzt und PAK auf den restlichen 18. Die Auswahl, ob eine Kläranlage PAK oder GAK einsetzt, muss anhand vieler Kriterien abgewogen werden. Drei wichtige Kriterien sind Nachhaltigkeit, Dynamik und Handhabbarkeit des Systems. GAK ist im Hinblick auf Nachhaltigkeit der PAK aktuell überlegen, da GAK nach Einsatz und Beladung reaktiviert und wiedereingesetzt werden kann, wohingegen PAK nach Dosierung im Schlamm verbleibt und mit verbrannt wird. Mit PAK wiederum kann dynamisch auf Schwankungen im Zulauf reagiert werden, indem die Dosiermenge in Abhängigkeit von der Zulaufmenge angepasst wird. Da GAK bevorzugt in Festbettadsorbern eingesetzt wird, ist hier eine kurzfristige Anpassung der Reinigungsleistung über die Kohlemenge nicht möglich. Letztlich ist ein weiterer Vorteil von GAK, dass das Handling vergleichsweise einfach ist, Da im Gegensatz zu PAK nicht auf Ex-Schutz geachtet werden muss.

Im Hinblick auf die Novellierung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist abzusehen, dass es perspektivisch eine gesetzliche Pflicht zur Spurenstoffelimination auf großen Kläranlagen (>150.000 EW) und teilweise auch auf kleineren Kläranlagen (>10.000 EW, nach Risikobewertung) geben wird (Canfin, 2024). Da die in der weitergehenden Abwasserreinigung eingesetzte Aktivkohle in der Regel aus Braun- oder Steinkohle hergestellt wird ist ein nachhaltiger Umgang mit diesem Material unerlässlich (DWA-AG KA-8.6, 2021; Benstöm, 2017). Vor diesem Hintergrund sind eine Optimierung und Weiterentwicklung der bereits eingesetzten Verfahren sinnvoll bzw. notwendig. Eine solche Weiterentwicklung stellt das Verfahren der Mikro-GAK (auch: μ GAK) im Schwebebett dar. Bei diesem Verfahren wird GAK, die einen kleineren Korndurchmesser als reguläre GAK hat, eingesetzt. Die Mikro-GAK wird in aufwärtsdurchströmten Reaktoren mit dem zu behandelnden Abwasser in Kontakt gebracht, wobei ein Teil der Spurenstoffe adsorptiv entfernt wird. Dieses Verfahren wurde deutschlandweit bisher nicht erprobt, lediglich in der Schweiz gab es Pilotstudien und zwischenzeitlich wird das Verfahren auf zwei großtechnische Anlagen eingesetzt. Trotz der bereits erfolgten großtechnischen Umsetzung sind viele Fragestellungen noch nicht vollständig geklärt. Um die Betriebsweisen und das Optimierungspotenzial des Verfahrens im großtechnischen Betrieb zu untersuchen, wurde im März 2021 das Projekt mit dem Titel „Effiziente und kostengünstige Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Renchen mittels Mikro-Granulataktivkohle“ vom Abwasserverband Vorderes Renchtal beantragt. Das

Projekt wird durch Partner aus dem Projektverbund bestehend aus dem Abwasserverband Vorderes Renchtal, dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, der HOLINGER Ingenieure GmbH und der Techfina SA gemeinsam bearbeitet. Die Förderung des Projekts erfolgt durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Zur Untersuchung des Mikro-GAK-Verfahrens wurde auf der Kläranlage des Abwasserverband Vorderes Renchtal in Renchen eine halbtechnische Versuchsanlage installiert und über einen Zeitraum von zwei Jahren betrieben. Durch den Betrieb sollten Daten zur Beantwortung der offenen Fragestellungen gesammelt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Test des Betriebs des Mikro-GAK-Verfahrens und Nachweis der in Baden-Württemberg geforderten mittleren Spurenstoffentnahme
- Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit der Mikro-GAK auf die mittlere Spurenstoffentnahme der in Baden-Württemberg geforderten Substanzen
- Optimierung der eingesetzten Mikro-GAK Menge und des Anlagenbetriebs durch Variation der Dosiermenge und des Dosierintervalls der Mikro-GAK
- Nachweis der Feststofffreiheit und somit auch des Mikro-GAK-Rückhalts im Ablauf des Mikro-GAK Reaktors
- Test von verschiedenen Mikro-GAK Produkten
- Klärung der Randbedingungen für die Regeneration von Mikro-GAK mit den Kohleherstellern
- Untersuchung zur biologischen Wirkung der Mikro-GAK im Reaktor
- Nachweis einer weitestgehenden Phosphorelimination
- Ermittlung des Betriebsmittelverbrauchs
- Betriebskostenabschätzung im Vergleich zu anderen Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die relevanten Grundlagen zum besseren Verständnis des Mikro-GAK-Verfahrens beschrieben. Im Anschluss erfolgen eine Beschreibung des eingesetzten Materials und der verwendeten Methoden. Die gesammelten und aufbereiteten Daten werden dargestellt und anschließend hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich der vorgegebenen Forschungsfragen diskutiert. Abschließend folgen ein Fazit sowie ein Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Spurenstoffe im Ablauf von Kläranlagen

Unter dem Begriff Spurenstoffe wird eine Vielzahl an Einzelstoffen zusammengefasst, die in Konzentrationen zwischen Nano- bis einigen Mikrogramm pro Liter in Abwasser vorkommen und anthropogenen Ursprungs sind (KomS, Spurenstoffe im Abwasser - Eine Handlungsempfehlung für Kommunen, 2020). Spurenstoffe werden in konventionellen kommunalen Kläranlagen nur teilweise aus dem Abwasser entfernt, bevor dieses über die Vorfluter wieder in den natürlichen Wasserkreislauf zurückgeführt wird. Um Organismen wie auch natürliche Wasserreserven vor Kontamination zu schützen, ist eine weitergehende Abwasserbehandlung notwendig.

Da das Monitoring aller umweltrelevanten Substanzen aufgrund des Ausmaßes unmöglich ist, muss eine Auswahl an relevanten Stoffen getroffen werden. In Baden-Württemberg wurden dazu vom KomS die Liste A und die Liste B veröffentlicht (KomS, 2018). Die Liste A beinhaltet 47 Substanzen aus diversen Stoffgruppen mit unterschiedlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften und dient insbesondere dazu einen Überblick über die Spurenstoffsituation einzelner Kläranlagen zu erhalten und diese mit anderen (kommunalen Kläranlagen) zu vergleichen. Die Substanzen der Liste A sind im Rahmen von Vergleichskontrollen vor dem Ausbau und in größeren Abständen im Betrieb zu analysieren. Die KomS Liste B umfasst zehn Substanzen aus der Gruppe der Arzneimittelwirkstoffe und der Korrosionsschutzmittel. Die Substanzen der Liste B werden für die Betriebsüberwachung in regelmäßigen Abständen analysiert. Laut den „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination“ des KomS und dem „Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg“ sind Spurenstoffeliminationsverfahren so zu betreiben, dass die Kläranlage an Tagen mit Abflüssen von maximal $Q_{\text{Spur,max}}$ im Mittel eine Spurenstoffeliminationsleistung von mindestens 80 % aufweist (UMBW, Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, 2018; KomS, 2018). Zu Grunde gelegt wird hier die mittlere Entnahmeleistung der Substanzen Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, 1H-Benzotriazol und Tolyltriazol (auch Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol genannt), die auch als 7 BW Substanzen bezeichnet werden.

Stand April 2024 sind in Baden-Württemberg 30 Kläranlagen mit einer Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination ausgestattet. Mit diesen Anlagen wird das Wasser von 20 % der Bevölkerung von Baden-Württemberg behandelt (vgl. Abbildung 2-1). Weitere 31 Anlagen befinden sich allein in Baden-Württemberg aktuell in der Planung oder sind bereits im Bau.

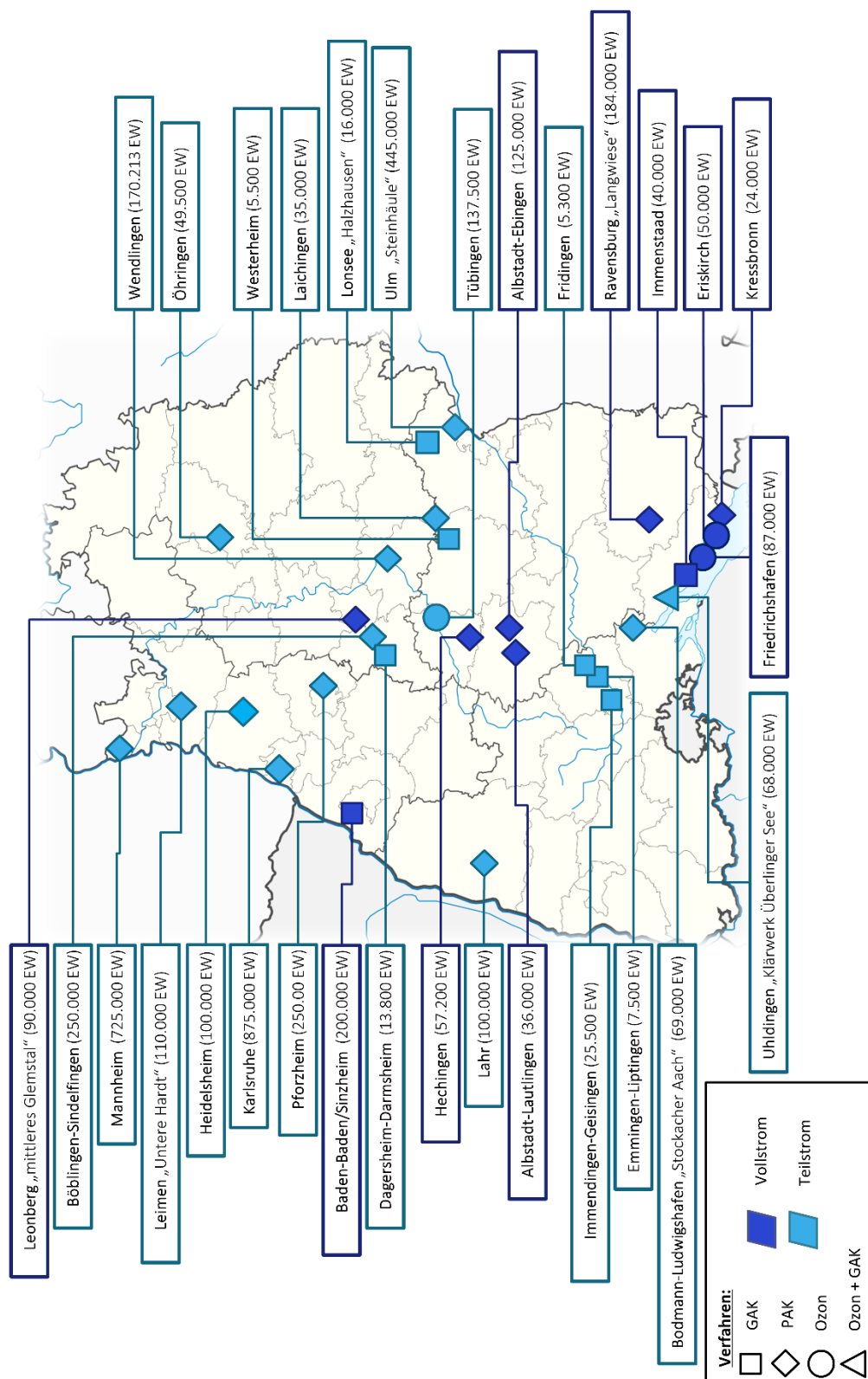


Abbildung 2-1: Kläranlagen in Baden-Württemberg, die über eine Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination verfügen (Stand: April 2024)

2.2 Aktivkohleverfahren in der Abwasserreinigung

Abbildung 2-1 zeigt die Verteilung der in Baden-Württemberg eingesetzten Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination. Es gibt spezifische Vor- und Nachteile, die bei der Auswahl eines Verfahrens abhängig von den Standortbedingungen gegeneinander abgewägt werden. Das im Rahmen des Projekts untersuchte Mikro-GAK-Verfahren zählt, wie Verfahren unter Einsatz von PAK- und GAK, zu den adsorptiven Verfahren. Im bisherigen Ausbauzustand benutzen 18 der 30 Kläranlagen PAK und 8 von 30 Anlagen GAK.

Da das feine Pulver der Pulveraktivkohle nicht direkt ins Abwasser dosiert werden kann, wird PAK zunächst in eine wässrige Suspension versetzt. Die PAK-Suspension kann anschließend in den Fließprozess der Kläranlage dosiert werden, wobei unterschiedliche Verfahrensvarianten gefahren werden können. Die baulich und verfahrenstechnisch einfachste Art der Dosierung ist direkt in die biologische Stufe als Simultandosierung (DWA-AG KA-8.6, 2021). Alternativ kann PAK in einer separaten, nachgeschalteten Adsorptionsstufe dosiert werden. Dies geschieht als Dosierung direkt vor einen Filter oder nach dem sogenannten „Ulmer Verfahren“ in eine Adsorptionsstufe bestehend aus Kontaktreaktor und Sedimentationsbecken (DWA-AG KA-8.6, 2021). Im „Ulmer Verfahren“ wird zudem die PAK in Form von Kohleschlamm aus der Sedimentation in den Kontaktreaktor zurückgeführt, was zum einen die Auslastung/Beladung der Kohle erhöht und zum anderen durch Gegenstrom-Führung die Aufenthaltszeit der PAK im System von der Aufenthaltszeit des Abwassers entkoppelt (DWA-AG KA-8.6, 2019). Durch eine Rückführung der teilbeladenen Kohle in die biologische Stufe kann die Adsorptionskapazität bei den nachgeschalteten Verfahren besser ausgenutzt werden (DWA-AG KA-8.6, 2019). In der Regel ist ein Filter im Abstrom der Dosierstelle notwendig, um einen Austrag der PAK aus der Kläranlage zu verhindern (DWA-AG KA-8.6, 2021). Um die PAK zuverlässig abzutrennen, bedarf es je nach Filtertyp der Dosierung eines Fällmittels zur Flockungsfiltration (DWA-AG KA-8.6, 2021). Die drei Verfahrensvarianten der PAK-Dosierung sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

Aufgrund der feinen Vermahlung besitzt PAK eine deutlich höhere spezifische Oberfläche. Dadurch finden Adsorptionsprozesse schneller statt als bei granulierter Aktivkohle. Außerdem wird PAK in Suspensionen direkt in den Klärprozess dosiert, wodurch eine temporäre Anpassung der spezifischen Dosiermenge möglich ist, bspw. bei erhöhten Zulaufkonzentrationen, was einen weiteren Vorteil der Pulveraktivkohle darstellt. Ein Nachteil gegenüber GAK ist, dass aufgrund der feinen Vermahlung eine Staubexplosionsgefahr besteht. Eine explosionsfähige Atmosphäre ist beim Be-/Entladen daher zu vermeiden (DWA-AG KA-8.6, 2019). Zwar ist PAK schwer entflammbar, jedoch können durch ablaufende oxidative Prozesse insbesondere in großen Silos Glutnester durch Selbstentzündung entstehen, die zu einer Kohlenstoffmonooxidbildung führen (DWA-AG KA-8.6, 2019). Durch die direkte Dosierung ist PAK im Gegensatz zu GAK außerdem derzeit nicht wieder zurückgewinn- und reaktivierbar.

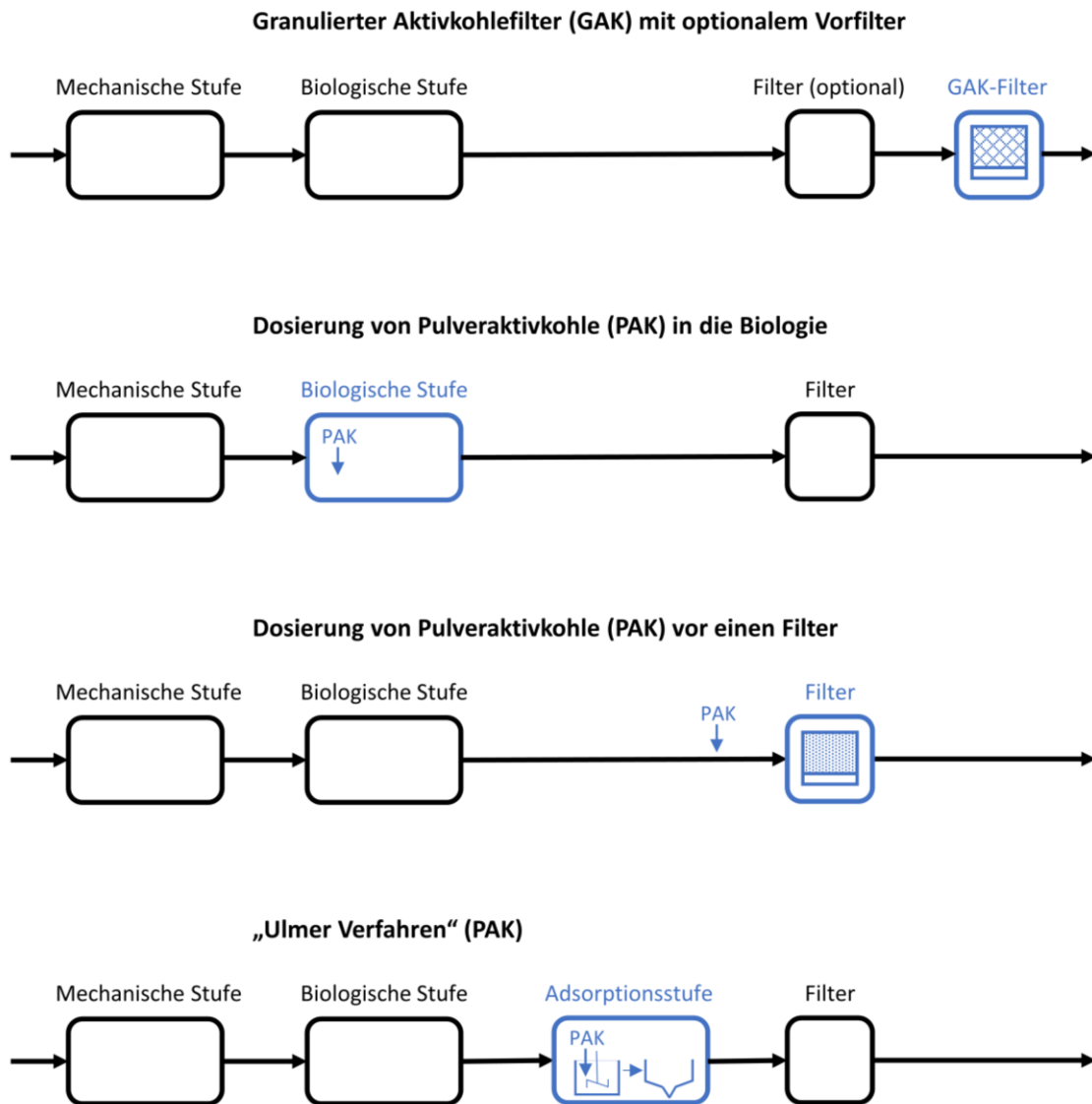


Abbildung 2-2: Verfahren von GAK und PAK zum Einsatz zur gezielten Spurenstoffentnahme

Wie in Abbildung 2-2 gezeigt, wird granulierte Aktivkohle als GAK-Filter der biologischen Stufe nachgeschaltet. Die Filter enthalten ein fixes Bettvolumen und können sowohl im Teil- als auch Vollstrom des Kläranlagenablaufs betrieben werden. In der Verfahrensweise werden offene und geschlossene (Druckkessel), aufwärts- und abwärtsdurchströmte, sowie diskontinuierlich- und kontinuierliche durchströmte Filter unterschieden, wie in Abbildung 2-3 gezeigt.

Dem GAK-Filter können physikalische oder oxidative Prozesse (z.B. Ozonung) vorgeschaltet werden. Ein Vorfilter kann die Belastung des nachfolgenden GAK-Filters reduzieren, wenn der Ablauf der Kläranlage hohe AFS-Werte aufweist (DWA-AG KA-8.6, 2021). Durch den ortsfesten Einsatz in GAK-Filtern ist GAK relativ einfach aus dem System zu entfernen. Die gröbere Partikelstruktur ermöglicht eine thermische Regenerierung und Reaktivierung, dabei werden die adsorbierten Spurenstoffe in der Regenerierung desorbiert und anschließend thermisch zerstört (Benstöm, 2017). Die reaktivierte Aktivkohle kann erneut im Prozess

eingesetzt werden. Aufgrund der gröberen Struktur der GAK ist dieser Prozess frei von Staub, wodurch keine Staubexplosionsgefahr besteht und die Handhabung vereinfacht wird.

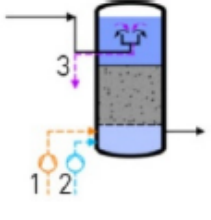
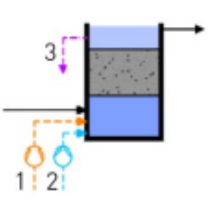
Betriebsweise	diskontinuierlich		kontinuierlich
Bauform	Druckkessel	offen	
Fließrichtung	abwärts		aufwärts
Schema			
	1 - - - - Spülluft 2 - - - - Spülwasser 3 - - - - Schlammabwasser		

Abbildung 2-3: Verfahrensweisen der GAK Filtration (Grafik: Weber-Ingenieure GmbH aus DWA-AG KA-8.6, 2021)

Beim Einsatz von PAK ist in der Regel mit einem Verbrauch von $1 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{mg}_{\text{DOC,NK-Abl.}}$ im „Ulmer Verfahren“ zu rechnen, bei der Simultandosierung erhöht sich die Menge um das 2,5-fache und bei der Dosierung vor einen Filter um das 1,5-fache (DWA-AG KA-8.6, 2021). Für GAK ist dagegen der Parameter der durchgesetzten Bettvolumen entscheidend, was dem behandelten Abwasser bezogen auf das Volumen der GAK-Schüttung ($\text{m}^3_{\text{Abwasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK-Filtervolumen}}$) entspricht. Da die Entnahmeleistungen der GAK mit zunehmendem Bettvolumen abnehmen, können Filterzellen mit neuerer GAK die Entnahmeleistungen älterer Zellen ausgleichen (Böhler, Joss, & McArdell, 2022). Ab 20.000 bis 30.000 Bettvolumen nehmen die Schwankungen der Spurenstoffentnahme meist zu, sodass nach diesen Bettvolumen je nach Abwassermatrix und DOC ein Austausch der granulierten Aktivkohle nötig werden kann (Böhler, Joss, & McArdell, 2022; Taudien, Kolisch, Bornemann, & Nahrstedt, 2020). Bei industriellem Abwasser mit hohem DOC wird von einem früheren Austausch nach 15.000 bis 20.000 Bettvolumen ausgegangen (Böhler, Joss, & McArdell, 2022).

Die Herstellung von frischer Aktivkohle ist ein energetisch intensiver Prozess. Der Verbrauch an Rohstoffen und fossilen Primärenergieträgern beeinflusst den CO_2 -Fußabdruck und die Ökobilanz der Aktivkohleprozesse (DWA-AG KA-8.6, 2016). Ein Überblick für Frischkohle und Reaktivaten ist in Tabelle 2-1 gezeigt. Durch Verwendung von Reaktivaten kann der CO_2 -Fußabdruck der Aktivkohleprozesse nachweislich gesenkt werden, wobei derzeit nur frische Kohle für PAK-Prozesse eingesetzt werden kann (DWA-AG KA-8.6, 2021). Aufgrund des hohen Aktivkohlebedarfs und den ökologischen Nachteilen von Frischkohle bedarf es der Entwicklung nachhaltigerer Verfahren.

Tabelle 2-1: Vergleich des Rohstoffbedarfs, primären fossilen Energieverbrauchs und CO₂-Fußabdrucks für frische Aktivkohle (AK) und Reaktivat (modifiziert nach DWA-AG KA-8.6, 2016)

Rohstoff		Rohstoffbedarf	Primärenergiever- brauch fossil	CO ₂ -Fußabdruck
		$[t_{\text{Rohstoff}}/t_{\text{AK}}]$	$[GJ/t_{\text{AK}}]$	$[t_{\text{CO}_2\text{-Äquivalent}}/t_{\text{AK}}]$
Steinkohle	FrISChe AK	3,5 – 5	109 – 124	11 – 18
	Reaktivat	-	17 – 29	2 – 3
Braunkohle	FrISChe AK	5 – 6,5	152 – 184	14 – 18
	Reaktivat	-	20 – 37	2 – 4
Kokosnussschalen	FrISChe AK	10 – 13	28 – 51	5 – 7
	Reaktivat	-	9 – 14	1

Eine Option der Verfahrensoptimierung wird mit den Mikro-GAK-Verfahren untersucht, in dem die Vorteile von PAK und GAK Prozessen durch die Verwendung von kleinerer GAK (Mikro-GAK) ausgenutzt werden sollen mit der Option der Dosierungsanpassung bei gleichzeitiger Option der Regenerierung und Reaktivierung der Aktivkohle.

2.3 Aktivkohle und ihre Eigenschaften

Als Adsorbens wird weit verbreitet Aktivkohle zur Abwasserreinigung eingesetzt. Die wesentlichen Unterschiede in der Prozessführung beim Einsatz von PAK und GAK wurden bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt. Nachfolgend werden kurz die wichtigsten Eigenschaften von Aktivkohle vorgestellt.

Substanzen, wie Spurenstoffe, können an der Oberfläche eines Adsorbens, wie Aktivkohle, anhaften, ohne Neben- oder Transformationsprodukte zu bilden. Während unpolare, hydrophobe Substanzen adsorbieren, können polare Substanzen weniger gut bis gar nicht durch Adsorption entfernt werden (Fundneider, 2020). Die Funktionsweise der Adsorption ist in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt.

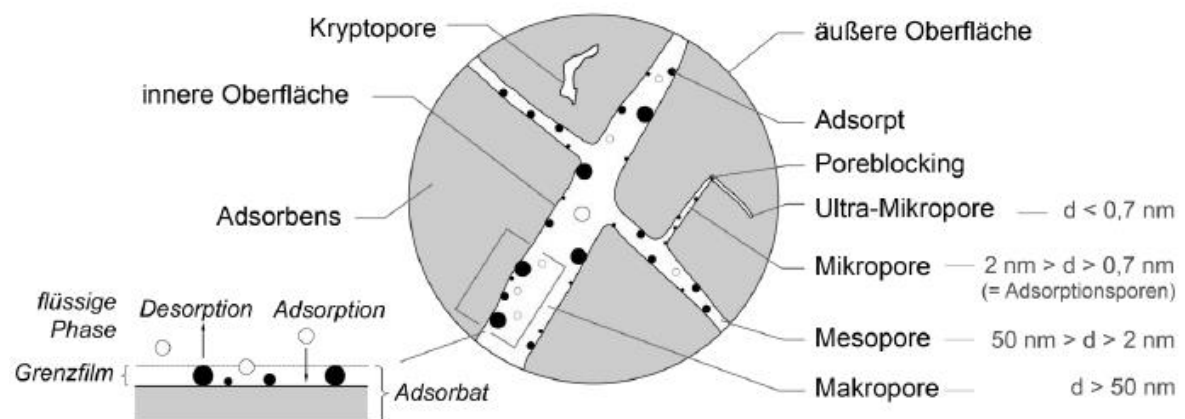


Abbildung 2-4: Grundbegriffe der Adsorption, Porenbezeichnung und Porentextur von granulierter Aktivkohle (Fundneider, 2020)

Bei der Herstellung der Aktivkohle wird eine hohe Porosität und damit eine sehr große Oberfläche angestrebt, um gute adsorptive Eigenschaften zu erreichen (DWA-AG KA-8.6, 2021). Während der Herstellung bilden sich durch die Aktivierung Poren, die in unterschiedliche Porengrößen unterschieden werden, wie für granulierten Aktivkohle ebenfalls in Abbildung 2-4 gezeigt (Benstöm, 2017). Durch die Vermahlung der Aktivkohle wird ein gleichmäßiges Korn mit vielen mittelgroßen Mesoporen erzeugt (DWA-AG KA-8.6, 2021). Granulierte Aktivkohlen bestehen aus einem hohen Anteil an Meso- und Mikroporen und eignen sich so auch bei hoher Konkurrenz einer vielfältigen Abwassermatrix zur Adsorption von Spurenstoffen (Fundneider, 2020). PAK und GAK sind mit ihren unterschiedlichen Korngrößen in Abbildung 2-5 visuell zu sehen.



Abbildung 2-5: Visueller Vergleich von GAK (links) und PAK (rechts) (Ausschnitt aus DWA-AG KA-8.6, 2021)

Neben der Vielfältigkeit der Porenverteilung und der Korngrößen unterscheiden sich PAK und GAK in weiteren Eigenschaften, wie in Tabelle 2-2 gezeigt.

Tabelle 2-2: Eigenschaften von granulierter und Pulveraktivkohle im Vergleich (Metcalf & Eddy, 2014)

Parameter	Einheit	GAK ¹	PAK ¹
Gesamte Oberfläche	m ² /g	700 – 1300	800 – 1800
Schüttdichte	kg/m ³	400 – 500	360 – 740
Partikeldichte, mit Wasser benetzt	kg/L	1,4 – 1,5	1,3 – 1,4
Partikelgrößenverteilung	µm	100 – 2400 (DWA: 600 – 2400) ²	5 – 50 (DWA: 5 – 100) ²
Ungleichförmigkeitszahl	-	≤ 1,9 oder ≤ 2,1 ³	-
Mittlere Porenradius	nm	16 – 30	20 – 40
Iod Zahl	-	600 – 1100	800 – 1200
Abriebzahl	Minimum	75 – 85	70 – 80
Aschegehalt	%	≤ 10	≤ 6
Feuchtigkeit (gepackt)	%	2 – 4	2 – 4

¹ Die genauen Werte sind abhängig vom Rohprodukt und der Produktion und variieren daher pro Produkt;
² Angabe des üblichen GAK Kornbandbereichs nach DWA-AG KA-8.6 (2021), bei PAK sollen 95 % der Korns < 150µm sein, meist liegen die Produkte im Bereich von < 30 µm;
³ (DWA-AG KA-8.6, 2019);
⁴ nach DWA-AG KA-8.6 (2021) 3 – 15 %

Die tatsächlichen Eigenschaften eines Produktes variieren in Abhängigkeit des Ausgangsproduktes, des Herstellungsprozesses und der Charge (Metcalf & Eddy, 2014; DWA-AG KA-8.6, 2021). Für die Aktivkohleauswahl bei GAK-Filterprozessen sind die Verteilung der mittleren Porenradien und die Filterschüttdichte zu berücksichtigen (Benstöm, 2017; Fundneider, 2020). Des Weiteren ist für die Auswahl von GAK im Gegensatz von PAK für die Verwendung im Filter die Abriebfestigkeit und Härte von Relevanz. Eine Kugelhärte > 80 % für GAK zeigte sich für den großtechnischen Einsatz als geeignet (DWA-AG KA-8.6, 2021).

2.4 Wirbelbettverfahren in der biologischen Abwasserreinigung

Das Mikro-GAK-Verfahren wird in einem Wirbelbett umgesetzt. In der Abwasseraufbereitung werden Wirbelbettverfahren, auch Schwebebettverfahren genannt, bereits in der biologischen Abwasseraufbereitung eingesetzt.

Bei dem Schwebebettverfahren (engl. moving bed biofilm reactor) werden Aufwuchskörper durch leichte Fluiddurchmischung in Schwebelage gehalten (Chen, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2020). Die Durchmischung kann durch Lufteintrag, Fluidrezirkulation oder mechanisches Mischen erfolgen, siehe Abbildung 2-6 (Biofilm Reactors Task Force, 2010). Auf den Aufwuchskörpern, die aus geformten Kunststoffkörpern bestehen, kann sich ein Biofilm etablieren, daher zählt dieses Verfahren zu den Biofilmprozessen (di Biase, Kowalski, Devlin, & Oleszkiewicz, 2019). Die Biomasse kann im Schwebebettverfahren sowohl suspendiert, wie beim Belebtschlammverfahren, als auch als aufwachsender Biofilm vorliegen. Der Schlamm kann optional zurückgeführt werden (Chen, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2020).

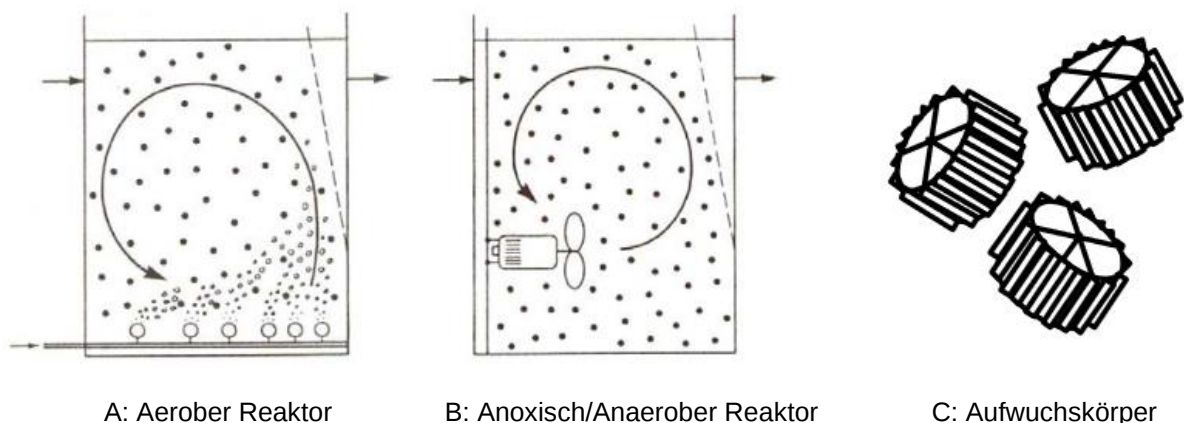


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung eines Schwebebettreaktors für an aerobe und anoxisch/anaerobe Prozesse und ein Modell an einsetzbaren Kunststoff-Aufwuchskörper (Ødegaard, 1999)

Das Becken bzw. der Reaktor ist meist zwischen 1/3 und 2/3 mit Aufwuchskörpern gefüllt (Biofilm Reactors Task Force, 2010). Um ein Ausspülen der Aufwuchskörper zu verhindern, wird der Ablauf durch ein Sieb geführt (Biofilm Reactors Task Force, 2010). Insbesondere unbewachsene Kunststoffkörper schwimmen zu Beginn einer Prozessetablierung zunächst aufgrund ihrer geringen Dichte auf (di Biase, Kowalski, Devlin, & Oleszkiewicz, 2019).

Der Transport von Nährstoffen, Sauerstoff oder anderen Substanzen in einen Biofilm erfolgt hauptsächlich über Diffusion (Reineke & Schlömann, 2020). Eine effektive Diffusion stellt daher einen wichtigen Faktor für die Leistungsfähigkeit von Biofilmen dar. Die Substanzen können durch Adsorption am Biofilm zwischengespeichert werden (di Biase, Kowalski, Devlin, & Oleszkiewicz, 2019). Dieser Prozess ist vergleichbar zur Adsorption von Spurenstoffen an Aktivkohle, bei der der Transport der Spurenstoffe in die Poren der Aktivkohle durch Diffusion stattfindet (Benstöm, 2017). Eine schematische Darstellung der ablaufenden Prozesse an einem GAK-Korn ist in Abbildung 2-7 gezeigt.

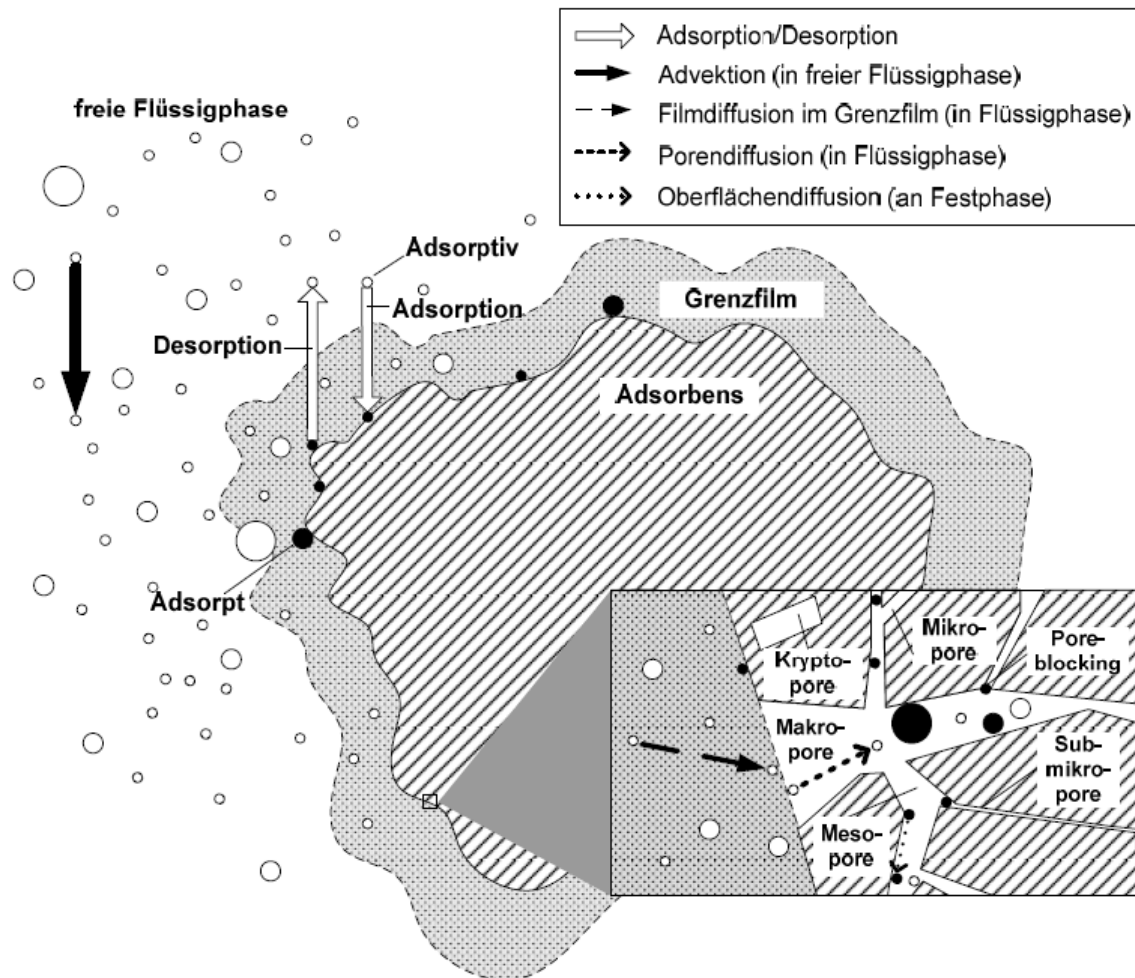


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Vorgänge an einem GAK-Korn (Benstöm, 2017)

Dieser Prozess der Spurenstoffadsorption an GAK wird sich im Mikro-GAK-Prozess zu Nutze gemacht. Dabei sorgt die Durchmischung in einem Wirbelschichtverfahren für einen guten Austausch von Spurenstoff und Adsorbens. Weitere Aspekte des Mikro-GAK-Verfahrens werden im nachfolgenden Kapitel weiter beschrieben.

2.5 Mikro-GAK-Verfahren

Die beiden vor allem in Baden-Württemberg eingesetzten Aktivkohle-Verfahren zur Spurenstoffentnahme, GAK und PAK, weisen jeweils einige verfahrensspezifische Vor- und Nachteile auf. Durch das Mikro-GAK-Verfahren sollen die Vorteile beider Verfahrensvarianten in einem Verfahren kombiniert werden:

- Hohe Betriebsfreundlichkeit, da technisch deutlich weniger komplex als das Ulmer Verfahren oder eine Ozonung. Daraus ergibt sich ein geringerer Betriebs- und Wartungsaufwand.
- Keine zusätzliche Zugabe von Koagulationsmittel oder Polymeren.
- Im Weiteren ist eine hohe Pufferwirkung der Adsorptionskapazität durch die sehr hohe Kohlemasse im System sichergestellt, so dass Spitzen behandelt werden können, ohne die Einstellungen täglich zu verändern.
- Regeneration der Mikro-GAK ist möglich, allerdings entsteht ein höherer Abbrand als bei GAK, welcher danach mit frischer Mikro-GAK (Make-up) aufgefüllt werden muss.
- Keine Notwendigkeit eines baulich und technisch aufwändigen nachgeschalteten Filters.
- Geringer Platzbedarf im Vergleich zu anderen Verfahren zur Spurenstoffentnahme.
- Geringere Investitions- und Betriebskosten verglichen mit dem Ulmer Verfahren und einer Ozonung, da technisch weniger komplex.
- Die Mikro-GAK hat bessere Eigenschaften gegenüber PAK und verursacht keine Explosionsgefahr. Die Anlage ist somit kein Ex-Bereich.
- Keine Bildung von Transformationsprodukten wie bei der Ozonung.
- Auf der Mikro-GAK bildet sich ein Biofilm aus, welcher die Entnahme der Anlage steigern kann.

Das Mikro-GAK-Verfahren wird bisher nur in der Schweiz auf den ARA Delémont und ARA Penthaz eingesetzt (Grelot, Horisberger, & Casazza, 2021; Horisberger, Casazza, Grelot, & Joss, 2019; VSA, Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett, 2022). Das im Oktober 2022 veröffentlichte Faktenblatt der VSA fasst den aktuellen Wissensstand zum Verfahren und die bisher gewonnen Erkenntnisse zusammen (VSA, Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett, 2022).

Bei der eingesetzten Aktivkohle handelt es sich um granulierten Aktivkohle, die mit ca. 0,2 bis 0,5 mm einen geringeren Korndurchmesser aufweist als GAK (0,6 - 2,6 mm (8x30 mesh)), die in GAK-Filtern eingesetzt wird (VSA, Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett, 2022). Aufgrund der Eigenschaften der Mikro-GAK ist es möglich das GAK-Bett in einem Reaktor bei ausreichender Anströmgeschwindigkeit zu fluidisieren und in Schwebe zu versetzen. Das Verfahrensschema des Schweizer Verfahrens ist in Abbildung 2-8 gezeigt.

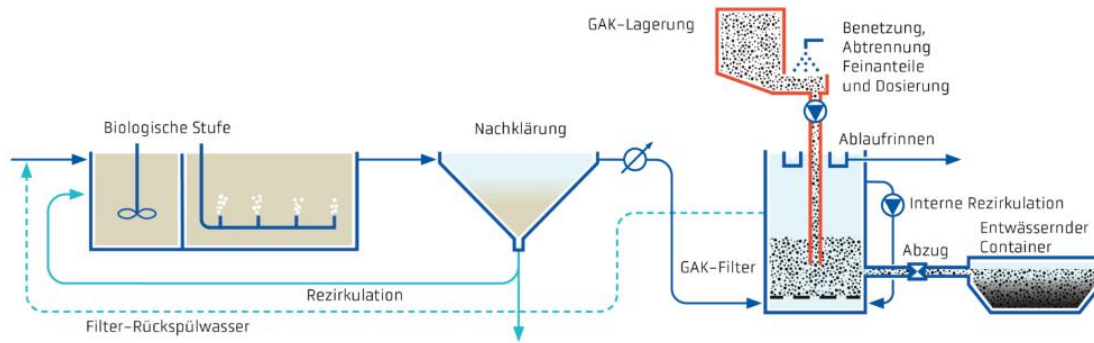


Abbildung 2-8: Schema des in der Schweiz angewandten Mikro-GAK-Verfahrens (VSA, 2024)

Während der Kontaktzeit der Spurenstoffe im Abwasser und der Aktivkohlekörner können diese an die Aktivkohle adsorbieren. Die Obergrenze des Schwebebetts wird auch unter Expansion durch eine scharfe Trenngrenze zwischen Aktivkohle und Wasser gebildet. Das gereinigte Abwasser fließt weiter nach oben, bis es den Reaktor verlässt. Um eine gleichbleibende Reinigungsleistung im Bett zu gewährleisten, wird batchweise in regelmäßigen Abständen frische Aktivkohle in den Reaktor zudosiert. Verbrauchte Kohle wird regelmäßig, diskontinuierlich aus dem Reaktor abgezogen, um eine gleichbleibende Betthöhe zu erhalten. Kenngrößen aus den Erfahrungen der Schweizer Anlagen sind in Tabelle 2-3 gezeigt.

Tabelle 2-3: Kenngrößen aus der Praxis für Mikro-GAK-Verfahren in der Schweiz (VSA, 2024)

Parameter	Kenngröße	Einheit
GAK-Dosierung	2	mg _{PAK} /mg _{DOC}
Betthöhe (Ruhe/Expandiert)	1,5/2,2	m
Standzeit	80 – 100	Tage
Aktivkohle-Rückhalt	> 97	%
Filtergeschwindigkeit	7 – 15	m/h

Die Hinweise zur Dimensionierung und zum Betrieb basieren größtenteils auf den Erfahrungen aus dem Betrieb auf der ARA Penthaz. Trotz der großtechnischen Umsetzung gibt es weiterhin offene Fragen zum Verfahren, die im VSA Datenblatt aufgeführt sind. Diese sind nachfolgend kurz umrissen (VSA, 2022):

- Bisherige Dimensionierungsangaben basieren allein auf einem Aktivkohleprodukt. Weitere Informationen zur Auswahl bei verschiedenen Produkten fehlt.
- Ein einheitliches Verfahren für die Qualitätssicherung von Aktivkohlelieferungen fehlt.
- Die Höhe des Aktivkohlerückhalts im Reaktor ist weiter zu untersuchen, um zu klären, ob eine nachfolgende Filtrationsstufe notwendig ist.

- Alle bisherigen Erfahrungen basieren auf einer kleinen Kläranlage, wodurch Unsicherheiten bei der Skalierung auf größere Anlagen entstehen.
- Weitere Langzeiterfahrungen zum Betrieb bei Regenwetter und Steuer- und Regelstrategien sind durchzuführen.

3 Material und Methoden

3.1 Kläranlage Renchen

Die Kläranlage Renchen wird vom Abwasserverband Vorderes Renchtal betrieben. Sie liegt nördlich der Stadt Renchen an der Klingelmatt 1.

Das Einzugsgebiet der Kläranlage umfasst die Orte Erlach, Haslach, Mösbach, Nußbach, Önsbach, Renchen, Stadelhofen, Tiergarten, Ulm und Zusenhofen. Die Anlage besitzt eine Ausbaugröße von 32.000 EW (GK 4a).

Das anfallende Abwasser wird mechanisch-biologisch gereinigt und in die Rench eingeleitet. Der bei der Abwasserreinigung entstehende Primär- und Überschussschlamm wird einer anaeroben Schlammbehandlung zugeführt.

Abbildung 3-1 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Renchen.

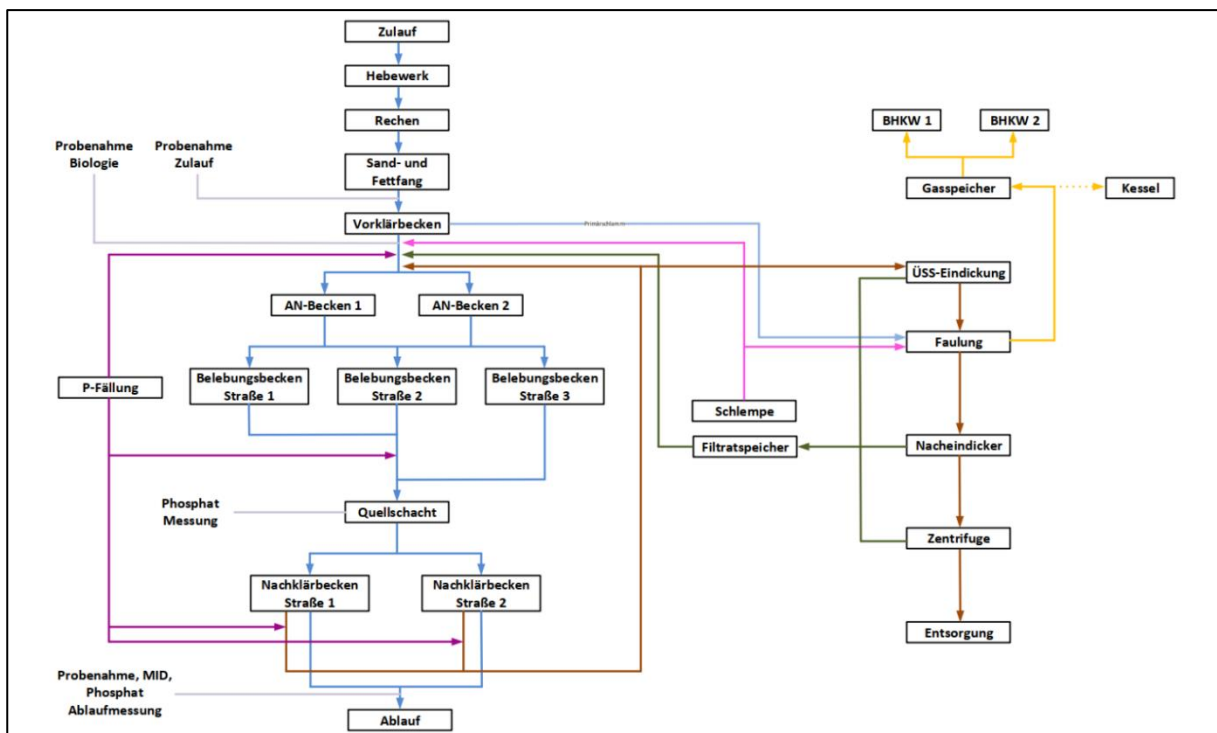


Abbildung 3-1: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Renchen

Im Folgenden werden die maßgeblichen Verfahrensstufen aufgelistet:

- Schneckenhebewerk
- Rechananlage 3 mm Filterstufenrechen
- Belüfteter Sand- und Fettfang
- Vorklärbecken (Volumen 187 m³)
- Regenbecken (Volumen 392 m³)

- Alternierende biologische Abwasserreinigung
 - 2-strassige AN Becken: Volumen $2 * 200 \text{ m}^3$ gefolgt von,
 - 3-strassige Kaskadenbiologie: Volumen $3 * 1.100 \text{ m}^3$
- Nachklärbecken (rund, $2 * 30 \text{ m}$ jeweils mit Räumschild)
- Chemische Phosphatfällung
- Anaerobe Schlammstabilisation (2 Faultürme je 1.500 m^3)
- Überschussschlammvoreindickung (Bandeindicker)
- Statischen Nacheindicker (Volumen 250 m^3)
- Faulschlammentwässerung mittels Zentrifuge
- Niederdruckgasspeicher (Volumen 500 m^3)
- BHKW-Anlage ($2 * 105 \text{ kWel.}$)
- Heizung für bivalentem Betrieb (Heizöl oder Klärgas)
- Gasfackel

In der wasserrechtlichen Erlaubnis der Kläranlagen Renchen sind folgende Einleitungsanforderungen fest vorgeschrieben:

Trockenwetterzufluss: bis zu $345 \text{ m}^3/\text{h} = 96 \text{ L/s}$

Mischwasserzufluss: bis zu 178 L/s

Jahresschmutzwassermenge: $1.100.000 \text{ m}^3/\text{a}$

Im Regenüberlaufbecken darf mechanisch gereinigtes Abwasser im Regenwetterfall Q_r - zusätzlich zu Q_{M-} von bis zu 860 L/s in die Rench eingeleitet werden.

Die nachfolgenden Parameter müssen seit 01.01.2003 im Ablauf der Kläranlage eingehalten werden:

- $\text{CSB} < 45 \text{ mg/L}$
- $N_{\text{ges, anorg.}} < 18 \text{ mg/L}$ (bei $T > 12 \text{ }^\circ\text{C}$)
- $\text{NH}_4\text{-N} < 4 \text{ mg/L}$ (bei $T > 12 \text{ }^\circ\text{C}$)
- $P_{\text{ges}} < 1,5 \text{ mg/L}$

Folgende Ablaufkonzentrationen können für die Jahre 2017 bis 2019 bilanziert werden:

Tabelle 3-1: Charakterisierung der Kläranlagenabläufe der Kläranlage Renchen für die Jahre 2017 bis 2019

Parameter	Jahr	Min	Mittelwert	85%-Quantil	Max	Grenzwerte
CSB [mg/L]	2017	12	23	28	37	45
	2018	13	24	28	38	
	2019	11	21	24	38	
NH₄-N [mg/L]	2017	0,03	0,8	1,7	4,6	4 (bei T > 12 °C)
	2018	0,02	0,8	1,6	3,0	
	2019	0,02	0,5	1,1	2,9	
N_{ges, anorg} [mg/L]	2017	5,4	11,5	14,4	22,3	18
	2018	6,9	13,5	17,0	25,4	
	2019	5,0	10,2	13,3	20,7	
P_{ges} [mg/L]	2017	0,17	0,45	0,68	1,36	1,5
	2018	0,14	0,50	0,74	1,22	
	2019	0,14	0,55	0,79	1,48	
PO₄-P [mg/L]	2017	-	-	-	-	-
	2018	0,06	0,26	0,38	0,66	
	2019	0,02	0,27	0,41	1,13	
Trübung [FNU]	2017	2	4	4	24	-
	2018	2	4	5	41	
	2019	2	4	4	38	
DOC [mg/L]	2020	7	10,1	11,2	12,3	-
* PO ₄ -P-Daten erst ab 28.08.2018 vorhanden						

Im Zeitraum von 22. - 28 November 2020 wurde der Ablauf der Kläranlage Renchen auf AFS hin beprobt. Im Untersuchungszeitraum lagen Trockenwetterbedingungen vor. Die Ergebnisse der Beprobungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Abfiltrierbare Stoffe im Ablauf der Kläranlage Renchen im November 2020

Datum	22.11.	23.11.	24.11.	25.11.	26.11.	27.11.	28.11.
AFS [mg/L]	4,2	2,5	3,5	4	4,5	3,5	1,5

Der AFS-Gehalt im Ablauf der Kläranlage Renchen liegt im betrachteten Zeitraum zwischen 1,5 und 4,5 mg/L. Der Mittelwert beträgt etwa 3,4 mg/L.

3.2 Halbtechnische Versuchsanlage

Um das Mikro-GAK-Verfahren auf der Kläranlage im halbtechnischen Maßstab zu untersuchen, wurde eine Versuchsanlage auf der Kläranlage installiert und über einen Zeitraum von zwei Jahren betrieben. Die Versuchsanlage besteht aus zwei baugleichen zylindrischen Reaktoren, die über dem Ablaufschacht der Kläranlage Renchen aufgebaut wurden (Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Abbildungen der halbtechnischen Versuchsanlage // oben links: Ansicht der Versuchsanlage // oben rechts: Zulaufleitungen zu den Reaktoren // unten links: Überlaufschwelle an der Oberkante eines Reaktors // unten rechts: Schaltschrank zur Steuerung der Pumpentechnik und Mehrkanal-Controller

Abbildung 3-3 zeigt das vereinfachte R&I-Schema eines Reaktors.

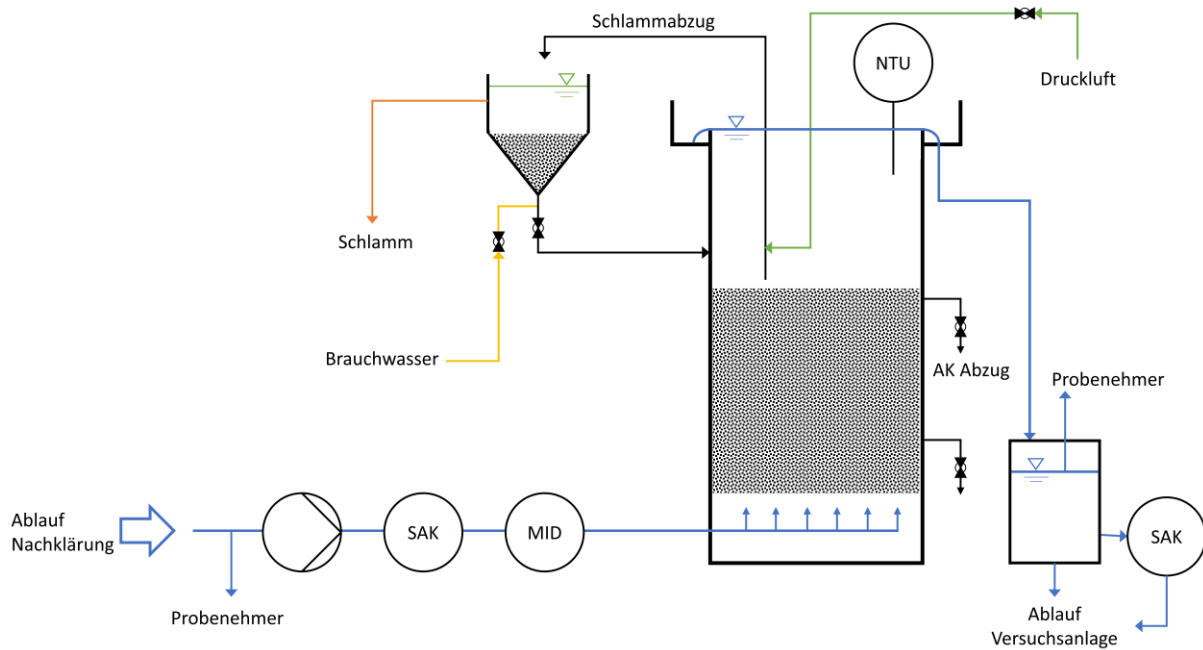


Abbildung 3-3: Vereinfachtes R&I-Schema eines Reaktors der Versuchsanlage

Die aus Kunststoff bestehenden Reaktoren besitzen eine Höhe von 3,80 m sowie einen Durchmesser von 0,475 m. Die Wassertiefe in den Reaktoren beträgt ca. 3,50 m, sodass sich ein Nutzvolumen von 0,6 m³ je Reaktor ergibt.

Die Reaktoren verfügen jeweils über Bodenverteilsystem zur gleichmäßigen Zugabe des Abwassers aus dem Ablauf der Kläranlage Renchen, sowie über eine Überlaufrinne im oberen Bereich des Reaktors zur Klarwasserentnahme. Zudem verfügt jeder Reaktor in der unteren Hälfte über drei Vorrichtungen zur Entnahme von Mikro-GAK. Ferner besitzen die Reaktoren im oberen Bereich einen Schlammabzug sowie eine Schlammspülanlage. Um die Ausdehnung des Mikro-GAK-Bettes in den Reaktoren beobachten zu können, befinden sich Sichtfenster in den Reaktorwänden.

Vom 8.05.2023 bis 10.05.2023 fand ein umfangreicher Umbau der Versuchsanlage statt. Um die Höhe des expandierten Kohlebettes noch besser bestimmen zu können wurden transparente Zwischenstücke in die Reaktoren eingebaut (siehe Abbildung 3-4). Zudem wurde der Reaktorfuß umgebaut und ein neues Verteilsystem installiert (siehe Abbildung 3-5). Das zuerst eingesetzte Verteilsysteme war davor häufiger verstopft gewesen, was die benötigte Gleichverteilung des Abwassers im Reaktor beeinträchtigt hat. Im Zuge des Umbaus fand auch ein Wechsel des Mikro-GAK-Produkts in Reaktor 1 statt (vgl. Kapitel 3.4).

Die Reaktoren werden über zwei Tauchmotorpumpen beschickt, die das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung über das Bodenverteilsystem in die Reaktoren fördern. Durch die Aufwärtsströmung des Abwassers durch den Reaktor wird die Mikro-Granulataktivkohle fluidisiert. Bei der Durchströmung der fluidisierten Mikro-GAK adsorbieren Spurenstoffe aus dem Abwasser an der Aktivkohle. Nach der Durchströmung der Reaktoren verlässt das Abwasser diese über die Überlaufschwelle in einen Sammeltopf. Von dort aus wird das

gereinigte Abwasser zunächst in einem IBC gesammelt und anschließend in die Belebung der Kläranlage Renchen zurückgeführt.



Abbildung 3-4: Eingebaute transparente Zwischenstücke als Sichtfenster nach dem Umbau

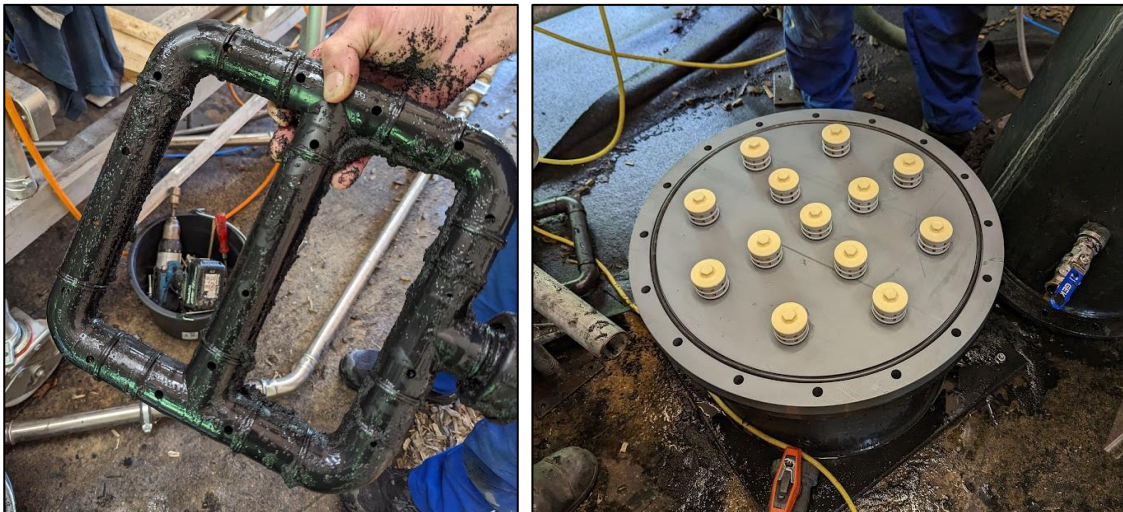


Abbildung 3-5: Bodenverteilersystem vor dem Umbau (links) und nach dem Umbau (rechts)

Tabelle 3-3 stellt die technischen Daten der Versuchsanlage zusammen.

Tabelle 3-3: Technische Daten der Versuchsanlage

Abmessungen der Anlage	
Anzahl der Reaktoren [Stk.]	2
Durchmesser [m]	0,475
Höhe [m]	3,80
Wassertiefe [m]	3,50
Fläche [m ²]	0,18
Nutzvolumen [m ³]	0,6
Hydraulische Belastung	
Q _{TW} ($\triangleq$ Minimum) [m ³ /h]	1,50
Q _{Rw} ($\triangleq$ Maximum) [m ³ /h]	3,00

Beide Reaktoren der Versuchsanlage sind jeweils mit derselben Messtechnik ausgestattet. Es wurde folgende Messtechnik installiert (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: An der Versuchsanlage installierte Messtechnik

Parameter	Art	Ort der Probenahme	Name und Hersteller der Messtechnik
SAK [1/m]	Online	Zulauf Versuchsanlage	Viomax CAS51D Fa. Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG
	Online	Ablauf Reaktor 1+2 (Umschaltung alle 10 min)	
Trübung (FNU)	Online	Ablauf Reaktor 1	Turbimax CUS51D Fa. Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG
	Online	Ablauf Reaktor 2	
Durchfluss [m ³ /h]	Online	Ablauf Reaktor 1	Keine Angabe
	Online	Ablauf Reaktor 2	
automatischer Probenehmer zur Entnahme von zeitproportionalen 24-h-Mischproben		Ablauf Reaktor 1	MAXX Mess- und Probenahmetechnik GmbH
		Ablauf Reaktor 2	

3.3 Betrieb der Versuchsanlage

Der Betrieb der Versuchsanlage wurde durch Mitarbeiter des Abwasserverbandes Vorderes Renchtal und des Kompetenzzentrums Spurenstoffe organisiert. Mitarbeiter des Kompetenzzentrums Spurenstoffe waren während der gesamten Versuchsdauer ca. einmal wöchentlich vor Ort. Die Tätigkeiten im Rahmen der Termine umfassten:

- Abholen der Proben der letzten Woche und Vorbereiten der Probenflaschen für die nächste Woche
- Abwiegen und Wässern der Mikro-GAK für die folgenden Tage
- Dokumentation der expandierten Betthöhe und der Betthöhe in Ruhe
- Reinigung der SAK- und Trübungssonden
- Ggf. Rückspülung des Reaktors mit Wasser und/oder Luft
- Generelle Instandhaltungs- und Reinigungstätigkeiten
- Ggfs. Abzug von Mikro-GAK
- Ggfs. Änderung von Einstellungen an der Versuchsanlage

Zwischen den Vor-Ort-Terminen des KomS wurde die Kohledosierung, Instandhaltungsaufgaben, die Probenahme sowie Dokumentationstätigkeiten durch die Mitarbeiter des Abwasserverbandes Vorderes Renchtal wahrgenommen.

Während des Versuchsbetriebs kam es zu einigen Problemen/Störungen, die nachfolgend kurz dargestellt werden sollen:

- Beim Reinigen der Nachklärbeckenrinne trat vermehrter Schlammabtrieb auf, was zu Schlamm in den beiden Reaktoren führte. Durch die Außerbetriebnahme der Versuchsanlage während der Rinnenreinigung konnte dieses Problem behoben werden.
- Akkumulation von Schlamm in beiden Reaktoren hauptsächlich im Frühling und am Anfang des Sommers. Zusätzlich trat im Sommer ein Bewuchs von einer Flechte auf, die an der Reaktorwand anhaftete, den Betrieb aber nicht weiter störte. Durch regelmäßiges Rückspülen der Reaktoren konnte der Schlamm teilweise reduziert werden.
- Für die Reinigung der MikroGAK waren an den Reaktoren Spültöpfe und ein Mammutheber installiert. Die Spülung mit diesen Einrichtungen war jedoch sehr aufwendig und zeitintensiv. Deshalb wurden im weiteren Verlauf der Reaktoren analog eines Filters (mit Wasser und/oder Luft) zurückgespült.
- Verstopfung des Zulaufverteilers durch das Zurückdrücken der MikroGAK in den Verteilerring. Dies führte zu einer ungleichmäßigen Bettausdehnung im Betrieb. Mittels Luft- und Wasserspülung konnte der Verteilerring wieder frei gespült werden. Durch den Umbau der Versuchsanlage und den Einbau des Düsenbodens konnte dieses Problem nicht mehr auftreten.

- Nach einer Weile erzielten die beiden Beschickungspumpen nicht mehr den geforderten Volumenstrom. Der Grund dafür waren Ablagerungen von Eisenocker und von Algen an den Beschickungspumpen. Durch regelmäßige Kontrollen und ggf. Reinigungen konnte dieses Problem behoben werden.
- Undichtigkeiten am Zulaufschlauch aufgrund von Rost an der Schlauchkupplung. Diese mussten getauscht werden.
- Bei zu hohen Volumenströmen lag die Grenzschicht zwischen MikroGAK und Abwasser außerhalb der Sichtfenster. Beim Umbau der Versuchsanlage wurde deshalb ein PE Rohrstück durch Plexiglas ersetzt.
- Probenehmer Störungen z.B. Kompressorschlauch zerrissen, Sicherung defekt.
- Werte fehlten von Zulaufmessung z.B. nach Stromausfall und musste neu eingestellt werden.
- Schlauch von den Pumpen hing nach dem Rausnehmen oft vor der Trübungssonde was das Messergebnis verfälschte und Störungen begünstigte.
- Bei zu wenig Zulauf liefen die Pumpen trocken.
- Die Schläuche wurden verlängert, was als Nachteil hatte, dass Sie in das Ablaufrohr gedrückt wurden und bei Regen das Abwasser nicht schnell genug abließ und es sich stark zurückstaute.

3.4 Mikro-GAK-Produkte

Im Rahmen der Untersuchungen wurden drei verschiedene Mikro-GAK-Produkte von drei unterschiedlichen Herstellern verwendet. Tabelle 3-5 zeigt Produktspezifikationen gemäß Hersteller der verwendeten Mikro-GAK-Produkte.

Tabelle 3-5: Produktspezifikationen gemäß Hersteller der verwendeten Mikro-GAK-Produkten

Eigenschaft / Mikro-GAK-Produkt	Produkt A	Produkt B	Produkt C
Einsatz im Reaktor	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 1
Einsatzdauer	13.01.2022 bis 7.5.2023	13.01.2022 bis 24.01.2024	7.05.2023 bis 24.01.2024
Jodzahl [mg/g]	min. 775	950 - 999	1000 ± 50
Körnung [mesh]	20 x 50	20 x 50	20 x 50
> 20 US mesh (0,85 mm) [wt%]	max. 5	max. 5	-
< 50 US mesh (0,30 mm) [wt%]	max. 5	max. 5	-
Schüttdichte [kg/m ³]	510	Min. 400 (430)	470 ± 30
Feuchtigkeit [wt%]	max. 5	max. 5	max. 5
Aschegehalt [%]	-	max. 10	< 12

3.5 Versuchshistorie

Um das Mikro-GAK-Verfahren besser zu verstehen und Erkenntnisse zum Betrieb zu gewinnen, wurde die halbtechnische Versuchsanlage über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren betrieben. Über diesen Zeitraum wurden verschiedene Betriebsparameter variiert, um deren Einfluss auf die Spurenstoffentnahme zu verstehen. In Abbildung 3-6 sind die verschiedenen Phasen des Versuchsbetriebs aufgelistet. Der Versuchsbetrieb kann in 21 verschiedene Versuchsphasen aufgeteilt werden. Über den gesamten Zeitraum wurden die beiden Reaktoren parallel betrieben und dementsprechend mit der gleichen Menge an Abwasser beschickt. Über den Großteil des Projekts wurde beiden Reaktoren die gleiche Menge an frischer Kohle zugegeben und abgezogen.

Zu Beginn des Projekts wurden Kohle A und Kohle B verwendet (vgl. Kapitel 3.4). Der Beschickungsvolumenstrom lag bei $2 \text{ m}^3/\text{h}$ je Reaktor. Über den Zeitraum von Versuchsphase 01 wurden die Reaktoren schrittweise befüllt, indem wöchentlich größere Mengen an Aktivkohle eingefüllt wurden, ohne dabei beladene Kohle abzuziehen. Initial wurden 50 kg Kohle in jeden Reaktor gefüllt, anschließend lag die wöchentlich zugegebene Menge zwischen 6 kg und 12 kg. Ab Versuchsphase 02 wurde mit dem Regelbetrieb begonnen. Die Reaktoren wurden weiterhin mit $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ beschickt. Die zugegebene Kohlemenge lag bei 3 mal 1,2 kg Kohle je Reaktor je Woche. Anschließend (Versuchsphase 03) wurde die zudosierte Kohlemenge halbiert, während das Dosierungsintervall und der Beschickungsvolumenstrom nicht verändert wurden. Dadurch sollte der Einfluss der dosierten Frischkohlemenge auf die Reinigungsleistung untersucht werden. Für Versuchsphase 04 wurden Dosiermenge und Dosierintervall nicht verändert, dafür aber der Beschickungsvolumenstrom auf $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht. Dadurch sollte der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit und der Kontaktzeit auf die Reinigungsleistung untersucht werden. Anschließend (Versuchsphase 05) wurde der Beschickungsvolumenstrom auf $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert. Dies diente ebenfalls zur Untersuchung des Einflusses der Anströmgeschwindigkeit sowie der Kontaktzeit. Im Versuchsfenster 06 wurde die Beschickung auf $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht. Somit sind Versuchsfenster 04 und 06 von den Betriebseinstellungen her gleich.

Die Versuchsanlage wurde über den Wechsel der Jahre 2022 zu 2023 ausgeschaltet und erst wieder im Versuchsfenster 07 in Betrieb genommen. Hier wurde die Beschickung auf $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt und 2 mal 0,6 kg Frischkohle je Reaktor je Woche zudosiert. Diese Einstellungen waren ähnlich zu denen aus Versuchsfenster 03. Die Anlage sollte in diesem Zeitraum wieder eingefahren werden, um Veränderungen durch den vorangegangenen Stillstand auszuschließen. Während Versuchsfenster 08 wurde die Beschickung mit $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ nicht verändert. Die zugegebene Frischkohlemenge dagegen wurde auf 1 mal 0,6 kg je Reaktor je Woche reduziert. In den beiden folgenden Zeitfenstern (09 und 10) wurde bei konstanter Beschickung die zudosierte Frischkohlemenge zunächst auf 1 mal 0,3 kg je Reaktor je Woche und danach auf 1 mal 1,2 kg je Reaktor je Woche verändert. Durch diese Einstellungen sollten weitere Erkenntnisse zum Einfluss der Dosiermenge und des Dosierintervalls erhalten werden.

Anschließend wurden die Reaktoren umgebaut, wobei das Verteilsystem zur Erzeugung des Schwebebetts innerhalb der Reaktoren ausgetauscht sowie ein Teil der Reaktorkolonnen von schwarzen in transparente Teile getauscht wurde. Für den Umbau der Reaktoren mussten

diese vollständig entleert werden. Die Entleerung der Reaktoren wurde genutzt, um Reaktor 1 mit Kohle C neu zu befüllen, welche bisher noch nicht untersucht worden war. Über das Versuchsfenster 12 wurden die beiden Reaktoren wöchentlich mit größeren Mengen Kohle (5 kg bis 10 kg) befüllt. Für Reaktor 1 wurde frische Kohle C verwendet. Reaktor 2 wurde mit der zuvor bereits im Reaktor eingesetzten Kohle B wieder befüllt. Anschließend (Versuchsphase 13) wurde die Beschickung auf 2,5 m³/h erhöht und 2- bis 3-mal 0,6 kg Frischkohle je Reaktor je Woche zudosiert. Im nächsten Schritt (Versuchsphase 14) wurde lediglich die Beschickung auf 3,0 m³/h erhöht, während Dosiermenge und -intervall der Frischkohle konstant gehalten wurde. Dies diente zur weiteren Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit auf die Reinigungsleistung. Im Versuchsfenster 15 wurde die Beschickung konstant gehalten ebenso wie die wöchentlich zudosierte Menge an Frischkohle. Verändert wurde das Dosierintervall von 3-mal pro Woche auf einmal wöchentlich, um isoliert den Einfluss des Dosierintervalls herauszufinden.

Während des Versuchsbetriebs wurden kontinuierliche Daten ausgewertet, wobei auffiel, dass die bisher dosierte Frischkohlemenge teilweise nicht (mehr) ausreichte, um die gewünschte Reinigungsleistung zu erzielen. Deshalb wurde in Versuchsphase 16 die Dosiermenge auf 2- bis 3-mal 1,2 kg je Reaktor je Woche erhöht. Im nächsten Schritt (Versuchsphase 17) wurde die Beschickung auf 2,5 m³/h reduziert, um durch eine erhöhte Kontaktzeit weiter in den Bereich der gewünschten Reinigungsleistung zu kommen. Da sich Kohle B und Kohle C unterschiedlich verhielten wurde die Kontaktzeit weiter erhöht durch Reduzierung der Beschickung (Versuchsphase 18). In Versuchsphase 19 wurde dann das Dosierintervall erhöht, um die Kohlemenge im System weiter zu erhöhen.

Schlussendlich wurde die Beschickung der Reaktoren volumenproportional abhängig von der Kläranlage eingestellt. Dabei wurde die Beschickung als Ablauf der Kläranlage mit einem Faktor eingestellt. Zunächst wurde der Faktor 0,015 gewählt (Versuchsphase 20). Dieser war jedoch aufgrund des relativ hohen Niederschlags im Versuchszeitraum und der daraus resultierenden hohen Ablaufmenge der Kläranlage zu hoch für die Versuchsanlage und wurde entsprechend auf 0,008 reduziert (Versuchsphase 21). Während des volumenproportionalen Betriebs wurden 3-mal wöchentlich 1,17 kg frische Kohle C in Reaktor 1 und 0,94 kg frische Kohle B in den Reaktor 2 zugegeben.

Nach dem Umbau der Reaktoren (Versuchsphase 11) wurde das abgesetzte Bett der Aktivkohle in den Reaktoren für eine bessere Vergleichbarkeit bei -1,60 m gehalten. Dazu wurde entsprechend der zudosierten Menge in der Regel wöchentlich alte Kohle aus den Reaktoren entfernt.



Abbildung 3-6: Zeitlicher Verlauf der Betriebseinstellungen der Versuchsanlage und Benennung des jeweiligen Untersuchungsziels

3.6 Probenahme und Analytik

Im Laufe des Projekts wurden zur Überwachung des Betriebs der Versuchsanlage verschiedene Parameter ermittelt. Neben den eingesetzten Sonden zur Online-Messung des SAK₂₅₄ und der Trübung wurde eine Vielzahl von Parametern im Labor in unterschiedlicher Häufigkeit ermittelt. Die Probenahme erfolgte dazu durch die in Kapitel 3.2 aufgelisteten Probenehmer im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Renchen und im Ablauf der beiden Versuchsreaktoren. Mithilfe dieser wurden zeitproportionale Mischproben erstellt. Da die Reaktoren überwiegend mit einem konstanten Zulaufvolumenstrom beschickt wurden entspricht dies überwiegend einer mengenproportionalen Probenahme. Soweit dies nicht anders beschrieben ist, wurden 24 h Mischproben für die Analytik verwendet. Lediglich für die Analyse der Spurenstoffliste A des KomS wurden 72 h Mischproben und für die Thermogravimetrie teilweise Stichproben oder 4 h Mischproben verwendet.

Tabelle 3-6: Übersicht über die durchgeführten Probenahmen in den einzelnen Versuchsphasen

Versuchsphase	Anzahl Versuchstage	Probenahmen KomS (Trübung, SAK)	Probenahmen Standardparameter LFL	Standardparameter Probenahmen P-Fraktionen, LFL	Anzahl Probenahmen Liste B, LFL	Probenahme Zulauf KA, LFL	Probenahmen Liste A, LW	Probenahmen Thermogravimetrie, RWTH Aachen
1	117	11	19	0	0	0	0	0
2	18	6	2	0	1	0	0	0
3	75	21	13	0	2	0	1*	0
4	50	44	7	0	3	2	0	0
5	27	22	3	0	3	3	0	0
6	49	39	4	0	3	2	0	0
7	28	19	0	0	0	0	0	0
8	35	32	3	0	3	1	0	0
9	28	25	2	0	2	1	0	0
10	26	24	2	0	2	1	0	1 ¹
11 (Umbau)	3	0	0	0	0	0	0	0
12	50	30	1	0	1	0	0	0
13	21	10	2	0	2	0	0	0
14	24	21	2	0	2	0	0	0
15	23	21	2	2	2	0	0	0
16	15	15	0	0	0	0	0	0
17	14	14	2	2	2	1	0	0
18	11	11	0	0	0	0	0	0
19	25	20	1	1	1	0	0	0
20	18	18	0	0	0	0	0	0
21	58	22	0	0	0	0	1**	1 ²
Summe	715	425	65	5	29	11	2	2

*25.07.2022 ff, **17.12.2023 ff, ¹26.04.2023 ff, ²17.01.2024 ff

Tabelle 3-6 stellt die durchgeführten Analysen und ihre Häufigkeit in den jeweiligen Versuchsphasen dar. Mit insgesamt 425 Analysen wurden am häufigsten der SAK_{254} und die Trübung am KomS gemessen. 65-mal fand die Analyse der abwassertypischen Standardparameter beim LFL statt und 29-mal wurden Proben auf die Spurenstoffliste B des KomS analysiert. Die Spurenstoffsituation im Zulauf der Kläranlage Renchen wurde insgesamt 11-mal bestimmt. Die ergänzenden Untersuchungen der KomS Liste A und die Thermogravimetrischen Untersuchungen fanden jeweils zweimal statt.

3.6.1 SAK_{254} / ΔSAK_{254}

Um Aussagen zur Spurenstoffentnahme in den Mikro-GAK-Reaktoren treffen zu können, ohne regelmäßig die Spurenstoffliste B messen zu müssen, wurde beinahe täglich der SAK_{254} im Zu- und Ablauf der Versuchsanlage bestimmt. Die prozentuale Abnahme des SAK_{254} ($= \Delta SAK_{254}$) wurde in der Literatur bereits als Parameter beschrieben, mit dem die Spurenstoffentnahme verfahrensspezifisch abgeschätzt werden kann (VSA, 2018; Altmann, Ruhl, Zietzschmann, & Jekel, 2014). Die Bestimmung erfolgt durch Mitarbeiter des KomS im KomS-Labor an der Universität Stuttgart in einem UV-VIS Spektralphotometer (50 mm Quarzglas-Küvette; DR6000, Hach Lange). Zur Bestimmung des SAK_{254} wurden die 24-Stunden Mischproben aus dem Zu- und Ablauf der Reaktoren geschüttelt und anschließend filtriert. Von den filtrierten Proben wurde photometrisch die Extinktion bei einer Wellenlänge von 254 nm bestimmt. Der ΔSAK_{254} wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta SAK_{254} = \frac{SAK_{254,Zulauf} - SAK_{254,Ablauf}}{SAK_{254,Zulauf}}$$

Wenn beispielsweise der ΔSAK_{254} für den Reaktor 2 berechnet wurde, dann wurde die Gleichung wie folgt angewandt:

$$\Delta SAK_{254} = \frac{SAK_{254,Zulauf} - SAK_{254,Ablauf \text{ Reaktor 2}}}{SAK_{254,Zulauf}}$$

3.6.2 Trübung

Zur Überwachung der Feststofffreiheit des Ablaufs der Reaktoren wurde ebenfalls die Trübung bestimmt. Dazu wurden die 24-Stunden-Mischproben geschüttelt und unfiltriert in das Messgerät (Turbidimeter 2100P, Hach Lange) gegeben, mit dem die Trübung bestimmt wurde. Die Bestimmung erfolgte im Labor des KomS an der Universität Stuttgart.

3.6.3 Standardparameter

Neben der regelmäßigen Bestimmung der Trübung und des SAK_{254} am KomS wurden 65 (vgl. Tabelle 3-6) Proben zur Analyse der abwassertypischen Standardparametern im Lehr- und Forschungslabor des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (LFL) abgegeben. Routinemäßig wurden alle Proben auf den SAK_{254} , die Trübung und den gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) hin untersucht. Weiterhin fanden vereinzelt Analysen auf den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), die elektrische Leitfähigkeit (LF), den pH-Wert

und das Redox-Potenzial. Besonders hervorgehoben in Tabelle 3-6 sind die Beprobungen der Phosphorfraktionen P_{ges} , $P_{\text{gelöst}}$ (P_{mf}) und $\text{PO}_4\text{-P}$. Da aufgrund des Handlungskonzepts Abwasser eine Vielzahl von Kläranlagen zukünftig verschärfte Anforderungen an die Phosphorelimination erfüllen müssen, sollte über diese Messung gezeigt werden, inwiefern Phosphorfraktionen durch das Mikro-GAK-Verfahren ggfs. eliminiert werden können.

3.6.4 Spurenstoffe

Zur Bewertung der Reinigungsleistung der Versuchsanlage wurden Spurenstoffanalysen durchgeführt. Gemessen wurden die Spurenstoffe der vom KomS veröffentlichten Spurenstofflisten A sowie eine modifizierte Version der Spurenstoffliste B. Die Spurenstoffliste A ist mit 47 Stoffen umfangreich und umfasst Einzelsubstanzen aus verschiedenen Stoffgruppen. Durch die breite Auswahl der Substanzen soll ein Überblick über die Spurenstoffsituation abgebildet werden, da sich Spurenstoffe trotz ihrer gemeinsamen Kategorisierung aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften verschieden verhalten (bspw. bezogen auf die Adsorbierbarkeit). Aufgrund der großen Anzahl an Einzelsubstanzen wie auch der Heterogenität dieser ist eine Analyse der Spurenstoffliste A relativ aufwändig und teuer. Eine kostengünstigere Alternative stellt die Spurenstoffliste B dar, die lediglich aus zehn Substanzen besteht. Sie beinhaltet die sieben in Baden-Württemberg zur Bewertung der Wirksamkeit von Verfahren zur Spurenstoffelimination herangezogenen Substanzen Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Benzotriazol und Tolytriazol. Ibuprofen welches Teil der Liste B ist, ist gut biologisch abbaubar und wird bereits in der konventionellen Kläranlage zu > 99 % entfernt. Deshalb wurde die Spurenstoffliste B, für im Rahmen des durchgeführten Projekts, so modifiziert, dass statt Ibuprofen Gabapentin gemessen wurde. Die Spurenstofflisten A und B sind nachfolgend in Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 aufgeführt.

Die Analytik der Substanzen erfolgte durch beauftragte Labore. Die Spurenstoffliste A wurde durch das Betriebs- und Forschungslabor des Zweckverbands Landeswasserversorgung (LW) analysiert. Die Analytik der Spurenstoffliste B wurde durch das Lehr- und Forschungslabor des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (LFL) durchgeführt.

Tabelle 3-7: Substanzen der KomS Spurenstoffliste A

Stoffgruppe	Nr.	Einzelsubstanz	Stoffgruppe	Nr.	Einzelsubstanz
Arzneimittel-wirkstoffe und Metabolite	1	10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepin	Estrogene	24	17-alpha-Ethinylestradiol
	2	Azithromycin		25	17-beta-Estradiol
	3	Bezafibrat		26	Estron
	4	Candesartan	Pestizide	27	Carbendazim
	5	Carbamazepin		28	DEET
	6	Ciprofloxacin		29	Mecoprop
	7	Clarithromycin		30	Terbutryn
	8	Dehydrato-Erythromycin A	Korrosions-schutzmittel	31	Benzotriazol
	9	Diclofenac		32	Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol
	10	Erythromycin A	Komplexbildner	33	DTPA
	11	Gabapentin		34	EDTA
	12	Guanylharnstoff		35	NTA
	13	Hydrochlorothiazid	Weitere Chemikalien	36	Melamin
	14	Ibuprofen	Perfluorierte Tenside	37	PFBA
	15	Irbesartan		38	PFBS
	16	Metformin		39	PFOA
	17	Metoprolol		40	PFOS
	18	Sulfamethoxazol	Synthetische Duftstoffe	41	AHTN
Röntgen-kontrastmittel	19	Amidotrizoesäure		42	HHCB
	20	Iohexol	Flammschutz-mittel	43	TCEP
	21	Iomeprol		44	TCPP
	22	Iopamidol	Synthetische Süßstoffe	45	Acesulfam
	23	Iopromid		46	Cyclamat
				47	Sucralose

Tabelle 3-8: Substanzen der KomS Spurenstoffliste B, mit * sind die Substanzen gekennzeichnet, die zur Berechnung der erforderlichen, mittleren Spurenstoffentnahme in Baden-Württemberg herangezogen werden

Stoffgruppe	Nr.	Einzelsubstanz
Arzneimittelwirkstoffe	1	Candesartan
	2	Carbamazepin*
	3	Diclofenac*
	4	Hydrochlorothiazid*
	5	Ibuprofen
	6	Irbesartan*
	7	Metoprolol*
	8	Sulfamethoxazol
Korrosionsschutzmittel	9	Benzotriazol*
	10	Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol*

3.6.5 Gradienten-Verfahren

Um zu überprüfen, ob sich im Ablauf der Reaktoren Feinanteile der MikroGAK oder Kohleabrieb befand, wurden Proben mithilfe des Gradienten-Verfahren untersucht. Dazu wurden die homogenisierten, unfiltrierten Proben schrittweise erhitzt, um selektiv die verschiedenen Kohlenstofffraktionen über die Detektion von CO₂ in der Probe bestimmen zu können. Eine ausführliche Beschreibung der Methode findet sich im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Bewertung von Verfahren zum Nachweis von Pulveraktivkohle im Kläranlagenablauf“ („BePAK“) (Malms, et al., 2018). Die Analysen wurden durch das Umweltanalytisches Laboratorium des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen durchgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Auswertung des Betriebs der Versuchsreaktoren

Im Rahmen des Versuchsbetriebs sollten durch Variation verschiedener Parameter unterschiedliche Betriebsbedingungen im Reaktorbetrieb realisiert werden. Dafür wurden die Durchflussmenge, die Dosiermenge der Mikro-GAK, sowie das Dosierintervall variiert (vgl. Kapitel 3.5). Durch die Variation der Versuchseinstellung in den verschiedenen Versuchsphasen ergeben sich unterschiedliche Betriebsbedingungen, diese sind in Tabelle 4-2 für die einzelnen Versuchsphasen zusammengefasst.

Die gezeigten Betriebsparameter der Versuchsanlage können wie folgt beschrieben werden:

1. Durchflussmenge:

Die Durchflussmenge wird über die Steuerung der Versuchsanlage vorgegeben. Nach der Vorgabe des Durchflusswertes in m^3/h werden die Pumpen geregelt. Zudem ist im Zulauf jedes Reaktors ein MID mit Datenlogger eingebaut, um die realen Durchflussdaten aufzuzeichnen. Tabelle 4-2 gibt sowohl den Sollwert für den Durchfluss, der an der Steuerung eingestellt wurde, sowie den Ist-Wert an. Der Ist-Wert berechnet sich als Mittelwert der realen Zulaufmenge in der jeweiligen Versuchsphase. Es ist erkennbar, dass überwiegend ein leicht geringerer Durchfluss als die Sollwertvorgabe erzielt wurde. Dies liegt teilweise an der reduzierten Leistung der Zulaufpumpen (vgl. Kapitel 3.3). Außerdem wurden Abschaltungen der Anlage nicht berücksichtigt, sodass sich für Tage mit z.B. Reinigungsarbeiten niedrigere Durchflussmengen ergeben. Insgesamt lassen sich die unterschiedlichen Versuchsbedingungen in den Versuchsphasen aber eindeutig darstellen.

2. Anströmgeschwindigkeit:

Die Anströmgeschwindigkeit berechnet sich als Quotient der Durchflussmenge (Soll/Ist) und der durchströmten Reaktorfläche ($0,18 \text{ m}^2$).

$$v_{\text{Anström}}[\text{m/h}] = Q_{\text{Zulauf,Reaktor}} [\text{m}^3/\text{h}] / A_{\text{Reaktor}} [\text{m}^2]$$

Im Versuchsbetrieb wurden Anströmgeschwindigkeiten zwischen ca. 8 m/h (Versuchsphase 18) und $16,5 \text{ m/h}$ (Versuchsphase 14) erzielt.

3. Mikro-GAK-Dosiermenge:

Ein Vorteil des Mikro-GAK-Verfahrens ist, dass die Mikro-GAK dem System flexibel zugegeben werden kann. Im Rahmen des Versuchsbetriebs auf der Kläranlage Renchen fand eine Batchweise Zugabe der Mikro-GAK ca. alle 2 Tage bis alle 7 Tage statt. Für den Vergleich der Dosiermengen der unterschiedlichen Versuchsphasen wurde eine mittlere Mikro-GAK-Dosis berechnet. Hierfür wurde die zugegebene Mikro-GAK-Menge über die gesamte Versuchsphase aufsummiert (kg) und durch die Anzahl der Tage in der jeweiligen Versuchsphase geteilt. Die mittlere Dosierung stellt eine Vereinfachung dar, da unmittelbar nach der Mikro-GAK-Zugabe eine deutlich höhere

freie Adsorptionskapazität vorliegt, als wenn seit der Zugabe schon eine längere Zeit vergangen ist. Die Anzahl der Mikro-GAK-Zugaben je Versuchsphase kann ebenfalls in Tabelle 4-2 abgelesen werden.

Der Kohleabzug wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt, sodass teilweise die Dosiermenge überschätzt wird.

4. Kontaktzeit in Expansion:

Neben der Anströmgeschwindigkeit und der Mikro-GAK-Dosiermenge ist zur Beschreibung des Prozesses die Kontaktzeit in Expansion relevant, da diese beschreibt, wie lange das Abwasser mit dem Adsorbens (Mikro-GAK) in Kontakt ist. Die Kontaktzeit im Mikro-GAK-Prozess ist dabei abhängig von der Menge an Kohle, die sich im System befindet und von der Anströmgeschwindigkeit. Die Kontaktzeit berechnet sich als Quotient der expandierten Betthöhe und der Anströmgeschwindigkeit. Dafür wurde die expandierte Betthöhe regelmäßig im Betrieb der Versuchsanlage an den Sichtfenstern der Reaktoren bzw. den transparenten Reaktorstücken abgelesen. Wie oft eine Ablesung in der jeweiligen Versuchsphase stattgefunden hat, kann Tabelle 4-2 entnommen werden (n Kontaktzeit Expansion R1/R2).

$$t_{\text{Kontakt}}[\text{min}] = h_{\text{Bett,expandiert}}[\text{m}] / v_{\text{Anström}}[\text{m/h}] * 60 [\text{min/h}]$$

Die einzelnen Werte der Kontaktzeit sind Abbildung 4-1 in dargestellt.

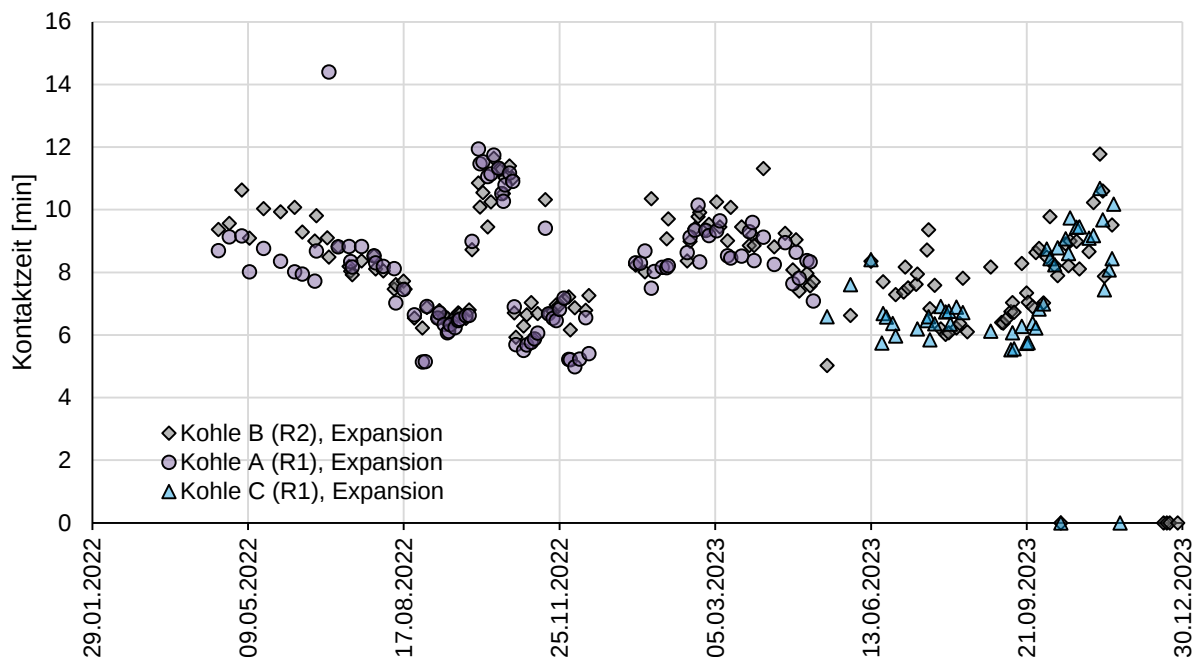


Abbildung 4-1: Kontaktzeit während des Versuchsbetriebs auf der Kläranlage Renchen

Tabelle 4-2 zeigt die gemittelten Kontaktzeiten für die jeweiligen Versuchsphasen. Im Mittel ergeben sich Kontaktzeiten zwischen ca. 6 min und ca. 10 min.

5. Mikro-GAK-Dosis:

Neben der zugegebenen Mikro-GAK-(Dosier)Menge ist auch die Mikro-GAK-Dosis bezogen auf die behandelte Abwassermenge (g/m^3) sowie die spezifische Mikro-GAK-Dosis bezogen auf den DOC im Zulauf der Versuchsanlage von Interesse. Diese berechnen sich nach den folgenden Formeln:

$$\mu\text{GAK} - \text{Dosis} [\text{g}/\text{m}^3]; [\text{mg}/\text{L}] = \mu\text{GAK} - \text{Dosiermenge} [\text{kg}/\text{d}] / \text{Wassermenge} [\text{m}^3/\text{d}]$$

$$\text{spez. } \mu\text{GAK} - \text{Dosis} [\text{g}_{\mu\text{GAK}}/\text{g}_{\text{DOC}}] = \mu\text{GAK} - \text{Dosis} [\text{mg}/\text{L}] / \text{DOC} [\text{mg}/\text{L}]$$

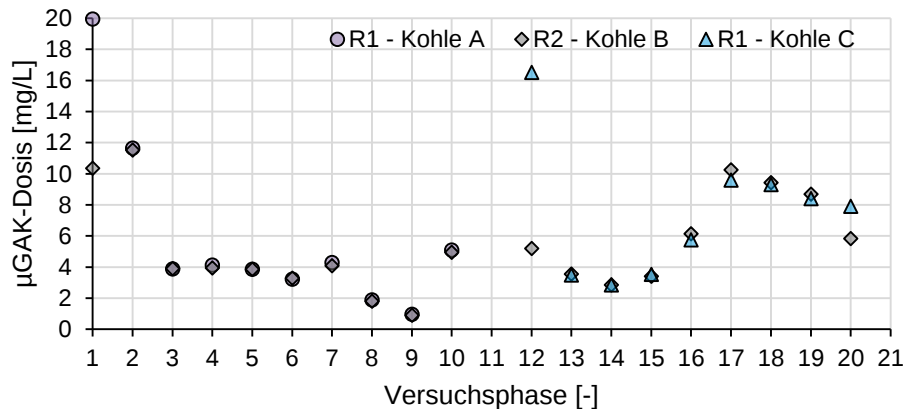


Abbildung 4-2: Mittlere Mikro-GAK-Dosis in den verschiedenen Versuchsphasen

Abbildung 4-2 zeigt die mittlere Mikro-GAK-Dosis in den Versuchsphasen. Diese liegt zwischen 0,9 mg/L in Versuchsphase 9 und 11,5 mg/L in Versuchsphase 2. Mit einem mittleren DOC-Wert von 6,8 mg/L im Ablauf der Nachklärung ($n = 65$) ergeben sich die in Tabelle 4-1 angegebenen Werte.

Tabelle 4-1: Mittlere und spezifische Mikro-GAK-Dosis in den verschiedenen Versuchsphasen

Versuchsphase	μGAK -Dosierung R1 [g/m^3]/[mg/L]	μGAK -Dosierung R2 [g/m^3]/[mg/L]	spez. μGAK - Dosierung R1 [$\text{g}_{\mu\text{GAK}}/\text{g}_{\text{DOC}}$]	spez. μGAK - Dosierung R2 [$\text{g}_{\mu\text{GAK}}/\text{g}_{\text{DOC}}$]
1	19,9	10,3	2,9	1,5
2	11,6	11,5	1,7	1,7
3	3,9	3,9	0,6	0,6
4	4,1	3,9	0,6	0,6
5	3,9	3,9	0,6	0,6
6	3,2	3,3	0,5	0,5
7	4,3	4,1	0,6	0,6
8	1,9	1,8	0,3	0,3
9	0,9	0,9	0,1	0,1
10	5,1	4,9	0,7	0,7
12	16,5	5,2	2,4	0,8
13	3,5	3,5	0,5	0,5
14	2,8	2,8	0,4	0,4
15	3,5	3,4	0,5	0,5
16	5,7	6,1	0,8	0,9
17	9,6	10,2	1,4	1,5
18	9,3	9,4	1,4	1,4
19	8,4	8,7	1,2	1,3
	7,9	5,8	1,2	0,9

Tabelle 4-2: Zusammenfassung des Betriebs der Versuchsreaktoren während der einzelnen Versuchsphasen

Startdatum	Enddatum	Anzahl Versuchstage	Versuchsphase	n (Durchflussmessungen)	Durchfluss Soll	Mittelwert Durchfluss R1	Mittelwert Durchfluss R2	Anströmgeschwindigkeit Soll	Mittelwert Anströmgeschwindigkeit R1	Mittelwert Anströmgeschwindigkeit R2	n (Dosierung R1)	GAK-Dosierung R1	n (Dosierung R2)	GAK-Dosierung R2	n (Kontaktzeit Expansion R1)	Kontaktzeit Expansion R1	n (Kontaktzeit Expansion R2)	Kontaktzeit Expansion R2
		[d]	[-]		[m³/h]	[m³/h]	[m³/h]	[m/h]	[m/h]	[m/h]	[-]	[kg/d]	[-]	[kg/d]	[-]	[min]	[-]	[min]
13.01.2022	09.05.2022	117	1	117	2,0	1,86	1,89	11,29	10,52	10,66	14	0,89	9	0,47	3	9,00	4	9,66
10.05.2022	27.05.2022	18	2	18	2,0	1,95	1,93	11,29	11,01	10,89	8	0,54	8	0,53	2	8,39	2	9,56
28.05.2022	10.08.2022	75	3	75	2,0	1,87	1,86	11,29	10,54	10,48	20	0,17	20	0,17	14	8,79	15	8,78
11.08.2022	29.09.2022	50	4	50	2,5	2,43	2,41	14,11	13,73	13,62	20	0,24	19	0,23	18	6,50	18	6,80
30.09.2022	26.10.2022	27	5	27	1,5	1,44	1,44	8,46	8,13	8,14	6	0,13	6	0,13	13	10,99	13	10,62
27.10.2022	14.12.2022	49	6	49	2,5	2,86	2,81	14,11	16,13	15,84	18	0,22	18	0,22	19	6,17	18	6,90
11.01.2023	07.02.2023	28	7	28	2,0	1,88	1,97	11,29	10,62	11,13	9	0,19	9	0,19	8	8,17	5	9,08
08.02.2023	14.03.2023	35	8	35	2,0	1,90	1,98	11,29	10,70	11,19	5	0,09	5	0,09	10	9,16	10	9,40
15.03.2023	11.04.2023	28	9	28	2,0	1,90	1,99	11,29	10,71	11,22	4	0,04	4	0,04	6	8,89	6	9,62
12.04.2023	07.05.2023	26	10	26	2,0	1,89	1,95	11,29	10,69	11,01	5	0,23	5	0,23	8	8,14	8	8,23
08.05.2023	10.05.2023	3	11	Umbau mit Wechsel Kohle A -> C in Reaktor 1														
11.05.2023	29.06.2023	50	12	50	2,0	1,86	1,90	11,29	10,48	10,71	7	0,74	4	0,24	8	6,74	5	7,00
30.06.2023	20.07.2023	21	13	21	2,5	2,39	2,35	14,11	13,49	13,26	7	0,20	7	0,20	3	6,42	7	8,10
21.07.2023	13.08.2023	24	14	24	3,0	2,93	2,94	16,93	16,52	16,58	8	0,20	8	0,20	8	6,57	8	6,64
14.08.2023	05.09.2023	23	15	23	3,0	2,78	2,88	16,93	15,71	16,23	8	0,23	8	0,23	1	6,12	3	6,89
06.09.2023	20.09.2023	15	16	15	3,0	2,91	2,72	16,93	16,39	15,34	5	0,40	5	0,40	4	5,86	6	6,95
21.09.2023	04.10.2023	14	17	14	2,5	2,61	2,44	14,11	14,71	13,77	7	0,60	7	0,60	7	6,66	7	7,74
05.10.2023	15.10.2023	11	18	11	2,0	1,96	1,93	11,29	8,03	7,93	4	0,44	4	0,44	3	8,49	3	8,63
16.10.2023	09.11.2023	25	19*	19*	2,0	1,90	1,84	11,29	10,75	10,41	8	0,38	8	0,38	8*	9,43	8*	9,55
10.11.2023	27.11.2023	18	20	7	k.A.	2,06	2,24	k.A.	4,52	4,93	6	0,39	6	0,31	4	8,53	2	8,70
28.11.2023	24.01.2024	58	21	0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	18	0,36	18	0,29	0	k.A.	0	k.A.

* 6 Tage Stillstand des Reaktors, in dieser Zeit keine Ermittlung der Kontaktzeit möglich

4.2 Spurenstoffentnahme der Kläranlage Renchen ohne 4. Reinigungsstufe

Die biologische Reinigungsstufe von kommunalen Kläranlagen ist nicht auf die Elimination von Spurenstoffen ausgelegt, dennoch findet in dieser Stufe eine Abnahme der Konzentrationen verschiedenster Spurenstoffe statt. Da sich die Vorgaben zur Reinigungsleistung von Verfahren zur Spurenstoffelimination nach dem „Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg“ auf die gesamte Kläranlage beziehen (UMBW, Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, 2018), muss neben der Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Prozess auch die Entnahme in der mechanischen und der biologischen Stufe betrachtet werden. In Abbildung 4-3 ist die prozentuale Entnahme der sieben BW Substanzen wie auch deren mittlere Entnahme dargestellt. Die Entnahme wurde aus den Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage Renchen und im Ablauf der Nachklärung berechnet. Jeder Balken stellt den Mittelwert von $n=11$ Messungen dar.

Die Substanzen 1H-Benzotriazol und Tolyltriazol sind mäßig biologisch abbaubar (Rau & Metzger, 2017) und werden mit im Mittel über 60 % und 64 % gut durch die mechanische und die biologische Stufe entfernt. Die Stoffe Metoprolol und Diclofenac werden mit im Mittel 33 % und 34 % etwas schlechter entfernt. Eine noch etwas geringere Entnahmeleistung wurde bei den Stoffen Irbesartan (25 %) und Hydrochlorothiazid (25 %) beobachtet. Von den dargestellten Substanzen wurde Carbamazepin (11 %) am schlechtesten durch die mechanisch-biologische Stufe entfernt. Die mittlere Entnahmeleistung der 7 BW Substanzen ergab sich im Mittel zu 35 %, im Maximum zu 50 % und im Minimum zu 29 %. Daraus ergibt sich eine notwendige Leistung der Anlage zur gezielten Spurenstoffelimination von 72 % (Entnahme in der konventionellen Kläranlage: $80 \% - 29 \% = 51 \%$; Erforderliche Entnahme in der weitergehenden Reinigungsstufe: $0,71 * 0,72 = 0,51 \pm 51 \%$).

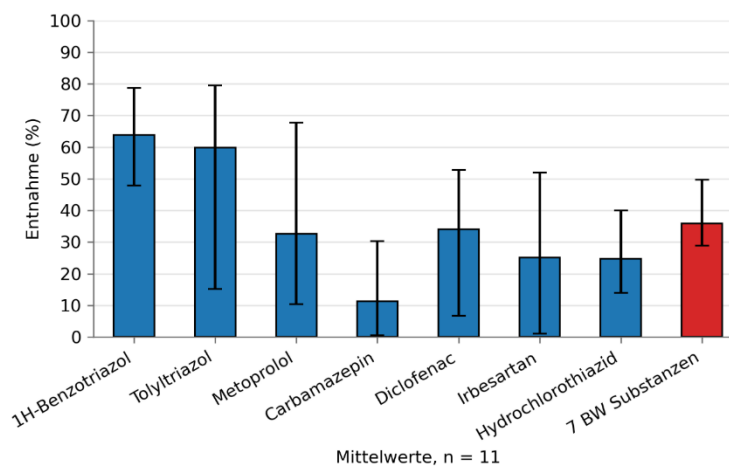


Abbildung 4-3: Entnahme der 7 BW Substanzen durch die mechanische und biologische Stufe der Kläranlage Renchen

Neben den elf Messungen der KomS Liste B wurden auch zwei Messungen der KomS Liste A mit insgesamt 47 Stoffen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser beiden Messungen sind im Anhang I dargestellt.

4.3 Spurenstoffentnahme des Mikro-GAK-Verfahrens

Ziel der Anwendung des Mikro-GAK-Verfahrens ist es ein breites Spektrum anthropogener Spurenstoffe aus dem kommunalen Abwasser zu entfernen und somit zum Schutz der aquatischen Umwelt beizutragen. Um die Wirkung des Mikro-GAK-Verfahrens auf eine breite Auswahl an Spurenstoffen zu testen, wurde im Laufe der Projektlaufzeit 2-mal eine Bestimmung der KomS Liste A (47 Substanzen, vgl. Kapitel 3.6.4) durchgeführt. Die erste Messung der Spurenstoffe der KomS Liste A erfolgte am 25.07.2022 bis 27.07.2022 (72-Stunden-Mischprobe) in Versuchsphase 3. In dieser Versuchsphase wurde in Reaktor 1 Kohle A und in Reaktor 2 Kohle B eingesetzt. Der Durchfluss der Reaktoren betrug in diesem Zeitraum 2 m³/h und die mittlere Dosiermenge in beiden Reaktoren im Mittel 3,9 mg/L bzw. 0,6 mg/mg_{DOC}. Aufgrund der nur wenige Monate zurückliegenden Inbetriebnahme der Reaktoren mit Frischkohle kann es gegebenenfalls noch zu einer Beeinflussung der Entnahmleistung gekommen sein. Die zweite Probenahme fand vom 17.12.2023 bis zum 19.12.2023 statt. In dieser Zeit wurden beide Reaktoren mit variablem Durchfluss betrieben. In Reaktor 1 wurde Kohle C eingesetzt und in Reaktor 2 Kohle B.

Abbildung 4-4 zeigt die Entnahme von 14 Humanarzneimitteln in den beiden Mikro-GAK-Reaktoren. Die Konzentrationen der untersuchten Spurenstoffe werden in Anhang III gezeigt. Die Darstellung der Entnahme weiterer Spurenstoffe aus unterschiedlichen Stoffgruppen zeigt Anhang IV. Die gezeigten 14 Humanarzneimittel weisen unterschiedliche Entnahmeraten auf. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den Entnahmeraten gut adsorbierbarer Stoffe wie Metoprolol, Carbamazepin, Diclofenac, Azithromycin und Ciprofloxacin und den eher mäßig adsorbierbaren Stoffen wie dem Antibiotikum Sulfamethoxazol oder den Stoffe Candesartan und Guanylharstoff erkennbar (vgl. DWA-AG KA-8.6, 2021).

Außerdem zeigen sich Unterschiede in den eingesetzten Mikro-GAK-Produkten. Kohle B zeigt sowohl bei der Probenahme im Jahr 2022 (gegenüber Kohle A) als auch im Jahr 2023 (gegenüber Kohle C) eine höhere Entnahme für die meisten Spurenstoffe.

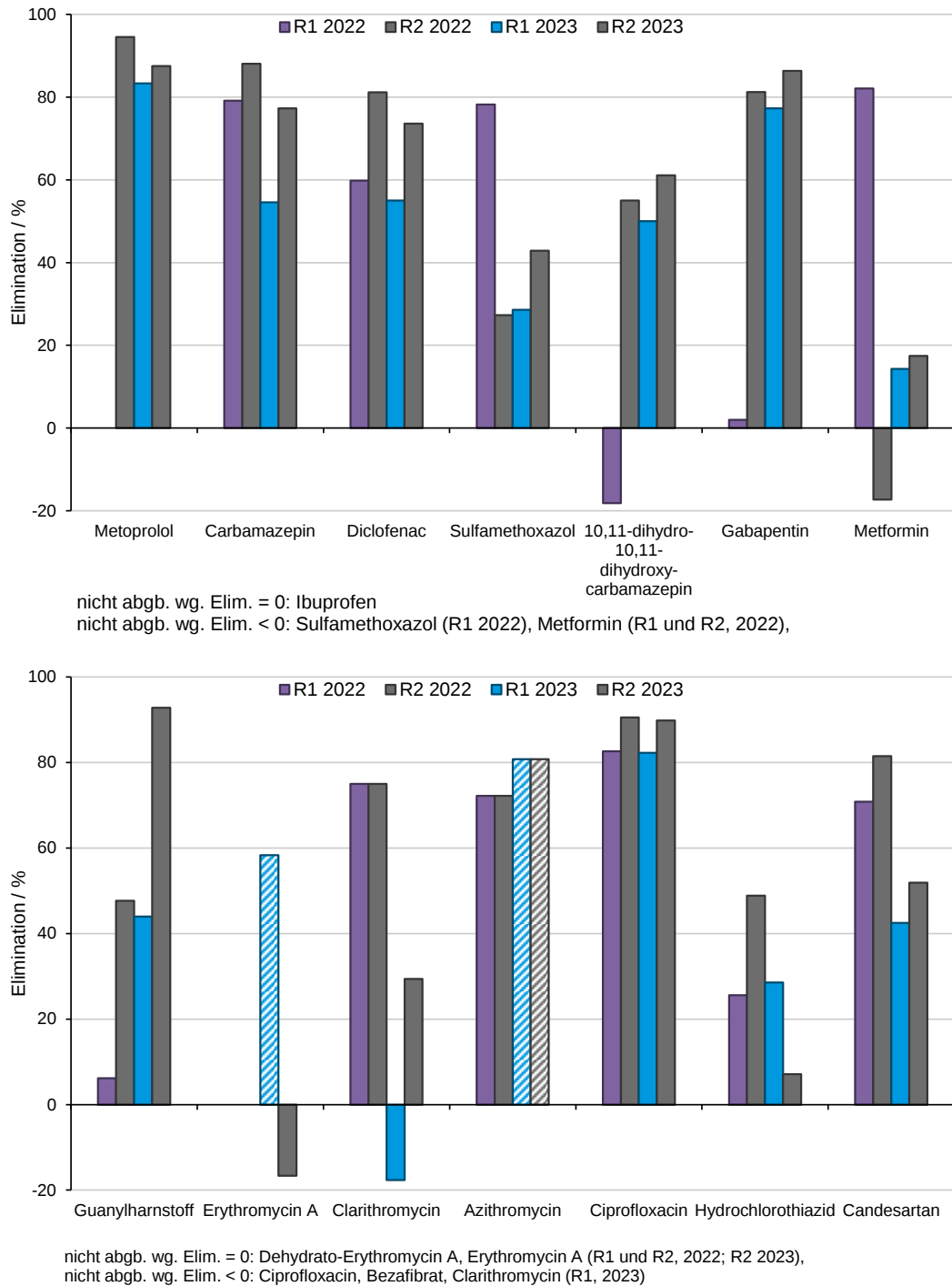


Abbildung 4-4: Entnahme unterschiedlicher Humanarzneimittel in den Mikro-GAK-Reaktoren
(Gestrichelte Balken stellen eine Entnahme des Spurenstoffs bis unter die Bestimmungsgrenze dar)

Neben der Entnahme einer großen Auswahl an Spurenstoffen ist auch relevant, ob das Verfahren geeignet ist, die geforderten Anforderungen zu erfüllen. Wie in Kapitel 4.2 gezeigt ist für eine nachgeschaltete Stufe zur gezielten Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Renchen eine mittlere Entnahme der sieben Leitsubstanzen der KomS Handlungsempfehlungen von 72 % erforderlich. Die restliche Entnahme zur Erreichung der 80 % werden durch die mechanisch-biologische Reinigungsstufe erzielt.

Abbildung 4-5 zeigt die mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 1 unter Einsatz von Kohle A. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 19 Messkampagnen zur Bestimmung der Spurenstoffentnahme im Reaktor durchgeführt. Die Konzentrationsdaten der Spurenstoffe sind in Anhang II zusammengefasst. Während der 19 Messkampagnen wurden unterschiedliche Einstellungen des Durchflusses durch den Reaktor sowie Zugabemengen und -intervalle der Mikro-GAK-Zugabe getestet. Daraus resultierten die ebenfalls in Abbildung 4-5 dargestellten Mikro-GAK-Dosierungen und die Kontaktzeiten während der Probenahmen. Der Einfahrbetrieb ist insbesondere bei den ersten drei Probenahmen erkennbar. Zu Beginn des Projekts wurde der Reaktor mit einer großen Menge an frischer Mikro-GAK befüllt, was an der zunächst sehr hohen mittleren Spurenstoffentnahme von über 80 % im Mikro-GAK-Reaktor erkennbar ist. Bei den anschließenden drei Probenahmen wurde die erforderliche Entnahme von 72 % nicht erzielt. Nach Erhöhung der Kontaktzeit von 6,5 min auf 11 min wird bei gleichbleibender Dosis wieder eine mittlere Spurenstoffentnahme von 74 % (11.10.2022), 72 % (18.10.2022) und 70 % (26.10.2022) erzielt. Bei den weiteren Probenahmen konnte keine mittlere Entnahme > 72 % mehr erzielt werden. Jedoch war die Mikro-GAK-Dosiermenge mit 0,9 mg/L, 1,9 mg/L und 3,2 mg/L auch sehr niedrig. Bei den letzten zwei Probenahmen wurde wieder mehr Mikro-GAK dosiert (5,1 mg/L), was in einem neuerlichen Anstieg der mittleren Entnahme resultiert.

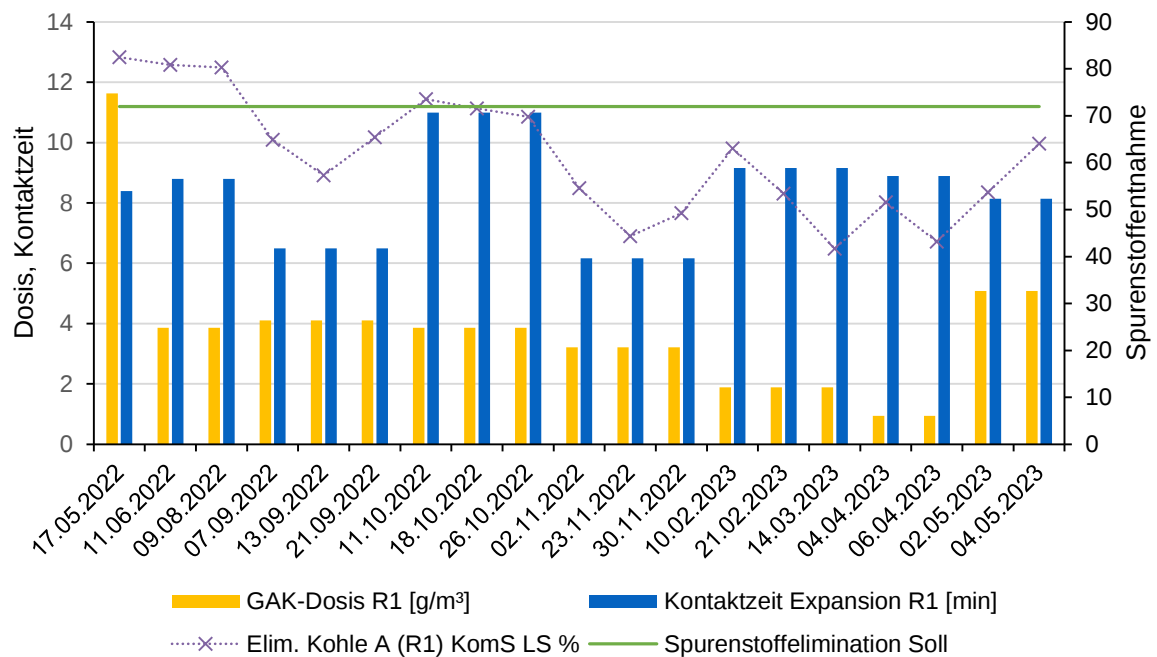


Abbildung 4-5: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 1 (Kohle A)

Abbildung 4-6 zeigt die mittlere Spurenstoffentnahme in Reaktor 1 ab Juni 2023. In diesem Zeitraum war Reaktor 1 mit Kohle C gefüllt. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum 10 Spurenstoffmessungen durchgeführt. Analog zum Einfahrbetrieb mit Kohle A ist auch hier die hohe Entnahme in den ersten Monaten erkennbar, die mit der Befüllung des Reaktors mit einer großen Menge frischer Mikro-GAK zusammenhängt. Im August 2023 ist dann trotz gleichbleibender Dosis und Kontaktzeit eine deutliche Abnahme der Entnahme erkennbar. Am

26.09.2023, 28.09.2023 und 17.10.2023 ist der Einfluss der Erhöhung der Dosis und der Kontaktzeit auf die mittlere Spurenstoffentnahme erkennbar.

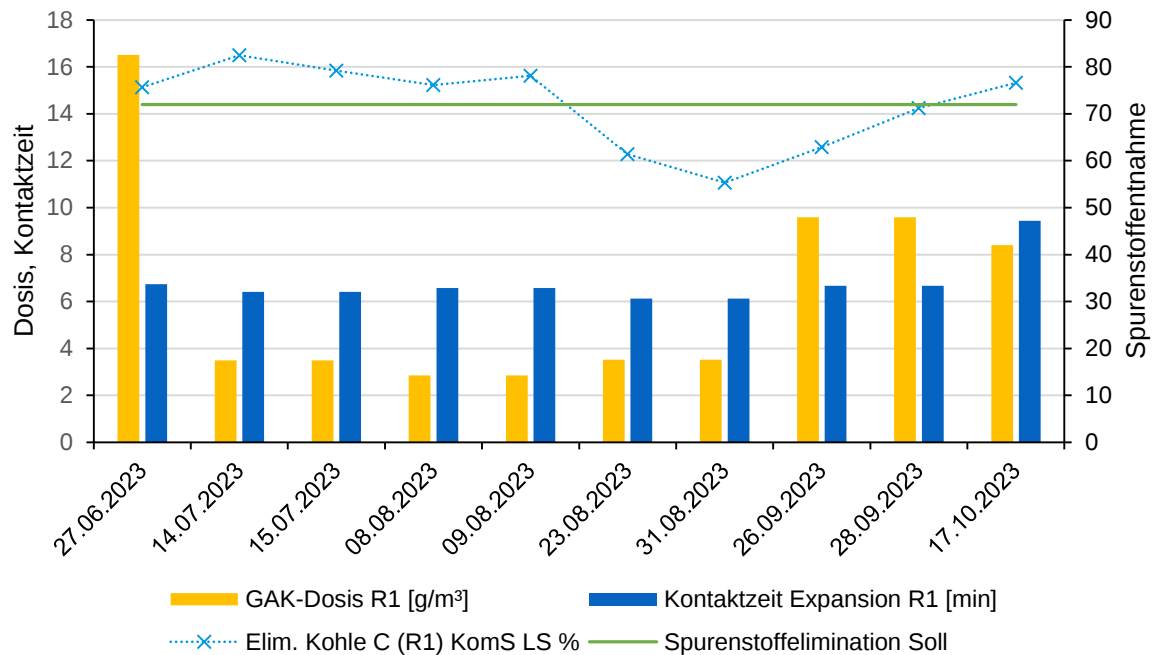


Abbildung 4-6: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 1 (Kohle C)

Reaktor 2 war die gesamte Projektlaufzeit mit Kohle B befüllt, deshalb liegen hier insgesamt 28 Spurenstoffmessungen vor. Die berechneten mittleren Entnahmeraten der Spurenstoffe sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Auch für Kohle B zeigt sich zu Beginn des Versuchszeitraums eine sehr hohe Entnahme, die mit der Einfahrphase mit frischer Mikro-GAK erklärt werden kann. Es ist erkennbar, dass die gewünschte mittlere Spurenstoffentnahme von > 72 % bei der Hälfte der Messungen erreicht wird. Niedrigere Entnahmen treten insbesondere bei sehr niedrigen Dosismengen von 1,8 mg/L bzw. 0,9 mg/L auf (vgl. Zeitraum 10.02.2023 bis 6.04.2023). Nach diesem Zeitraum ist erkennbar, dass selbst eine Erhöhung der Dosis auf 5,1 mg/L nicht sofort zu einer deutlichen Zunahme der Spurenstoffentnahme führt. Dies legt nahe, dass das Mikro-GAK-System verhältnismäßig „träge“ ist.

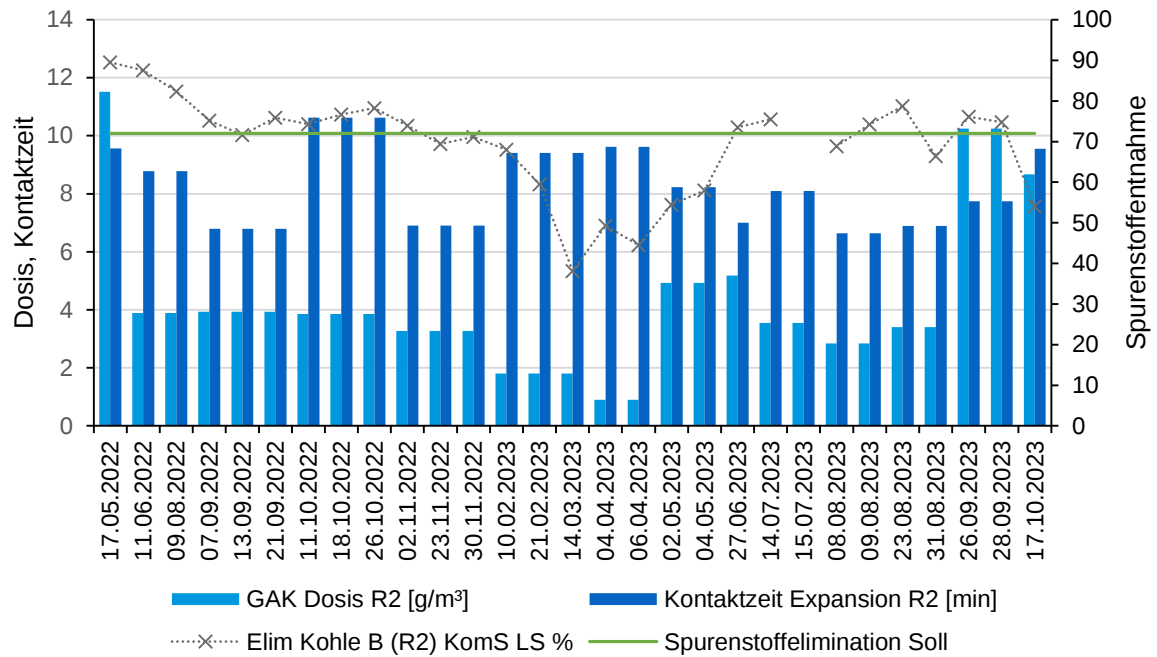


Abbildung 4-7: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen in Reaktor 2 (Kohle B), am 15.07. fand keine Spurenstoffmessung in Reaktor 2 statt

Die Ergebnisse des Versuchsbetriebs des Mikro-GAK-Verfahrens auf der Kläranlage Renchen zeigen, dass es mit dem Verfahren möglich ist die erforderliche mittlere Spurenstoffentnahme von > 72 % zu erfüllen. Es zeigt sich jedoch, dass die Betriebseinstellungen (Dosis und Kontaktzeit) einen starken Einfluss auf die Entnahme haben. Dies wird in Kapitel 4.6 näher betrachtet. Von den drei getesteten Mikro-GAK-Produkten sind alle in der Lage die erforderliche Entnahme zu erzielen.

4.4 Einsatz von Surrogatparametern für die Betriebsoptimierung

Die Messung von Spurenstoffen im Abwasser ist relativ aufwändig und nicht kontinuierlich möglich. Deshalb sind zur fortwährenden Überwachung des Anlagenbetriebs und zur Bearbeitung von Optimierungsfragestellungen Surrogatparameter notwendig über die eine fortwährende Abschätzung der Spurenstoffelimination möglich ist. Surrogat- oder Ersatzparameter sollten dabei kostengünstig (und wenn möglich) über Online-Sonden gemessen werden können. Für Verfahren zur Spurenstoffelimination hat sich die prozentuale Abnahme des spektralen Absorptionskoeffizienten bei einer Wellenlänge von 254 nm (ΔSAK_{254}) (DWA-AG KA-8.6, 2019; VSA, 2019) oder für die Ozonung die (Nitrit-korrigierte) Reduktion des DOC als potenziell geeignete Ersatzparameter gezeigt (Abegglen & Siegrist, 2012; DWA-AG KA-8.5, 2022).

Um auch bei der Optimierung des Mikro-GAK-Verfahrens auf einen einfach zu bestimmenden Parameter zurückgreifen zu können wird nachfolgend dargestellt, ob ein Zusammenhang zwischen der mittleren Entnahme der 7 Leitsubstanzen (Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, 1H-Benzotriazol und Tolytriazol) und dem ΔSAK_{254} bzw. der prozentualen Abnahme des DOC besteht. Da der Zusammenhang Abwasser und Aktivkohlespezifisch ist, sind in Abbildung 4-8 die drei Mikro-GAK-Produkte getrennt dargestellt. Der hier dargestellte ΔSAK_{254} berechnet sich aus den SAK_{254} -Messwerten der 24-Stunden-Mischprobe die auch für die Spurenstoffanalytik verwendet wurde.

Für alle drei untersuchten Kohleprodukte zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Spurenstoffentnahme und dem ΔSAK_{254} . Da für Kohle C nur 10 Messpunkte vorliegen stellt sich der Zusammenhang nicht so eindeutig dar wie für die Kohlen A und B (siehe Bestimmtheitsmaß). Generell kann somit für die Beurteilung und Optimierung des Mikro-GAK-Verfahrens der ΔSAK_{254} als Surrogatparameter genutzt werden. Um die notwendige mittlere Spurenstoffentnahme von 72 % im nachgeschalteten Mikro-GAK-Verfahren zu erzielen sind je nach eingesetztem Kohleprodukt unterschiedliche ΔSAK_{254} Werte erforderlich. Um eine ausreichende Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Verfahren unter Einsatz von Kohle A (Reaktor 1) zu erzielen müsste demnach ein ΔSAK_{254} von 21 % erzielt werden. Für Kohle B müsste der ΔSAK_{254} mindestens bei 21 % liegen und für Kohle C bei 17 %. Diese Werte werden für die Optimierungsbetrachtung in Kapitel 4.7 zu Grunde gelegt. Auf der Ara Penthaz in der Schweiz findet das Mikro-GAK-Verfahren bereits großtechnisch Anwendung und hier wird der Prozess ebenfalls über den ΔSAK_{254} überwacht. Der Sollwert für den ΔSAK_{254} auf der Ara Penthaz liegt bei 25 % (Horisberger, Casazza, Grelot, & Joss, 2019; Grelot, Horisberger, & Casazza, 2021).

Analog zur Abnahme des SAK_{254} kann auch eine Korrelation zwischen Reduktion des DOC und der Spurenstoffentnahme erstellt werden. Für das Mikro-GAK-Verfahren zeigt sich jedoch unabhängig von der eingesetzten Kohle kein ausreichend guter Zusammenhang zwischen DOC-Elimination und Spurenstoffentnahme, sodass hier eine Nutzung des DOC-Rückgangs als Surrogatparameter für die Spurenstoffentnahme nicht möglich ist. Die Abbildungen, die den Zusammenhang zwischen Spurenstoffentnahme und DOC-Rückgang zeigen, sind in Anhang I dargestellt.

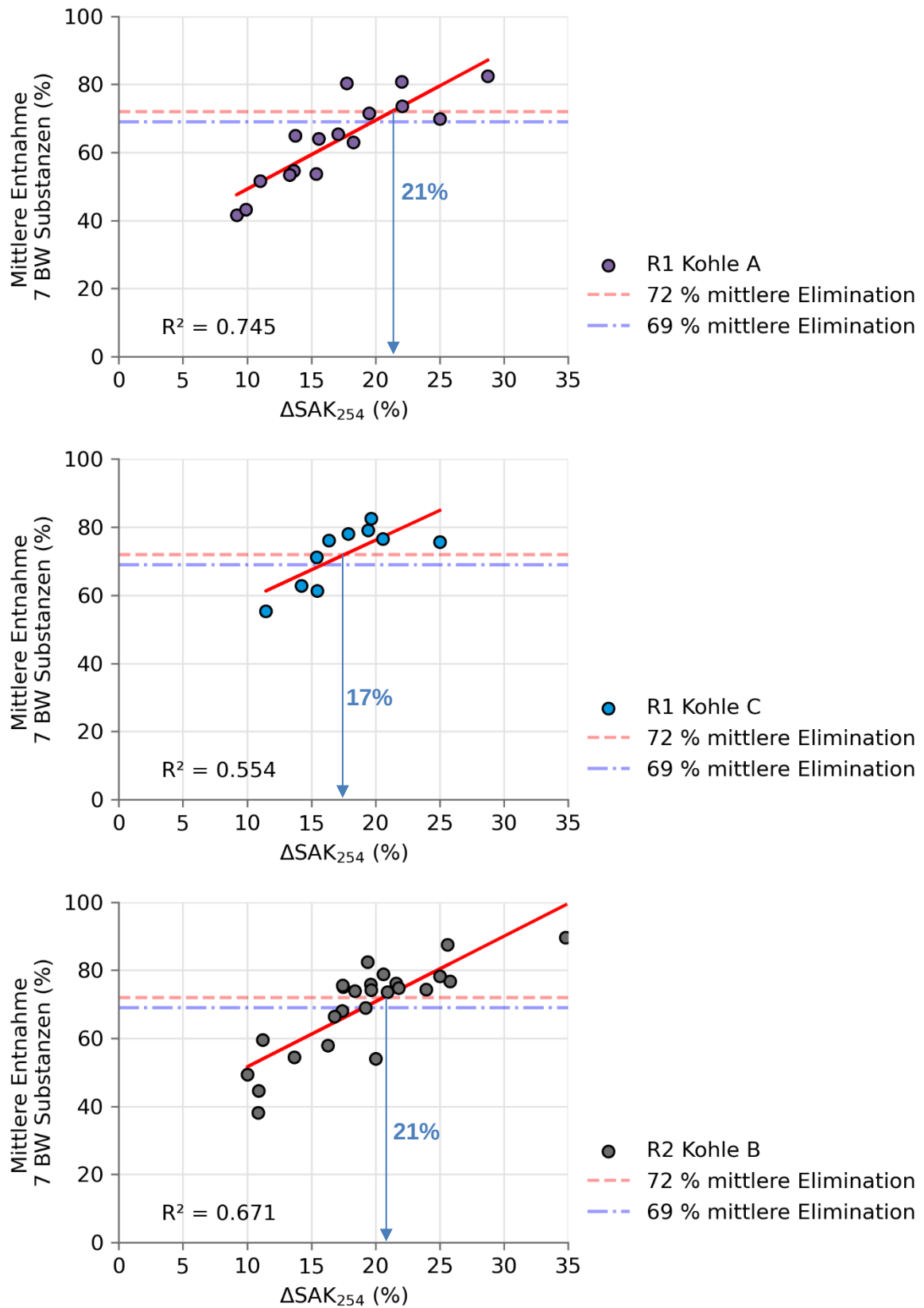


Abbildung 4-8: Korrelation des ΔSAK_{254} und der mittleren Spurenstoffentnahme der 7 BW Substanzen

4.5 Einsatz von Sonden zur Überwachung des Betriebs

4.5.1 SAK_{254} und ΔSAK_{254}

Wie in Kapitel 3.6.1 und Kapitel 4.4 geschildert ist die prozentuale Abnahme des SAK_{254} (der ΔSAK_{254}) im Rahmen des Mikro-GAK-Verfahrens als Surrogatparameter für die Spurenstoffentnahme nutzbar. Um diesen Effekt im Betrieb möglichst effizient auszunutzen, ist eine kontinuierliche Bestimmung des SAK_{254} über Online-Sonden erforderlich. Im Renchen Projekt wurde das SAK_{254} deshalb sowohl über Online-Messsonden als auch täglich im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe bestimmt. Um den Labormesswert und den Messwert der Online-sonde vergleichen zu können, wurde der Onlinemesswert über das 24-Stunden Zeitintervall der Probenahme für die Laboranalytik gemittelt.

Anschließend wurden die Datensätze bereinigt (vgl. Abbildung 4-9, beispielsweise dargestellt für die Probenahmestelle im Ablauf der Nachklärung). Dabei wurden insbesondere sehr hohe Sondenmesswerte aus der Betrachtung exkludiert. Diese Werte können durch Sondendrift, Verunreinigungen des Messspalts (z.B. Luftblasen), Reinigungsarbeiten etc. entstehen und werden nicht weiter betrachtet. Nach Bereinigung der Daten zeigte sich eine gute Übereinstimmung der im Labor ermittelten SAK_{254} -Messwerte mit den Daten des SAK_{254} -Sensors.

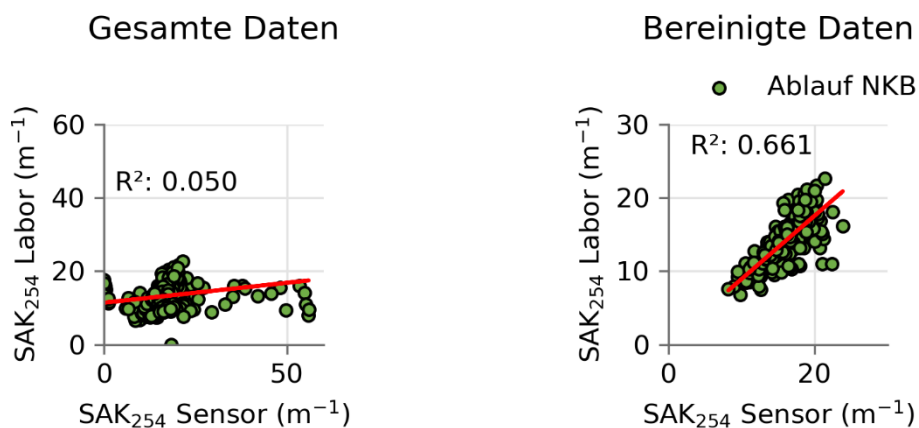


Abbildung 4-9: Darstellung der Bereinigung der Sondenmesswerte

Neben der Probenahmestelle im Ablauf des Nachklärbeckens fanden auch regelmäßige Messungen des SAK_{254} im Ablauf der beiden Versuchsreaktoren statt und auch an dieser Stelle waren SAK_{254} -Online-Messsonden installiert. Abbildung 4-10 zeigt die Korrelation zwischen dem Laborwert und dem Sensor-Messwert, der für die jeweiligen Abläufe der einzelnen Reaktoren ermittelt wurde. Analog zum Ablauf der Nachklärung zeigt sich hier nach Bereinigung der Daten eine gute Übereinstimmung.

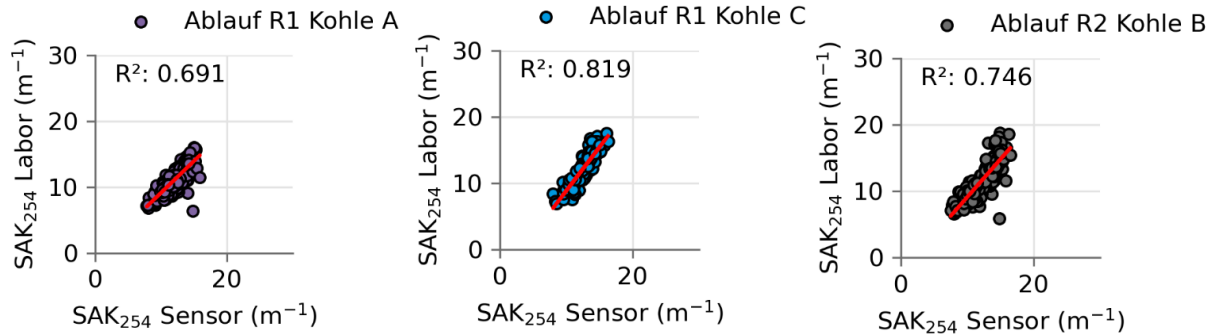


Abbildung 4-10: Korrelation des SAK_{254} gemessen aus der 24h-Mischprobe (Labor) und dem über 24 Stunden gemittelten Wert der Onlinesonde (Sensor)

Für die Abschätzung der Spurenstoffentnahme ist jedoch nicht der Absolutwert des SAK_{254} im Zu- oder Ablauf der Verfahrensstufe zur gezielten Spurenstoffentnahme entscheidend, sondern die prozentuale Abnahme über diesen Verfahrensschritt (ΔSAK_{254}). Deshalb ist in Abbildung 4-11 die Korrelation zwischen dem ΔSAK_{254} berechnet aus den Labormesswerten und dem ΔSAK_{254} berechnet aus den Sensordaten aufgezeigt. Im Gegensatz zu den Werten des SAK_{254} ist für den ΔSAK_{254} eine deutlich schlechtere Übereinstimmung erkennbar. Dies kann insbesondere dann resultieren, wenn eine Messsonde eher zum Überschätzen und die andere Messsonde eher zum Unterschätzen des Laborwertes tendiert.

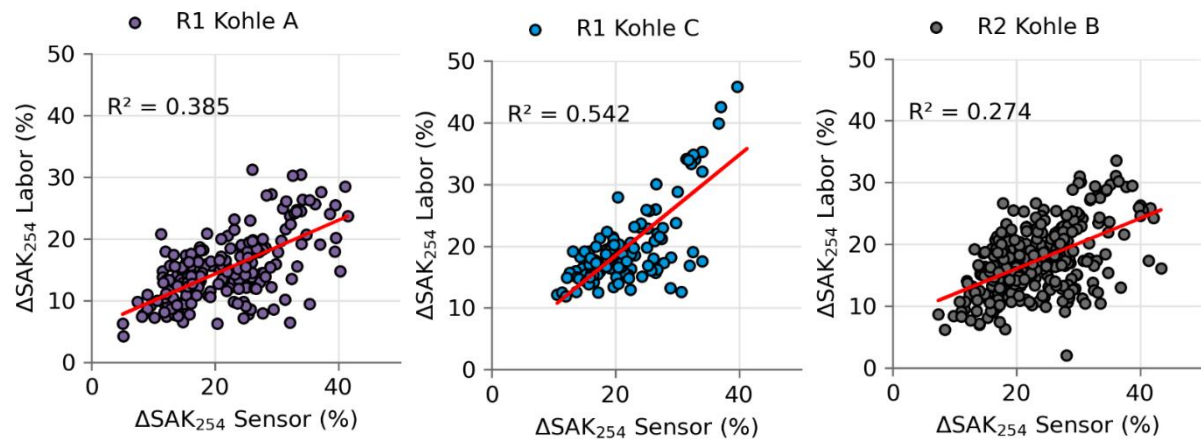


Abbildung 4-11: Korrelation des ΔSAK_{254} berechnet aus den im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe ermittelten Werten (Labor) und den aus den über 24 Stunden gemittelten Onlinemesswerten (Sensor) berechneten Werten

Abschließend kann gefolgert werden, dass durch Online-Sensoren zwar eine Einschätzung der Bedingungen des Mikro-GAK-Verfahrens und somit ein Rückschluss auf die erzielbare Spurenstoffentnahme möglich ist. Soll jedoch zukünftig die Onlinemessung des SAK_{254} zur Regelung der Mikro-GAK-Dosis verwendet werden, sind entweder andere Sonden zu wählen oder weitere Optimierungen vorzunehmen, um die Korrelation zwischen den Sondenmesswerten und den Labormesswerten zu verbessern. Dazu kann es ggfs. hilfreich sein durch die Verwendung von einer Sonde für die Messung des Zu- und Ablaufs die Effekte durch unterschiedliche Sondendrifts zu minimieren. Eine Vor-Ort-Messung des SAK_{254} im Labor hätte weiterhin den Vorteil, dass bei Abweichungen sofort weitere Maßnahmen, wie beispielsweise eine Reinigung der Sonden, möglich gewesen wären. Beim Ablauf der

Versuche auf der Kläranlage Renchen konnten Korrekturen erst beim nächsten Vor-Ort-Termin (ca. 1 Woche nach Beprobung für die Labormessungen) vorgenommen werden. Außerdem wäre für das Mikro-GAK-Verfahren in jedem Fall noch zu untersuchen, ob das System flexibel und schnell genug auf Dosisanpassungen reagiert, um eine solche Steuerung wirkungsvoll implementieren zu können.

4.5.2 Trübung

Zur Überwachung des Feststoffaustrags waren im Ablauf beider Reaktoren Online-Sensoren zur Trübungsmessung installiert. Neben der kontinuierlichen Online-Messung der Trübung wurde jeden Tag die Trübung im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe bestimmt. Abbildung 4-12 zeigt die Korrelation der bereinigten im Labor gemessenen Daten mit den bereinigten gemittelten Daten der Trübungssensoren. Erkennbar ist, dass unabhängig von Reaktor und verwendeter Kohle die Messungen der Trübungssensoren die Messwerte der Laboranalysen deutlich überschreiten. Gründe für die teils deutlichen Abweichungen konnten im Projektverlauf nicht identifiziert werden. Im weiteren Verlauf der Auswertungen (vgl. Kapitel 4.8.1) wird daher der Labormesswert für die Auswertungen verwendet.

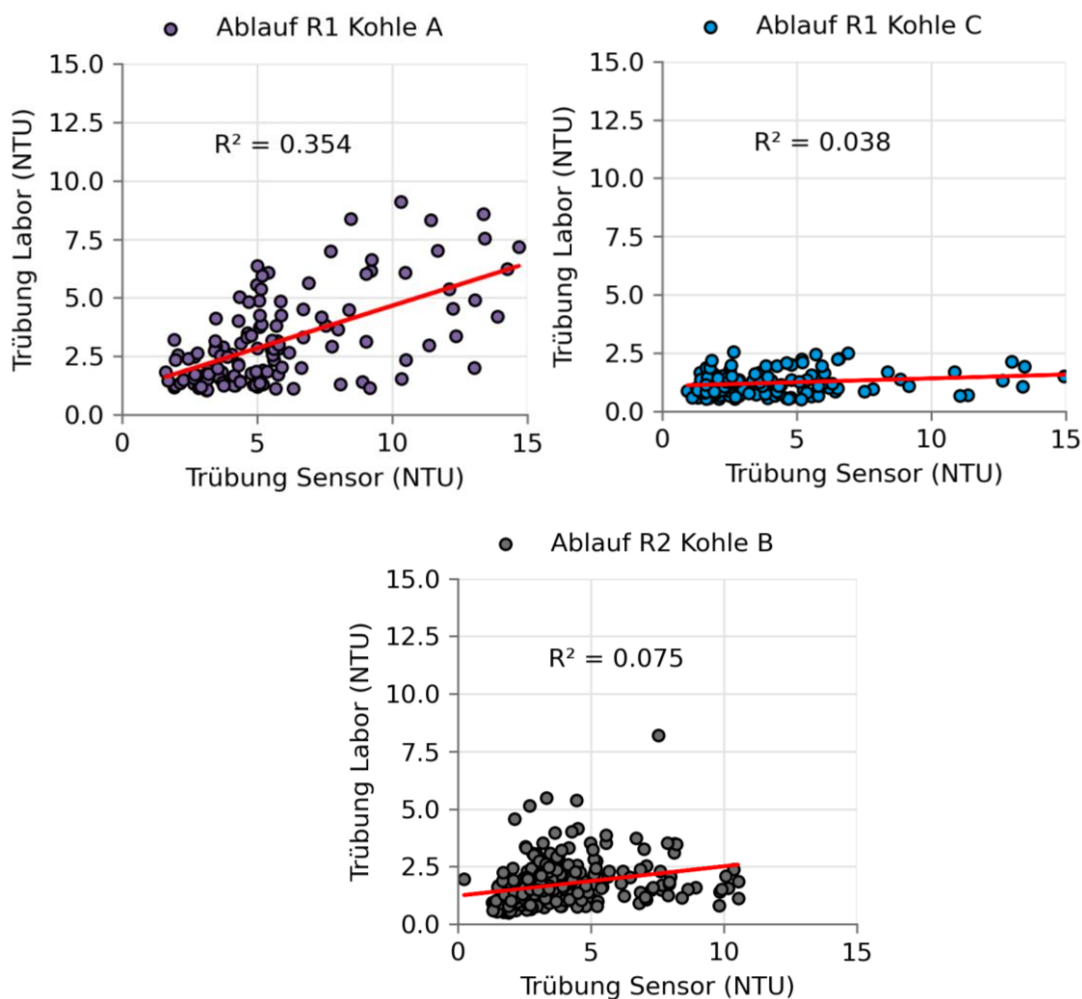


Abbildung 4-12: Korrelation der Trübung gemessen aus der 24h-Mischprobe (Labor) und dem über 24 Stunden gemittelten Wert der Onlinesonde (Sensor)

4.6 Einfluss der Betriebsgrößen auf die Entnahmeleistung des Mikro-GAK-Verfahrens

4.6.1 Durchflussmenge

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Durchflussmengen in den Reaktoren getestet. Der Durchfluss beeinflusst die Anströmgeschwindigkeit und somit die Expansion des Bettes und die Kontaktzeit. Abbildung 4-13 zeigt die mittlere Entnahme der 7 Spurenstoffe, die in Baden-Württemberg zur Bewertung von Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination herangezogen werden. Um den Einfluss der Mikro-GAK-Dosiermenge zu reduzieren, sind lediglich Probenahmen dargestellt, bei denen die Dosiermenge zwischen 2,8 mg/L und 5,2 mg/L lag. Mit Kohle A und Kohle B wurden alle vier unterschiedlichen Durchflussmengen getestet. Deutlich ist erkennbar, dass für Kohle A die Spurenstoffentnahme mit steigender Durchflussmenge abnimmt. Für Kohle B stellt sich dieser Zusammenhang nicht so eindeutig dar. Kohle C wurde nur bei zwei Durchflüssen getestet und auch hier ist die Reduzierung der mittleren Entnahme mit steigendem Zufluss zu erkennen. Insgesamt ergibt sich somit tendenziell, dass steigende Durchflussmengen einen negativen Einfluss auf die Spurenstoffentnahme haben können.

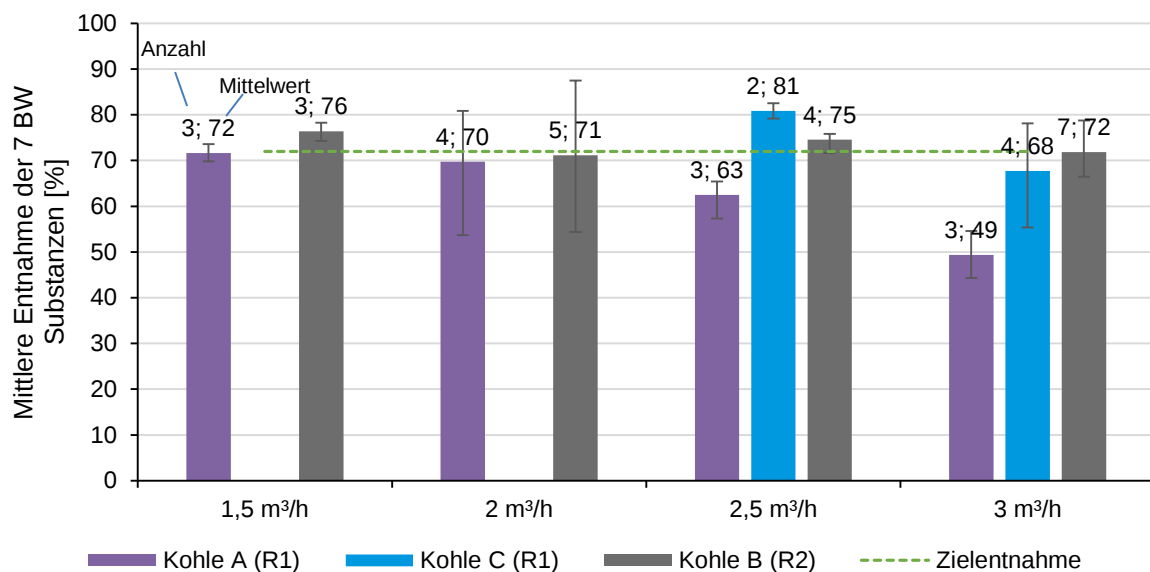


Abbildung 4-13: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen getesteten Kohleprodukten in Abhängigkeit des Soll-Durchflusses (Auswahl der Daten: Dosis > 2,8 und < 5,2 g/m³); Fehlerbalken stellen Max und Min-Werte dar

4.6.2 Kontaktzeit

Die Kontaktzeit gibt an, wie lange die Abwasserinhaltsstoffe theoretisch mit dem expandierten Mikro-GAK-Bett in Kontakt sind. Abbildung 4-14 zeigt die Entnahme der organischen Summenparameter SAK_{254} und DOC in Abhängigkeit der Kontaktzeit. Insgesamt wurden im Versuchszeitraum Kontaktzeiten zwischen 6 und 11 Minuten erzielt. Sowohl für den SAK_{254} als auch für den DOC zeigt sich, dass mit steigender Kontaktzeit eine leicht bessere Entnahme stattfindet, da die Abwasserinhaltsstoffe länger mit dem Adsorbens in Kontakt sind.

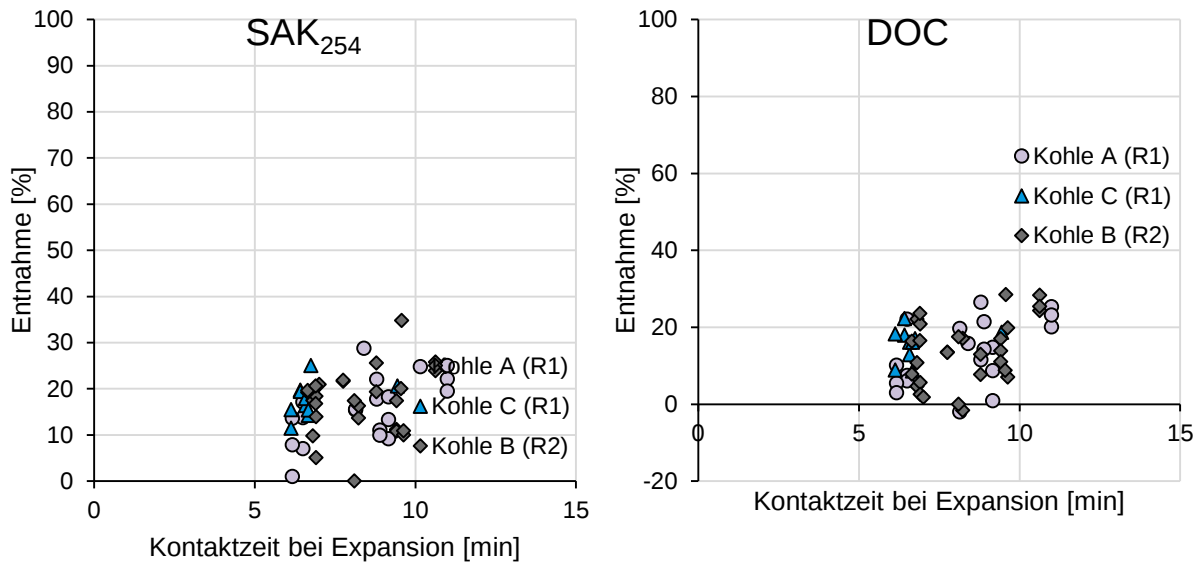


Abbildung 4-14: Entnahme des SAK₂₅₄ und des DOC in den Reaktoren in Abhängigkeit der Kontaktzeit

Abbildung 4-15 zeigt die Entnahme von zwei einzelnen Spurenstoffen, dem Korrosionsschutzmittel 1H-Benzotriazol und dem Blutdrucksenker Candesartan in Abhängigkeit der Kontaktzeit. Für das sehr gut adsorbierbare 1H-Benzotriazol zeigt sich keine deutliche Abhängigkeit zwischen der Kontaktzeit und der Entnahme. Aufgrund der guten Adsorptionseigenschaften sind hier schon geringe Kontaktzeiten ausreichend, um hohe Entnahmen zu erzielen. Der Blutdrucksenker Candesartan adsorbiert nur mittel/mäßig an Aktivkohle. Hier ist deutlicher ein Zusammenhang zwischen Kontaktzeit und Entnahme zu erkennen. Je länger die Kontaktzeit ist, desto besser wird Candesartan entnommen.

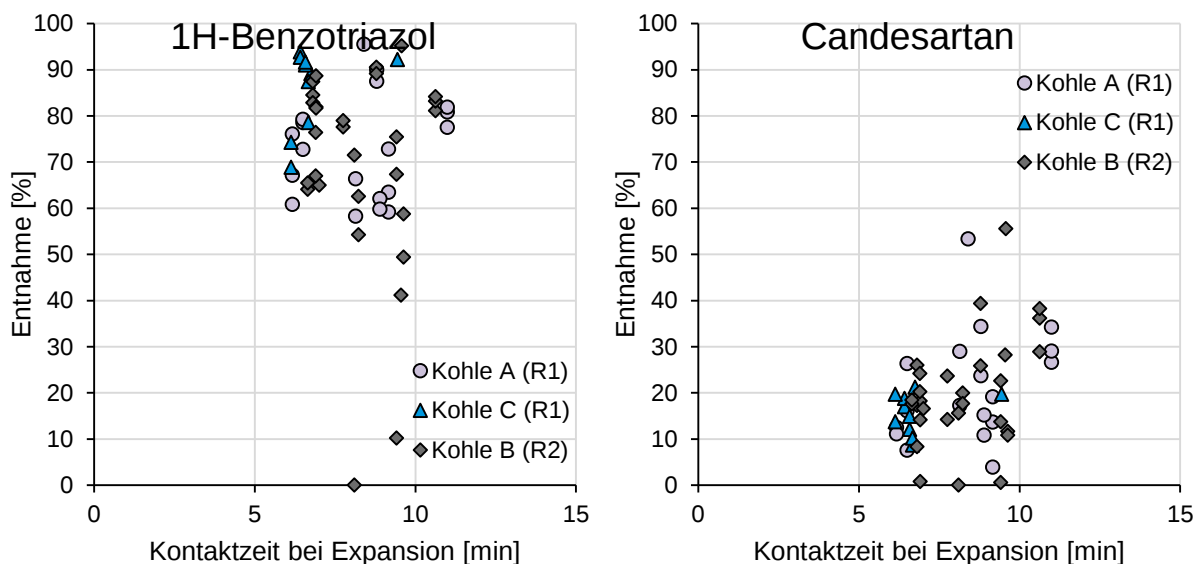
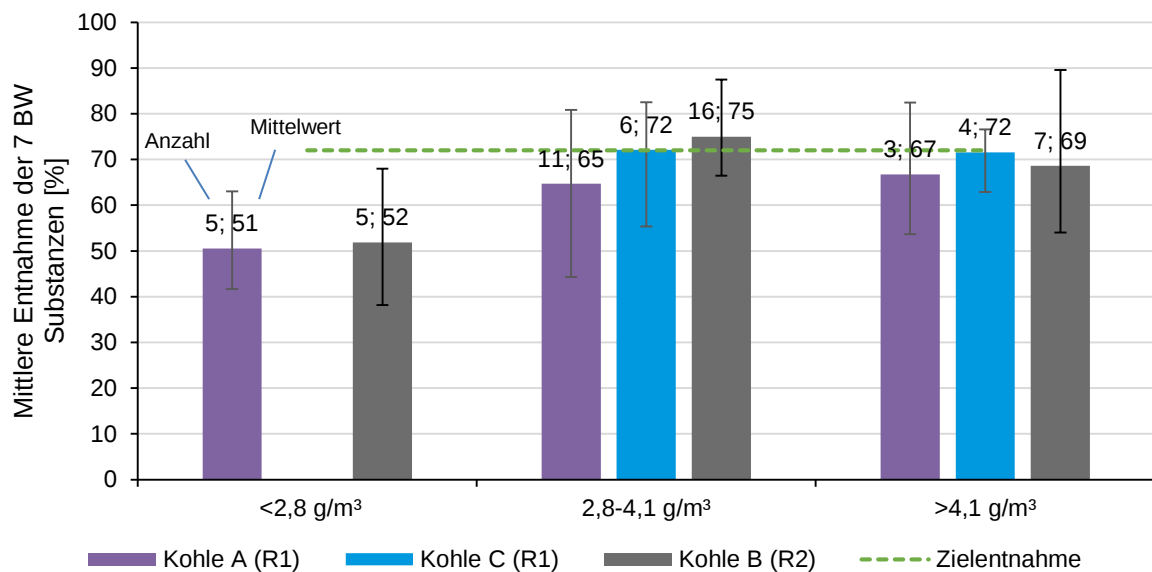


Abbildung 4-15: Entnahme von 1H-Benzotriazol (gut adsorbierbar) und Candesartan (mäßig adsorbierbar) in den Reaktoren in Abhängigkeit der Kontaktzeit

Die Entnahme weiterer Einzelstoffe in Abhängigkeit verschiedener Betriebsgrößen ist in Anhang VI dargestellt. Generell kann festgehalten werden, dass eine längere Kontaktzeit des Abwassers mit dem Mikro-GAK-Bett, insbesondere für mäßig adsorbierbare Stoffe, zu einer besseren Entnahme führt.

4.6.3 Mikro-GAK-Dosiermenge

Einen großen Einfluss auf die Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Verfahren hat auch die Mikro-GAK-Dosis, da sie anzeigt, wieviel frische Aktivkohle im System für die Adsorption der Spurenstoffe zur Verfügung steht. Abbildung 4-16 zeigt die mittlere Entnahme der Spurenstoffe gruppiert in verschiedene Dosierungsklassen. Insbesondere bei den Probenahmen mit einer Dosierung $< 2,8 \text{ g/m}^3$ ist eine deutlich niedrigere Spurenstoffentnahme erkennbar als für die höheren Dosiermengen. Für Kohle A zeigt sich auch eindeutig die Zunahme der mittleren Spurenstoffentnahme mit steigender Mikro-GAK-Dosis. Insgesamt muss bei dieser Auswertung berücksichtigt werden, dass der Einfahrbetrieb der Reaktoren, das heißt die Zeiten in denen anfänglich viel frische Kohle im System war mitberücksichtigt wurden. In den hier beprobten Versuchsphasen 3 und 4, sowie 13 und 14 lag die Mikro-GAK-Dosis jeweils zwischen 2,8 und $4,1 \text{ g/m}^3$. In dieser Klasse kann es somit zu einer Überschätzung der Entnahme durch die Effekte der Inbetriebnahme gekommen sein.



Mittelwert Dosis	Kohle A (R1)	Kohle C (R1)	Kohle B (R2)
<2,8 g/m³	1,5		1,4
2,8-4,1 g/m³	3,8	3,3	3,6
>4,1 g/m³	7,3	11,0	8,0

Abbildung 4-16: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen getesteten Kohleprodukten in Abhängigkeit der Dosiermenge; Fehlerbalken stellen Max und Min-Werte dar

Abbildung 4-17 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Entnahme der Spurenstoffe in Abhängigkeit der Mikro-GAK-Dosis. Weitere Parameter sowie die Abhängigkeit von der spezifischen Mikro-GAK-Dosis sind in Anhang VI dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass im

Laufe des Versuchsbetriebs überwiegend Mikro-GAK-Dosierungen $< 5 \text{ g/m}^3$ getestet wurden. Mit dem mittleren DOC im Ablauf der Kläranlage Renchen von $6,8 \text{ mg/L}$ ergibt das spezifische Mikro-GAK-Dosierungen $< 1 \text{ g}_{\text{GAK}}/\text{g}_{\text{DOC}}$. Nach Merkblatt DWA-M 285-2 (DWA-AG KA-8.6, 2021) ist eine spezifische Aktivkohle-Dosis von mindestens $1 \text{ g}_{\text{AK}}/\text{g}_{\text{DOC}}$ notwendig, um eine ausreichende mittlere Spurenstoffentnahme zu erzielen. Dies bestätigt sich auch für die Zugabe der Aktivkohle in Form von Mikro-GAK.

Für Kohle A (Reaktor 1) waren die getesteten Dosiermengen überwiegend nicht ausreichend, um die notwendige mittlere Spurenstoffentnahme von $> 72 \%$ zu erzielen (vgl. Kapitel 4.2). Lediglich bei einer Probenahme mit einer Dosiermenge von $> 10 \text{ g/m}^3$ wurde die erforderliche mittlere Spurenstoffentnahme deutlich überschritten. Bei Kohle C (Reaktor 1) zeigt sich deutlich der Einfluss der Einfahrphase auf die mittlere Spurenstoffentnahme. In dieser wurden trotz niedriger Mikro-GAK-Dosis, aufgrund von viel frischer Aktivkohle im System, sehr gute Entnahmen erzielt (vgl. Kapitel 4.3). Die Daten geben jedoch einen Hinweis, dass bei Dosiermengen von knapp 10 g/m^3 die Zielentnahme von 72% erreicht werden kann.

Für Kohle B (Reaktor 2) liegen die meisten Messwerte vor. Auch hier ergaben sich in der Versuchsphase überwiegend Dosierungen von $< 5 \text{ g/m}^3$. Trotz der ebenfalls niedrigen Mikro-GAK-Dosis wird die benötigte mittlere Entnahme deutlich häufiger überschritten.

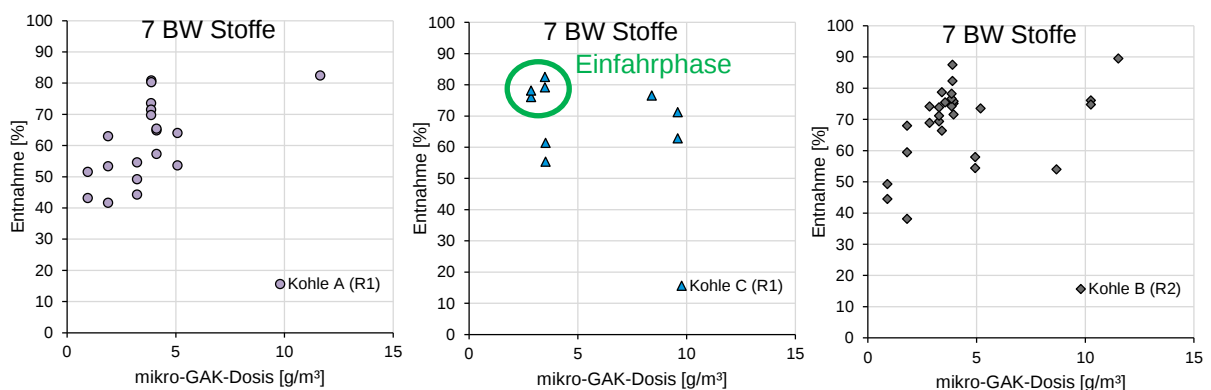


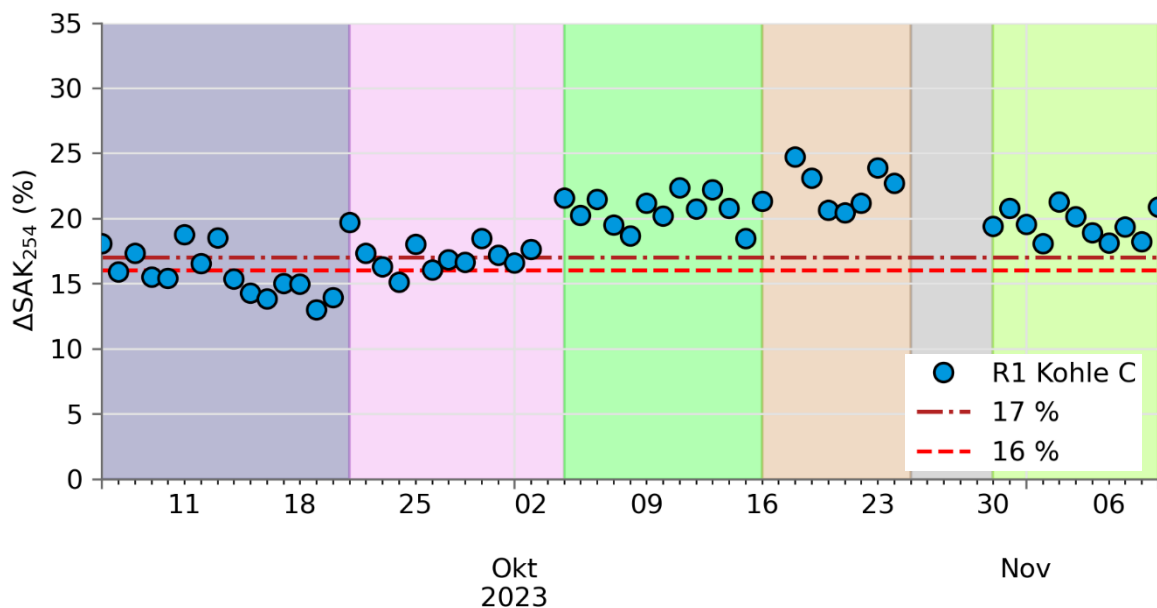
Abbildung 4-17: Mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen mit den verschiedenen Mikro-GAK-Produkten in Abhängigkeit der Mikro-GAK-Dosis

Insgesamt ist festzuhalten, dass Mikro-GAK-Dosierungen $< 1 \text{ g/m}^3$ dauerhaft nicht ausreichen, um die geforderte Spurenstoffentnahme zu gewährleisten. Für die Kläranlage Renchen mit einem mittleren DOC im Ablauf der Nachklärung von $6,8 \text{ mg/L}$ ergeben sich tendenziell notwendige Dosiermengen von knapp 10 g/m^3 , um die notwendige Entnahme sicher einzuhalten. Neben der Mikro-GAK-Dosis ist die Entnahme auch vom gewählten Mikro-GAK-Produkt abhängig. Hier scheint das Produkt B etwas bessere Entnahmen aufzuzeigen als die anderen beiden getesteten Produkte. Im Vergleich dazu war im zweijährigen Betrieb bei der ARA Penthaz (Schweiz) eine Dosierung von 13 g/m^3 für das dort genutzte Mikro-GAK-Produkt notwendig, um die erforderlichen 80% Entnahme zu erreichen (Grelot, Horisberger, & Casazza, 2021).

4.7 Optimierung der Dosierstrategie

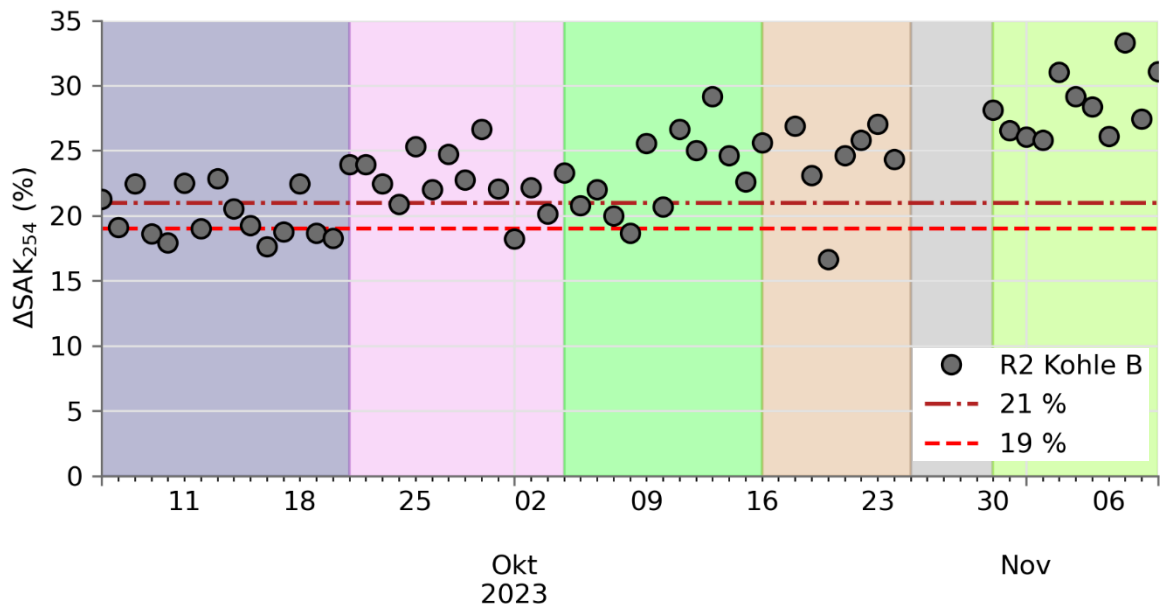
In den Versuchsphasen 16 bis 19 wurde, auf Basis der bisherigen Erkenntnisse eine strukturierte Optimierung der Dosierstrategie vorgenommen. Für die Optimierung wurde die Abnahme des SAK_{254} (ΔSAK_{254}) berechnet aus den Messungen im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe als Surrogatparameter verwendet. Für Kohle C (Reaktor 1) wurde angenommen, dass ein ΔSAK_{254} 17 % notwendig ist, um eine mittlere Entnahme der Leitsubstanzen von 80 % zu erzielen, und für Kohle B (Reaktor 2) ein ΔSAK_{254} von 21 %. Die Ermittlung dieser Werte wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Der zeitliche Verlauf des ΔSAK_{254} im Versuchszeitraum und die zugehörigen, jeweiligen Einstellungen sind für Reaktor 1 (Kohle C) in Abbildung 4-18 und für Reaktor 2 (Kohle B) in Abbildung 4-19 dargestellt. In Versuchsphase 16 konnte mit einer mittleren Durchflussmenge von 2,9 m³/h bzw. 2,7 m³/h der jeweils notwendige ΔSAK_{254} nicht erreicht werden. Deshalb wurde in Versuchsphase 17 der Durchfluss reduziert, was zu einer Erhöhung des ΔSAK_{254} in beiden Reaktoren führte. Zudem fanden in dieser Versuchsphasen häufigere Zugaben von Mikro-GAK statt. In Versuchsphase 18 wurde der Durchfluss weiter reduziert, was zu einem weiteren Anstieg des ΔSAK_{254} führte. In Versuchsphase 19a wurde dann die Dosis der Mikro-GAK nochmals erhöht, was in den höchsten, während dieser Optimierung erzielten ΔSAK_{254} -Werten resultierte.



	Mittlere Durchflussmenge (ist)	Anzahl Versuchstage	Anzahl Dosierungen	Mittlere Anzahl Dosierungen pro Tag	Dosierung Ist
Versuchsphase 16	2,9 m ³ /h	15	5	0,33	5,7 g/m ³
Versuchsphase 17	2,6 m ³ /h	14	7	0,5	9,6 g/m ³
Versuchsphase 18	2,0 m ³ /h	11	4	0,36	9,3 g/m ³
Versuchsphase 19a	1,9 m ³ /h	9	5	0,56	13,0 g/m ³
Anlagenstillstand					
Versuchsphase 19b	1,9 m ³ /h	10	3	0,3	7,2 g/m ³

Abbildung 4-18: ΔSAK_{254} im Zeitraum von 06. September bis zum 09. November 2023 während der Optimierungsphase der Dosierung im Reaktor 1 mit Kohle C



	Mittlere Durchflussmenge (ist)	Anzahl Versuchstage	Anzahl Dosierungen	Mittlere Anzahl Dosierungen pro Tag	Dosierung Ist
Versuchsphase 16	2,7 m ³ /h	15	5	0,3	6,1 g/m ³
Versuchsphase 17	2,4 m ³ /h	14	7	0,5	10,3 g/m ³
Versuchsphase 18	1,9 m ³ /h	11	4	0,36	9,4 g/m ³
Versuchsphase 19a	1,9 m ³ /h	9	5	0,56	12,9 g/m ³
Anlagenstillstand					
Versuchsphase 19b	1,8 m ³ /h	10	3	0,3	7,8 g/m ³

Abbildung 4-19: ΔSAK_{254} im Zeitraum von 06. September bis zum 09. November 2023 während der Optimierungsphase der Dosierung im Reaktor 2 mit Kohle B

Auch wenn die einzelnen Versuchsphasen relativ kurz gewählt wurden und sich daher die Veränderungen in den einzelnen Phasen ggfs. teilweise überlappen, sind folgende Effekte deutlich erkennbar:

- Eine Verringerung des Durchflusses/der Anströmgeschwindigkeit führt zu einem höheren ΔSAK_{254}
- Eine Erhöhung des Dosierintervalls und somit der Ist-Dosierung führt zu einem höheren ΔSAK_{254}
- Um die gewünschte Spurenstoffentnahme einhalten zu können, müssen nach dieser Auswertung bei einem Durchfluss ca. 2 m³/h und einer Kontaktzeit von 8,5 min (Versuchsphase 18) ca. 9,3 mg/L (Kohle C) bzw. 9,4 mg/L (Kohle B) dosiert werden

Um den Zustand in Versuchsphase 17 (rosa hinterlegt) und die Nutzung des ΔSAK_{254} als Surrogatparameter zu verifizieren/validieren, wurden in dieser Versuchsphase zwei Spurenstoffprobenahmen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-20 dargestellt. Die Substanzen 1H-Benzotriazol und Tolyltriazol wurden durch die verschiedenen Kohlen ungefähr ähnlich gut entfernt. Bei den anderen Substanzen ist eine geringere Entnahmeleistung durch Kohle C als durch Kohle B zu erkennen. Dies lässt sich durch den erhöhten Durchfluss in Reaktor 1 verglichen mit Reaktor 2 und die daraus resultierende geringere Mikro-GAK-Dosis

erklären. Im Kapitel Einfluss der Betriebsgrößen auf die Entnahmeleistung des Mikro-GAK-Verfahrens (vgl. Kapitel 4.6) konnte bereits gezeigt werden, dass die Entnahmeleistung je nach Kohle deutlich vom eingesetzten Durchfluss und der Dosiermenge abhängt. Die Durchflüsse waren aufgrund der Pumpenkonfiguration nicht identisch.

Zusätzlich ist im Diagramm die mittlere Entnahme der 7 BW Substanzen dargestellt und die notwendige mittleren Entnahme von 72 % durch eine gestrichelte rote Linie gekennzeichnet. Diese zeigt den Wert von 72 % an, der notwendig ist, um bei einer minimalen Spurenstoffentnahmeleistung der Kläranlage insgesamt auf eine Reinigungsleistung von 80 % zu kommen (vgl. Kapitel 4.2).

Die mittlere Entnahme durch Reaktor 2 mit Kohle B liegt oberhalb dieses Wertes. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen für den ΔSAK_{254} wieder, der in Versuchsphase 17 (rosa hinterlegt) bereits überwiegend über 21 % betrug (vgl. Abbildung 4-19). Für Kohle C konnte in Versuchsphase 17 noch keine Spurenstoffentnahme von > 72 % erzielt werden. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass die als notwendig identifizierte SAK_{254} -Reduktion von 17 % überwiegend in dieser Versuchsphase nicht erzielt wurde (vgl. Abbildung 4-19). Insgesamt zeigt die Validierung deutlich, dass durch den Verlauf des ΔSAK_{254} Rückschlüsse auf die mittlere Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Prozess gezogen werden können.

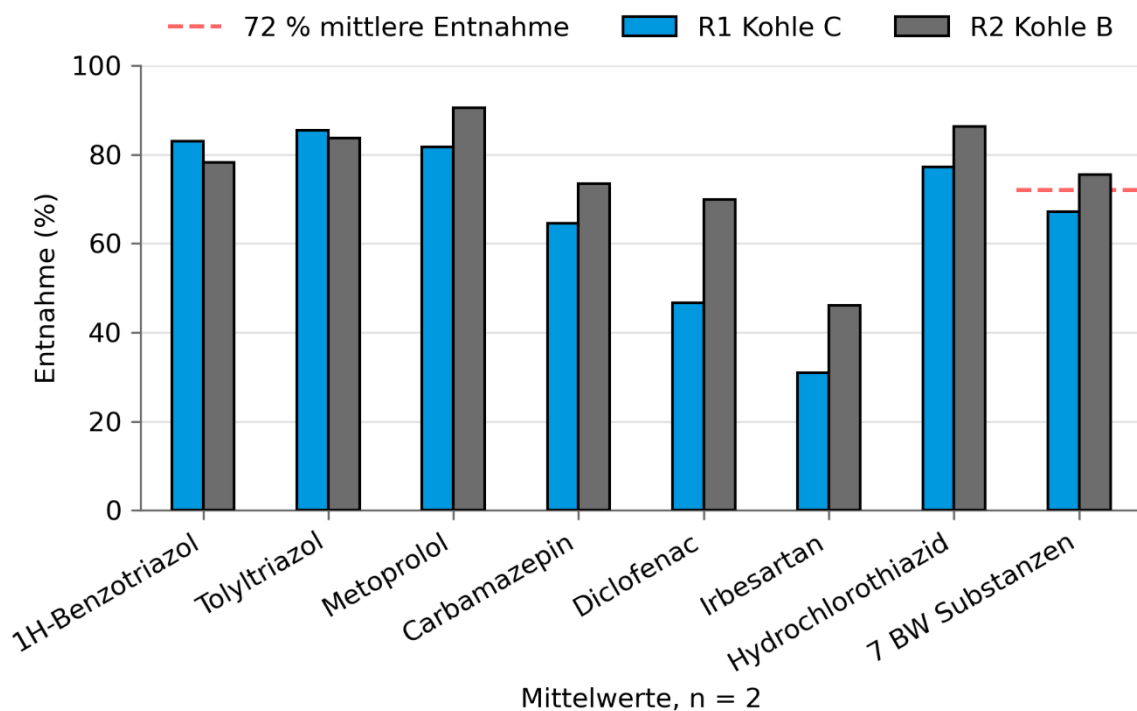


Abbildung 4-20: Spurenstoffentnahme durch Reaktor 1 mit Kohle C und Reaktor 2 mit Kohle B im September 2023 (rosa Bereich in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19)

4.8 Feststofffreiheit des Ablaufs der Versuchsanlage

Da dem Mikro-GAK-Verfahren kein Filter nachgeschaltet ist muss der Rückhalt der Aktivkohle im System nachgewiesen werden. Zum Nachweis wurden drei Indikatoren verwendet. Ergänzend wurde visuell bestätigt, dass sich bei stabilem Betrieb in den Reaktoren eine deutlich sichtbare Grenzschicht zwischen der Oberkannte des Schwebebetts und dem weiteren Überstand im Reaktor bildete. Das Schwebebett hatte abhängig von der Anströmgeschwindigkeit eine feste maximale Höhe. Oberhalb dieser Schicht konnte visuell kein Abtreiben von Mikro-GAK-Körnern festgestellt werden. Die Indikatoren, die genutzt wurden, um die Feststofffreiheit im Ablauf der Mikro-GAK-Reaktoren zu überwachen, waren:

- Messungen der Trübung durch Online-Messsonden und Messungen in 24-Stunden.-Mischproben, vgl. Kapitel 4.8.1
- Sichtfilterscheiben zur Erkennung von Mikro-GAK-Körnern im Ablauf (durchgeführt mit 24-Stunden Mischproben), vgl. Kapitel 4.8.2
- Bestimmung der PAK-Konzentration durch das Gradienten-Verfahren nach DIN 19539:2016-12: Untersuchung von Feststoffen – Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC400, ROC, TIC900), Methode A, vgl. Kapitel 4.8.3

4.8.1 Trübungswerte für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs

Im Regelbetrieb von PAK-Anlagen wird häufig die Trübung als Parameter für die Feststofffreiheit eingesetzt, da verschiedene Versuche in der Vergangenheit Zusammenhänge zwischen der Trübung im Ablauf einer PAK-Stufe und dem PAK-Austrag gezeigt haben (vgl. Malms et al. (2018) und Bornemann et al. (2012)). Die Auswertungen in Kapitel 4.5.2 haben jedoch gezeigt, dass durch die, auf der Kläranlage Renchen eingesetzten Online-Trübungssonden keine direkte Abbildung der im Labor gemessenen Trübung möglich ist. Deshalb werden in der nachfolgenden Auswertung zur Feststofffreiheit im Ablauf der Mikro-GAK-Reaktoren die Trübungsmessungen aus dem Labor herangezogen (24-Stunden-Mischproben). Abbildung 4-21 zeigt die mittleren, sowie maximalen und minimalen Trübungswerte die im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Renchen, sowie im Ablauf der Reaktoren gemessen wurden. Im Ablauf der Nachklärung liegt eine mittlere Trübung von 1,5 FNU vor, der Maximalwert liegt bei 10,4 FNU. Kohle B war über den gesamten Versuchszeitraum in Reaktor 2 im Einsatz. Im Mittel wurde hier eine Trübung im Ablauf des Reaktors von 1,7 FNU erzielt, was ggfs. für einen geringen Feststoffaustrag sprechen könnte. Unter Einsatz von Kohle A wird eine mittlere Trübung im Ablauf des Reaktor 1 von 3,5 FNU erzielt, Maximalwerte liegen hier bei bis zu 13,3 FNU. Hier zeigen sich somit eindeutige Hinweise auf einen Austrag von Mikro-GAK aus dem Reaktor. Im Ablauf des Reaktors 1 unter Einsatz von Kohle C ist die Trübung mit 1,3 FNU sogar etwas geringer als im Ablauf der Nachklärung im selben Zeitraum und auch der Maximalwert der Trübung ist mit 3 FNU geringer als der Maximalwert im Ablauf der Nachklärung mit 4,5 FNU. Bei dieser Kohle findet somit tendenziell kein Feststoffaustrag statt.

Der Verlauf der Trübungsmesswerte der 24-Stunden Mischproben ist in Anhang VII dargestellt.

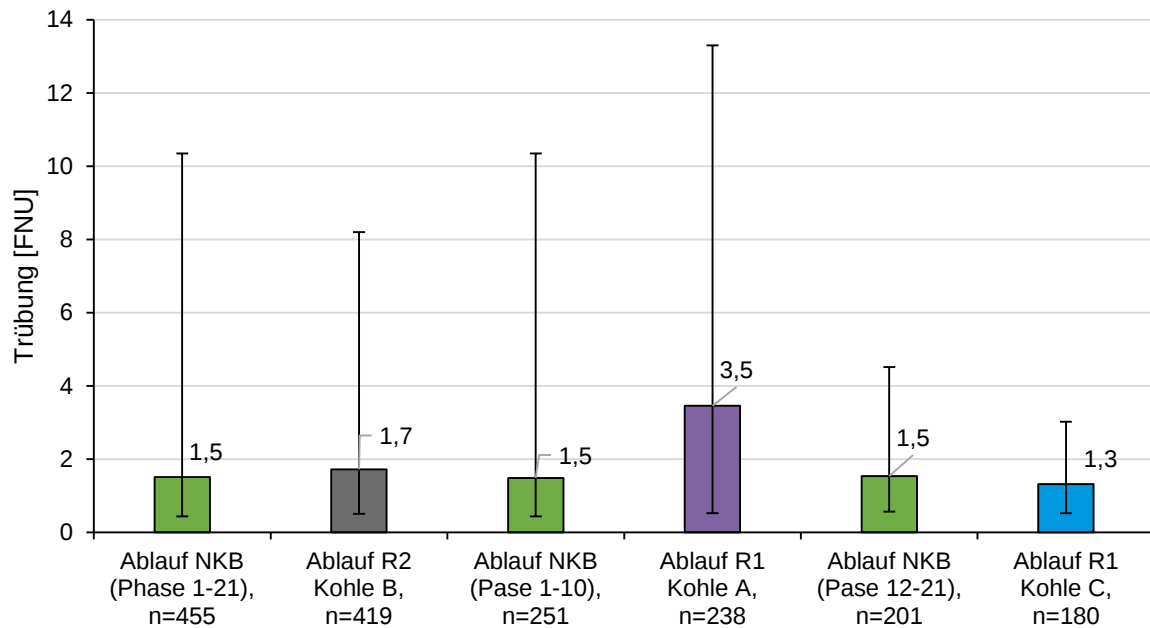
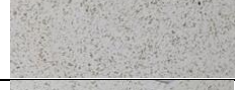
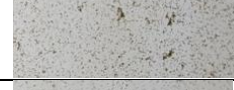


Abbildung 4-21: Mittlere, sowie maximale und minimale Trübung im Ablauf der Nachklärung (=Zulauf Versuchsanlage) und im Ablauf der Versuchsanlage (Laborwerte)

4.8.2 Sichtfilterscheiben für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs

Als zweite Möglichkeit, um Aussagen zur Feststofffreiheit des Ablaufs der μ GAK-Reaktoren treffen zu können, wurden Sichtfilterscheiben angefertigt. Dazu wurden jeweils 300 mL Probenvolumen (24-Stunden Mischproben) über Cellulose-Nitrat-Filter mit einer Porengröße von $0,45 \mu\text{m}$ filtriert. Anschließend wurden die Filterpapiere getrocknet und optisch ausgewertet. Ziel der optischen Auswertung war es Mikro-GAK-Partikel festzustellen die ggfs. aus den Reaktoren ausgetragen wurden. Insgesamt wurden an sieben aufeinanderfolgenden Tagen (7.12.2023 bis 13.12.2023) Sichtfilterscheiben angefertigt. Fotos der vollständigen Sichtfilterscheiben sind in Anhang VIII dargestellt. Eine ausschnittshafte Darstellung der Sichtfilterscheiben im Vergleich zu den jeweils gemessenen Trübungsmesswerten ist in Tabelle 4-3 dargestellt. Eindeutig sind auf allen Sichtfilterscheiben Feststoffablagerungen erkennbar, was sich auch mit den Ergebnissen der Trübungsmessung deckt. Bei genauer Betrachtung der Sichtfilterscheiben zeigt sich, dass keine Mikro-GAK-Körner erkennbar sind. Die Mikro-GAK wird somit bei der getesteten Anströmgeschwindigkeit in Schwebe gehalten aber nicht aus dem Reaktor ausgetragen. Ob es durch die Reibung der Mikro-GAK-Körner aneinander zum Austrag von feineren Aktivkohlepartikeln kommt, kann durch die Sichtfilterscheiben nicht festgestellt werden. Hier wird auf die Messergebnisse des Gradienten-TOC-Verfahrens verwiesen (vgl. Kapitel 4.8.3).

Tabelle 4-3: Beschreibung der Sichtfilterscheiben und Vergleich mit den Ergebnissen der Trübungsmessung

Datum	Trübung Ablauf Nachklärung (24h-MP, NTU)	Trübung Ablauf R1 (24h-MP, NTU)	Trübung Ablauf R2 (24h-MP, NTU)	Ausschnitthafte Darstellung der Sichtfilterscheiben		
				Ablauf NKB	Ablauf R1	Ablauf R2
7.12.23	2,7	1,9	2,6			
8.12.23*	2,2	2,1	2,5			
9.12.23	3,8	2,1	2,3			
10.12.23	1,6	1,7	1,7			
11.12.23*	3,7	1,7	1,8			
12.12.23	3,4	2,0	2,3			
13.12.23*	4,5	1,8	2,3			

* An den gekennzeichneten Tagen wurde jeweils Kohle zugegeben (1,17 kg in Reaktor 1 und 0,94 kg in Reaktor 2)

4.8.3 Gradienten-TOC-Verfahren für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs

Mittels des Gradienten-TOC-Verfahrens ist es möglich Aktivkohle, die ggfs. aus adsorptiven Verfahrensstufen ausgetragen wird, nachzuweisen (Malms, et al., 2018; Krahnstöver & Wintgens, 2018). Im Rahmen des Versuchsbetriebs des Mikro-GAK-Verfahrens auf der Kläranlage Renchen wurden zwei Probenahmeserien durchgeführt und die Proben anschließend mit dem Gradienten-TOC-Verfahren auf das Vorhandensein von Aktivkohle hin untersucht. Die erste Probenahmeserie fand vom 26.04.2023 bis zum 1.05.2023 statt (Versuchsphase 10). Insgesamt wurden zu vier Zeitpunkten (1 h, 1 d, 2 d und 5 d nach Mikro-GAK-Dosierung) Stichproben aus dem Ablauf von Reaktor 1 und Reaktor 2 entnommen und diese in Doppelbestimmung analysiert. In Versuchsphase 10 wurde die Versuchsanlage mit einer Durchflussmenge von 2,0 m³/h betrieben und die Mikro-GAK-Dosierung fand 1-Mal wöchentlich statt (1,2 kg je Reaktor).

Abbildung 4-22 zeigt die Konzentration an Aktivkohle im Ablauf der Versuchsanlage in verschiedenen Zeitschritten nach der Dosierung von frischer Mikro-GAK. Es ist deutlich erkennbar, dass kurz nach der Dosierung (1h) sowohl bei Kohle A (Reaktor 1) als auch bei

Kohle B (Reaktor 2) Aktivkohle im Ablauf nachgewiesen werden konnte. Hier ist somit deutlich erkennbar, dass beim Benetzen der Kohle auch Feinanteile ins Abwasser gelangen und diese im Mikro-GAK-Prozess ausgetragen werden. Großtechnisch werden deshalb bei der Benetzung und Dosierung von Mikro-GAK Wäscher eingesetzt, um diesen Feinanteil vor Zugabe ins System abzuscheiden (Horisberger, Casazza, Grelot, & Joss, 2019; VSA, 2022). Der Feinanteil kann in die biologische Stufe zurückgeführt werden.

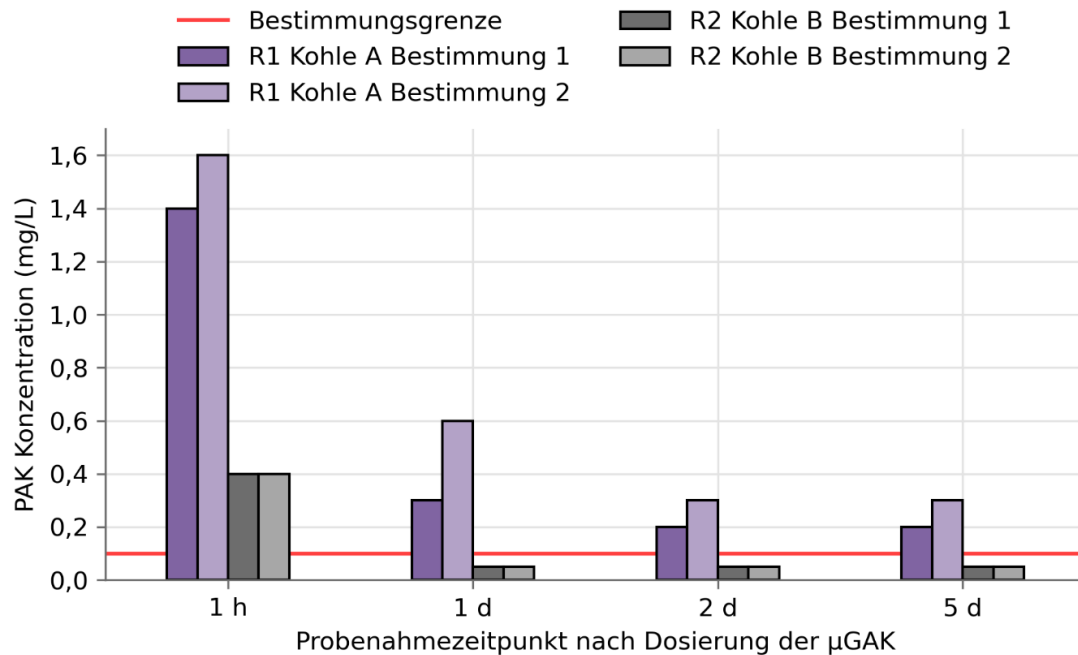


Abbildung 4-22: Aktivkohle-Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage in verschiedenen Zeitschritten nach Dosierung von frischer Mikro-GAK

1 Tag nach Dosierung der Mikro-GAK in die Versuchsreaktoren ist im Ablauf von Versuchsreaktor 2 keine Aktivkohle mehr nachweisbar (Bestimmungsgrenze 0,1 mg/L). Im Ablauf von Reaktor 1 (Kohle A) ist jedoch noch Aktivkohle nachweisbar 0,3 mg/L (Bestimmung 1) und 0,6 mg/L (Bestimmung 2). Bezogen auf die mittlere Mikro-GAK-Dosis in dieser Versuchsphase von 5,1 mg/L (Reaktor 1) bedeutet dies einen Aktivkohleaustrag von 6 % bis 12 % der zudosierten Aktivkohle. In der Probe die zwei Tage nach der Mikro-GAK-Zugabe genommen wurde sind noch 0,2 mg/L bzw. 0,3 mg/L Aktivkohle nachweisbar. Eine weitere Verringerung der Aktivkohlemenge im Ablauf des Reaktor 1 war auch 5 d nach der Mikro-GAK-Zugabe nicht zu erkennen, sodass in Reaktor 1 insgesamt nur ca. 95 % der zudosierten Aktivkohlemenge zurückgehalten wurden. Dies deckt sich auch mit den erhöhten Trübungswerten im Ablauf des Reaktors (vgl. Kapitel 4.8.1) und den Ergebnissen von Krahnstöver und Wintgens (2018), die im Ablauf einer Pilotanlage mit Mikro-GAK-Zugabe im Wirbelbett einen mittleren Aktivkohlerückhalt von 97 % erzielten.

Die zweite Probenahmeserie wurde am 17. und 18.01.2024 durchgeführt (Versuchsphase 21). Dabei wurde zu sechs Zeitpunkten (4 h, 8 h, 12 h, 16 h, 20 h und 24 h) nach Zugabe der Mikro-GAK Proben aus dem Ablauf der Reaktoren 1 und 2 genommen und in Doppelbestimmung auf den Aktivkohlegehalt hin analysiert. Die Ergebnisse der zweiten Probenserie sind in

Abbildung 4-23 dargestellt. Es wurde in keiner Probe ein Aktivkohlegehalt über der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Wie schon die Ergebnisse der Trübungsmessung gezeigt haben, findet somit kein erhöhter Aktivkohleaustrag aus Reaktor 1 (Kohle C) und Reaktor 2 (Kohle B) statt.

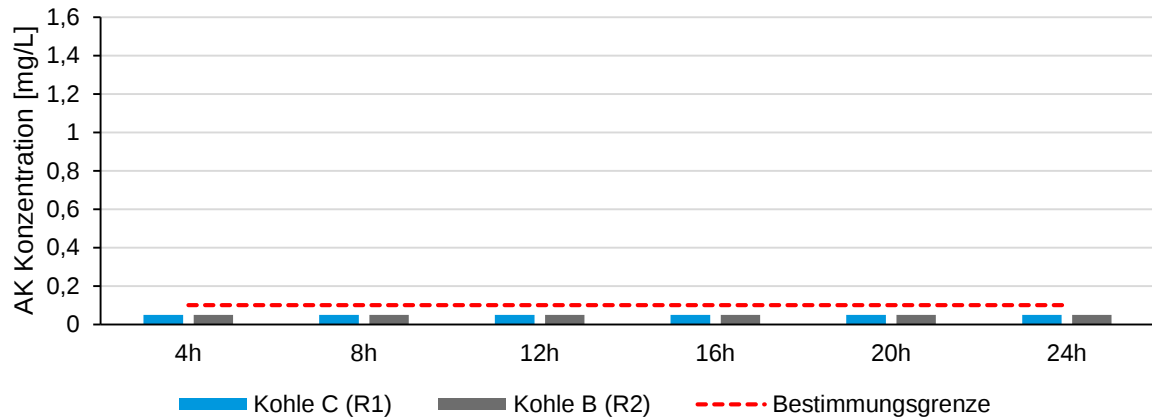


Abbildung 4-23: Aktivkohle-Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage in verschiedenen Zeitschritten nach Dosierung von frischer Mikro-GAK

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich prinzipiell die Trübungsmessung eignet, um kontinuierlich Hinweise auf den Aktivkohle-Rückhalt im Mikro-GAK-Verfahren zu erhalten. Abschließend kann der Austrag von Aktivkohle jedoch nur durch Verfahren wie die Gradienten-TOC-Methode festgestellt werden. Hinsichtlich des Aktivkohleaustrags wurde beobachtet, dass es, unabhängig vom eingesetzten Produkt, eine Stunde nach Zugabe der Mikro-GAK zu einem Austrag von Aktivkohle aus den Versuchsreaktoren kam. Dies kann über den nicht ausgespülten Feinanteil der Mikro-GAK begründet werden. Für den weiteren Betrieb geben die Versuchsergebnisse den Hinweis, dass es produktabhängig zu sein scheint, ob Aktivkohle aus dem Mikro-GAK-Prozess ausgetragen wird (Produkt A) oder nicht (Produkt B und C).

4.9 Einfluss auf die Phosphorelimination

Im Rahmen des Versuchsbetriebs auf der Kläranlage Renchen sollte ebenfalls die Auswirkung des Mikro-GAK-Verfahrens auf die Reduktion der Phosphorfractionen untersucht werden (vgl. Acosta, Launay, & Zettl (2021)). Dazu wurde zwischen August und Oktober 2023 bei insgesamt fünf Probenahmen das Abwasser auf den gesamten Phosphorgehalt (P_{ges}), den gelösten Phosphoranteil ($P_{mf,ges}$) und den als Phosphat gebundenen Phosphor ($PO_4\text{-P}$) analysiert. Über Differenzmethoden lassen sich dann noch die weiteren Phosphorfractionen P_{part} (partikulärer Phosphor) und P_{org} (gelöster, nicht reaktiver Phosphor, auch GUP) bestimmen, wie in Abbildung 4-24 gezeigt (Acosta, Launay, & Zettl, 2021; DWA-AG KA-8.3, 2023).

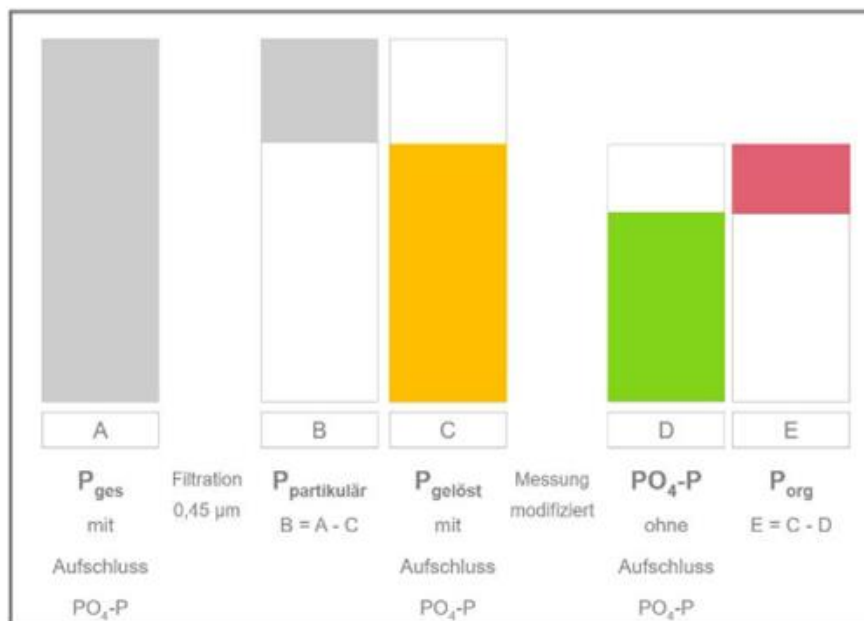


Abbildung 4-24: Schematische Darstellung der P-Fractionen im Abwasser (DWA-AG KA-8.3, 2023)

Probenahmeorte waren der Ablauf der Nachklärung sowie die Abläufe der Reaktoren 1 mit Kohle C und Reaktor 2 mit Kohle B. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Im Ablauf der Nachklärung lag bei den Probenahmen die Konzentration zwischen 0,19 mg/L und 0,45 mg/L (im Mittel 0,30 mg/L). Aufgrund der eutrophierenden Eigenschaften von Phosphor wurden die Grenzwerte für Gesamt-Phosphor P_{ges} über die Jahre und je nach Region in Baden-Württemberg angepasst, so liegt der Grenzwert nach Bodenseeverordnung für Kläranlagen < 40.000 EW bei 1,0 mg/L und > 40.000 EW bei 0,3 mg/L (igkb, 2005). Betroffene Kläranlagen der Vorgaben des Handlungskonzepts aus SLoPE Phase-2 bekommen den neuen Zielwert fürs Jahresmittel von 0,2 mg/L (Filtrervariante) und 0,3 mg/L (Fällungsvariante) (UMBW, 2020). Im Ablauf der Reaktoren wurden im Mittel P_{ges} -Konzentrationen von 0,32 mg/L (R1) und 0,31 mg/L (R2) gemessen. Anhand der Fraktion P_{ges} ist somit kein Einfluss des Mikro-GAK-Verfahrens auf die Phosphorelimination erkennbar.

Tabelle 4-4: Konzentrationen der Phosphorfractionen

Datum	P_{ges} [mg/L]			$P_{mf,ges}$ [mg/L]			$PO_4\text{-P}$ [mg/L]		
	ANK	R1	R2	ANK	R1	R2	ANK	R1	R2
23.08.23	0,22	0,25	0,23	0,24	0,22	0,23	0,20	0,19	0,19
31.08.23	0,45	0,42	0,42	0,35	0,36	0,36	0,32	0,33	0,33
26.09.23	0,23	0,26	0,24	0,23	0,23	0,22	0,16	0,16	0,16
28.09.23	0,18	0,20	0,21	0,17	0,18	0,17	0,10	0,12	0,11
17.10.23	0,43	0,44	0,45	0,37	0,37	0,37	0,32	0,32	0,31
Mittelwert	0,3	0,312	0,31	0,27	0,27	0,27	0,22	0,23	0,22

ANK = Ablauf der Nachklärung, R1 = Ablauf Reaktor 1 (Kohle C), R2 = Ablauf Reaktor 2 (Kohle B)

Auch bei $P_{mf,ges}$ liegt sowohl im Ablauf der Nachklärung als auch im Ablauf der Reaktoren 1 und 2 in einer mittleren Konzentration von 0,27 mg/L vor. Somit wird auch $P_{mf,ges}$ nicht durch das Mikro-GAK-Verfahren beeinflusst. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass ein Großteil des Phosphors im Ablauf der Nachklärung als gelöster Phosphor vorliegen und im Mittel lediglich 0,03 mg/L als P_{part} vorhanden sind. Analog zu P_{ges} und $P_{mf,ges}$ ist auch für $PO_4\text{-P}$ kein Einfluss des Mikro-GAK-Verfahrens erkennbar. Der verbleibende Anteil an fällbaren Phosphorverbindungen liegt sowohl im Ablauf der Nachklärung als auch im Ablauf des Reaktors 1 und des Reaktors 2 bei 0,22 mg/L (0,23 mg/L Ablauf R1). Der Anteil an gelöstem, nicht reaktivem Phosphor im Ablauf der Kläranlage Renchen liegt somit bei im Mittel 0,05 mg/L (0,27 – 0,22). Diese Phosphorfraction ist mit den klassischen Prozessen der Abwasserreinigung nicht entfernbar.

Insgesamt zeigt sich, dass das Mikro-GAK-Verfahren keinen zusätzlichen Beitrag zur Phosphorelimination leistet. Dies lässt sich auch über die beiden maßgeblichen Prozesse zum Phosphorrückhalt begründen. Die Fraktion P_{part} lässt sich durch Verfahren zur Feststoffabtrennung wirkungsvoll zurückhalten. Zum einen ist jedoch im Zulauf der Mikro-GAK-Reaktoren nur sehr wenig P_{part} (im Mittel 0,03 mg/L) vorhanden und zum anderen befindet sich beim Mikro-GAK-Verfahren das Aktivkohlebett in Schwebelage. Aufgrund der größeren Partikelabstände beim Schwebelager (im Vergleich zum Festlager) ist ein erhöhter Feststoffrückhalt im Schwebelager nicht zu erwarten. Dies zeigen auch die Auswertungen der Trübungsmessungen (vgl. Kapitel 4.8.1). $PO_4\text{-P}$ kann durch Fällung mit Eisen-/Aluminiumsalzen in eine unlösliche Form überführt und anschließend aus dem Abwasser entfernt werden. Im Mikro-GAK-Prozess findet jedoch keine Dosierung von Fällmitteln statt, sodass eine weitere Reduktion des $PO_4\text{-P}$ ebenfalls nicht zu erwarten war. Insofern bestätigen die Ergebnisse der Messungen die Annahme, dass das Mikro-GAK-Verfahren in der getesteten Verfahrenskonfiguration nicht zur weitestgehenden P-Elimination geeignet ist.

4.10 Einfluss auf pH, Leitfähigkeit und Redoxpotential

Um generelle Auswirkungen des Verfahrens beobachten zu können wurden wie bei den Analysen der Phosphorfractionen im Zeitraum zwischen August und Oktober 2023 Proben vom Ablauf der Nachklärung sowie den Abläufen von Reaktor 1 mit Kohle C und Reaktor 2 mit Kohle B auf pH, Leitfähigkeit und Redoxpotential untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-5: Messwerte des pH-Wertes, der Leitfähigkeit und des Redoxpotentials

Datum	pH-Wert [-]			Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]			Redoxpotential [mV]		
	ANK	R1	R2	ANK	R1	R2	ANK	R1	R2
23.08.23	7,7	7,9	7,9	761	776	779	220	200	190
31.08.23	7,4	7,7	7,7	620	615	616	280	220	200
26.09.23	7,8	7,9	8,1	776	775	782	305	259	234
28.09.23	7,7	7,8	8	850	860	860			
17.10.23	7,3	7,6	7,6	788	797	801	330	310	280

ANK = Ablauf der Nachklärung, R1 = Ablauf Reaktor 1 (Kohle C), R2 = Ablauf Reaktor 2 (Kohle B)

Der pH-Wert variierte während der Messungen zwischen 7,3 und 8,1, wobei nur geringe Unterschiede zwischen den Proben des Ablauf Nachklärung und denen der Abläufe der Reaktoren festgestellt wurden. Es ist zu erkennen, dass die pH-Werte in den Abläufen der Reaktoren immer geringfügig höher sind als im Ablauf der Nachklärung. Eine mögliche Erklärung ist die Auswirkung der Aktivkohle auf den pH-Wert (Abegglen & Siegrist, 2012).

Die Leitfähigkeit bewegte sich in den analysierten Proben zwischen 615 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 860 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Schwankungen sind auf unterschiedliche Wetterlagen und dadurch verursachte Verdünnungen des Kläranlagen Zu- und dadurch auch des Ablaufs der Nachklärung zurückzuführen. Zwischen dem Ablauf der Nachklärung und den Abläufen der Reaktoren ist kein wesentlicher Unterschied festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass durch das Verfahren keine merkliche Menge an Ionen aus dem Wasser gezogen bzw. adsorbiert wird (Metcalf & Eddy, 2014).

Die gemessenen Redoxpotentiale lagen zwischen 190 mV und 330 mV. Tendenziell ist durch den Einsatz der Mikro-GAK eine leichte Verringerung des Redoxpotentials erkennbar. Dies deutet durch das positive Redoxpotential auf oxidative Bedingungen in den Reaktoren hin (Myers, 2019). Die Reduktion kann z.B. durch mikrobiologische Aktivität verursacht werden, wobei die Messung des Redoxpotentials mit Sonden durch eine Änderung des pH-Werts oder Mineraliengehalts in z.B. mikrobiologischen Kulturmedien beeinflusst werden kann (Katoh, Horiuchi, & Yoshida, 2015). Daher kann die geringe Veränderung des Redoxpotentials ein Hinweis auf biologische Prozesse sein. Ein Einfluss durch den pH-Wert und die GAK-Zugabe kann nicht vollends ausgeschlossen werden.

4.11 Reduktion organische Belastung

Neben der Spurenstoffentnahme ist es auch von Interesse in welchem Umfang die organische Belastung des Abwassers durch das Mikro-GAK-Verfahren reduziert werden kann. Die organische Belastung kann hierbei anhand verschiedener Summenparameter wie dem gelösten organischen Kohlenstoff (dissolved organic carbon, DOC) oder dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) dargestellt werden. Eine weitere Reduktion des CSBs um > 20 % des Überwachungswerts durch eine nachgeschaltete Verfahrensstufe kann ggfs. mit der Abwassergebühr verrechnet werden, sodass dies von besonderem Interesse ist (LUBW, 2017). Im Rahmen des Versuchsbetriebs auf der Kläranlage Renchen wurde an insgesamt 65 Tagen der DOC im Ablauf der Nachklärung und im Ablauf der Reaktoren 1 und 2 gemessen. Eine Messung des CSB fand hingegen nur am 20.01.2022 statt. Aus dieser Messung kann das Verhältnis zwischen CSB/DOC gebildet werden welches bei 2,7 (16/6) liegt. Dieser Wert ist typisch für gereinigtes kommunales Abwasser und kann somit auch für weitere Abschätzungen verwendet werden (DWA-AG KA-8.6, 2021). Tabelle 4-6 zeigt die DOC-Konzentrationen die im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Renchen und im Ablauf der beiden Mikro-GAK-Versuchsreaktoren während der einzelnen Versuchsphasen.

Tabelle 4-6: DOC-Konzentration in den verschiedenen Versuchsphasen

	Ablauf NKB				R1, Kohle A				R1, Kohle C				R2, Kohle B			
	MW	n	MIN	MAX	MW	n	MIN	MAX	MW	n	MIN	MAX	MW	n	MIN	MAX
	mg/L	-	mg/L	mg/L	mg/L	-	mg/L	mg/L	mg/L	-	mg/L	mg/L	mg/L	-	mg/L	mg/L
1	6,6	19	4,3	10,0	6,1	19	4,4	8,3					5,4	19	3,6	7,7
2	8,3	2	7,7	9,0	7,5	2	7,4	7,5					6,8	2	6,4	7,2
3	8,1	13	7,1	9,1	7,0	13	6,2	8,3					7,1	13	5,9	8,3
4	6,6	7	3,9	8,3	6,0	7	3,4	7,5					6,0	7	3,8	6,9
5	6,8	3	5,4	7,5	5,2	3	4,2	6,0					5,0	3	4,1	5,7
6	6,0	4	5,1	6,6	5,6	4	4,9	6,2					5,3	4	4,8	6,2
7																
8	6,4	3	5,6	7,5	5,9	3	5,3	6,8					5,5	3	5,0	6,4
9	5,0	2	5,0	5,1	4,1	2	4,0	4,3					4,3	2	4,1	4,6
10	6,4	2	5,0	7,8	5,6	2	5,1	6,2					5,7	2	5,0	6,4
11																
12	6,8	1	-	-					5,6	1	-	-	6,7	1	-	-
13	7,3	2	7,3	7,3					5,8	2	5,6	6,0	6,0	1	-	-
14	4,3	2	4,1	4,5					3,7	2	3,6	3,8	3,8	2	3,8	3,8
15	6,4	2	5,6	7,1					5,5	2	5,1	5,8	5,1	2	4,7	5,5
16																
17	6,2	2	6,1	6,3					5,5	2	5,3	5,6	5,4	2	5,3	5,5
18																
19	6,9	1	-	-					5,6	1	-	-	6,3	1	-	-
20																
21																
Alle	6,8	65	3,9	10,0	6,2	55	3,4	8,3	5,2	10	3,6	6,0	5,8	64	3,6	8,3

MW = Mittelwert, n = Anzahl, MIN = minimaler Wert, MAX = maximaler Wert in der Versuchsphase

Der mittlere DOC im Ablauf der Nachklärung liegt in den einzelnen Versuchsphasen zwischen 4,3 mg/L (Versuchsphase 14) und 8,8 mg/L (Versuchsphase 5). Gemittelt über alle 65 Messwerte ergibt sich ein Wert von 6,8 mg/L. Mit oben genannter Umrechnung entspricht dieser Wert ca. einem CSB von 18 mg/L. Dieser Wert wird auch im Leistungsvergleich der Kläranlagen in Baden-Württemberg für das Jahr 2023 genannt, was die Güte der Abschätzung bestätigt. Mit diesem Ablaufwert liegt die Kläranlage Renchen ca. im Mittelfeld der Kläranlagen der Größenklasse 5 (DWA-BW, 2023). Im Ablauf der Versuchsreaktoren liegt im Mittel ein DOC von 6,2 mg/L (Kohle A, Reaktor 1), 5,2 mg/L (Kohle C, Reaktor 1) und 5,8 mg/L (Kohle B, Reaktor 2) vor. Durch das Mikro-GAK-Verfahren findet somit eine Reduktion der organischen Belastung statt. Umgerechnet auf den CSB würden sich mittlere Ablaufkonzentrationen von 17 mg/L (Kohle A, Reaktor 1), 14 mg/L (Kohle C, Reaktor 1) und 16 mg/L (Kohle B, Reaktor 2) ergeben. Im Mittel ergeben sich somit Eliminationsraten bezogen auf den DOC von 10,1 % (Kohle A, Reaktor 1), 15,7 % (Kohle C, Reaktor 1) und 14,2 % (Kohle B, Reaktor 2). Die, über alle gemessenen Werte gemittelte Elimination, sowie die Elimination des DOC in den einzelnen Versuchsphasen ist in Tabelle 4-7 dargestellt.

Tabelle 4-7: DOC-Elimination in den verschiedenen Versuchsphasen (grün: Entnahme > 20 %, gelb: Entnahme > 10 %)

	R1, Kohle A				R1, Kohle C				R2, Kohle B			
	MW	n	MIN	MAX	MW	n	MIN	MAX	MW	n	MIN	MAX
	%	-	%	%	%	-	%	%	%	-	%	%
1	6,9	19	-12,4	29,8					17,7	19	-24,8	41,7
2	9,8	2	3,8	15,8					17,0	2	5,5	28,5
3	13,3	13	6,9	26,5					12,1	13	5,4	18,0
4	8,9	7	-6,3	22,1					7,9	7	-15,8	22,1
5	22,9	3	20,1	25,3					26,0	3	24,3	28,3
6	5,9	4	3,0	10,1					11,7	4	2,6	20,8
7												
8	8,1	3	0,9	14,8					14,0	3	11,0	17,0
9	17,8	2	14,3	21,4					13,4	2	7,0	19,8
10	8,8	2	-2,0	19,7					7,8	2	-1,6	17,1
11												
12					17,0	1	-	-	1,8	1	-	-
13					20,1	2	17,9	22,2	17,5	1	-	-
14					14,5	2	12,9	16,1	12,0	2	7,8	16,3
15					13,5	2	8,9	18,2	20,0	2	16,5	23,5
16												
17					12,4	2	8,6	16,1	13,5	2	13,4	13,5
18												
19					18,6	1	-	-	8,7	1	-	-
20												
21												
Alle	10,1	55	-12,4	29,8	15,7	10	8,6	22,2	14,2	64	-24,8	41,7

4.12 Durchflussproportionaler Betrieb

Den Großteil der Versuchszeit wurden die Versuchsreaktoren der Mikro-GAK-Anlage mit konstantem Zulauf betrieben. Dadurch ergibt sich bei konstanter Aktivkohlemenge im System eine konstante Bettexpansion und Kontaktzeit. Die reale Zulaufsituation kommunaler Kläranlagen ist jedoch nicht konstant, sondern durch einen ausgeprägten Tagesgang geprägt. Zudem sind an kommunale Kläranlagen in Baden-Württemberg überwiegend Gebiete angeschlossen, die im Mischsystem entwässert werden. Dadurch erhöhen sich die Schwankungen in der Zulaufmenge weiter. Ähnliches kann auch für die Zulaufmenge der Kläranlage Renchen beobachtet werden.

Um die Eignung des Mikro-GAK-Verfahrens auch bei schwankenden Zulaufbedingungen zu testen, wurde in Versuchsphase 20 und 21 der Zulauf zu den Mikro-GAK-Reaktoren proportional zum Zulaufvolumenstrom der Kläranlage Renchen eingestellt. In Versuchsphase 20 (10.11. bis 27.11.2024) wurde die Zulaufmenge der Kläranlage mit einem Faktor von 0,015 multipliziert. Aufgrund hoher Zulaufmengen in Folge von andauernden Niederschlägen wurde der Faktor in Versuchsphase 21 auf 0,008 reduziert. Ziel bei der Auswahl des Faktors war, dass der Zulaufvolumenstrom zu den Mikro-GAK-Reaktoren im bereits zuvor getesteten Bereich von ca. 1,5 m³/h bis ca. 2,5 m³/h liegt.

Abbildung 4-24 zeigt den Tagesmittelwert des Zulaufs zu den Reaktoren und die Abnahme des SAK₂₅₄ in diesem Zeitraum. Ebenfalls eingezeichnet sind die im Rahmen der Optimierung (vgl. Kapitel 4.7) ermittelten Δ SAK₂₅₄-Werte, die für eine ausreichende Spurenstoffentnahme benötigt werden. Es ist erkennbar, dass gemittelt über den gezeigten Ausschnitt sowohl in Reaktor 1 als auch in Reaktor 2 Δ SAK₂₅₄-Werte über dem als notwendig ermittelten Wert von 16/17 % (Reaktor 1) und 19/21 % erreicht werden. Ebenfalls ist erkennbar, dass insbesondere bei höheren mittleren Zulaufmengen (infolge von Niederschlägen) niedrigere Δ SAK₂₅₄-Werte erzielt werden als in Zeiten mit eher niedrigen Zulaufmengen (vgl. Anfang Dezember).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das Mikro-GAK-Verfahren auch bei schwankenden Zulaufmengen und somit schwankenden Kontaktzeiten gute Eliminationsleistungen hinsichtlich des SAK₂₅₄ zeigt. Bei deutlich erhöhten Zulaufmengen ist, analog zu anderen Verfahrenstechniken zur Spurenstoffentnahme, eine Verringerung des SAK₂₅₄-Rückgangs festzustellen.

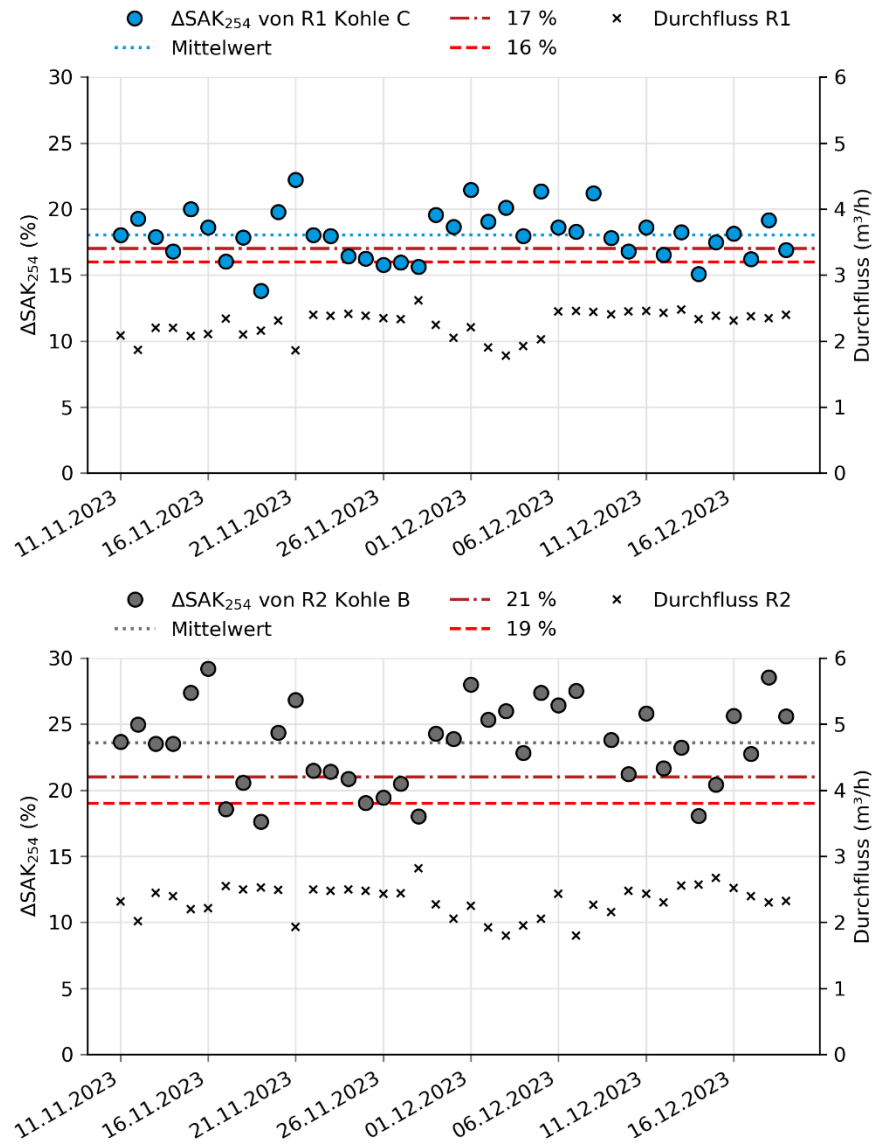


Abbildung 4-25: Verlauf des ΔSAK_{254} während des durchflussproportionalen Betriebs

4.13 Reaktivierung der Mikro-GAK

Im Rahmen des Anlagenumbaus im Mai 2023 wurden Proben der, bereits seit einiger Zeit, im Mikro-GAK-Prozess befindlichen Kohle B aus Reaktor 2 entnommen. Anschließend wurden diese Proben im Labor untersucht und testweise reaktiviert. Tabelle 4-8 zeigt dabei die Eigenschaften der, aus den Reaktoren entnommenen Proben. Es wurde eine Mikro-GAK-Probe aus dem oberen Bereich des Reaktors und eine aus dem unteren Bereich des Reaktors entnommen. Aufgrund der fortwährenden Zugabe von Mikro-GAK ins System und Entnahme von Mikro-GAK aus dem System kann keine genaue Angabe zur Verweilzeit der Kohle gemacht werden. Insgesamt war die Mikro-GAK-Versuchsanlage zum Zeitpunkt der GAK Entnahme seit ca. 15 Monaten in Betrieb. Erkennbar ist, dass die Iodzahl für die unten im Reaktor gezogene Probe geringer ist als für die Probe aus dem oberen Bereich des Reaktors. Laut Merkblatt DWA-M 285-2 der DWA-AG KA-8.6 (2021) ist eine Iodzahl von etwa 500 $\text{mg}_{\text{Iod}}/\text{g}_{\text{AK}}$ eine Voraussetzung für die Reaktivierbarkeit von GAK-Produkten. Diese Bedingung erfüllen die, aus dem Mikro-GAK-Prozess, entnommenen Proben. Durch die Reaktivierung kann anschließend von einer Steigerung der Iodzahl um ca. 300 ausgegangen werden (DWA-AG KA-8.6, 2021).

Tabelle 4-8: Eigenschaften der Mikro-GAK-Proben vor der Reaktivierung

Parameter	Kohle B Reaktor oben	Kohle B Reaktor unten
Iodzahl	663	640
Feuchte	58,6	56,9
AOX-Beladung	806	764
Rütteldichte (ASTM)	548	560
Gesamtaschegehalt	11,2	11,1

Nach Durchführung der Reaktivierung der Kohleproben wurden nochmals die Iodzahl und die Melassezahl bestimmt. Diese sind, zusammen mit den Spezifikationen des frischen Produkts, in Tabelle 4-9 angegeben. Ein Vergleich der Ergebnisse vor und nach der Reaktivierung zeigt, dass durch die Reaktivierung eine Steigerung der Iodzahl um ca. 200 möglich ist. Wie in DWA-AG KA-8.6 (2021) angegeben, kann durch die Reaktivierung keine vollständige Regeneration der Mikro-GAK stattfinden, was am Unterschied der Iodzahl nach Reaktivierung und der Iodzahl der Frischkohle erkennbar ist.

Tabelle 4-9: Iod- und Melassezahl der reaktivierten Kohle, sowie die im Produktdatenblatt für das frische Produkt angegebenen Spezifikationen

Parameter	Kohle B reakt. oben	Kohle B reakt. unten	Kohle B frisch
Iodzahl	879	845	1038
Melassezahl	512	572	392

4.14 Betriebsmittelverbrauch

Für die Übertragung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse auf die großtechnische Anwendung ist vor dem Hintergrund der Kostenbetrachtung vor allem der Verbrauch an Betriebsmitteln interessant. Im laufenden Betrieb ist beim Mikro-GAK-Verfahren ein kontinuierlicher Einsatz an Aktivkohle erforderlich. Im Rahmen der Optimierung der Dosiermenge (vgl. Kapitel 4.7), die in den Versuchsphasen 16 bis 19 durchgeführt wurde konnte gezeigt werden, dass für Kohle B $9,4 \text{ mg}_{\mu\text{GAK}}/\text{L}_{\text{Abwasser}}$ eingesetzt werden müssen. Von Kohle C muss mit $9,3 \text{ mg}_{\mu\text{GAK}}/\text{L}_{\text{Abwasser}}$ ähnlich viel Aktivkohle eingesetzt werden, um die erforderliche mittlere Spurenstoffentnahme zu erreichen.

Der tägliche Zufluss der Kläranlage Renchen liegt bei ca. $4.184 \text{ m}^3/\text{d}$, woraus eine mittlere Jahresabwassermenge von $1.527.160 \text{ m}^3/\text{a}$ resultiert. Wird dieser Wert für die Prognose des Aktivkohleverbrauchs eingesetzt, so ergibt sich ein jährlicher Verbrauch von ca. $14,9 \text{ t}$ für Kohle B bzw. Kohle C. Die weiteren im Rahmen des Projekts ermittelten Ergebnisse legen nahe, dass von Kohle A etwas mehr benötigt werden würde, da im Vergleich zu Kohle B die Entnahme etwas geringer ausgefallen ist.

4.15 Betriebskostenabschätzung

In die Betriebskosten wurden folgende Kosten mit aufgenommen:

- Aktivkohlekosten
- Stromverbrauch
- Entsorgungskosten
- Personalkosten

Die Betriebskosten wurden anhand der Daten der Kläranlage Renchen ermittelt. Die Kosten für Energie, Entsorgung und Personal sind in Tabelle 4-10 dargestellt.

Tabelle 4-10: Einheitspreise für Betriebskosten für die Kläranlage Renchen (netto)

	Preis	Einheit
Strom	0,30	€/kWh
Schlamm Entsorgung	85,80	€/t
Personalkosten	35,00	€/h

Die Produktkosten für Aktivkohle waren in den letzten Jahren einer hohen Fluktuation unterworfen, weshalb hier im Bericht keine absoluten Kosten genannt werden. Die Aktivkohlekosten für die verschiedenen Produkte wurden anhand der Produktkosten des Herstellers von Aktivkohle B inklusive des Anlieferungswegs ermittelt. Die Aktivkohlekosten lassen sich folgendermaßen einordnen: $\text{€}_{\text{GAK_Reaktivat}} < \text{€}_{\mu\text{GAK_Reaktivat}} < \text{€}_{\text{PAK}} < \text{€}_{\text{GAK}} < \text{€}_{\mu\text{GAK}}$

Für die Betriebskostenermittlung wurde jeweils das Reaktivat für GAK und Mikro-GAK verwendet. Für das Mikro-GAK-Verfahren wurden die Betriebskosten für eine zu behandelnde Jahresabwassermenge von 90% ermittelt.

Um die Betriebskosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Spurenstoffentfernung einordnen zu können, wurden diese ebenfalls für die Kläranlage Renchen für Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK), mit Ozon und mit granulierter Aktivkohle (GAK) berechnet. In Tabelle 4-11 sind die Dosiermengen von Aktivkohle und Ozon für weitere Verfahren zur Spurenstoffentfernung aufgelistet. Diese Mengen wurden für die Betriebskostenschätzung anderer Verfahren herangezogen.

Tabelle 4-11: Dosiermengen für weitere Verfahren zur Spurenstoffentfernung

Verfahren	Dosiermenge	Spez. Dosiermenge
Mikro-GAK Dosiermenge	8 mg/l 10 mg/l 15 mg/l	1,2 mg _{AK} /mg _{DOC} 1,5 mg _{AK} /mg _{DOC} 2,2 mg _{AK} /mg _{DOC}
PAK-Dosierung Ulmer Verfahren	7 mg/l	1,0 mg _{AK} /mg _{DOC}
PAK-Dosierung Belebungsbecken	18 mg/l	2,6 mg _{AK} /mg _{DOC}
PAK-Dosierung vor Filter	10 mg/l	1,5 mg _{AK} /mg _{DOC}
Ozonung		0,5 mg O ₃ / mg _{DOC}
Ozonung in Kombination mit GAK-Filter	80.000 Bettvolumen	0,2 mg O ₃ / mg _{DOC}
GAK-Filter	20.000 Bettvolumen	

In Abbildung 4-26 sind die Betriebskosten (netto) für verschiedene Verfahren zur Spurenstoffentfernung dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Material- und Energiekosten die Betriebskosten am stärksten beeinflussen. Bei geringeren Dosiermengen ergeben sich geringere Materialkosten. Die Energiekosten sind bei den Ozonverfahren höher als bei den Aktivkohleverfahren. Für die Herstellung des Ozons aus Sauerstoff wird Energie vor Ort auf der Kläranlage benötigt. Außerdem kommen bei beiden Verfahren Festbettfilter (Sand bzw. GAK) zum Einsatz, welche zusätzlich Energie für die Rückspülung benötigen. Die Personalkosten liegen bei allen Verfahren in einem ähnlichen Bereich. Verfahren, die zwei Verfahrensstufen besitzen, haben auch höhere Personalkosten, da beide Verfahren betrieben werden müssen. Die Entsorgungskosten sind die Schlammmentsorgungskosten, die je nach Verfahren, mehr oder weniger ansteigen. Vor allem bei Verfahren mit Pulveraktivkohle sind diese höher, da die PAK über den Überschussschlamm aus dem Verfahren genommen wird. Die höchsten Entsorgungskosten hat hier das Verfahren PAK-Dosierung in die Belebung aufgrund der höchsten Dosiermenge.

Das Mikro-GAK-Verfahren weist eher geringere Betriebskosten auf, je nach eingesetzter Dosiermenge. Die Betriebskosten liegen in einem vergleichbaren Bereich zu den anderen Verfahren, wenn von einer Unsicherheit von +/- 30% ausgegangen wird.

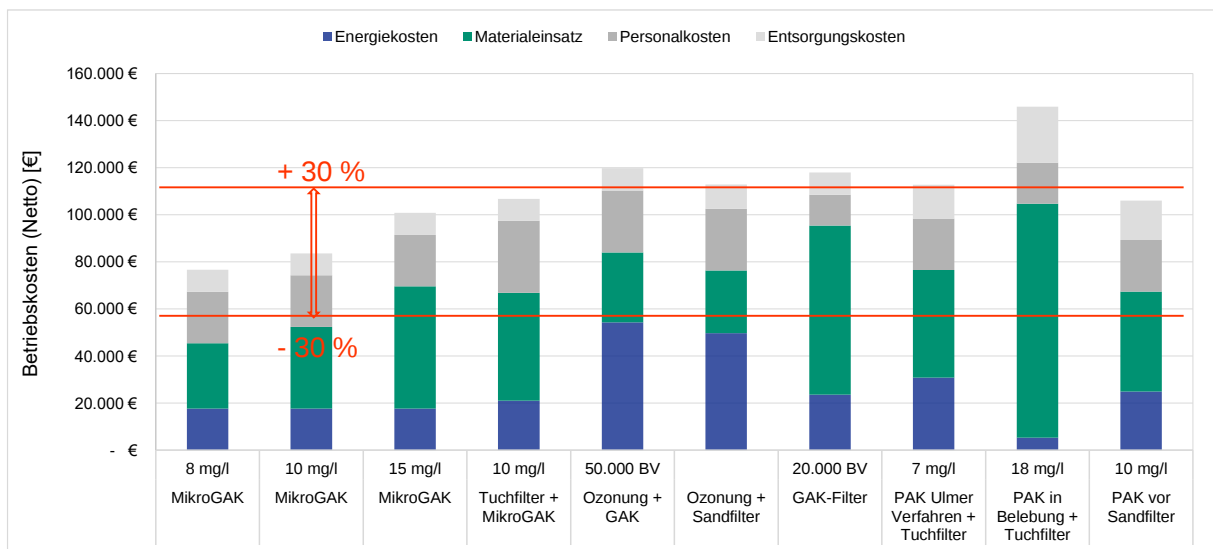


Abbildung 4-26: Betriebskostenvergleich für verschiedene Verfahren der Spurenstoffentfernung

5 Fazit und Ausblick

Im Projekt „Effiziente und kostengünstige Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Renchen mittels Mikro-Granulataktivkohle“ wurde über einen Versuchszeitraum von ca. 2 Jahren das Verfahren zum Einsatz von Mikro-GAK im Schwebebett auf der Kläranlage Renchen erprobt. Ziel des Versuchsbetriebs war es die generelle Eignung des Verfahrens zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen festzustellen und die in Kapitel 1 vorgestellten spezifischen Fragestellungen zu beantworten. Dazu wurden zwei baugleiche Versuchsreaktoren kontinuierlich mit realem Abwasser aus dem Ablauf der Kläranlage Renchen betrieben.

Im Test auf der Kläranlage Renchen hat sich das Mikro-GAK-Verfahren generell als geeignet für die Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen gezeigt. Die in **Baden-Württemberg geforderte mittlere Entnahmeleistung** von 7 Spurenstoffen von 80 % kann mit dem Verfahren erreicht werden. Es wurde festgestellt, dass die **Kontaktzeit einen Einfluss auf die Spurenstoffentnahme** hat. Insbesondere mittel bis mäßig adsorbierbare Spurenstoffe wie Candesartan zeigen bei höheren Kontaktzeiten deutlich bessere Entnahmen. Bei gut adsorbierbaren Stoffen wie beispielsweise 1H-Benzotriazol zeigt sich dieser Zusammenhang nicht so eindeutig. Da sich die 7 Leitsubstanzen, die in Baden-Württemberg zur Ermittlung der Einhaltung der Spurenstoffentnahme herangezogen werden, aus teilweise gut/sehr gut und teilweise mittel/mäßig adsorbierbaren Substanzen zusammensetzen, zeigt sich zwar ein Einfluss der Kontaktzeit auf die mittlere Spurenstoffentnahme, dieser ist im getesteten Bereich (6 min bis 11 min) jedoch nicht sonderlich groß.

Im Laufe des Projekts wurden die Einstellungen der Versuchsreaktoren in insgesamt 21 Versuchsphasen variiert und optimiert. Dabei fanden auch **Veränderungen in der Dosiermenge und dem Dosierintervall** statt. Deutliche Einflüsse durch eine Änderung des Dosierintervalls konnten nicht festgestellt werden. Die Mikro-GAK-Dosis hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Spurenstoffentnahme. Es zeigt sich, dass Dosiermengen $< 5 \text{ g}_{\mu\text{GAK}}/\text{m}^3$ bzw. $< 1 \text{ g}_{\mu\text{GAK}}/\text{g}_{\text{DOC}}$ für eine ausreichende Spurenstoffentnahme nicht ausreichend sind. Notwendige Dosiermengen liegen, abhängig vom eingesetzten Mikro-GAK-Produkt, bei ca. $8 \text{ g}_{\mu\text{GAK}}/\text{m}^3$ bis ca. $11 \text{ g}_{\mu\text{GAK}}/\text{m}^3$.

Ein Vorteil des Mikro-GAK-Verfahrens ist, dass es ohne nachgeschaltete Filtration zum Feststoffrückhalt betrieben werden kann. Im Rahmen des Projekts wurde daher ein Fokus auf den Nachweis von Feststoffen bzw. der **Feststofffreiheit im Ablauf der Versuchsreaktoren** gelegt. Dazu wurden drei verschiedene Ansätze gewählt. Die Trübung im Ablauf beider Versuchsreaktoren wurde kontinuierlich über Online-Messsonden gemessen und zusätzlich täglich im Labor aus der 24-Stunden-Mischprobe bestimmt. Je nach eingesetztem Mikro-GAK-Produkt zeigten sich teils deutliche Unterschiede in der Trübung im Reaktorablauf. Im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Renchen lag die Trübung im Mittel bei 1,5 FNU und im Ablauf der Versuchsreaktoren wurden je nach eingesetztem Kohleprodukt im Mittel zwischen 1,3 FNU und 3,5 FNU ermittelt. Diese Ergebnisse konnten durch die durchgeführte Messung des Aktivkohle-Gehalts mittels Gradienten-TOC-Verfahren bestätigt werden. Auch hier zeigte

sich in Abhängigkeit des eingesetzten Mikro-GAK-Produkts entweder kein Austrag von Aktivkohle oder ein geringer Austrag. Insbesondere kurz nach der Dosierung der Mikro-GAK in den Reaktor kam es zu Anstiegen des Aktivkohlegehalts im Ablauf der Reaktoren, da zunächst der, an den Mikro-GAK-Körnern anhaftende, Feinanteil ausgespült wurde. Durch eine Rückführung des Ablaufs kurz nach Zugabe frischer Mikro-GAK oder ein Waschen der benetzten Mikro-GAK kann dieser Austrag vermieden werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das Mikro-GAK-Verfahren ohne nachgeschalteten Feststoffrückhalt durch einen Filter betrieben werden kann und kein übermäßiger Austrag von Aktivkohle stattfindet. Eine gezielte Auswahl der Aktivkohle zur Vermeidung und eine kontinuierliche Überwachung der Trübung im Ablauf des Mikro-GAK-Verfahrens sind sinnvoll.

Im Laufe des Projekts wurden insgesamt drei **verschiedene Mikro-GAK-Produkte** eingesetzt. Bei zwei Produkten handelte es sich nach Datenblatt um Frischkohlen und bei einem Produkt um ein Regenerat. Alle drei Produkte sind prinzipiell geeignet, um die erforderliche mittlere Spurenstoffentnahme zu erzielen. Jedoch sind je nach gewähltem Kohleprodukt unterschiedliche Mikro-GAK-Dosierungen notwendig. Auch hinsichtlich der Abriebfestigkeit zeigen die getesteten Mikro-GAK-Produkte unterschiedliches Verhalten.

Ein weiterer Vorteil der Mikro-GAK ist, dass sie, im Gegensatz zu Pulveraktivkohle, reaktiviert und erneut eingesetzt werden kann. Kohle B wurde durch den Hersteller testweise regeneriert. Es zeigte sich, dass eine **Regenerierung möglich** ist.

Neben der Entnahme von organischen Spurenstoffen wurde im Projekt auch untersucht, inwiefern Phosphor und Restorganik (dargestellt über den Summenparameter CSB) zurückgehalten werden können. Untersuchungen mit GAK/PAK haben hier in der Vergangenheit Synergiepotenziale aufgezeigt. Hinsichtlich des Phosphors ergibt sich durch das Mikro-GAK-Verfahren keine weitere Elimination. Da durch das Mikro-GAK-Verfahren weder Feststoffe in großem Maße zurückgehalten werden, noch eine Dosierung von Fällmitteln stattfindet, ist auch keine weitergehende **Phosphorelimination** zu erwarten. Analog zur Anwendung von PAK und GAK adsorbieren auch an der Mikro-GAK verschiedene organische Bestandteile des Abwassers, was sich in einer Reduktion des DOC im Ablauf der Versuchsreaktoren gegenüber dem Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Renchen darstellt. Je nach eingesetztem Kohleprodukt und gewählten Betriebseinstellungen ist eine weitere **Reduktion der organischen Belastung** (ausgedrückt als DOC) zwischen 10 % und > 20 % möglich.

Je nach DOC-Konzentration im Zulauf des Mikro-GAK-Verfahrens ergeben sich notwendige Dosiermengen von ca. $10 \text{ g}_{\mu\text{GAK}}/\text{m}^3$, um die notwendige Entnahmeleistung zu erreichen. In Abhängigkeit des eingesetzten Kohleproduktes sind ggfs. auch niedrigere Dosiermengen möglich. Weitere Betriebsmittel werden für den Betrieb des Verfahrens nicht benötigt. Die **Abschätzung der Betriebskosten** für das Mikro-GAK-Verfahren zeigt, dass tendenziell geringere Betriebskosten zu erwarten sind als bei anderen Verfahren zur Spurenstoffelimination. Dies liegt darin begründet, dass nur eine Verfahrensstufe und nur ein Betriebsmittel benötigt werden. Die meisten anderen eingesetzten Verfahren sind deutlich komplexer. Geht man von einer Unsicherheit von +/- 30% bei der Abschätzung der

Betriebskosten des Mikro-GAK-Verfahrens aus, ergibt sich jedoch kein entscheidender Unterschied zu den Betriebskosten bereits etablierter Verfahren.

Die Untersuchungen des Mikro-GAK-Verfahrens auf der Kläranlage Renchen zeigen, dass das Verfahren ein großes Potenzial hat auf kommunalen Kläranlagen zur Entnahme von Spurenstoffen eingesetzt zu werden. Vor dem Hintergrund der Novellierung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie, die eine Spurenstoffelimination (Viertbehandlung) für eine Vielzahl kommunaler Kläranlagen in Europa vorsieht, stellt das Mikro-GAK-Verfahren eine gute Ergänzung zu den bisher überwiegend eingesetzten Verfahren zur Spurenstoffelimination (Ozonung, PAK und GAK) dar. Insbesondere die Vorteile der Reaktivierbarkeit der Aktivkohle und die nach Abschätzung geringen Betriebskosten machen das Verfahren für kommunale Kläranlagen sehr interessant.

In der Schweiz wurde das Mikro-GAK-Verfahren bereits zweimal auf kommunalen Kläranlagen erfolgreich geplant und umgesetzt und befindet sich auf weiteren Kläranlagen in Planung oder Bau. Aus dem großtechnischen Betrieb werden sich zukünftig weitere Erkenntnisse zur benötigten Mikro-GAK-Dosiermenge sowie zum Betrieb des Verfahrens bei schwankenden Zuflussbedingungen ergeben. Diese Erkenntnisse können zur weiteren Optimierung des Verfahrens und zu dessen Verbreitung auch über die Schweiz hinaus beitragen.

Literaturverzeichnis

- Abegglen, C., & Siegrist, H. (2012). *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Acosta, L., Launay, M., & Zettl, U. (2021). *Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen - Stufe 1. Abschlussbericht*. Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg.
- Altmann, J., Ruhl, A. S., Zietzschmann, F., & Jekel, M. (2014). Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water Research*, 55, 185-193.
- Benstöm, F. (2017). *Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*. Aachen: RWTH Publications.
- Biofilm Reactors Task Force. (2010). *Biofilm Reactors*. Alexandria, Virginia (USA): Water Environment Federation.
- Böhler, M. A., Joss, A., & McArdell, C. S. (2022). GAK-Filter für die Spurenstoffentfernung - Erfahrung und Betriebsergebnisse der Pilotstudien ARA Furt/Bülach und Glarnerland. *Aqua&Gas N° 1*, 48-54.
- Bornemann, C., Pinnekamp, J., Yüce, S., Herr, J., Jagemann, P., Lyko, S., . . . Stepkes, H. (2012). *Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (Mikroflock). Abschlussbericht*. RWTH Aachen, ISA.
- Canfin, P. (2024). A9-0276/268 - Änderungsantrag 268 zur Kommunalabwasserrichtlinie. Europäisches Parlament.
- Chen, G., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2020). *Biological Wastewater Treatment - Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 247, 849-866. doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.053
- DWA-AG K-8.6. (2018). Sedimentation pulverförmiger Aktivkohle. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 5, 413-424.
- DWA-AG KA-8.3. (2023). Abwasserfiltration nach biologischer Behandlung. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 4.
- DWA-AG KA-8.5. (2022). *DWA Themen - Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen - Erfahrungen, verfahrenstechnische Aspekte und offene Fragen*. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).

- DWA-AG KA-8.6. (2016). Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung - Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 „Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen“. (DWA, Hrsg.) *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 12, 1062-1067.
- DWA-AG KA-8.6. (Mai 2019). *DWA-Themen - Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung - Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte* -. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- DWA-AG KA-8.6. (2021). *Merkblatt DWA-M 285-2 - Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- DWA-BW. (2023). *Kläranlagen- und Kanalnachbarschaften. DWA-Landesverband Baden-Württemberg. Ergebnisse des 49. kommunalen Leistungsnachweises 2022*. Stuttgart: DWA-Landesverband Baden-Württemberg.
- Fundneider, T. (2020). *Filtration und Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Aufbereitung von kommunalem Abwasser – Phosphor- und Spurenstoffentfernung* –. Darmstadt: Verein zur Förderung des Instituts IWAR der Technischen Universität Darmstadt e. V.
- Grelot, J., Horisberger, M., & Casazza, R. (2021). ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS PAR CAG EN LIT FLUIDISÉ - EXPÉRIENCES D'EXPLOITATION DE LA STEP DE PENTHAZ. *Aqua&Gas N° 1*, 30-38.
- Horisberger, M., Casazza, R., Grelot, J., & Joss, A. (2019). ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN - PILOTVERSUCHE: EINSATZ VON GRANULIERTER AKTIVKOHLE IM WIRBELBETT AUF DER ARA PENTHAZ. *Aqua & Gas N°1*, 39-45.
- igkb. (2005). *Bodensee-Richtlinien 2005 mit VwV zu ihrer Einführung in Baden-Württemberg*. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB).
- Katoh, S., Horiuchi, J.-i., & Yoshida, F. (2015). *Biochemical Engineering*. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- KomS. (2018). *Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination*. Stuttgart: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg.
- KomS. (2020). *Spurenstoffe im Abwasser - Eine Handlungsempfehlung für Kommunen*. Stuttgart: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg.
- KomS. (2021). *Anhang zum Leitfaden Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen - Tabellenwerk_Bewertung_Spurenstoffsituation_KomS_2021_ueberarbeitet*. Von <https://koms-bw.de/publikationen/koms/> abgerufen
- Krahnstöver, T., & Wintgens, T. (2018). *Aktivkohle-Schlupf aus Reinigungsstufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen. Projektbericht an den Verband Schweizer Abwasser- und*

- Gewässerschutzfachleute, Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“*. Institut für Ecopreneurship Hochschule für Life Sciences Fachhochschule Nordwestschweiz.
- LUBW. (2017). *Leitfaden Abwasserabgaben*. Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- Malms, S., Krahnstöver, T., Montag, D., Wintgens, T., Benstöm, F., Fischer, J., . . . Linnemann, V. (2018). *Bewertung von Verfahren zum Nachweis von Pulveraktivkohle im Kläranlagenablauf–BePAK. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*. Aachen. Von https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/Abschlussbericht_BePAK_Druck.pdf abgerufen
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5. Ausg.). New York: McGraw-Hill Education.
- Myers, D. N. (2019). Innovations in Monitoring With Water-Quality Sensors With Case Studies on Floods, Hurricanes, and Harmful Algal Blooms. *Separation Science and Technology*, 11.
- Ødegaard, H. (1999). The Moving Bed Biofilm Reactor. *Water Environmental Engineering and Reuse of Water*, 205-305.
- Rau, W., & Metzger, S. (2017). *Bestandsaufnahme der Spurenstoffsituation*. Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg.
- Reineke, W., & Schlömann, M. (2020). *Umweltmikrobiologie*. Berlin: Springer Spektrum.
- Taudien, Y., Kolisch, G., Bornemann, C., & Nahrstedt, A. (2020). Langzeiterfahrungen zum Einsatz von GAK-Filtern bei der Spurenstoffelimination. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 858-867.
- UMBW. (2018). *Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- UMBW. (2020). *Handlungskonzept Abwasser*. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- VSA. (2018). *Erfahrungen mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen*. VSA Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“.
- VSA. (2019). *Pulveraktivkohle: Verfahren und Abtrennstufen*. Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“.
- VSA. (2022). *Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett*. Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen".
- VSA. (21. Mai 2024). *GAK im Schwebebett: Kenngrösse und Illustrationen*. Von VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen: <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/gak-verfahrensuehrungen/gak-im-schwebett/> abgerufen

VSA. (21. Mai 2024). *Verfahrensführungen GAK*. Von VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen: <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/gak-verfahrensfuehrungen/> abgerufen

Anhang

I. Vergleichswerte Liste A

Nr.	Substanz	Werte KA Renchen 2022			Werte KA Renchen 2023			Anzahl Vergleichswerte	Vergleichswerte Zulauf KA			Vergleichswerte Ablauf Kläranlage			Vergleichswerte Elimination
		KA Zulauf	KA Ablauf	Elimination	KA Zulauf	KA Ablauf	Elimination		Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max	Min	
		[µg/l]	[µg/l]	%	[µg/l]	[µg/l]	%		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
1	10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepin	1,10	1,00	9%	0,34	0,54	-59%	56	1,497	6,000	0,013	1,275	4,100	0,190	-20%
2	Azithromycin	0,08	0,09	-13%	0,18	0,13	28%	51	0,520	1,600	0,025	0,408	1,500	0,025	-15%
3	Bezafibrat	0,15	0,01	92%	0,05	0,01	75%	6	0,833	2,200	0,013	0,207	0,950	0,025	59%
4	Candesartan	4,80	4,30	10%	1,30	1,40	-8%	3	1,813	3,000	0,940	1,530	2,100	0,890	10%
5	Carbamazepin	0,91	0,92	-1%	0,20	0,22	-10%	56	0,665	2,100	0,013	0,675	2,100	0,093	-20%
6	Ciprofloxazin	0,14	0,01	91%	0,15	0,01	92%	53	1,785	6,300	0,025	0,393	2,500	0,025	70%
7	Clarithromycin	0,13	0,12	8%	0,19	0,17	11%	50	0,687	12,000	0,025	0,378	7,200	0,025	33%
8	Dehydrato-Erythromycin A	0,01	0,01	0%	0,01	0,01	0%	42	0,075	0,280	0,025	0,073	0,230	0,025	-18%
9	Diclofenac	4,30	3,40	21%	1,50	1,40	7%	56	2,843	6,000	1,400	2,118	3,500	0,950	23%
10	Erythromycin A	0,03	0,03	0%	0,03	0,06	-140%	50	0,182	0,890	0,025	0,133	0,800	0,025	10%
11	Gabapentin	7,20	2,40	67%	2,80	1,10	61%	52	8,921	36,000	2,400	4,585	30,000	0,520	46%
12	Guanylharnstoff	10,00	65,00	-550%	1,80	25,00	-1289%	52	16,121	260,000	0,690	54,367	190,000	0,570	-8520%
13	Hydrochlorothiazid	2,20	1,90	14%	0,63	0,62	2%	6	4,333	8,900	1,800	3,240	4,100	1,600	14%
14	Ibuprofen	17,00	0,01	100%	7,10	0,01	100%	56	17,191	36,000	3,400	0,086	1,300	0,013	99%
15	Irbesartan	0,57	0,48	16%	0,11	0,16	-45%	6	0,928	1,300	0,530	0,393	0,670	0,080	14%
16	Metformin	120,00	0,81	99%	47,00	0,63	99%	52	178,192	470,000	35,000	3,143	17,000	0,410	98%
17	Metoprolol	1,30	0,91	30%	0,39	0,24	38%	56	2,111	4,800	0,400	1,394	3,300	0,320	23%
18	Sulfamethoxazol	0,30	0,11	63%	0,27	0,14	48%	56	0,878	8,400	0,013	0,599	8,100	0,027	23,80%
19	Amidotrizoesäure	0,01	0,03	-140%	0,01	0,01	0%	53	6,560	31,000	0,025	6,096	76,000	0,025	-39%
20	Iohexol	0,01	0,01	0%	0,01	0,01	0%	51	4,629	51,000	0,025	16,526	810,000	0,025	-63467%
21	Iomeprol	9,30	0,33	96%	3,10	0,80	74%	56	52,530	360,000	0,170	11,209	37,000	0,025	75%
22	Iopamidol	0,10	0,16	-60%	0,01	0,01	0%	55	9,873	120,000	0,025	9,181	110,000	0,025	-97%
23	Iopromid	45,00	0,77	98%	5,70	1,30	77%	55	10,817	64,000	0,025	1,555	13,000	0,025	71%
24	17-alpha-Ethinylestradiol	0,00	0,00	75%	0,00	0,00	75%	41	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0%
25	17-beta-Estradiol	0,06	0,00	99%	0,01	0,00	96%	56	0,018	0,050	0,004	0,000	0,006	0,000	96%
26	Estron	0,09	0,01	94%	0,03	0,00	87%	56	0,054	0,110	0,010	0,004	0,032	0,000	90%

Vergleichswerte stammen aus: (KomS, Anhang zum Leitfaden Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen - Tabellenwerk_Bewertung_Spurenstoffsituation_KomS_2021_ueberarbeitet, 2021)

Nr.	Substanz	Werte KA Renchen 2022			Werte KA Renchen 2023			Anzahl Vergleichswerte	Vergleichswerte Zulauf KA			Vergleichswerte Ablauf Kläranlage			Vergleichswerte Elimination
		KA Zulauf	KA Ablauf	Elimination	KA Zulauf	KA Ablauf	Elimination		Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max	Min	
		[µg/l]	[µg/l]	%	[µg/l]	[µg/l]	%		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
27	Carbendazim	0,05	0,01	75%	0,01	0,01	0%	42	0,081	1,200	0,013	0,052	0,780	0,013	19%
28	DEET	1,00	0,18	82%	0,05	0,03	40%	54	0,384	1,800	0,013	0,097	0,730	0,013	50%
29	Mecoprop	0,04	0,08	-100%	0,04	0,03	25%	43	0,061	0,620	0,013	0,058	0,400	0,013	-18%
30	Terbutryn	0,08	0,07	13%	0,03	0,01	58%	44	0,141	2,000	0,013	0,082	0,520	0,013	-13%
31	1H-Benzotriazol	16,00	3,40	79%	2,00	0,62	69%	56	27,634	400,000	6,500	9,029	69,000	1,900	55%
32	Tolyltriazole	2,50	1,60	36%	0,59	0,40	32%	56	7,854	41,000	0,003	4,146	57,000	0,003	42%
33	DTPA	1,50	1,50	0%	1,50	1,50	0%	35	3,429	140,000	0,500	1,303	6,300	0,500	-147%
34	EDTA	25,00	44,00	-76%	12,00	11,00	8%	56	71,839	280,000	13,000	53,718	290,000	1,600	10%
35	NTA	15,00	2,50	83%	4,30	0,50	88%	56	78,584	240,000	0,500	4,943	28,000	0,500	88%
36	Melamin	4,00	4,90	-23%	1,00	1,00	0%	56	5,134	50,000	0,260	5,864	45,000	0,350	-29%
37	PFBA	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%	44	0,007	0,064	0,003	0,007	0,062	0,003	-58%
38	PFBS	0,01	0,01	-20%	0,00	0,00	0%	47	0,019	0,380	0,003	0,013	0,240	0,003	-34%
39	PFOA	0,01	0,01	-60%	0,00	0,00	0%	47	0,015	0,098	0,003	0,015	0,088	0,003	-76%
40	PFOS	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%	51	0,034	0,550	0,003	0,020	0,210	0,003	-44%
41	AHTN	0,11	0,04	64%	0,28	0,22	21%	47	0,069	0,470	0,013	0,082	0,610	0,013	-80%
42	HHCB	0,92	0,34	63%	2,20	1,50	32%	56	0,569	2,600	0,030	0,504	1,900	0,040	6%
43	TCEP	0,48	0,33	31%	0,62	0,67	-8%	46	0,190	0,780	0,025	0,155	0,690	0,025	-23%
44	TCPP	1,70	0,42	75%	2,10	1,10	48%	54	1,897	23,000	0,270	1,172	11,000	0,025	16%
45	Acesulfam	67,00	0,07	100%	12,00	0,43	96%	56	26,216	150,000	1,300	6,731	100,000	0,100	74%
46	Cyclamat	140,00	0,03	100%	25,00	0,04	100%	3	99,333	150,000	70,000	0,353	0,630	0,180	99,66%
47	Sucralose	23,00	22,00	4%	4,90	4,20	14%	3	6,933	7,300	6,300	6,467	7,400	5,300	7,15%

Vergleichswerte stammen aus: (KomS, Anhang zum Leitfaden Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen - Tabellenwerk_Bewertung_Spurenstoffsituation_KomS_2021_ueberarbeitet, 2021)

II. Spurenstoffkonzentrationen an den verschiedenen Probenahmestellen (Liste B)

	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)
	1H-Benzotriazol					Tolyltriazole					Metoprolol					Sulfamethoxazol					Gabapentin				
Datum	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
17.05.2022		2,69	0,12		0,13		1,66	0,12		0,06		0,691	0,101		0,035		0,263	0,195		0,086		2,448	1,148		0,734
11.06.2022		2,32	0,29		0,22		1,94	0,17		0,1		0,533	0,065		0,026		0,281	0,223		0,11		1,733	0,546		0,575
09.08.2022		5,08	0,51		0,55		1,25	0,27		0,19		0,671	0,068		0,043		0,412	0,338		0,198		1,669	0,715		0,81
07.09.2022		4,33	0,93		0,67		1,48	0,25		0,15		0,708	0,18		0,094		0,319	0,308		0,207		1,588	0,731		0,606
13.09.2022	7,8	3,15	0,86		0,54	1,39	1,18	0,31		0,15	0,751	0,513	0,159		0,08	0,425	0,161	0,149		0,132	5,048	1,171	0,618		0,552
21.09.2022	14,44	4,29	0,89		0,54	6,64	1,61	0,26		0,12	1,03	0,55	0,15		0,07	1,063	0,299	0,254		0,176	8,585	1,276	0,525		0,473
11.10.2022	9,03	3,18	0,61		0,6	2,26	0,83	0,1		0,1	0,879	0,565	0,109		0,11	0,611	0,164	0,165		0,094	6,243	1,24	0,51		0,492
18.10.2022	7,09	3,69	0,67		0,62	2,56	0,84	0,16		0,15	0,867	0,577	0,135		0,09	0,517	0,178	0,16		0,091	5,647	1,469	0,498		0,625
26.10.2022	5,55	2,71	0,61		0,43	0,75	0,45	0,09		0,06	0,556	0,42	0,115		0,063	0,277	0,081	0,075		0,039	3,965	1,611	0,709		0,742
02.11.2022		3,09	0,74		0,35		0,34	0,11		0,05		0,55	0,184		0,055		0,192	0,189		0,135		1,828	1,025		0,806
23.11.2022	5,43	1,94	0,76		0,35	2,82	1,5	0,4		0,09	0,491	0,327	0,137		0,051	0,204	0,108	0,109		0,087	2,886	1,199	0,866		0,593
30.11.2022	5,39	2,13	0,7		0,39	3,5	1,31	0,27		0,11	0,49	0,369	0,165		0,081	0,448	0,139	0,145		0,12	2,968	1,23	0,866		0,581
10.02.2023		1,14	0,31		0,28		0,37	0,07		0,05		0,454	0,128		0,096		0,081	0,081		0,066		2,06	1,338		0,957
21.02.2023	4,87	1,04	0,38		0,34	4,32	0,92	0,22		0,16	1,586	0,512	0,161		0,134	0,345	0,126	0,124		0,104	4,038	1,462	0,898		0,684
14.03.2023		0,98	0,4		0,88		0,47	0,18		0,3		0,379	0,177		0,167		0,108	0,09		0,048		1,306	0,731		0,557
04.04.2023	2,74	0,87	0,33		0,44	0,87	0,41	0,11		0,13	0,357	0,32	0,104		0,123	0,24	0,151	0,166		0,129	3,347	1,419	0,76		0,655
06.04.2023		0,97	0,39		0,4		0,54	0,17		0,16		0,354	0,15		0,133		0,2	0,198		0,145		1,765	0,901		0,654
02.05.2023		0,87	0,363		0,398		0,323	0,125		0,117		0,441	0,176		0,148		0,125	0,124		0,082		1,401	0,732		0,575
04.05.2023	3,576	0,978	0,329		0,366	2,903	0,707	0,106		0,134	0,551	0,474	0,122		0,17	0,279	0,084	0,081		0,113	3,73	1,947	0,602		0,786
27.06.2023		1,2		0,13	0,42		0,83		0,08	0,12		0,537		0,082	0,066		0,242		0,124	0,136		1,716		0,86	0,54
14.07.2023		1,79		0,11	0,51		1,36		0,04	0,17		0,452		0,018	0,045		0,152		0,08	0,12		1,69		0,516	0,428
15.07.2023		1,5		0,11			1,23		0,05			0,508		0,029			0,231		0,122			2,796		0,691	
08.08.2023		0,78		0,07	0,28		0,68		0,04	0,11		0,142		0,019	0,049		0,208		0,11	0,108		1,735		0,344	0,509
09.08.2023		0,84		0,07	0,29		0,77		0,03	0,1		0,35		0,02	0,03		0,225		0,122	0,127		1,724		0,327	0,382
23.08.2023		1,06		0,33	0,25		1,09		0,21	0,1		0,473		0,142	0,053		0,296		0,206	0,182		1,331		0,444	0,306
31.08.2023		0,97		0,25	0,32		0,74		0,14	0,11		0,43		0,17	0,091		0,173		0,124	0,13		1,453		0,49	0,315
26.09.2023		0,98		0,21	0,22		0,64		0,11	0,07		0,463		0,111	0,051		0,155		0,126	0,111		1,675		0,842	0,28
28.09.2023	3,27	1,19		0,15	0,25	4,48	0,92		0,11	0,2	0,807	0,509		0,064	0,04	0,664	0,189		0,166	0,141	9	1,384		0,515	0,203
17.10.2023		0,51		0,04	0,3		0,34		0,02	0,23		0,539		0,057	0,144		0,251		0,15	0,143		1,722		0,637	0,618

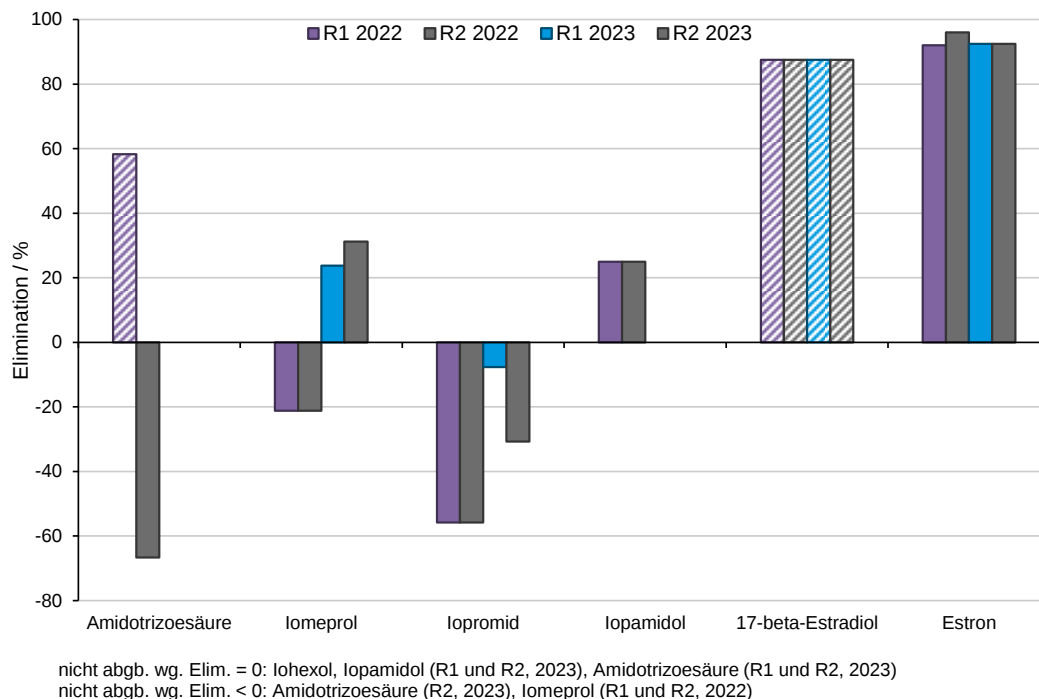
	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf Kläranlage	Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)
	Carbamazepin					Diclofenac					Irbesartan					Candesartan					Hydrochlorothiazid				
Datum	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
17.05.2022		0,93	0,202		0,067		3,154	0,99		0,666		0,51	0,145		0,137		1,927	0,899		0,856		1,949	0,293		0,088
11.06.2022		0,933	0,206		0,075		2,717	0,745		0,581		0,402	0,134		0,134		1,691	1,11		1,025		1,799	0,319		0,093
09.08.2022		1,181	0,173		0,092		2,314	0,566		0,675		0,441	0,169		0,19		2,338	1,784		1,733		2,341	0,437		0,255
07.09.2022		1,091	0,533		0,316		2,219	0,953		0,867		0,456	0,246		0,23		2,03	1,704		1,68		2,295	0,838		0,38
13.09.2022	0,687	0,64	0,431		0,241	3,207	1,648	0,881		0,736	0,301	0,298	0,159		0,158	1,563	1,518	1,403		1,392	2,613	1,578	0,633		0,28
21.09.2022	0,852	0,761	0,351		0,202	3,992	1,884	0,863		0,757	0,757	0,364	0,188		0,202	2,182	1,844	1,359		1,365	2,793	1,676	0,578		0,237
11.10.2022	0,933	0,819	0,288		0,234	2,929	1,988	0,601		0,746	0,586	0,397	0,187		0,185	1,943	1,617	1,187		1,15	2,521	1,767	0,389		0,301
18.10.2022	0,745	0,696	0,293		0,183	3,279	1,868	0,54		0,561	0,443	0,332	0,139		0,134	1,653	1,437	1,02		0,917	2,069	1,679	0,433		0,275
26.10.2022	0,627	0,558	0,239		0,143	2,304	1,41	0,416		0,368	0,302	0,207	0,085		0,083	1,024	0,902	0,593		0,557	1,388	1,032	0,291		0,167
02.11.2022		0,821	0,457		0,213		1,911	1,054		0,626		0,33	0,205		0,182		1,336	1,169		1,092		1,911	1,054		0,626
23.11.2022	0,515	0,359	0,252		0,134	1,519	1,128	0,816		0,529	0,255	0,203	0,154		0,138	0,838	0,652	0,662		0,647	1,048	0,832	0,53		0,187
30.11.2022	0,55	0,411	0,28		0,175	1,807	1,351	0,934		0,593	0,25	0,211	0,144		0,136	0,972	0,885	0,787		0,76	1,381	0,991	0,513		0,021
10.02.2023		0,549	0,239		0,195		1,694	0,938		0,912		0,264	0,15		0,144		1,117	0,903		0,865		1,186	0,342		0,248
21.02.2023	0,691	0,593	0,391		0,319	2,541	2,37	1,441		1,4	0,374	0,307	0,205		0,2	1,482	1,486	1,283		1,282	1,832	1,575	0,645		0,462
14.03.2023		0,479	0,347		0,256		1,719	1,667		1,471		0,304	0,153		0,157		0,853	0,82		0,848		0,934	0,588		0,417
04.04.2023	0,268	0,265	0,206		0,163	1,744	1,349	0,674		0,749	0,227	0,14	0,09		0,112	0,914	0,817	0,693		0,722	1,089	0,896	0,447		0,332
06.04.2023		0,305	0,224		0,179		1,42	0,784		0,823		0,156	0,103		0,116		0,82	0,731		0,731		3,125	2,778		2,778
02.05.2023		0,461	0,286		0,246		1,842	0,739		0,847		0,238	0,144		0,167		1,142	0,811		0,914		1,205	0,499		0,41
04.05.2023	0,472	0,445	0,2		0,291	3,251	2,231	1,014		0,979	0,342	0,314	0,19		0,17	1,369	1,271	1,052		1,046	1,55	1,293	0,341		0,501
27.06.2023		0,769		0,175	0,239		2,497		1,009	0,686		0,364		0,195	0,186		1,795		1,414	1,498		1,707		0,305	0,236
14.07.2023		0,643		0,075	0,195		2,208		0,831	0,539		0,353		0,194	0,186		1,685		1,399	1,422		1,535		0,079	0,201
15.07.2023		0,651		0,1			2,139		0,921			0,356		0,222			1,829		1,485			1,716		0,134	
08.08.2023		0,271		0,067	0,116		1,394		0,569	0,315		0,173		0,112	0,09		0,936		0,823	0,771		0,911		0,08	0,125
09.08.2023		0,348		0,069	0,117		1,504		0,676	0,371		0,215		0,132	0,117		1,128		0,96	0,92		1,105		0,099	0,13
23.08.2023		0,627		0,263	0,174		2,324		1,105	0,472		0,381		0,259	0,173		1,713		1,478	1,299		1,587		0,514	0,179
31.08.2023		0,44		0,235	0,194		1,583		1,005	0,636		0,296		0,221	0,184		1,506		1,21	1,201		1,383		0,509	0,27
26.09.2023		0,651		0,26	0,179		2,305		1,276	0,635		0,382		0,28	0,21		2,131		1,946	1,828		1,868		0,537	0,243
28.09.2023	0,628	0,625		0,193	0,16	4,196	2,174		1,116	0,713	0,602	0,397		0,258	0,21	2,898	2,188		1,965	1,671	2,299	1,826		0,309	0,264
17.10.2023		0,732		0,174	0,282		2,252		0,945	1,035		0,407		0,253	0,228		2,08		1,671	1,494		1,801		0,212	0,508

III. Spurenstoffkonzentrationen an den verschiedenen Probenahmestellen (Liste A)

Substanz	Einheit	2022				2023			
		Zulauf	Ablauf NKB	Ablauf R1 (Kohle A)	Ablauf R2 (Kohle B)	Zulauf	Ablauf NKB	Ablauf R1 (Kohle C)	Ablauf R2 (Kohle B)
Humanarzneimittel									
Ibuprofen	µg/L	17	0,0125	0,0125	0,0125	7,1	0,0125	0,0125	0,0125
Metoprolol	µg/L	1,3	0,91	0,19	0,05	0,39	0,24	0,04	0,03
Carbamazepin	µg/L	0,92	0,92	0,37	0,11	0,2	0,22	0,1	0,05
Diclofenac	µg/L	4,3	3,4	0,74	0,64	1,5	1,4	0,63	0,37
Sulfamethoxazol	µg/L	0,3	0,11	0,13	0,08	0,27	0,14	0,1	0,08
10,11-dihydro-10,11-dihydroxy-carbamazepin	µg/L	1,1	1	0,98	0,45	0,34	0,54	0,27	0,21
Gabapentin	µg/L	7,2	2,4	0,43	0,45	2,8	1,1	0,25	0,15
Metformin	µg/L	120	0,81	0,92	0,95	47	0,63	0,54	0,52
Guanylharnstoff	µg/L	10	65	61	34	1,8	25	14	1,8
Erythromycin A	µg/L	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,06	0,025	0,07
(Dehy-) Erytromycin	µg/L	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Clarithromycin	µg/L	0,13	0,12	0,03	0,03	0,19	0,17	0,2	0,12
Azithromycin	µg/L	0,08	0,09	0,025	0,025	0,18	0,13	0,025	0,025
Ciprofloxacin	µg/L	0,14	0,0125	0,0125	0,0125	0,15	0,0125	0,0125	0,0125
Hydrochlorothiazid	µg/L	2,2	1,9	0,33	0,18	0,63	0,62	0,11	0,063
Candesartan	µg/L	4,8	4,3	3,2	2,2	1,3	1,4	1	1,3
Irbesartan	µg/L	0,57	0,48	0,14	0,089	0,11	0,16	0,092	0,077
Bezafibrat	µg/L	0,15	0,0125	0,0125	0,0125	0,05	0,0125	0,0125	0,0125
Röntgenkontrastmittel									
Amidotrizoesäure	µg/L	0,0125	0,03	0,0125	0,05	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Iohexol	µg/L	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Iomeprol	µg/L	9,3	0,33	0,4	0,4	3,1	0,8	0,61	0,55
Iopromid	µg/L	45	0,77	1,2	1,2	5,7	1,3	1,4	1,7
Iopamidol	µg/L	0,1	0,16	0,12	0,12	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Estrogene									
17-alpha-Ethinylestradiol	µg/L	0,0002	0,00005	0,00005	0,00005	0,0002	0,00005	0,00005	0,00005
17-beta-Estradiol	µg/L	0,06	0,0004	0,00005	0,00005	0,01	0,0004	0,00005	0,00005
Estron	µg/L	0,09	0,005	0,0004	0,0002	0,03	0,004	0,0003	0,0003
Biozide / PSM-Wirkstoffe									
Carbendazim	µg/L	0,05	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Mecoprop	µg/L	0,04	0,08	0,04	0,03	0,04	0,03	0,0125	0,0125
N,N-Diethyl-meta-toluanide(DEET)	µg/L	1	0,18	0,16	0,1	0,05	0,03	0,0125	0,0125
Terbutryn	µg/L	0,08	0,07	0,03	0,0125	0,03	0,0125	0,0125	0,0125
Korrosionsschutzmittel									
Benzotriazol	µg/L	16	3,4	0,58	0,32	2	0,62	0,07	0,1
Tolyltriazol	µg/L	2,5	1,6	0,3	0,06	0,59	0,4	0,025	0,025
Komplexbildner									
EDTA	µg/L	25	44	39	40	12	11	10	11
Nitrilotriessigsäure	µg/L	15	2,5	1,3	1,1	4,3	0,5	0,5	0,5
DTPA	µg/L	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Perfluorierte Tenside									
Perfluorbutansäure (PFBA)	µg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Perfluorooctansäure (PFOA)	µg/L	0,005	0,008	0,007	0,006	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	µg/L	0,005	0,006	0,005	0,005	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	µg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Synthetische Duftstoffe	µg/L	0	0	0	0	0	0	0	0
Tonalid	µg/L	0,11	0,04	0,01	0,01	0,28	0,22	0,06	0,05
Galaxolid	µg/L	0,92	0,34	0,15	0,09	2,2	1,5	0,52	0,46
Summe	µg/L	1	0,38	0,15	0,09	2,5	1,7	0,58	0,51
Flammschutzmittel									
Tris-(2-chlorethyl)phosphat	µg/L	0,48	0,33	0,17	0,09	0,62	0,67	0,24	0,19
Tris-(2-chlorisopropyl)phosphat	µg/L	1,7	0,42	0,34	0,22	2,1	1,1	0,39	0,31
Synthetische Süßstoffe									
Acesulfam	µg/L	67	0,07	0,16	0,25	12	0,43	0,28	0,24
Sucralose	µg/L	23	22	17	12	4,9	6,1	4,2	3,3
Cyclamat	µg/L	140	0,03	0,03	0,03	25	0,05	0,04	0,03

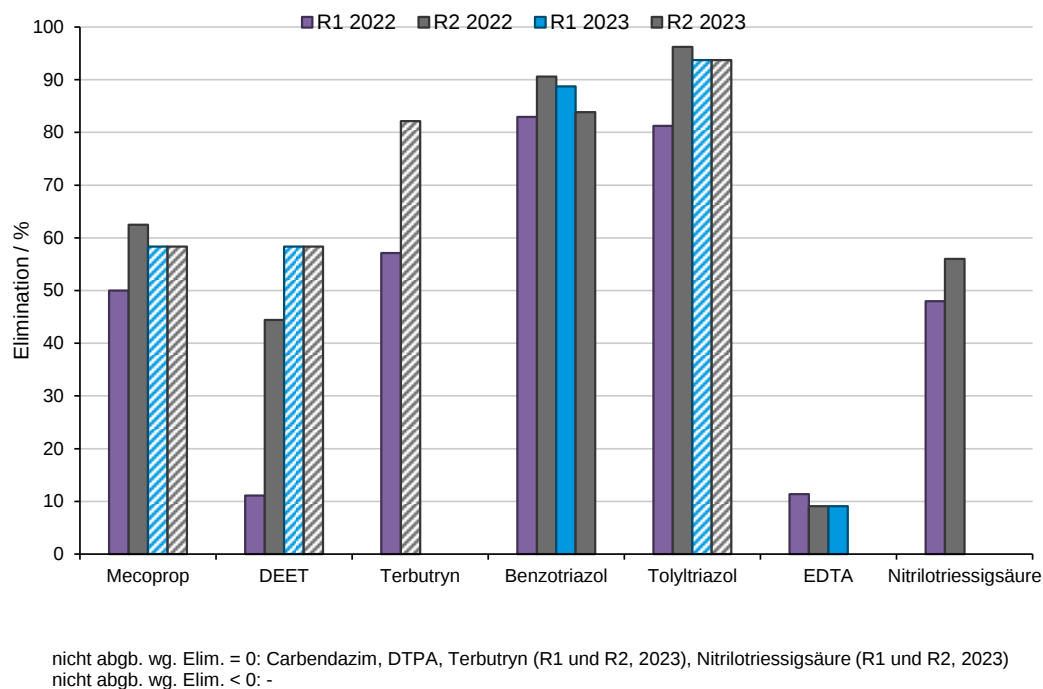
IV. Spurenstoffentnahme im Mikro-GAK-Verfahren (Liste A)

Röntgenkontrastmittel und Estrogene



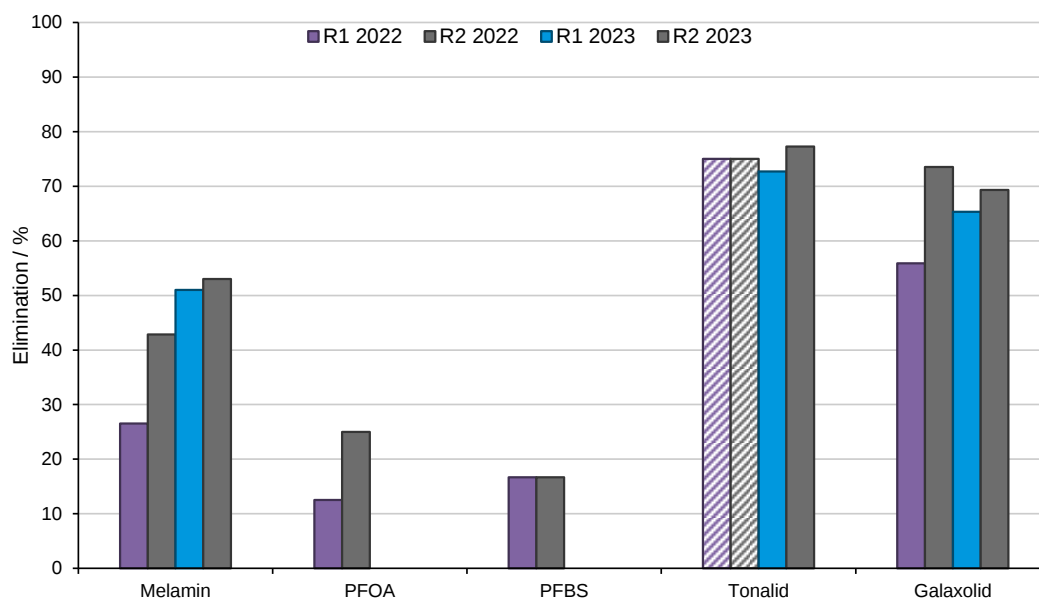
Gestrichelte Balken stellen eine Entnahme des Spurenstoffs bis unter die Bestimmungsgrenze dar

Pflanzenschutzmittel, Korrosionsschutzmittel und Komplexbildner



Gestrichelte Balken stellen eine Entnahme des Spurenstoffs bis unter die Bestimmungsgrenze dar

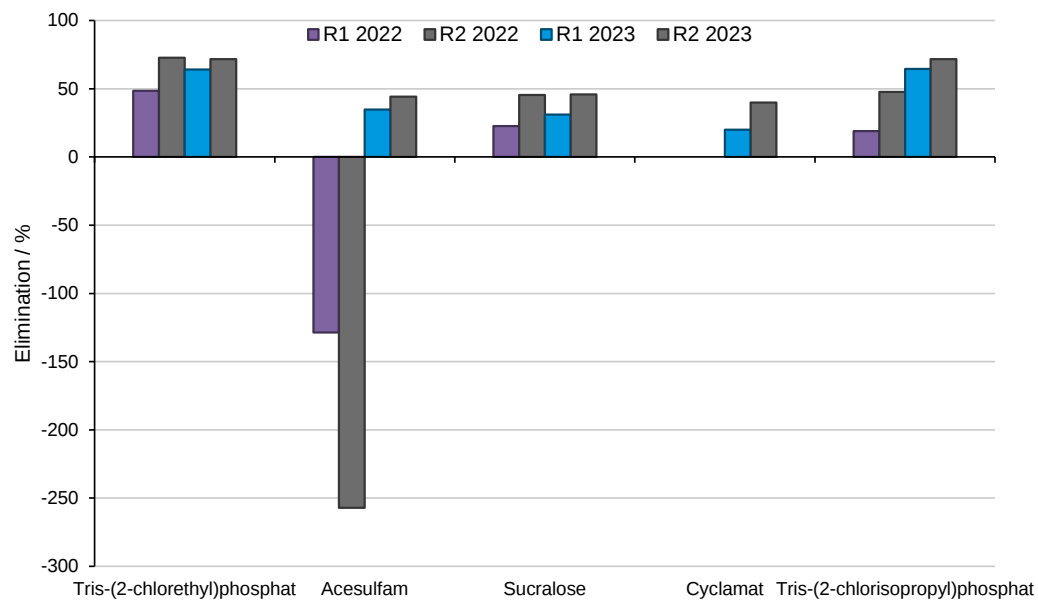
Industriechemikalien, PFT, synthetische Duftstoffe



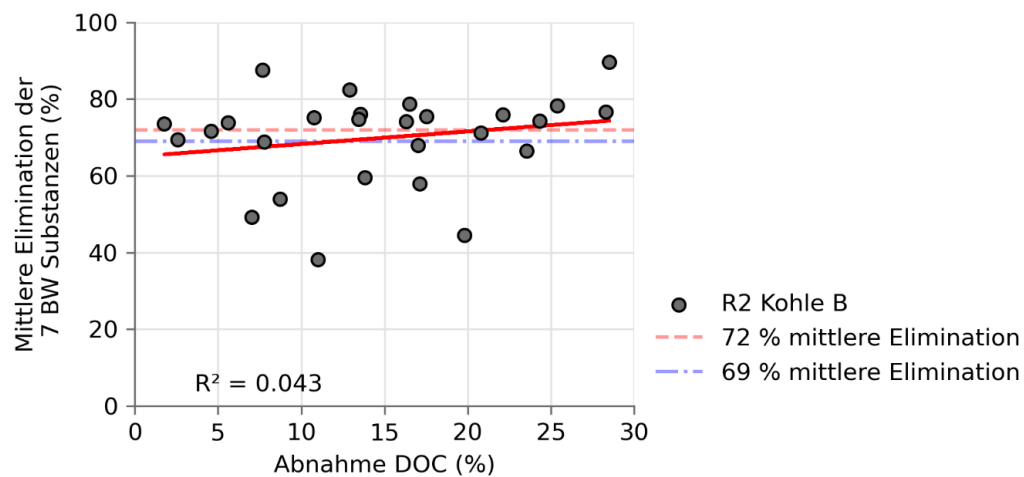
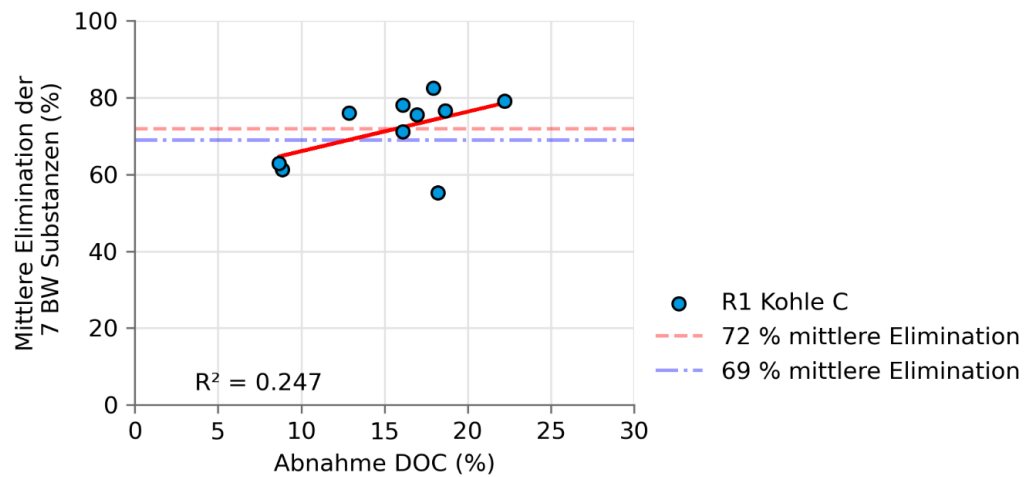
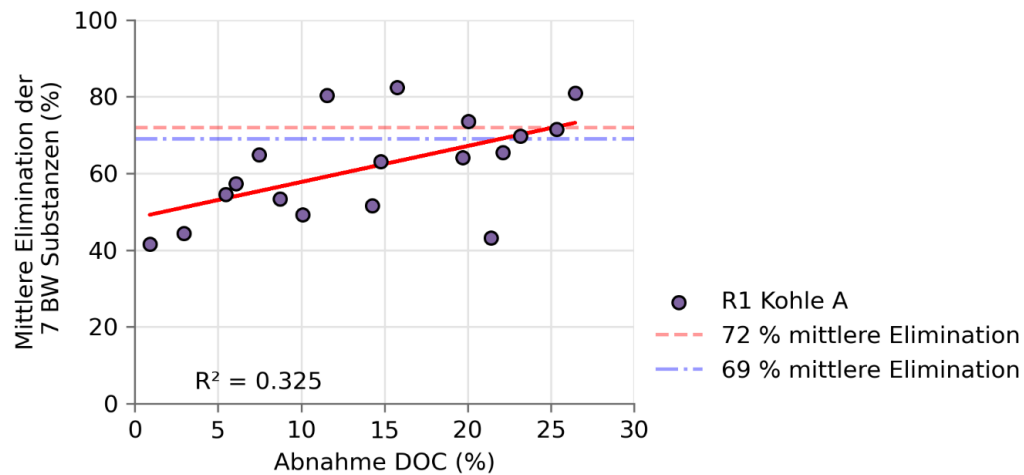
nicht abgb. wg. Elim. = 0: Perfluoroctansäure (R1 und R2, 2023), Perfluorbutansulfonsäure (R1 und R2, 2023)
 nicht abgb. wg. Elim. < 0: -

Gestrichelte Balken stellen eine Entnahme des Spurenstoffs bis unter die Bestimmungsgrenze dar

Flammschutzmittel und Süßstoffe

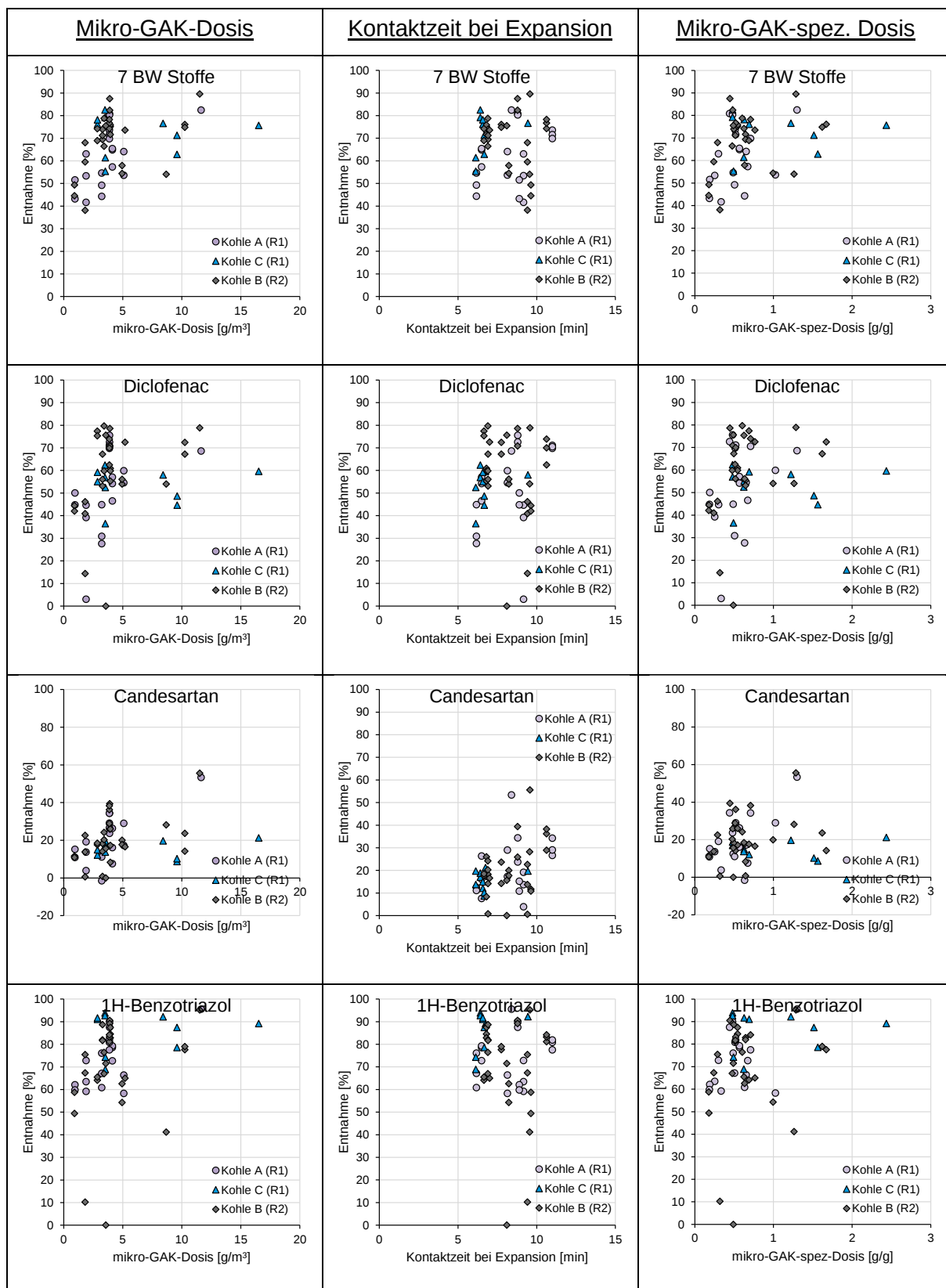


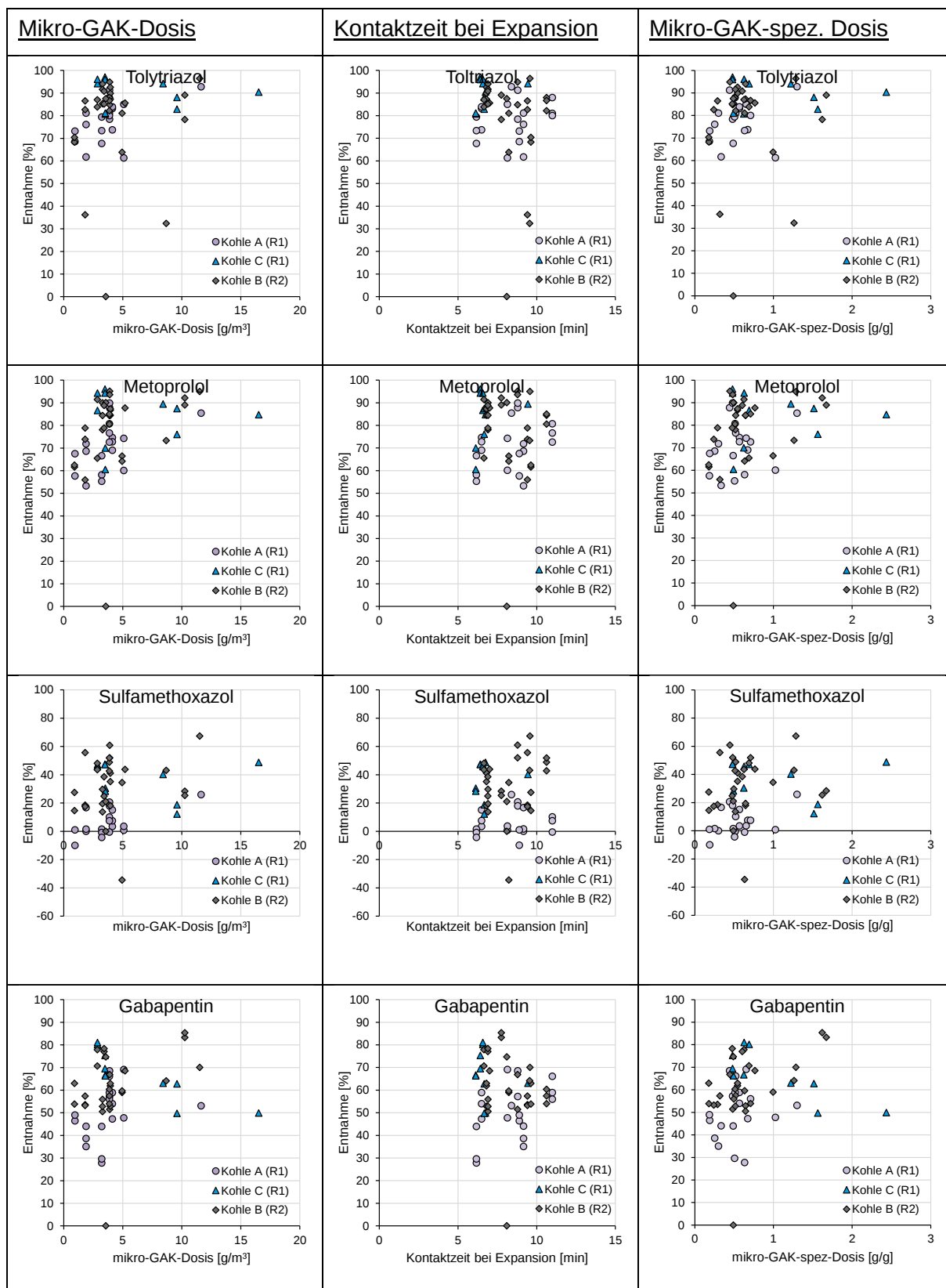
nicht abgb. wg. Elim. = 0: Cyclamat (R1 und R2, 2022)
 nicht abgb. wg. Elim. < 0: Acesulfam (R1 und R2, 2022)

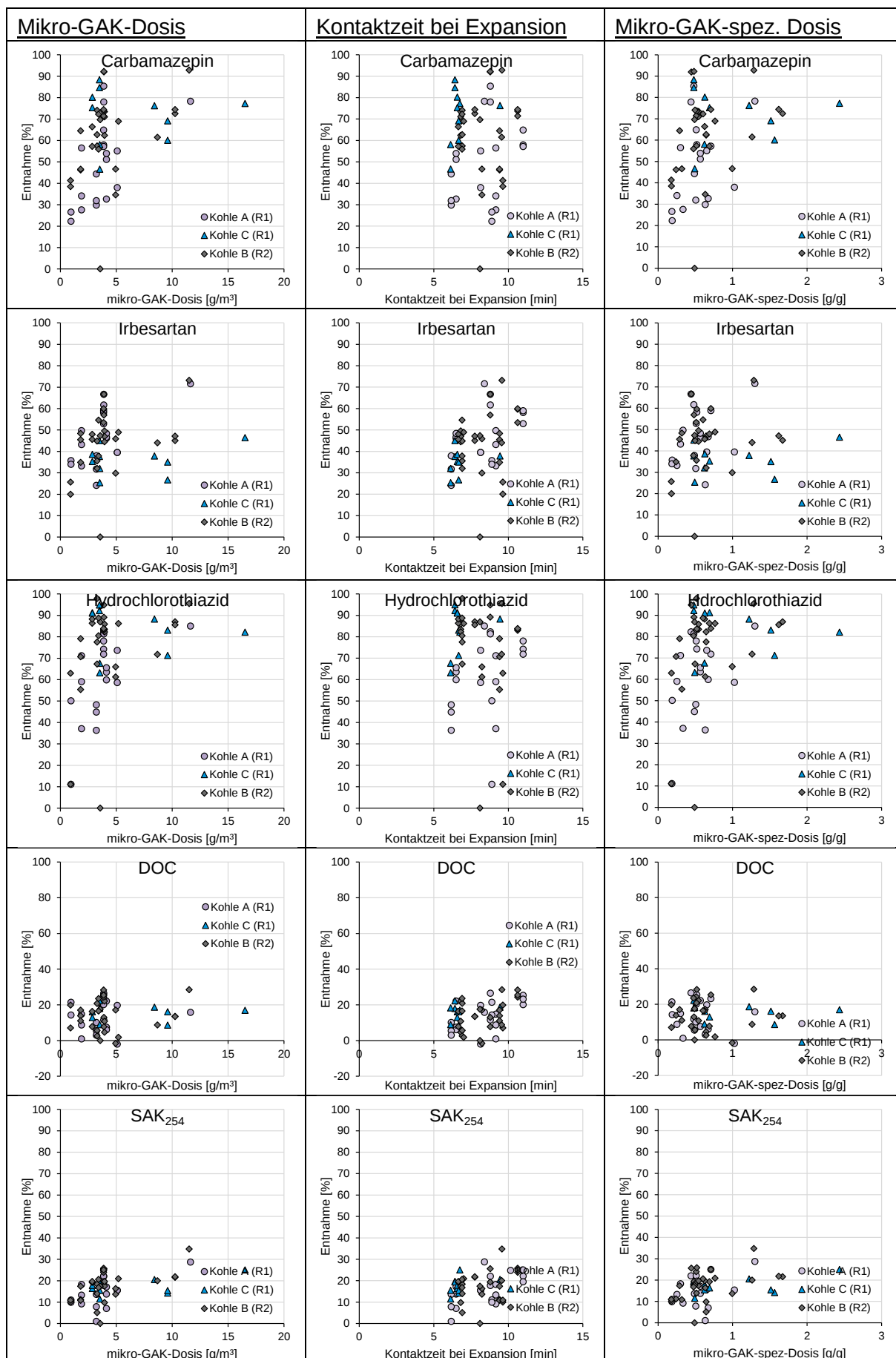
V. Surrogatparameter – Korrelation DOC und Spurenstoffentnahme

Korrelation der Abnahme des DOC und der mittleren Spurenstoffentnahme der 7 BW Substanzen

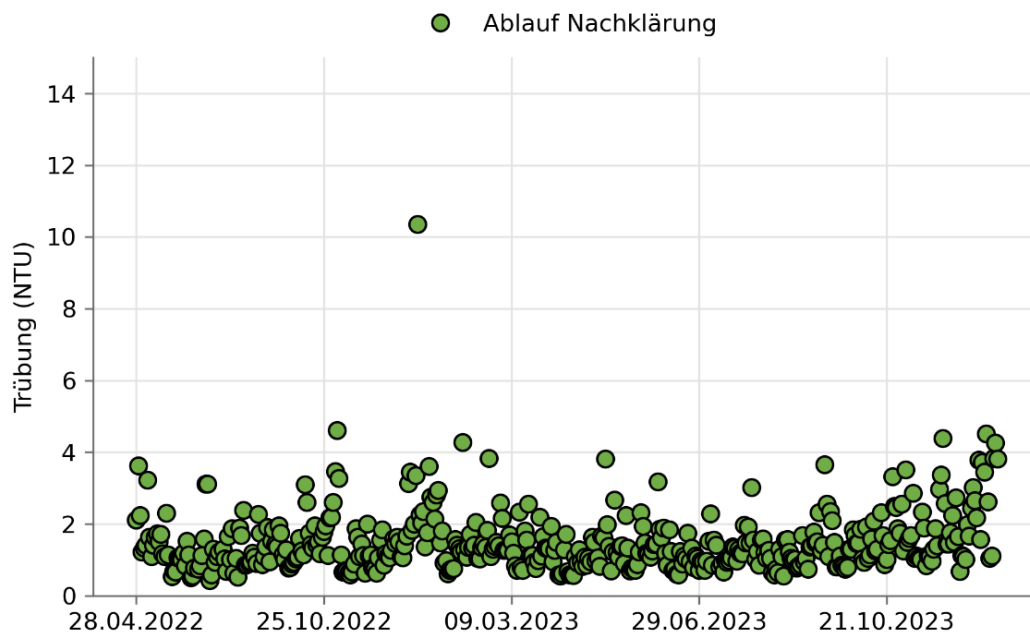
VI. Abhängigkeit des Mikro-GAK-Verfahrens von verschiedenen Betriebsgrößen



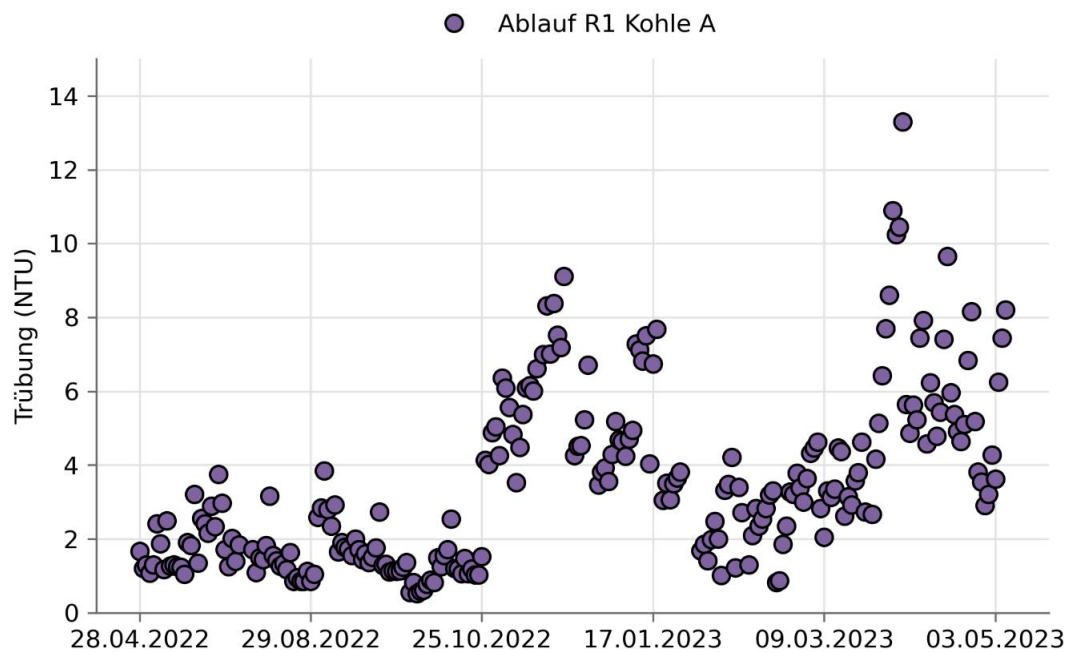




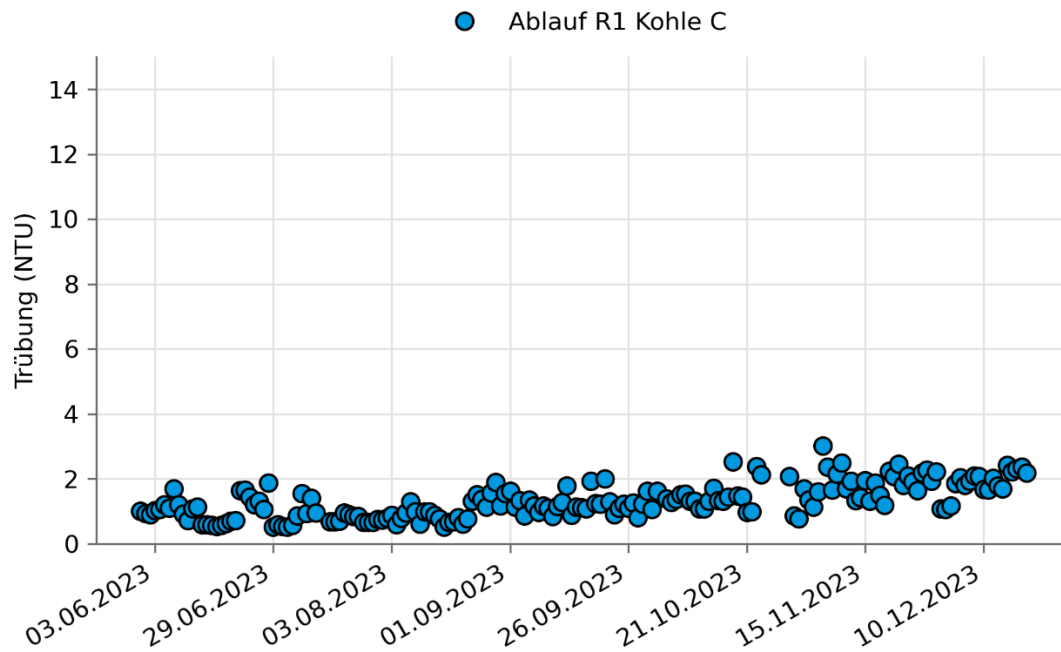
VII. Trübungsverläufe für den Nachweis der Feststofffreiheit des Ablaufs



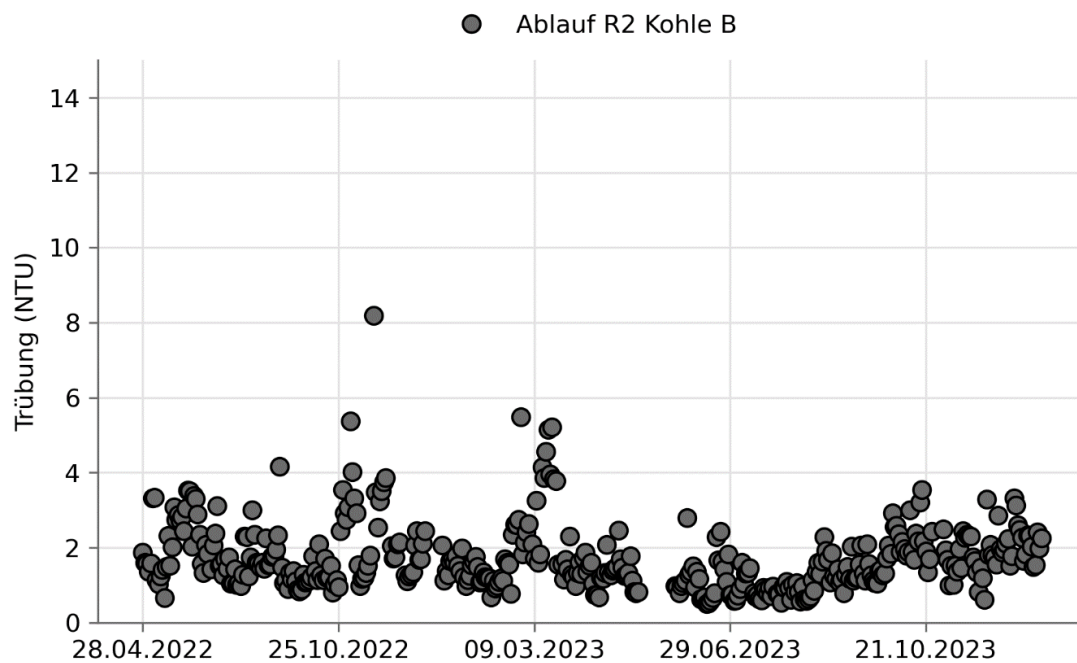
Verlauf der Trübung im Ablauf der Nachklärung bzw. im Zulauf der Versuchsanlage (Laborwerte)



Verlauf der Trübung im Ablauf des Reaktor 1 mit Kohle A (Laborwerte)



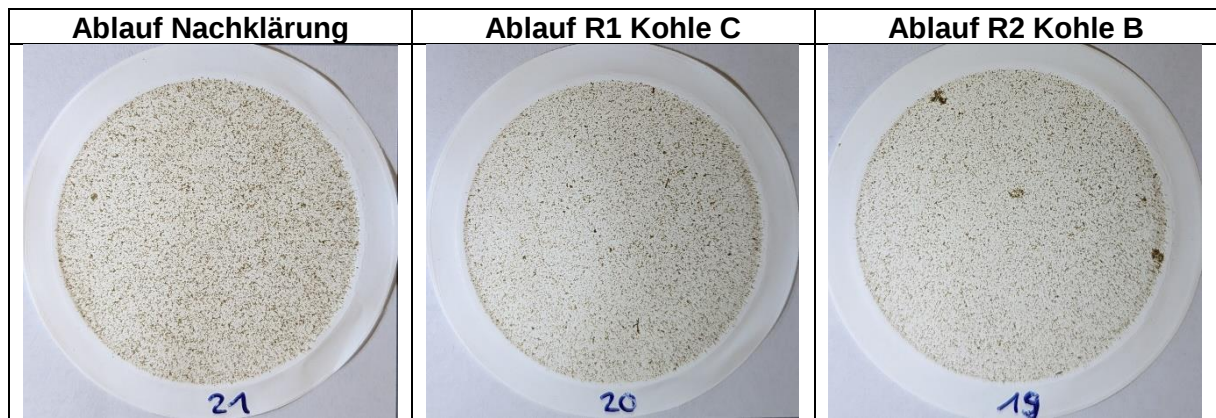
Verlauf der Trübung im Ablauf des Reaktor 1 mit Kohle C (Laborwerte)



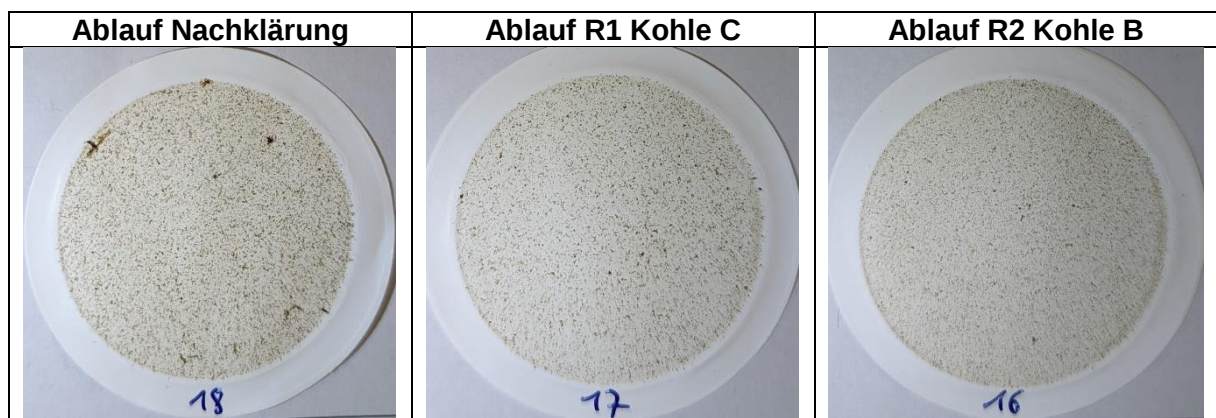
Verlauf der Trübung im Ablauf des Reaktor 1 mit Kohle C (Laborwerte)

VIII. Filtersichtscheiben

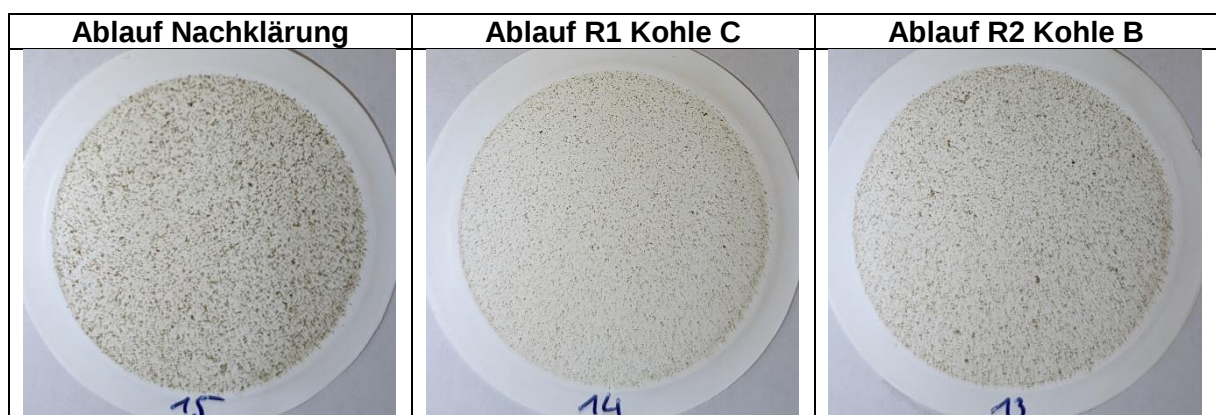
Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 07.12.2023



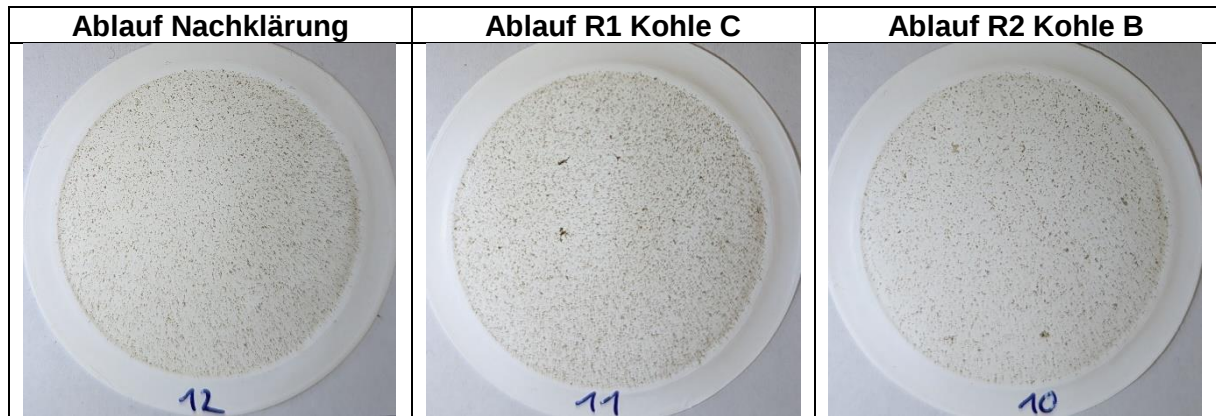
Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 08.12.2023



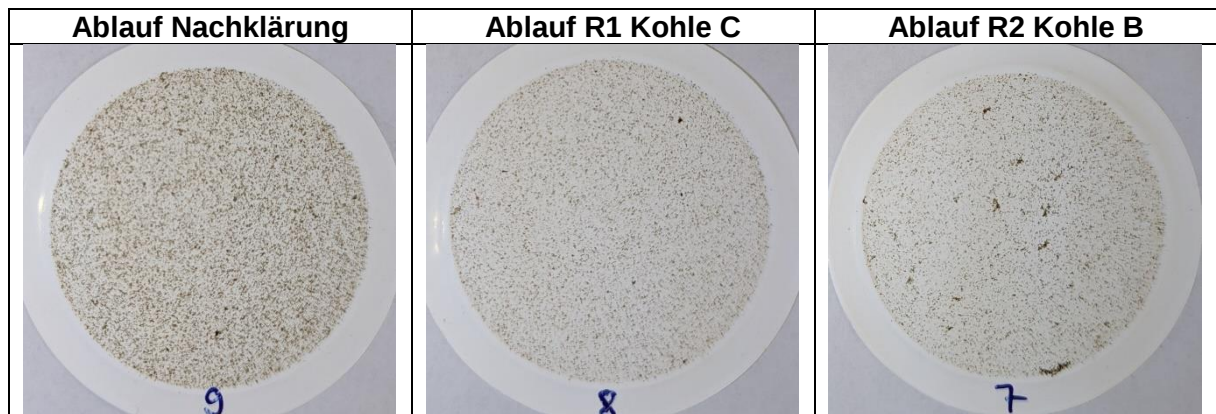
Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 09.12.2023



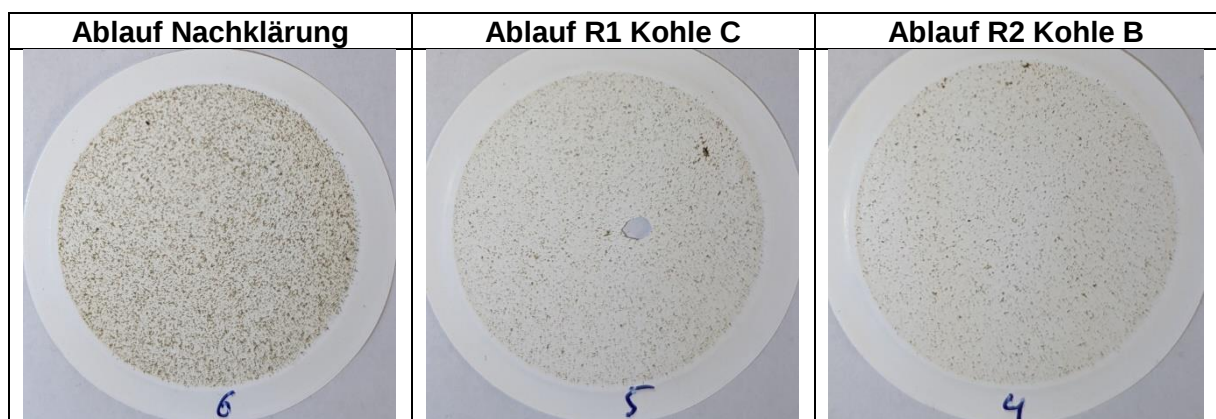
Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 10.12.2023



Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 11.12.2023



Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 12.12.2023



Sichtfilterscheiben, 24 h Mischproben vom 13.12.2023

Ablauf Nachklärung	Ablauf R1 Kohle C	Ablauf R2 Kohle B
	