

# GAK im Schwebbett - Verfahrensevaluation auf der STEP Delémont und Umgebung

**Auftraggeber:**

VSA-Plattform Verfahrenstechnik  
Mikroverunreinigungen  
c/o Eawag, Überlandstrasse 133  
8600 Dübendorf

**Projektpartner<sup>2</sup>:**

SEDE, Syndicat pour l'assainissement des eaux  
de Delémont et environs  
Bois du Treuil 4, 2805 Soyhières

**Auftragnehmer<sup>1</sup>:**

Fachhochschule Nordwestschweiz<sup>1</sup> (FHNW)  
Hochschule für Life Sciences  
Hofackerstrasse 30  
4132 Muttenz

**Projektpartner<sup>3</sup>:**

Eawag  
Überlandstrasse 133  
8600 Dübendorf

**Autoren:** Luca Loreggian<sup>1</sup>, Bartosz Kawecki<sup>1</sup>, Michael Thomann<sup>1</sup>, Nora Corvini<sup>1</sup>, Benjamin Gyax<sup>1</sup>,  
Michael Pulfer<sup>1</sup>, Caroline Baillat<sup>2</sup>, Pierre-Michel Seuret<sup>2</sup>, Marc Böhler<sup>3</sup>

Muttenz, 18. März 2026

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>7</b>
2.1	STEP Delémont und Umgebung	7
2.2	Probenahme	10
2.3	Analyse von Mikroverunreinigungen	10
2.4	Aktivkohlerückhalt	11
2.5	Summenparameter	12
<b>3</b>	<b>Resultate und Diskussion</b>	<b>13</b>
3.1	Standardparameter	13
3.2	Abwasserzufluss	14
3.3	Verhalten des Schwebebetts	14
3.4	Konzentration von Mikroverunreinigungen	16
3.5	Elimination von Mikroverunreinigungen	16
3.6	Elimination von Mikroverunreinigungen bei unterschiedlicher GAK-Dosis	19
3.7	Elimination von Mikroverunreinigungen bei Regenwetter	21
3.8	Aktivkohlerückhalt	24
3.9	Diclofenac Ablaufkonzentrationen	27
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>30</b>

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie wertet den Betrieb des Carbopius-Verfahrens (GAK im Schwebbett) auf der ARA Delémont und Umgebung (im Folgenden STEP Delémont) aus. Die Studie wurde über einen Zeitraum von etwa einem Jahr zwischen Ende 2023 und Ende 2024 durchgeführt und wertet die Elimination organischer Mikroverunreinigungen, diverser Summenparameter, Aktivkohlerückhalt, die Einhaltung des Gewässerschutzgesetzes (GSchV) und das Betriebsverhalten unter verschiedenen Wetterbedingungen aus. Das Verfahren auf der STEP Delémont besteht aus drei parallel betriebenen Schwebbett-Reaktoren (CBP1, CBP2, CBP3). Die Reinigungsleistung wurde anhand der gesetzlichen Vorgaben bewertet und mit einer ähnlichen Anlage (STEP Penthaz) verglichen. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

### Elimination von Mikroverunreinigungen:

- Trockenwetter: Das Verfahren erreichte zuverlässig das regulatorische Ziel einer Elimination von >80% der Leitsubstanzen. Es ist davon auszugehen, dass die Diclofenac-Konzentrationen im Vorfluter nach der Verdünnung unter dem Schweizer Gewässergrenzwert bleiben.
- Regenereignisse: Die Eliminationsleistung nahm während Regenwetterzulauf ab. Diese Abnahme war wahrscheinlich auf eine verkürzte Kontaktzeit und die Verdünnung des Abwassers zurückzuführen.
- GAK-Dosierung: Eine Variation der GAK-Dosierung (im Bereich von 10.5 – 15 mg/l) zeigte keinen unmittelbaren Einfluss auf die Eliminationsleistung, möglicherweise aufgrund der langen Verweildauer der Aktivkohle im System (>200 Tage).

### Aktivkohlerückhalt:

- Das System zeigte einen hohen Aktivkohlerückhalt (94 – 100%) und erfüllte im Mittel den vom VSA empfohlenen Wert von 96%. Die durchschnittliche AktivkohleKonzentration im Ablauf betrug 0.26 mg/l.
- Einfluss Regenwetter: Der Aktivkohlerückhalt blieb auch bei hohen Durchflussgeschwindigkeiten bei Regenereignissen hoch.

### Betrieb:

- Die Betthöhen schwankten und stiegen nach Regenfällen aufgrund der Ansammlung von Schwebstoffen (GUS) im Filterbett an, was regelmässige Rückspülungen erforderlich machte.

### Praktische Betriebsempfehlungen:

Auf Grundlage der Projektergebnisse und der praktischen Betriebserfahrungen werden die folgenden Parameter empfohlen, um eine Reinigungsleistung von 80% für die Leitsubstanzen, eine ausreichende

Elimination von Diclofenac sowie einen genügenden Aktivkohlerückhalt (insbesondere während der Einfahrphase) sicherzustellen:

- Dosierung von 1.8 mgGAK/mgDOC (ca. 12–13 mg/l bei typischen DOC-Werten), um eine Sicherheitsmarge für eine konstant hohe Leistung zu gewährleisten.
- Hydraulik: Eine Begrenzung der hydraulischen Filtergeschwindigkeit auf maximal 11–12 m/h gewährleistet eine ausreichende Kontaktzeit (ca. 6–8 min EBCT).
- Filterbetthöhe im Ruhezustand im Bereich von 1.6–1.8 m (in Schwebelagerung: 2.0–2.7 m).

**Schlussfolgerungen:** Das Verfahren GAK im Schwebelagerungsbett ist ein ausgereiftes Verfahren, das die gesetzlichen Anforderungen erfüllt. Allerdings nimmt die Elimination von Mikroverunreinigungen bei Regenwetter und hohem Durchfluss ab. Kleine kurzfristige Anpassungen der GAK-Dosis führen aufgrund der Trägheit des Systems nicht unmittelbar zu höheren Eliminationsraten. Für weitere Optimierungen könnten zweistufige Verfahrensführungen untersucht werden, wie beispielsweise die Dosierung von verbrauchter GAK in die biologische Behandlung.

## 1 Einleitung

Organische Mikroverunreinigungen wie Arzneimittel, Pestizide und Industriechemikalien werden in herkömmlichen kommunalen ARA oft nicht vollständig entfernt, sodass sie in natürliche Gewässer gelangen. Am 1. Januar 2016 trat eine Änderung der Schweizer Gewässerschutzverordnung in Kraft, die bestimmte ARA, je nach Anzahl der angeschlossenen Einwohner und den Eigenschaften des Vorfluters, verpflichtet, Massnahmen zur gezielten Elimination von Mikroverunreinigungen zu treffen (GSchV Anhang 3.1). Die betroffenen ARA müssen nachweisen, dass die zwölf Leitsubstanzen oder eine Auswahl aus diesen zu mindestens 80% eliminiert werden.

Seit Inkrafttreten der Gesetzesänderung wurden auf vielen kommunalen ARA in der Schweiz Ozonungen, Aktivkohleverfahren oder eine Kombination aus beiden Verfahren implementiert. In den letzten Jahren hat sich zunehmend das Verfahren GAK im Schwebelagerungsbett etabliert und ist bereits in mehreren Schweizer ARA in Betrieb. Das Verfahren nutzt Aktivkohle-Schwebelagerungsbetten im Aufstrom und wird in der Regel der biologischen Behandlung (z.B. nach der Nachklärung) nachgeschaltet. Die verwendete Aktivkohle hat eine Korngrösse zwischen 0.2 und 0.9 mm und wird allgemein als Mikro-GAK ( $\mu$ GAK) bezeichnet. Das Schwebelagerungsbett wird regelmässig mit frischer  $\mu$ GAK beschickt, während verbrauchte  $\mu$ GAK abgezogen wird. Verbrauchte  $\mu$ GAK wird auf Grundlage der Höhe des Filterbetts im Ruhezustand extrahiert, da diese der Indikator für die Gesamtmenge an  $\mu$ GAK im Filter ist. Die Höhe des Betts wird

kontinuierlich überwacht, um die  $\mu$ GAK-Extraktion zu steuern und den Verlust von Aktivkohle zu verhindern.

Die wichtigsten Auslegungsparameter sind die Betthöhe im Ruhezustand, die Filtergeschwindigkeit und die  $\mu$ GAK-Dosiermenge. Basierend auf den Erfahrungen der STEP PenthaZ scheinen eine Betthöhe im Ruhezustand von 1.5 – 1.7 m, eine Filtergeschwindigkeit von 7 – 16 m/h und eine  $\mu$ GAK-Dosis von 13 mgGAK/l (ca. 2 gGAK/gDOC) ausreichend zu sein, um die Schweizer Gewässerschutzverordnung zu erfüllen (Albers et al., 2022; Grelot et al., 2021). Die anhand der Betthöhe im Ruhezustand berechnete Kontaktzeit (Empty Bed Contact Time, EBCT) liegt im Bereich von 5 – 15 min und ist damit deutlich kürzer als bei der herkömmlichen GAK-Filtration. Es wird davon ausgegangen, dass die Zugabe von frischer Aktivkohle und die schnelle Adsorptionskinetik aufgrund der geringen Partikelgrösse die kürzere EBCT kompensieren. Die Höhe des expandierten Betts liegt typischerweise im Bereich von 2.0 - 2.6 m (Albers et al., 2022). Die Betausdehnung kann jedoch je nach Partikelgrößenverteilung und Dichte der verwendeten  $\mu$ GAK variieren. Basierend auf Daten aus Pilotversuchen ist bereits bekannt, dass mehr als 95% der Aktivkohle im Schwebbett zurückgehalten werden (VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2019).

Die Einführung des Verfahrens ist in vielen weiteren Schweizer ARA geplant. Obwohl das Verfahren als ausgereift gilt, liegen nur wenige Betriebsdaten vor, und es bestehen noch einige Wissenslücken, insbesondere hinsichtlich des Verlusts von  $\mu$ GAK im Ablauf, der erforderlichen  $\mu$ GAK-Dosis und der Reinigungsleistung bei Regenereignissen. Diese Studie soll einige dieser Wissenslücken schliessen, indem sie folgende Forschungsfragen beantwortet:

**Aktivkohlerückhalt:** Wie hoch ist der Aktivkohlerückhalt unter verschiedenen Betriebsbedingungen? Kann eine Rückspülung den Rückhalt erhöhen? Ist ein zusätzlicher Filter erforderlich?

**$\mu$ GAK-Dosis:** Was ist die ideale  $\mu$ GAK-Dosis, um eine Elimination von >80% der Leitsubstanzen zu erreichen? Was ist die optimale Betthöhe? Wie viel Aktivkohle befindet sich im System und wie lange ist die Verweilzeit?

**Betrieb bei Regen:** Wie reagiert das Verfahren kurz- und mittelfristig auf erhöhte Zuflüsse (verringerte Kontaktzeit, Feststoffrückhalt usw.)? Können betriebliche Massnahmen die Auswirkungen von verdünntem Abwasser und erhöhten Durchflüssen möglicherweise abmildern?

**Dosierungsstrategien:** Welche Steuerungs-/Regulierungsstrategie hat sich als wirksam erwiesen, um die Einhaltung der Qualitätsziele sicherzustellen, insbesondere bei Regenereignissen? Kann eine optimierte Dosierungsstrategie oder eine chargenweise GAK-Dosierung die Elimination von Mikroverunreinigungen verbessern?

**Auslegung:** Was ist die maximale Filtergeschwindigkeit, die noch ausreichend hohe Kontaktzeiten ermöglicht? Wird bei einer Geschwindigkeit von 15 m/h eine ausreichende Kontaktzeit eingehalten? Wie sieht ein optimiertes Filterregime bei Verwendung mehrerer Reaktoren aus?

Die STEP Delémont, die im April 2022 das Carbopius-Verfahren in Betrieb genommen hat, bietet die Möglichkeit, weitere Erkenntnisse über das Verfahren zu gewinnen. Um die oben genannten Forschungsfragen zu beantworten, wurde das Carbopius-Verfahren auf der STEP Delémont etwa ein Jahr lang bei Trocken- und bei Regenwetter und bei verschiedenen  $\mu\text{GAK}$ -Dosiermengen überwacht. Es wurden regelmässig Abwasserproben entnommen und auf die Konzentration von Mikroverunreinigungen, den GAK-Verlust und Summenparameter wie Gesamtgehalt an suspendierten Feststoffen (GUS), Trübung, spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm ( $\text{SAK}_{254}$ ) und gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) analysiert. Betriebsdaten wie Strömungsgeschwindigkeiten, Betthöhen während des Betriebs, Betthöhen im Ruhezustand usw. wurden vom Betreiber der Kläranlage zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden analysiert und zur Beantwortung der oben genannten Forschungsfragen verwendet. Diese Studie schliesst einige Wissenslücken hinsichtlich der Auslegung und des Betriebs des Carbopius-Verfahrens und liefert wertvolle Informationen für Fachleute aus Ingenieurbüros und von Kläranlagen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 STEP Delémont und Umgebung

Die STEP Delémont, auch SEDE (Syndicat pour l'assainissement des eaux usées de Delémont et environs), ist eine moderne ARA, die für 50'000 Einwohnerwerte ausgelegt ist. Sie nutzt mehrere Verfahren, um häusliches und industrielles Abwasser zu reinigen, sodass es sicher in die Birs eingeleitet werden kann.

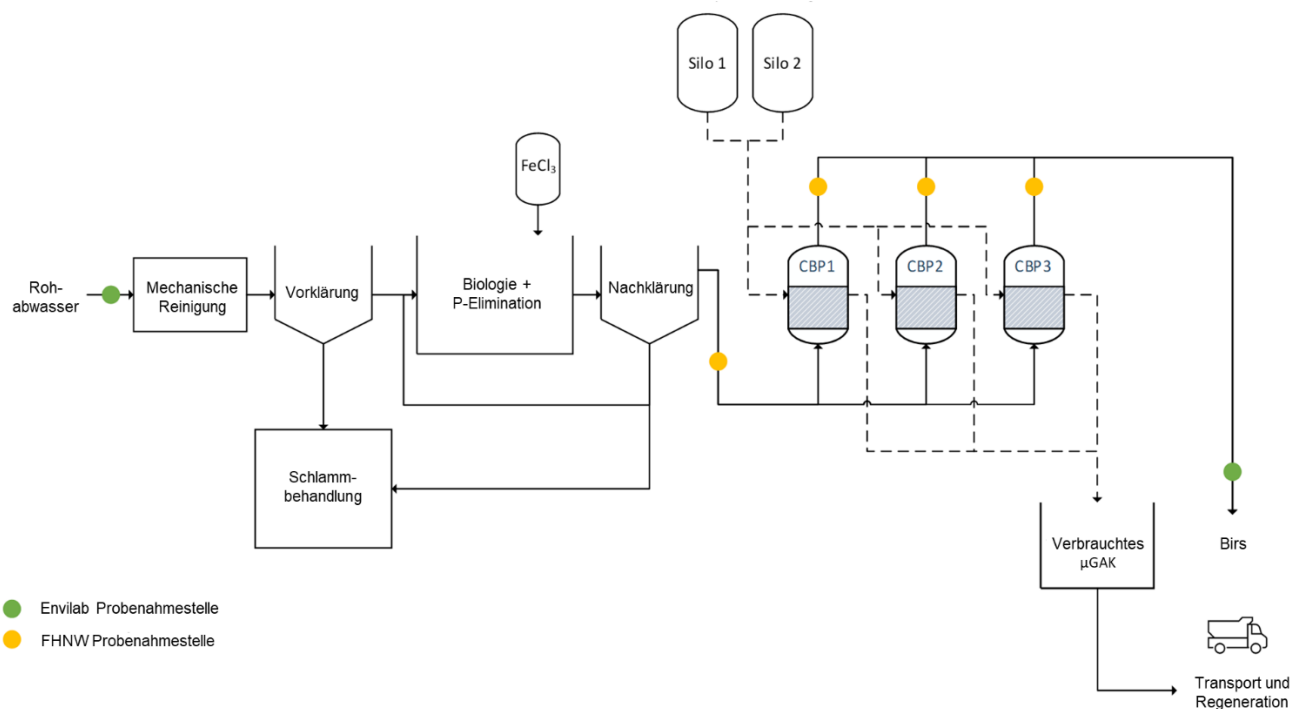


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der STEP Delémont, einschliesslich der Aktivkohlestufe mit drei parallel geschalteten CarboPlus-Betten (CBP1, CBP2 und CBP3) und Probenahmestellen für die Analyse von Mikroverunreinigungen.

Verfahrensablauf:

- **Sand- und Fettfang:** Das gesiebte Abwasser gelangt in einen Sand- und Fettfang. Die Strömungsgeschwindigkeit wird hier verlangsamt, sodass sich schwere anorganische Stoffe wie Sand und Kies am Boden absetzen und entfernt werden können. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Sand sehr abrasiv ist und zu Verschleiss an Pumpen und Rohren führen kann. Gleichzeitig treiben leichtere Stoffe wie Fette und Öle an die Oberfläche, wo sie abgezogen werden.
- **Vorklärung:** Das Wasser fließt in parallel betriebene Vorklärbecken. Durch Sedimentation setzt sich ein erheblicher Teil der suspendierten organischen Feststoffe am Boden ab und bildet Primärschlamm. Der Hauptzweck dieses Schritts besteht darin, die Konzentration organischer Stoffe zu

reduzieren, wodurch die nachfolgende biologische Stufe entlastet wird, die dadurch effizienter und kostengünstiger wird.

- **Biologische Behandlung:** In dieser Stufe werden natürliche biologische Prozesse genutzt, um gelöste organische Stoffe und Nährstoffe zu entfernen. Kernstück dieser Stufe sind die Belebungsbecken. Nitrifikation (aerobe Zone): In dieser Zone wird Luft eingeblasen, um eine sauerstoffreiche Umgebung zu schaffen. Hier nutzen aerobe Bakterien die gelösten organischen Schmutzstoffe als Nahrung. In diesem Prozess wandeln sie giftiges Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) in Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) um.
- **Phosphorentfernung:** Zur Entfernung von Phosphor wird dem Wasser  $\text{FeCl}_3$  zugesetzt. Diese Chemikalie reagiert mit gelöstem Phosphat unter Bildung stabiler, unlöslicher Feststoffpartikel. Diese Feststoffe fallen dann aus dem Wasser aus und werden zusammen mit dem überschüssigen Schlamm entfernt.
- **Elimination von Mikroverunreinigungen:** Das Carbopius-Verfahren wurde 2022 eingeführt und besteht aus drei Schwebebettreaktoren (CBP1, CBP2 und CBP3). Bei Trockenwetter werden zwei Reaktoren parallel betrieben, während der dritte ruht. Bei Regen werden alle drei Reaktoren parallel betrieben. Der Betrieb wird rotiert, um eine übermässige Verdichtung der Aktivkohle aufgrund längerer Stillstände zu vermeiden. Die Filterbetten werden ausserdem regelmässig gespült, um angesammelte Partikel zu entfernen. Bei hohen Niederschlägen wird ein Teil des Abwassers an den Reaktoren vorbeigeführt und direkt in die Birs abgeleitet. Die Reaktoren haben eine Fläche von jeweils  $42.9 \text{ m}^2$  und eine Gesamtsäulenhöhe von  $4.35 \text{ m}$ . Der Zielwert für die Betthöhe im Ruhezustand liegt bei  $1.55$  bis  $1.65 \text{ m}$ . Die Betten werden bei einer Aufstromgeschwindigkeit von  $7\text{--}15 \text{ m/h}$  betrieben, was zu einer Betthöhe von bis zu  $3.5 \text{ m}$  führt. Seit der Inbetriebnahme wurden die Betten meist mit einer  $\mu\text{GAK}$ -Dosis im Bereich von  $10.5\text{--}15 \text{ mg/l}$  betrieben (Tabelle 1). Die Injektionen von  $\mu\text{GAK}$  erfolgen in Intervallen von jeweils  $8.500 \text{ m}^3$  behandeltem Abwasser. Die  $\mu\text{GAK}$ -Dosis wurde im Laufe der Zeit geändert, um das Verfahren zu optimieren. Einige der Änderungen, wie z.B. die Festlegung unterschiedlicher  $\mu\text{GAK}$ -Dosierungen im Zeitraum vom 15.02.2024 bis zum 12.05.2024, wurden speziell für diese Studie vorgenommen (siehe untenstehende Tabelle).

Tabelle 1:  $\mu$ GAK-Dosierung in den Carbopius-Betten CBP1, CBP2 und CBP3.

Zeitspanne	CBP1 (mg $\mu$ GAK/l)	CBP2 (mg $\mu$ GAK/l)	CBP3 (mg $\mu$ GAK/l)
24.03.2022 - 11.05.2022	15.0	15.0	15.0
11.05.2022 - 23.08.2022	20.0	20.0	20.0
23.08.2022 - 30.11.2022	15.0	15.0	15.0
30.11.2022 - 21.02.2023	14.0	14.0	14.0
21.02.2023 - 03.04.2023	13.0	13.0	13.0
03.04.2023 - 12.06.2023	14.0	14.0	14.0
12.06.2023 - 10.07.2023	12.8	12.8	12.8
10.07.2023 - 30.07.2023	12.5	12.5	12.5
30.07.2023 - 08.09.2023	12.3	12.3	12.3
08.09.2023 - 21.11.2023	12.0	12.0	12.0
21.11.2023 - 21.12.2023	11.5	11.5	11.5
21.12.2023 - 28.12.2023	13.5	13.5	13.5
28.12.2023 - 16.01.2024	14.5	14.5	14.5
16.01.2024 - 15.02.2024	14.0	14.0	14.0
15.02.2024 - 12.05.2024	14.0	12.5	11.5
12.05.2024 - 06.06.2024	13.5	13.5	13.5
06.06.2024 - 16.06.2024	10.5	10.5	10.5
16.06.2024 - 06.07.2024	12.0	12.0	12.0
06.07.2024 - 25.09.2024	13.5	13.5	13.5

Die durchschnittliche Verweildauer der Aktivkohle in den Reaktoren liegt bei 212 bis 277 Tagen. Je nach Höhe des Bettes im Ruhezustand, der  $\mu$ GAK-Dosis und anderen Faktoren kann die Verweildauer variieren. Zum Zeitpunkt dieser Studie war das Carbopius-Verfahren in Delémont seit 570 Tagen in Betrieb, und die Kohle in den Betten war etwa 2- bis 2.5-mal ausgetauscht worden (erster vollständiger Austausch etwa im Januar 2023). Es ist zu beachten, dass während der Anlaufphase die Aktivkohle frisch ist, was zu einer hohen Adsorptionsleistung für Mikroverunreinigungen führt. Die Verfahrenseinstellungen in der STEP Delémont und der STEP Penthaz, die ebenfalls das Carbopius-Verfahren implementiert hat, sind relativ ähnlich (Tabelle 2). Das Carbopius-Verfahren in der STEP Penthaz arbeitet jedoch mit einer etwas geringeren Bett-Ruhehöhe und einer etwas höheren maximalen Filtergeschwindigkeit, was zu einer geringeren EBCT führt (Tabelle 2). Ein Unterschied zwischen den Verfahren in den beiden ARA besteht darin, dass das nachgeklärte Abwasser in der STEP Penthaz einer Vorfiltration mit einem Scheibenfilter unterzogen wird, während in der STEP Delémont keine solche Filtration erfolgt. In der Veröffentlichung von Mailler et al. (2016) wurde die  $\mu$ GAK-Dosierung als ein entscheidender Parameter identifiziert, der die Reinigungsleistung stark beeinflusst. So erreichte die durchschnittliche Elimination

von 13 wichtigen Arzneimitteln bei einer Dosierung von 20 mg/l etwa 78–89 %, sank jedoch bei 10 mg/l auf 57–68 % (Mailler et al., 2016). Die Studie legt nahe, dass für eine durchschnittliche Elimination dieser Verbindungen von 80% ein Betrieb bei 20 mg/l erforderlich ist. In Bezug darauf, wie lange die GAK im System bleibt, wurde eine optimale Verweildauer von 90 bis 100 Tagen ermittelt, bei der die Eliminationsleistung ihr Maximum erreichte und sich stabilisierte (Mailler et al., 2016). Dies ist deutlich länger als die für pulverförmige Aktivkohle (PAK) typische Verweilzeit von 5 bis 7 Tagen. Diese lange Verweildauer ermöglichte die Bildung eines Biofilms im Reaktor, der zur biologischen Aktivität beitrug (Mailler et al., 2016).

Tabelle 2: Vergleich der Carbopius-Verfahren in der STEP Penthaz und der STEP Delémont (Grelot et al., 2021; VSA, 2021) sowie Pilotversuch in der ARA Seine Centre (Paris) ((Mailler et al., 2016)).

Prozessparameter	STEP Penthaz	STEP Delémont	Mailler et al. (2016)
Prozess	Grossmassstab	Grossmassstab	Pilot
µGAK-Typ	Cyclecarb 305 (Chemviron)	Cyclecarb 305 (Chemviron)	Cyclecarb 305 (Chemviron)
Bettoberfläche	2 x 12.25 m <sup>2</sup>	3 x 42.9 m <sup>2</sup>	4 m <sup>2</sup>
Betthöhe Ruhezustand	1.5 m	1.55 m	1.5 - 2 m
Betthöhe expandiert	1.6 - 2.8 m	1.8 - 3.5 m	Keine Angabe
Aufstromgeschwindigkeit	5.4 - 6.8 m/h	7 - 15 m/h	15 m/h
EBCT	4.5 - 13 min	6 - 15 min	10 - 20 min
µGAK-Dosis	12.5 -16.4 mg/l	11 - 15 mg/l	10 – 20
µGAK-Aufenthaltszeit	≈ 350 d	212 – 277 d	90 - 100

NA: Daten nicht verfügbar.

## 2.2 Probenahme

Im Rahmen dieser Studie wurden Abwasserproben aus dem Nachklärbecken und im Ablauf der Schwebbettreaktoren zur Analyse von Mikroverunreinigungen, zur Bestimmung des µGAK-Verlusts und zur Analyse von Summenparametern entnommen (48-Stunden-Mischproben, 5 l pro Probe). Probenahmezeiträume: 21.10.2023-11.12.2023, 13.02.2024-24.03.2024 und 24.07.2024-25.09.2024.

## 2.3 Analyse von Mikroverunreinigungen

Abwasserproben wurden für die Analyse von Mikroverunreinigungen durch Filtration mit Glasfaserfiltern 0.4 µm (Macherey-Nagel, Deutschland) vorbereitet. Die Konzentrationen der zwölf Leitsubstanzen wurden durch direkte Injektion in die Flüssigchromatographie in Verbindung mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS, Agilent Technologies, Deutschland) ohne Vorkonzentrierung bestimmt. Zur

Trennung der Stoffgemische wurde eine Gradienten-HPLC (Wasser/Acetonitril, 0.1 % Ameisensäure) mit einer ACQUITY HSS T3 UPLC-Säule (1.8 µm, 3.0 x 100 mm, Waters, Schweiz) kombiniert. Mit Ausnahme von Hydrochlorothiazid und Acesulfam erfolgte der Nachweis und die Quantifizierung der Leitsubstanzen im positiven MS-Modus auf Basis von geeigneter Fragmentionen. 4- und 5-Methylbenzotriazol konnten mit dieser Methode nicht unabhängig voneinander quantifiziert werden, weshalb die ermittelten Konzentrationen gleichermassen für beide Substanzen gelten. Zusätzlich wurden allen Proben interne Standards zugesetzt, um matrix- und messbedingte Schwankungen bei der Konzentrationsbestimmung zu korrigieren.

Tabelle 3: Quotienten sowie Nachweis- und Bestimmungsgrenzen (LOD oder LOQ) der Leitsubstanzen in der LC-MS/MS-Messung. Kategorie gemäss UVEK (2016).

Substanz	Kategorie	Rt [min]	MS1 <i>m/z</i>	MS2 <i>m/z</i>	LOD [µg/L]	LOQ [µg/L]
Acesulfam	-	2.3	162.0	82	0.010	0.05
Gabapentin	-	5.8	172.1	154.1	0.015	0.05
Amisulprid	1	6.6	370.2	242.1	0.010	0.05
Carbamazepin	1	8.5	237.0	194.0	0.005	0.05
Citalopram	1	7.9	325.2	109.2	0.015	0.05
Metoprolol	1	7.0	268.2	72.1	0.010	0.05
Venlafaxin	1	7.5	278.0	58.2	0.005	0.05
Clarithromycin	1	8.6	748.4	158.2	0.015	0.05
Diclofenac	1	10.3	296.0	214.0	0.005	0.05
Hydrochlorothiazid	1	6.1	296.0	268.9	0.015	0.05
Irbesartan	2	8.7	429.3	207.2	0.005	0.05
Benzotriazol	2	6.6	120.0	65	0.001	0.05
Candesartan	2	8.9	440.9	262.9	0.005	0.05
4- and 5-Methylbenzotriazol	2	7.4	134.1	77.2	0.005	0.05

Um den bestehenden Datensatz zu erweitern, wurden auch Acesulfam und Gabapentin gemessen, obwohl sie nicht zu den zwölf Leitsubstanzen gehören. Parallel zu den in diesem Projekt durchgeführten Messungen wurde die bestehende Überwachungskampagne der STEP Delémont fortgesetzt (Analyse über Envilab). Die Ergebnisse wurden zum direkten Vergleich mit den von der FHNW gemessenen Konzentrationen zur Verfügung gestellt.

## 2.4 Aktivkohlerückhalt

Die Aktivkohlekonzentration im Ablauf der Schwebebettreaktoren wurde mittels mathematischer Bildverarbeitungsanalyse (MIPA2C) gemäss Pulfer et al. (2024) gemessen. Es wurden dreifache Messungen mit einem Probenvolumen von 0.5 l pro Messung durchgeführt. Zur Qualitätskontrolle wurden die

Proben ebenfalls dreifach mit 0.1 mgPAK/l versetzt. Die Proben wurden mit Filtration durch 0.45- $\mu$ m-Cellulosenitratfilter (Whatman NC45, 50 mm Durchmesser, Sigma-Aldrich, USA) aufbereitet. Die Filter wurden mindestens 4 Stunden lang bei 105 °C getrocknet und gescannt (EPSON Perfection V600 Scanner bei 2400 dpi). Die Aktivkohlekonzentration wurde durch Bestimmung der RGB-Werte unter Verwendung eines multiplen Polynomregressionsmodells berechnet. Für die Dreifachmessungen betragen die LOD und LOQ 0.051 mg/L bzw. 0.102 mg/L.

## **2.5 Summenparameter**

Die Abwasserproben, die aus dem Ablauf des Nachklärbeckens und dem Ablauf der Carbopius-Reaktoren entnommen wurden, wurden bezüglich GUS (SN EN 872:2005), SAK254 (DIN EN ISO 10523:2012-04+) und DOC (DIN EN 1484:2019-04+) analysiert.

### 3 Resultate und Diskussion

#### 3.1 Standardparameter

Die Ammonium-, Nitrit- und Nitratkonzentrationen im Ablauf der STEP Delémont zeigen, dass eine vollständige Nitrifikation erreicht wird (siehe Abbildung unten). Die GUS-, CSB- und DOC-Konzentrationen im Nachklärbecken liegen ebenfalls in einem typischen Bereich (siehe Abbildung unten). Die CSB-Konzentrationen erscheinen im Vergleich zu DOC- und GUS-Konzentrationen teilweise niedrig, was auf Messunsicherheiten zurückzuführen sein könnte.

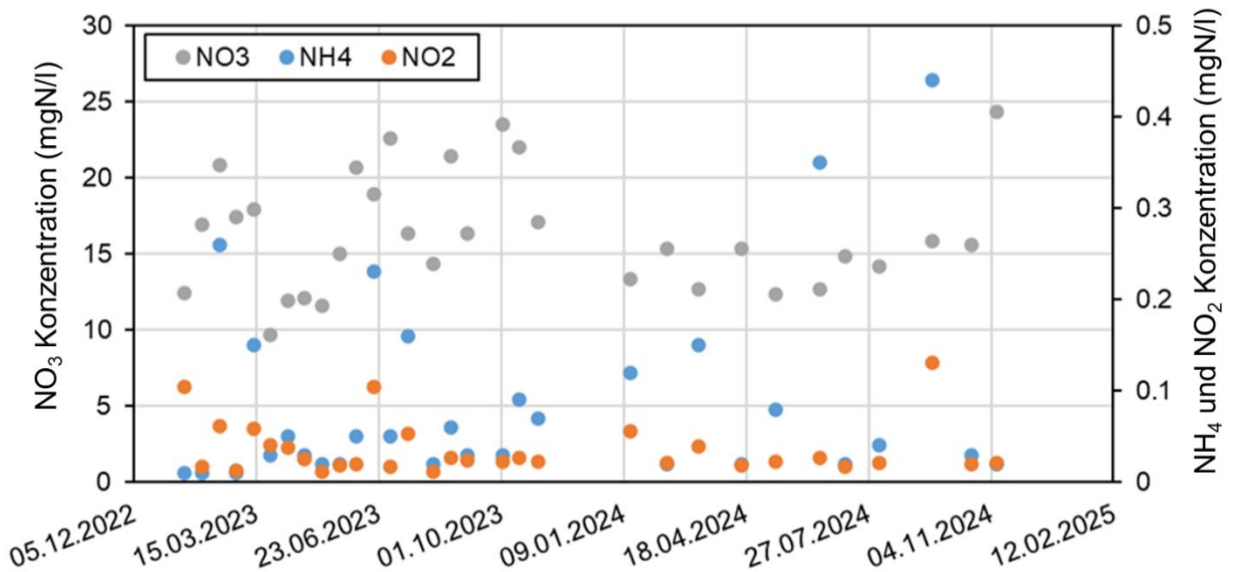


Abbildung 2: Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Konzentrationen im Ablauf der STEP Delémont.

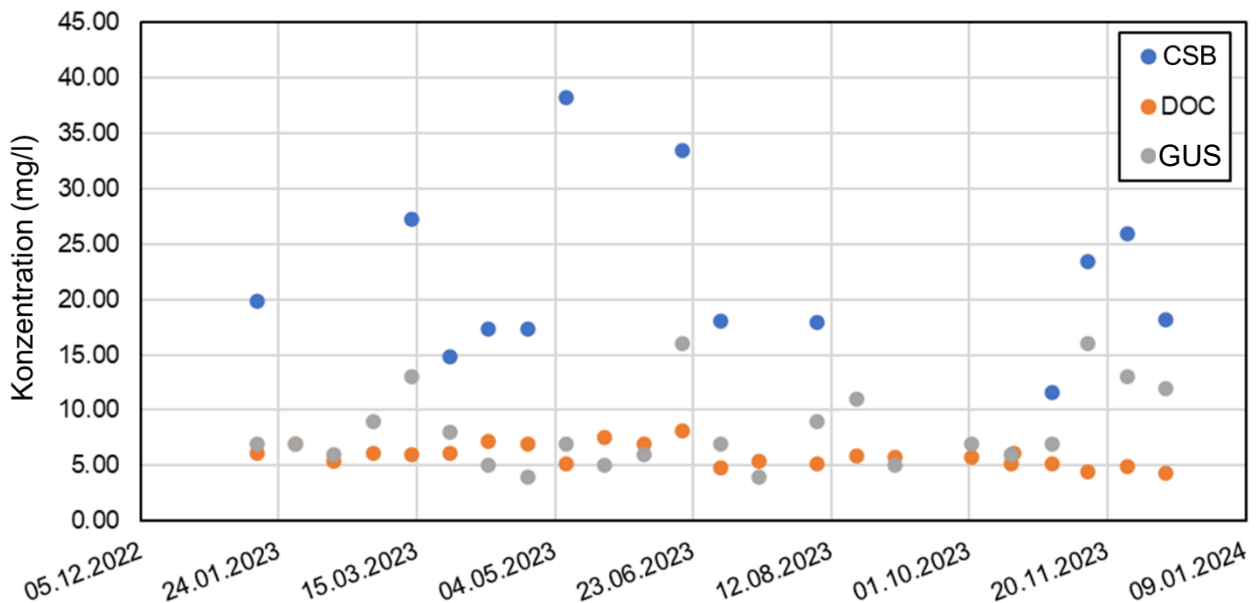


Abbildung 3: CSB-, DOC- und GUS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung der STEP Delémont.



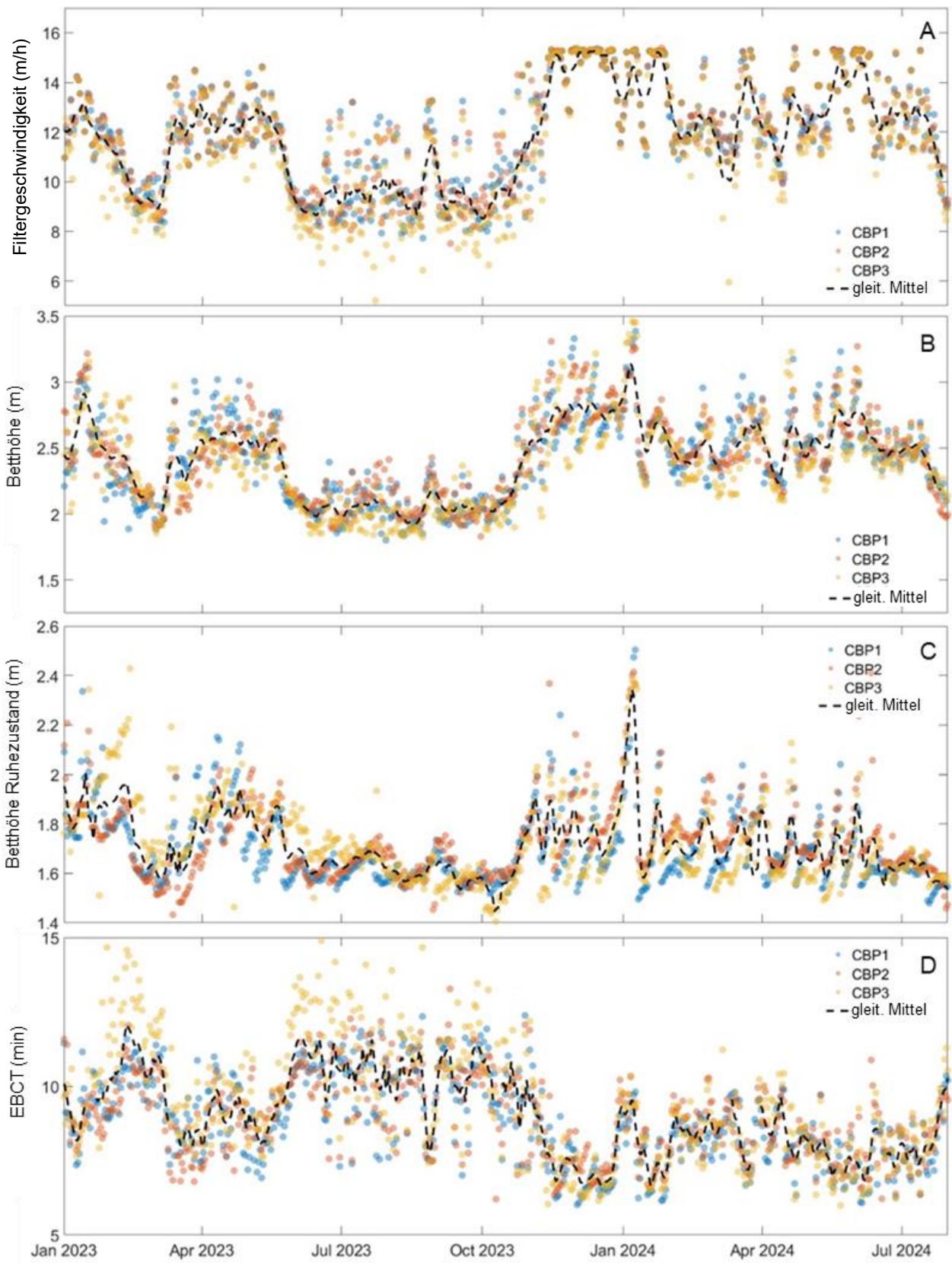


Abbildung 5: Betriebsdaten der Schwebebettreaktoren (CBP1, CBP2, CBP3) auf der STEP Delémont.

### 3.4 Konzentration von Mikroverunreinigungen

Die Abbildung unten vergleicht die Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Ablauf des Nachklärbeckens der STEP Delémont und Penthaz. Das Abwasser der STEP Penthaz weist höhere Konzentrationen bestimmter Mikroverunreinigungen auf. Mögliche Gründe für diese Diskrepanz sind regionale Unterschiede in der Verwendung von Arzneimitteln, der industriellen Aktivität im Einzugsgebiet oder des Fremdwasseranteils. Insgesamt sind die beobachteten Konzentrationen typisch für ARA in der Westschweiz (Kanton Waadt, 2019).

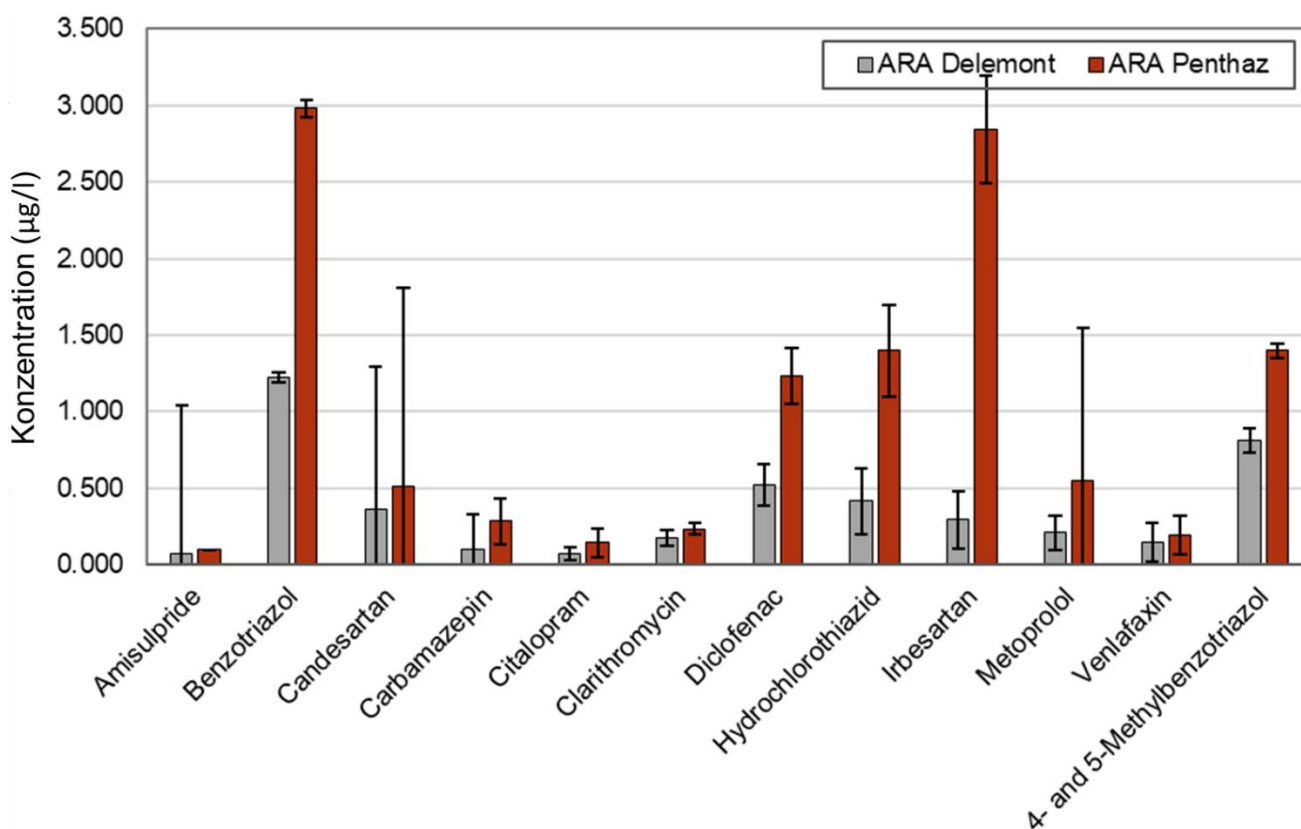


Abbildung 6: Konzentrationen von Mikroverunreinigungen im Ablauf der Nachklärung der STEP Delémont und STEP Penthaz.

### 3.5 Elimination von Mikroverunreinigungen

Seit der Einführung des Carboplus-Verfahrens auf der STEP Delémont wurden Mikroverunreinigungen der Kategorien 1 und 2 mit wenigen Ausnahmen im März 2023, Mai 2023 und November 2023 durchschnittlich zu mehr als 80% eliminiert (Abbildung 7). Gemäss der Schweizer Gesetzgebung muss die Eliminationsrate der Leitsubstanzen über 80% liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht unbedingt alle zwölf Substanzen für die Bewertung herangezogen werden müssen. Die Kantone können aus den zwölf Substanzen mindestens sechs auswählen. Ihr Durchschnitt wird im Verhältnis 2:1 für die Kategorien 1 und 2 berechnet.

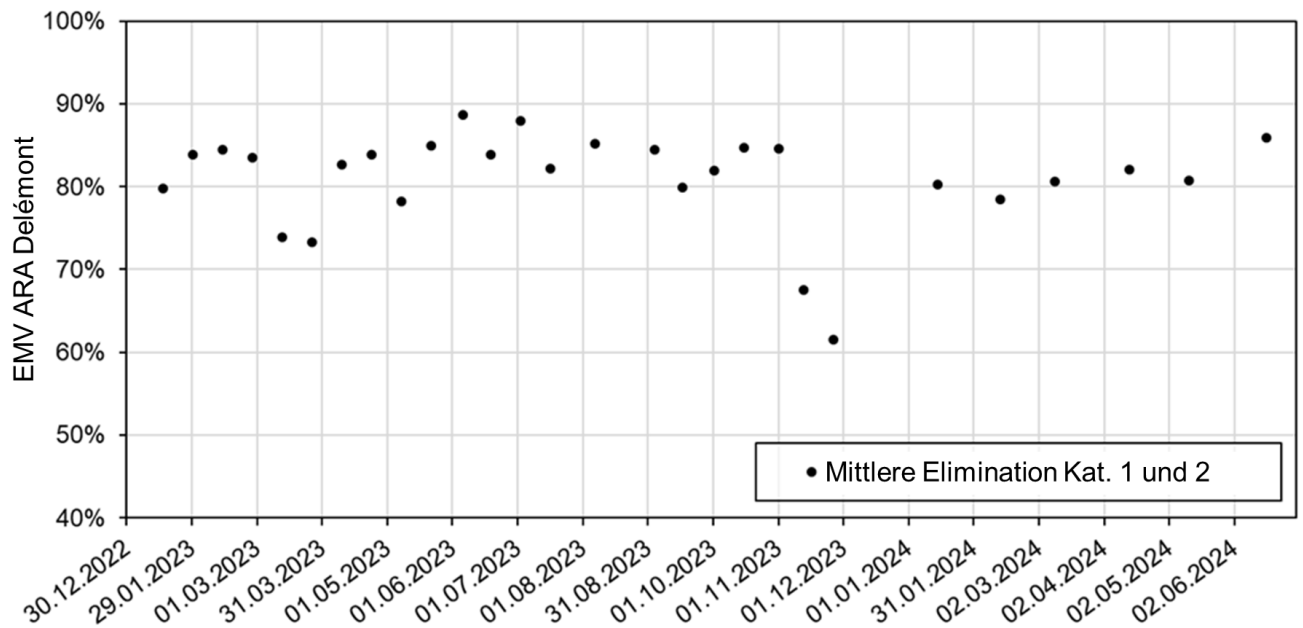


Abbildung 7: Elimination von Mikroverunreinigungen der Kategorien 1 und 2 in der STEP Delémont (gemessen durch Envilab).

Die in der STEP Penthaz gemessenen Eliminationsraten sind im Durchschnitt etwas höher als die in der STEP Delémont (Abbildung 8). Die durchschnittliche Elimination aller 12 Mikroverunreinigungen betrug 85% für die STEP Penthaz und 81% für die STEP Delémont. Metoprolol, Benzotriazol und 4- und 5-Methylbenzotriazol, gut adsorbierbare Verbindungen, werden in beiden Anlagen gut eliminiert (d. h. > 95%). Carbamazepin und Hydrochlorothiazid werden in ähnlichem Masse eliminiert. Das Carboplas-Verfahren auf der STEP Penthaz wird mit einer höheren GAK-Dosis betrieben. Dies könnte zu einer etwas höheren Gesamtleistung der STEP Penthaz im Vergleich zur STEP Delémont geführt haben. Mailler et al. (2016) beobachteten bei einer Dosierung von 10 mgGAK/L eine mittlere Diclofenac-Elimination von etwa 65% und bei einer Dosierung von 20 mgGAK/L eine mittlere Diclofenac-Elimination von etwa 80%. Der Mittelwert der Diclofenac-Elimination von etwa 72% bei einer Dosierung von 11–15 mgGAK/L (STEP Delémont) und der Mittelwert von etwa 85% bei einer Dosierung von 12.5–16.4 mgGAK/L (STEP Penthaz) zeigen eine etwas bessere Diclofenac-Adsorption. In Bezug auf Carbamazepin haben Mailler et al. (2016) Eliminationsraten im Bereich von 80–95% beobachtet, die etwas höher sind als die für die STEP Penthaz und Delémont beobachteten Eliminationsraten.

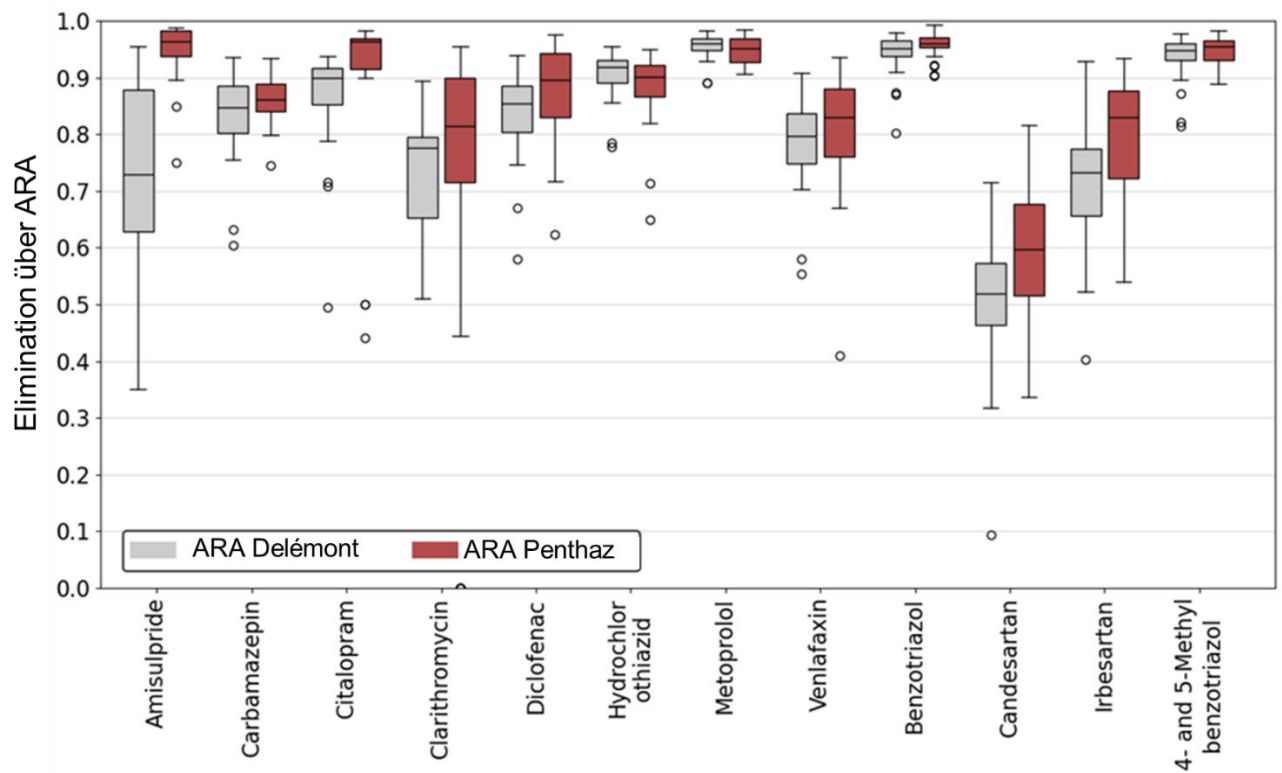


Abbildung 8: Elimination von Mikroverunreinigungen in den STEP Delémont und Penthaz (2019–2023).

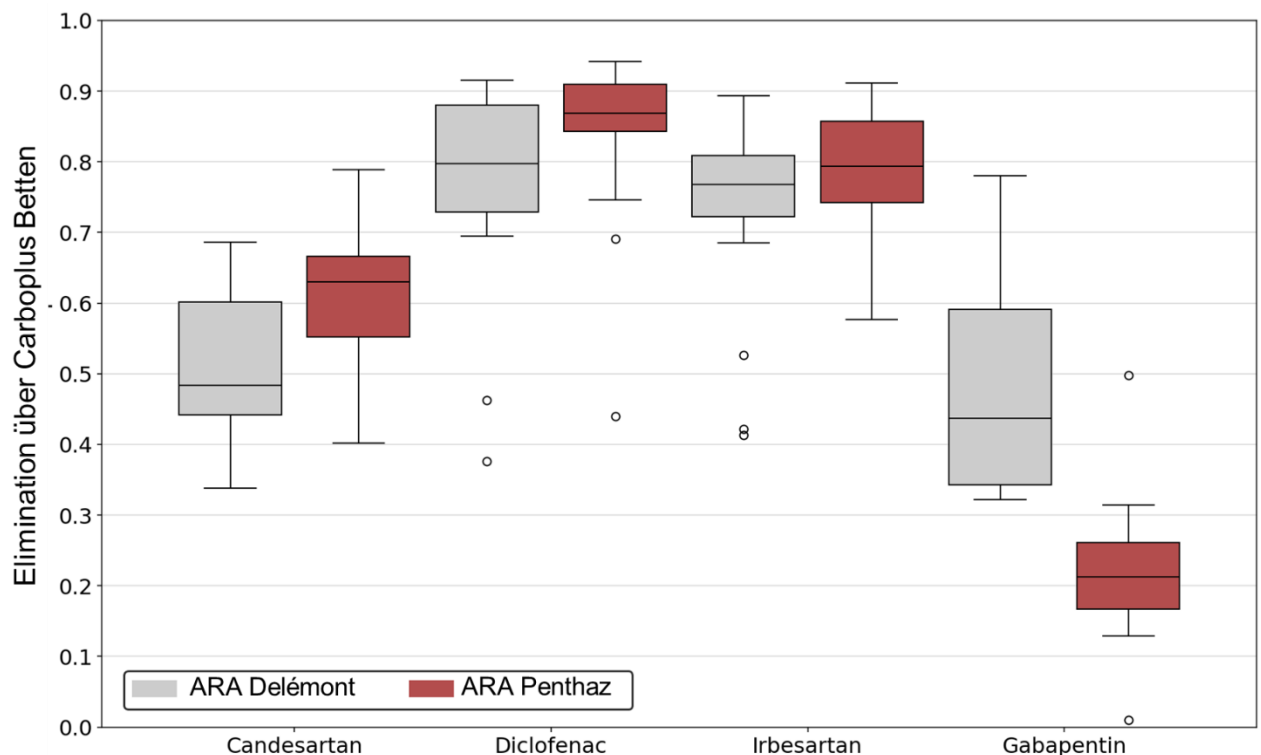


Abbildung 9: Elimination von Mikroverunreinigungen über CarboPlus-Reaktoren in der STEP Delémont, gemessen von der FHNW bei Trockenwetter, und Elimination über CarboPlus-Reaktoren in der STEP Penthaz (2019–2020).

### 3.6 Elimination von Mikroverunreinigungen bei unterschiedlicher GAK-Dosis

Die über die STEP Delémont gemessenen Eliminationsraten korrelieren nicht mit der eingesetzten GAK-Dosierung, selbst wenn diese bezüglich der DOC-Konzentration im Ablauf des Nachklärbeckens normiert wird (Abbildung 10). Das Fehlen einer Korrelation könnte möglicherweise darauf zurückzuführen sein, dass die GAK-Dosis häufig geändert und nie über einen längeren Zeitraum beibehalten wurde. Aufgrund der langen Verweildauer der GAK von etwa 212 bis 277 Tagen haben kurzfristige Änderungen der Dosierung möglicherweise keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtadsorptionskapazität der im Bett vorhandenen GAK. Darüber hinaus könnten andere Faktoren, wie Schwankungen der Betthöhe im Ruhezustand und Regenereignisse, den Einfluss der Dosierung auf die Reinigungsleistung überlagern.

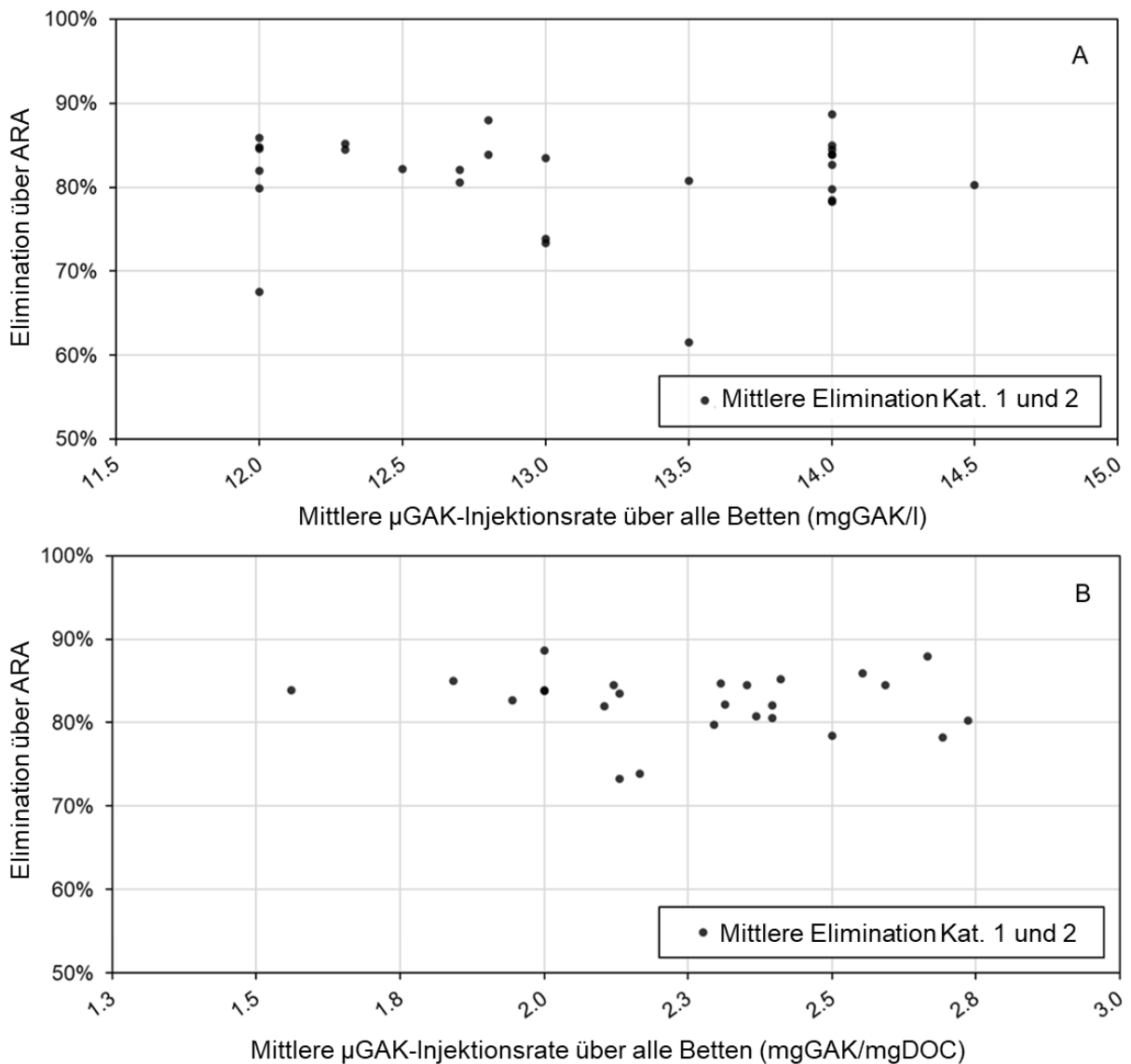


Abbildung 10: Von Envilab gemessene Elimination von Mikroverunreinigungen in der STEP Delémont im Vergleich zur eingesetzten  $\mu$ GAK-Dosis pro Liter Abwasser (A) und pro mg DOC (B).

Die über die STEP Penthaz gemessenen Eliminationsraten für Mikroverunreinigungen korrelieren ebenfalls nicht mit der GAK-Dosierung (Abbildung 11), möglicherweise aus den gleichen Gründen.

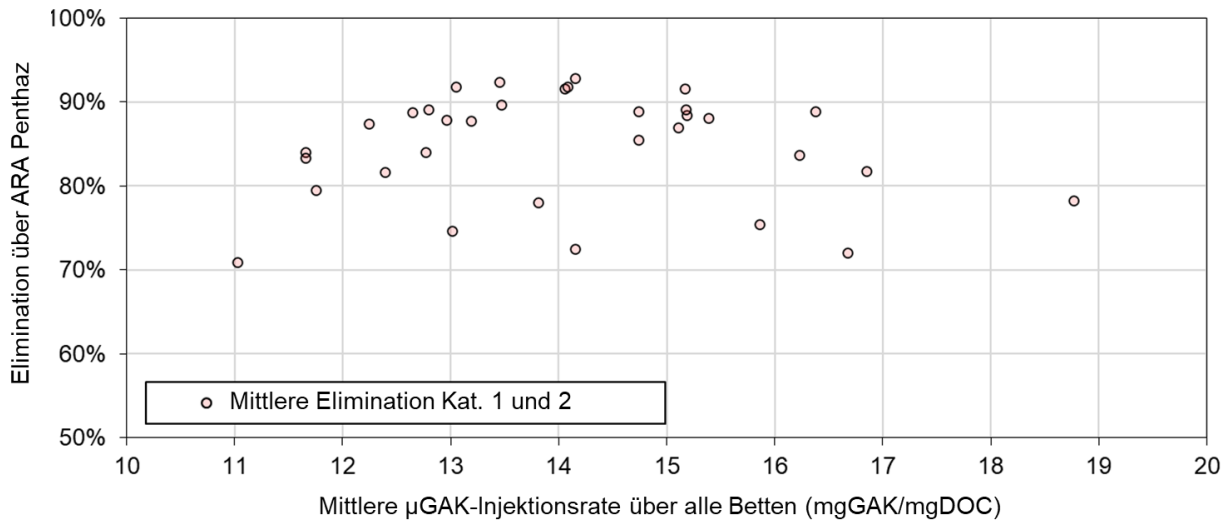


Abbildung 11: Elimination von Mikroverunreinigungen gemessen über die STEP Penthaz im Vergleich zur eingesetzten  $\mu$ GAK-Dosis pro Liter Abwasser.

Im Zeitraum von 02.2024 bis 03.2024, in dem unterschiedliche GAK-Dosierungen auf CBP1, CBP2 und CBP3 angewendet wurden, korreliert die Elimination von Mikroverunreinigungen über die GAK-Betten nicht mit der GAK-Dosierung (Abbildung 12). Eine geringfügig höhere Elimination wurde nur für Acesulfam beobachtet (Abbildung 12).

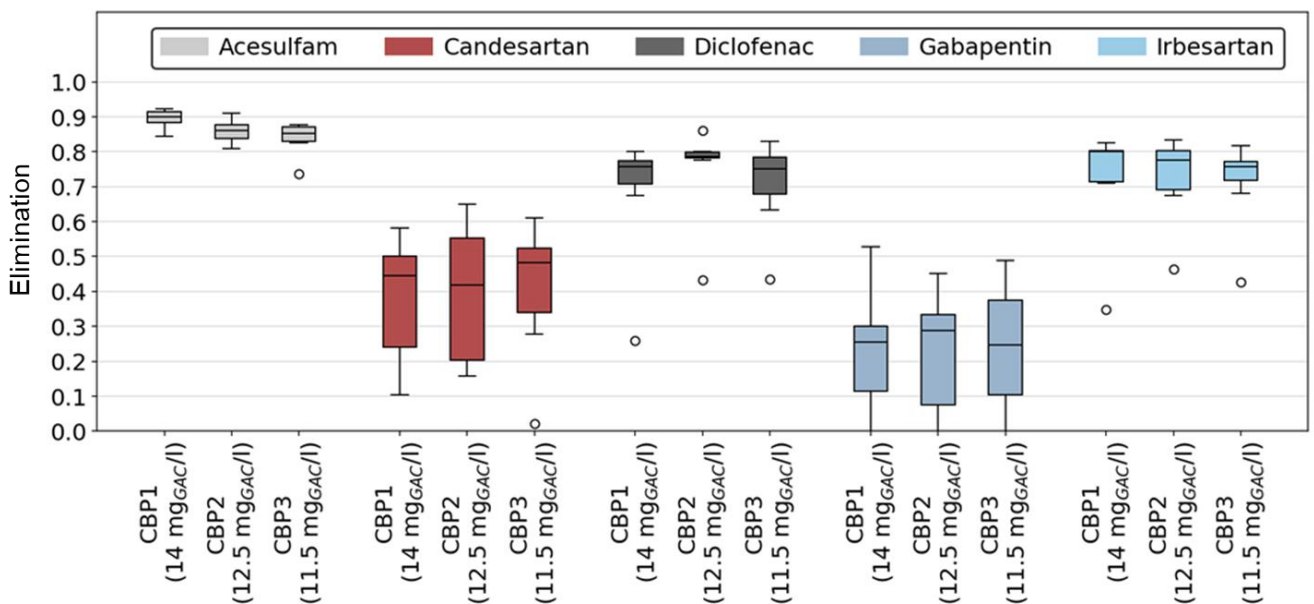


Abbildung 12: Elimination von Mikroverunreinigungen in den CarboPlus-Reaktoren, gemessen von der FHNW im Zeitraum 02.2024 – 03.2024, während dessen die Reaktoren mit unterschiedlichen  $\mu$ GAK-Dosen betrieben wurden.

Die Eliminationsraten für Mikroverunreinigungen konnten für Hydrochlorothiazid, Benzotriazol, Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Metoprolol, Venlafaxin sowie 4- und 5-Methylbenzotriazol nicht genau bestimmt werden, da die Konzentrationen im Ablauf meist unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Während des Untersuchungszeitraums betrug die durchschnittliche Konzentration von Amisulprid im Zulauf zur ARA (gemessen von Envilab) bei  $0.074 \pm 0.032 \mu\text{g/l}$ , während die Konzentration im Ablauf der Nachklärung (gemessen von der FHNW)  $0.068 \pm 0.031 \mu\text{g/l}$  betrug. Die Konzentration im Ablauf lag stets unter dem LOQ. Ähnlich wie Amisulprid wurden auch Carbamazepin, Citalopram, Clarythomycin, Metoprolol, Venlafaxin und 4- und 5-Methylbenzotriazol im Ablauf der Carbopius-Stufe unterhalb des LOQ gefunden.

### **3.7 Elimination von Mikroverunreinigungen bei Regenwetter**

Die von Envilab gemessenen Konzentrationen von Mikroverunreinigungen deuten auf eine unzureichende Elimination von Mikroverunreinigungen in der STEP Delémont während Regenereignissen hin, was mit einer hohen Filtergeschwindigkeit zusammenhängt (Abbildung 13). Es ist davon auszugehen, dass die folgenden Mechanismen die Elimination während Regenereignissen beeinträchtigen:

- (1) verminderte Elimination in der Biologie aufgrund kürzerer hydraulischer Verweildauer
- (2) verminderte Elimination im Carbopius-Verfahren aufgrund kürzerer Kontaktzeit
- (3) schlechte Adsorption aufgrund der Verdünnung des Abwassers
- (4) Desorption aufgrund der Verdünnung des Abwassers

Angesichts der Tatsache, dass all diese Mechanismen gleichzeitig auftreten, lässt sich der Beitrag jedes einzelnen Mechanismus zur Gesamtelimination nicht bestimmen und müsste in weiteren Experimenten ermittelt werden. Um zwischen dem Effekt einer kürzeren Kontaktzeit und der Abwasserverdünnung zu unterscheiden, wurden Eliminationsraten auch für hohe Durchflussmengen grafisch dargestellt (siehe Anhang). Die Datensätze der STEP Delémont und Penthaz stimmen im Wesentlichen überein, wenn die Filtergeschwindigkeiten zwischen 4 und 10 m/h liegen. In der STEP Delémont wurden während starker Regenfälle Geschwindigkeiten von mehr als 11 m/h gemessen. Unter diesen Bedingungen wurde die durchschnittliche Elimination mehrerer Mikroverunreinigungen negativ beeinflusst. Um definitive Schlussfolgerungen über den Einfluss der Filtergeschwindigkeit zu ziehen, sollten Pilotstudien durchgeführt werden. Besondere Aufmerksamkeit sollte dem Einfluss der Verdünnung gewidmet werden, damit die beiden Mechanismen voneinander getrennt werden können.

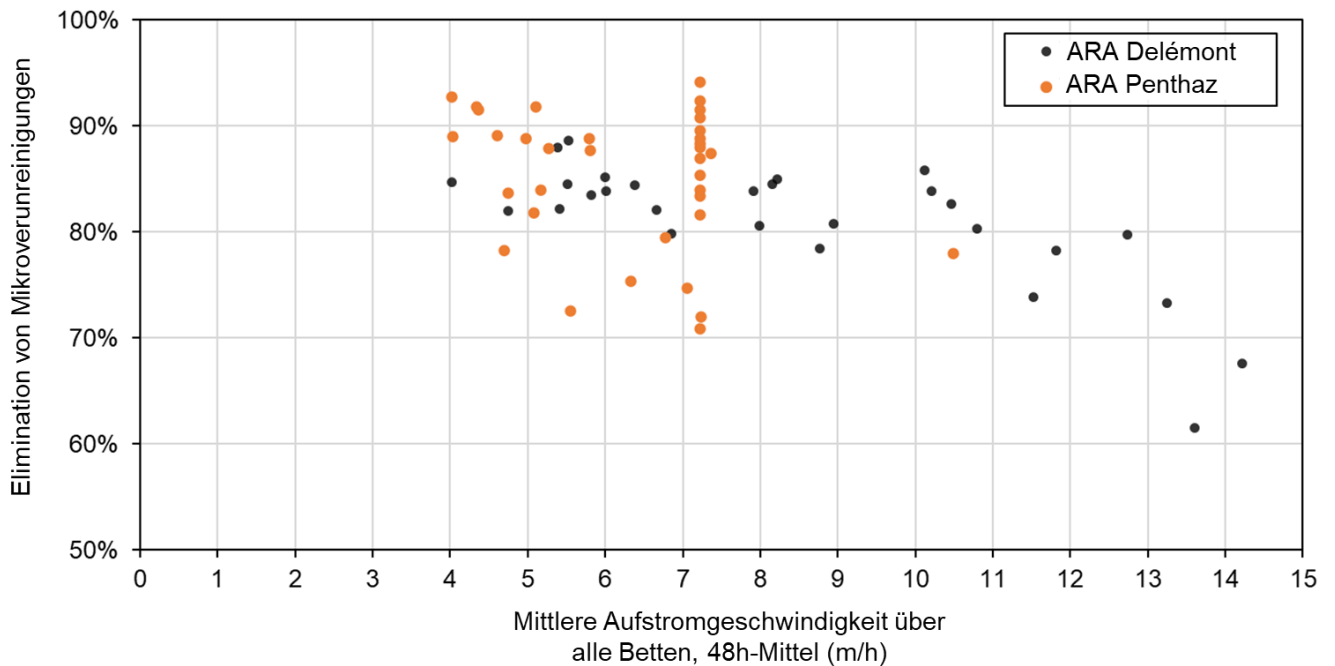


Abbildung 13: Elimination von Mikroverunreinigungen im Vergleich zur durchschnittlichen Filtergeschwindigkeit.

Die über die Carbopuls-Reaktoren allein gemessenen Eliminationsraten zeigen ein ähnliches Bild bei niedrigen Zulaufkonzentrationen, jedoch ist der Einfluss von Regen nicht bei allen Mikroverunreinigungen stark ausgeprägt (Abbildung 14 & Abbildung 15). Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Metoprolol, Venlafaxin sowie 4- und 5-Methylbenzotriazol werden durch Aktivkohle gut eliminiert (Kanton Waadt, 2019). Die Elimination dieser Verbindungen wird durch kürzere Kontaktzeiten und Änderungen der Zulaufkonzentration nicht so stark beeinflusst wie bei Verbindungen, die schlechter adsorbiert werden (z. B. Candesartan, Diclofenac, Irbesartan und Gabapentin).

Eine mögliche Massnahme zur Erhöhung der Elimination von Mikroverunreinigungen bei Regenereignissen könnte darin bestehen, die  $\mu$ GAK-Dosis vorübergehend stark zu erhöhen. Wie im vorigen Kapitel erläutert, ist jedoch unklar, ob der Effekt aufgrund der langen Verweildauer der GAK in den Reaktoren spürbar wäre. Die Rückführung von verbrauchter  $\mu$ GAK (möglicherweise ist eine Zerkleinerung erforderlich, um Sedimentation und Abrieb zu vermeiden) in die Biologie könnte ebenfalls untersucht werden, da zweistufige Aktivkohleprozesse effizienter sind als einstufige (Zwickenpflug et al., 2010). Allerdings könnte die zurückgeführte Aktivkohle dann nicht für die Regeneration verwendet werden, was ein Nachteil wäre. Diese Optimierung des Adsorptionsprozesses sollte jedoch in zukünftigen Experimenten unbedingt analysiert werden.

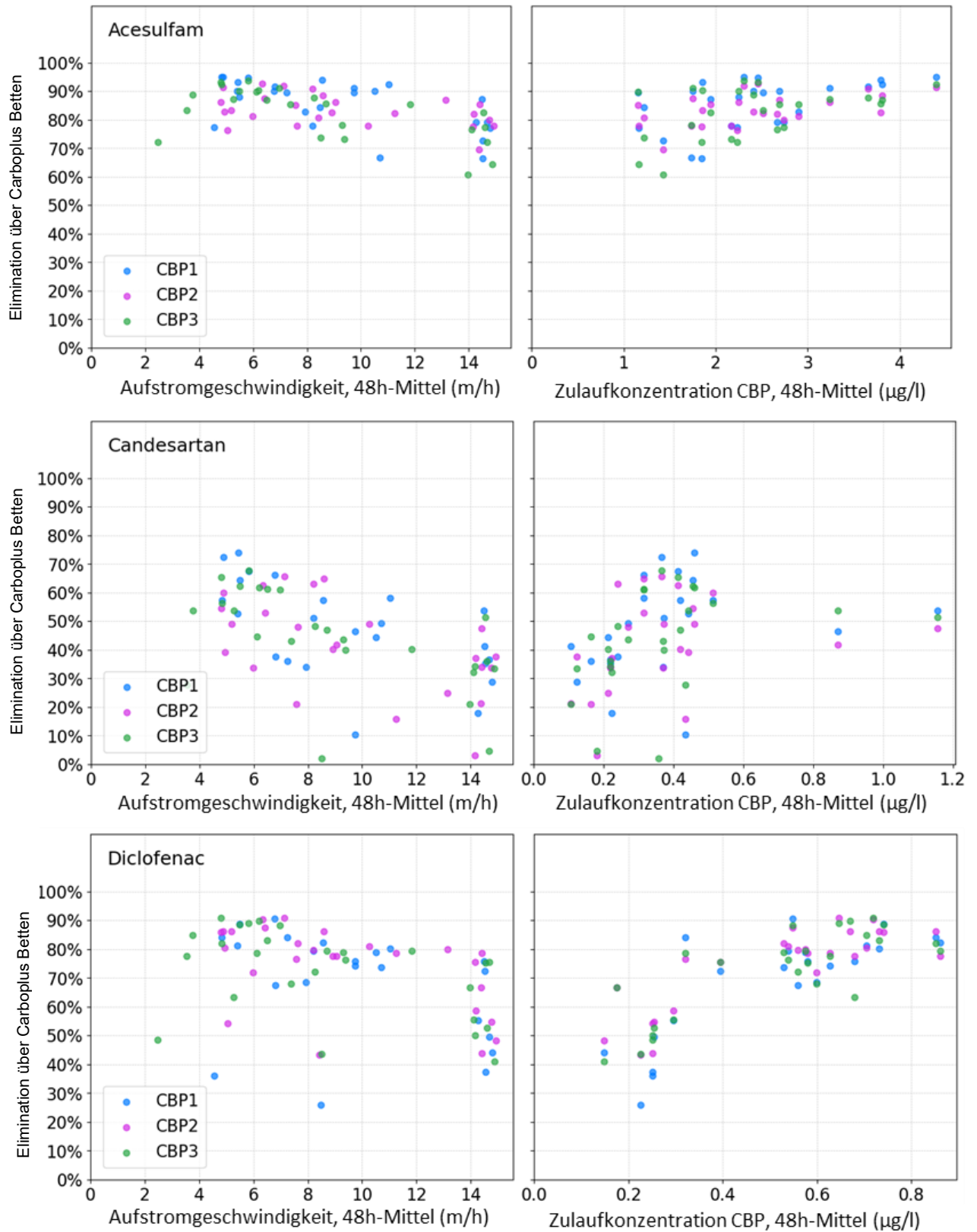


Abbildung 14: Elimination in Carbolplus-Betten im Vergleich zur Aufwärtsströmungsgeschwindigkeit und Zuflusskonzentration.

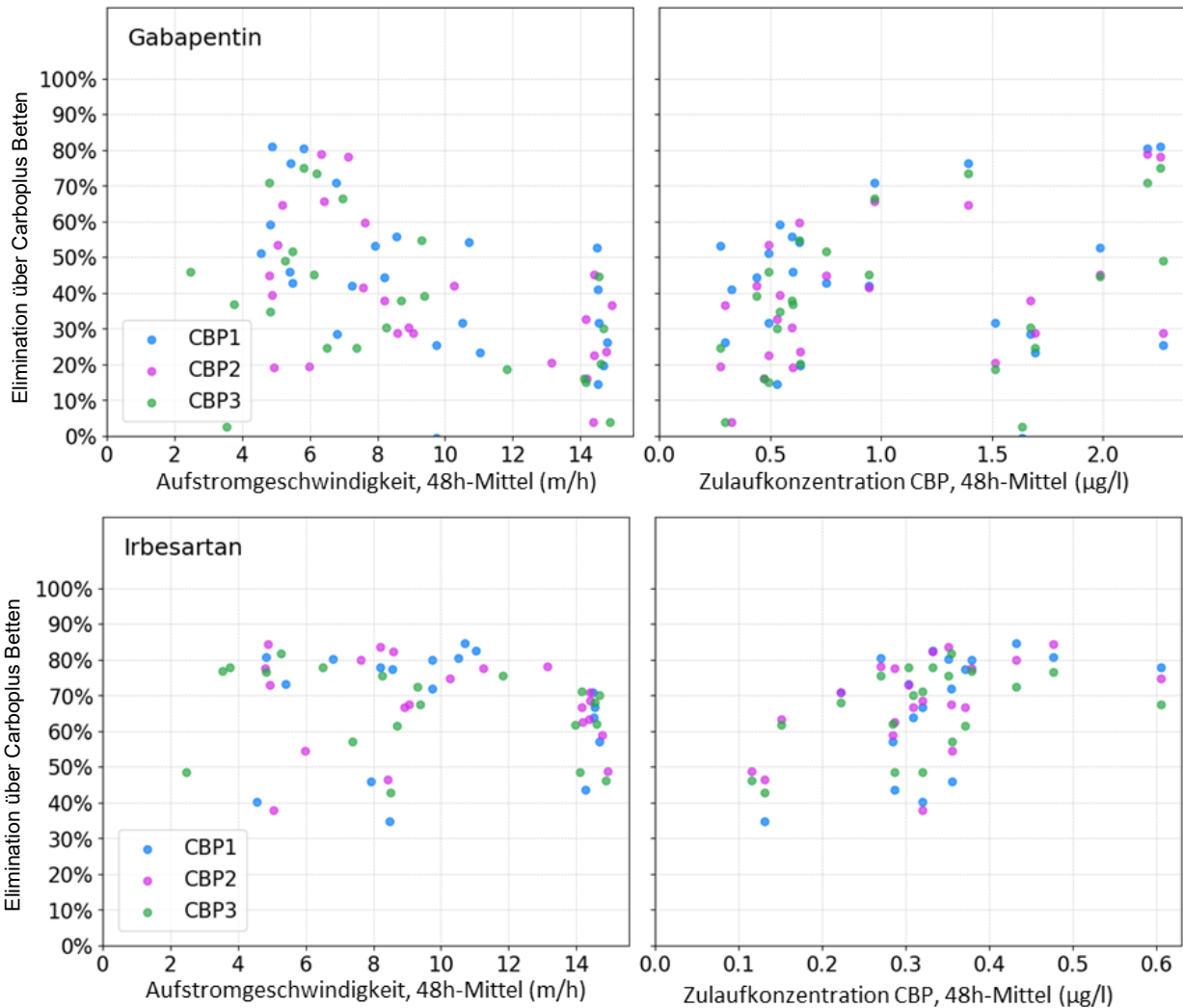


Abbildung 15: Elimination in CarboPlus-Betten im Vergleich zur Filtergeschwindigkeit und Zuflusskonzentration.

### 3.8 Aktivkohlerückhalt

Der Aktivkohlerückhalt in den CarboPlus-Betten wurde im Bereich von 94–100 % gemessen (Abbildung 16). Weniger als 10% der Messungen lagen unter dem neuen, vom VSA empfohlenen Schwellenwert von 96% (VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025). Bei der Darstellung der  $\mu\text{GAK}$ -Retention in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit wurde keine offensichtliche Korrelation beobachtet (Abbildung 16). Die mittlere Kohlenstoffkonzentration im Ablauf betrug 0.26 mg/l. Wenn man bedenkt, dass modernste Systeme in der Regel mittlere Konzentrationen von etwa 0.4 mg/l oder weniger erreichen, kann das CarboPlus-Verfahren hinsichtlich der Begrenzung des Aktivkohleverlusts im Ablauf als zufriedenstellend angesehen werden. Die AktivkohleKonzentrationen und der Aktivkohleverlust wurden in der STEP Penthaz etwas höher gemessen als in der STEP Delémont (Abbildung 17). Allerdings liegt der Aktivkohlerückhalt in beiden Fällen meist über dem neuen, vom VSA

vorgeschlagenen Schwellenwert von 96%. Im Vergleich zu anderen Schweizer ARA, die pulverförmige Aktivkohle verwenden, liegt die Rückhaltung in einem ähnlichen Bereich.

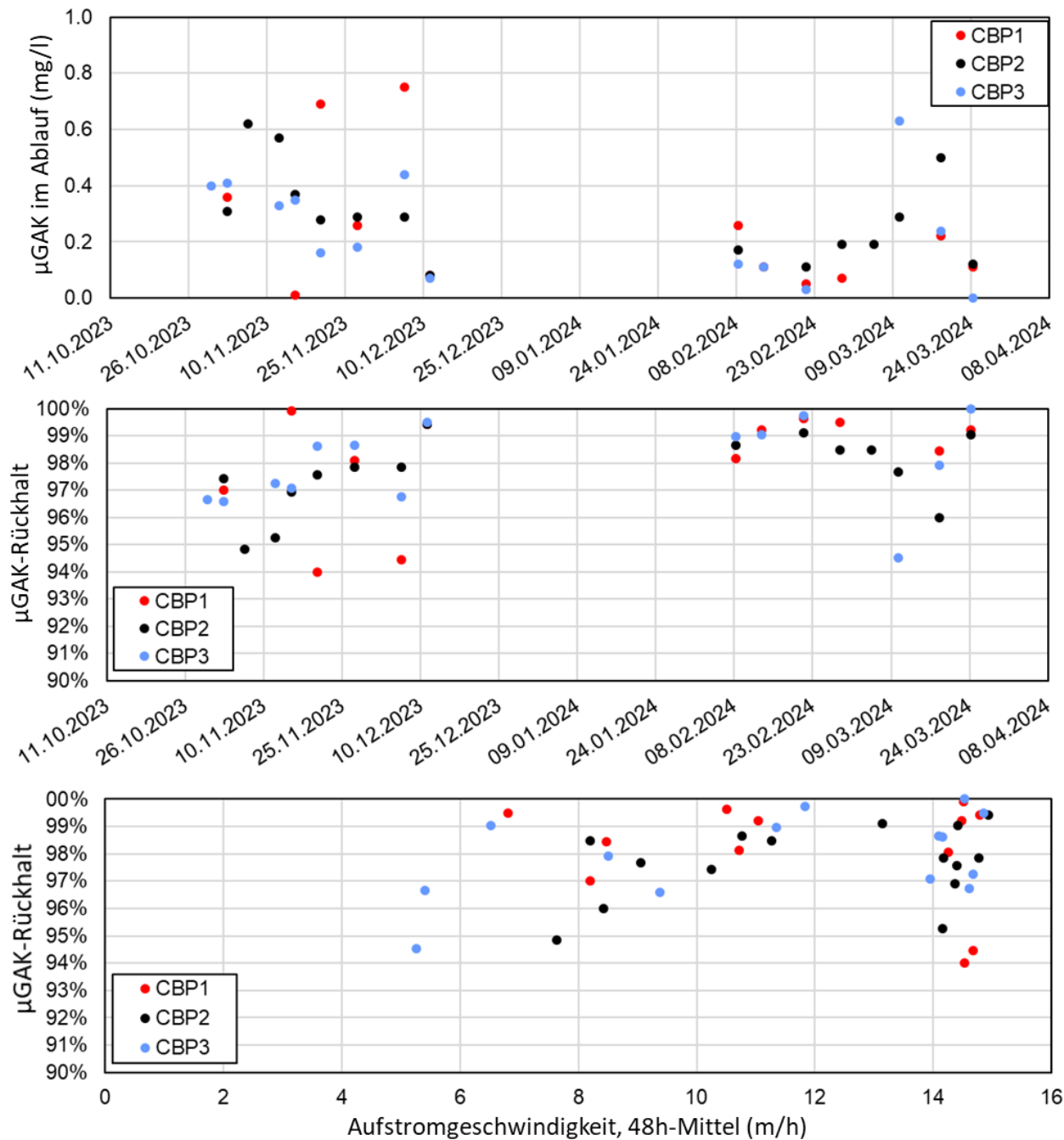


Abbildung 16:  $\mu\text{GAK}$ -Konzentration im Ablauf der ARA im Zeitverlauf (oben),  $\mu\text{GAK}$ -Rückhalt in den CarboPlus-Betten im Zeitverlauf (Mitte) und im Vergleich zur Filtergeschwindigkeit (unten).

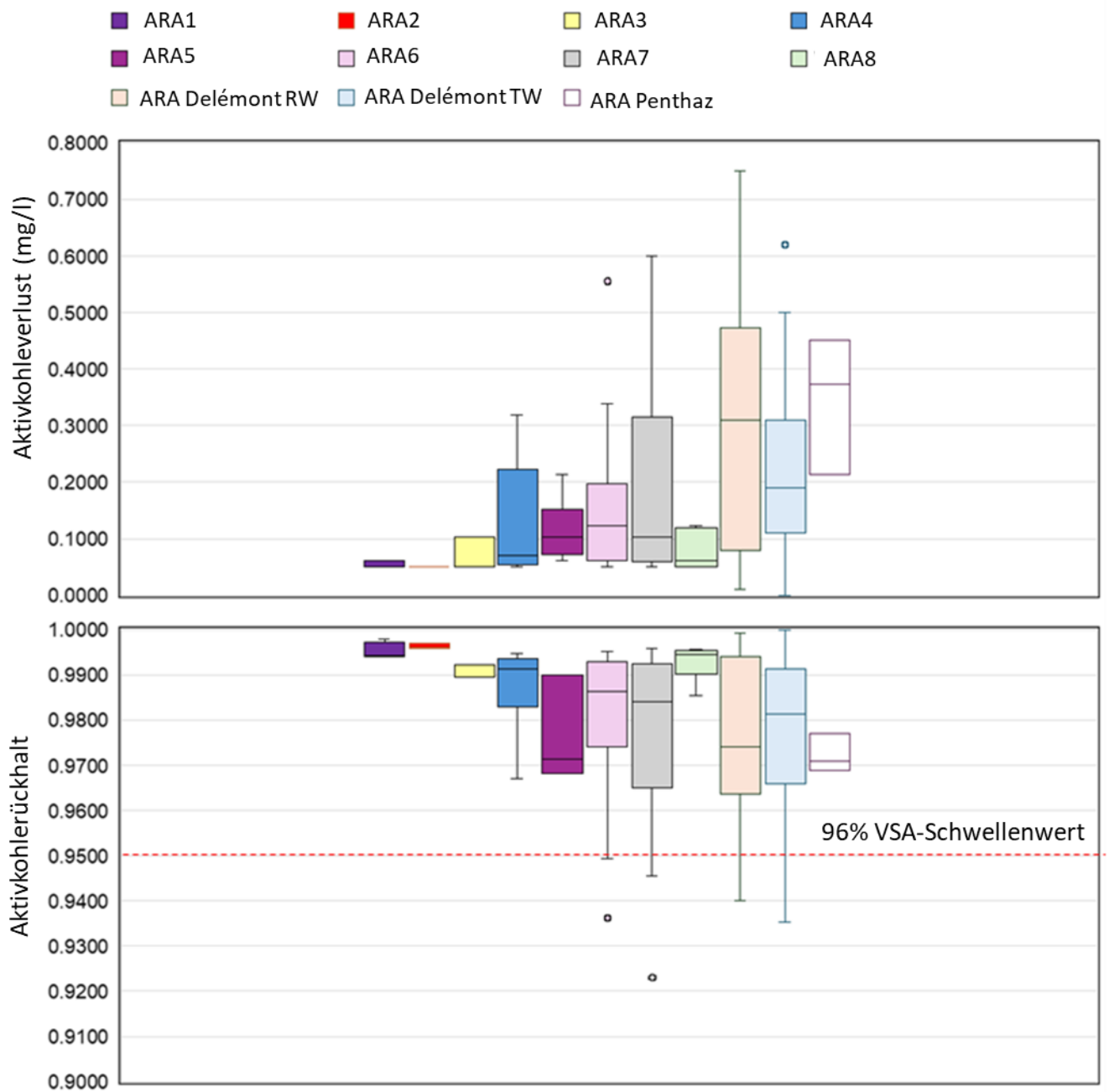


Abbildung 17: Aktivkohlekonzentrationen und Aktivkohlerückhalt in der STEP Delémont, der STEP Penthaz und anderen Schweizer ARA, die PAK verwenden.

### 3.9 Diclofenac Ablaufkonzentrationen

Gemäss der Schweizer Gewässerschutzverordnung dürfen die Diclofenac-Konzentrationen in Oberflächengewässern über einen Zeitraum von zwei Wochen gemittelt 0.05 µg/l nicht überschreiten. Die Diclofenac-Konzentrationen im Ablauf der STEP Delémont lagen meist im Bereich von 0.05 bis 0.20 µg/l (Abbildung 18). In der STEP Delémont liegt der durchschnittliche tägliche Abwasserabfluss bei Trockenwetter bei etwa 250 l/s. Der Wasserabfluss in der Birs unterhalb der STEP Delémont liegt bei längeren Trockenperioden bei etwa 1'500 bis 2'000 l/s (Abbildung 19).

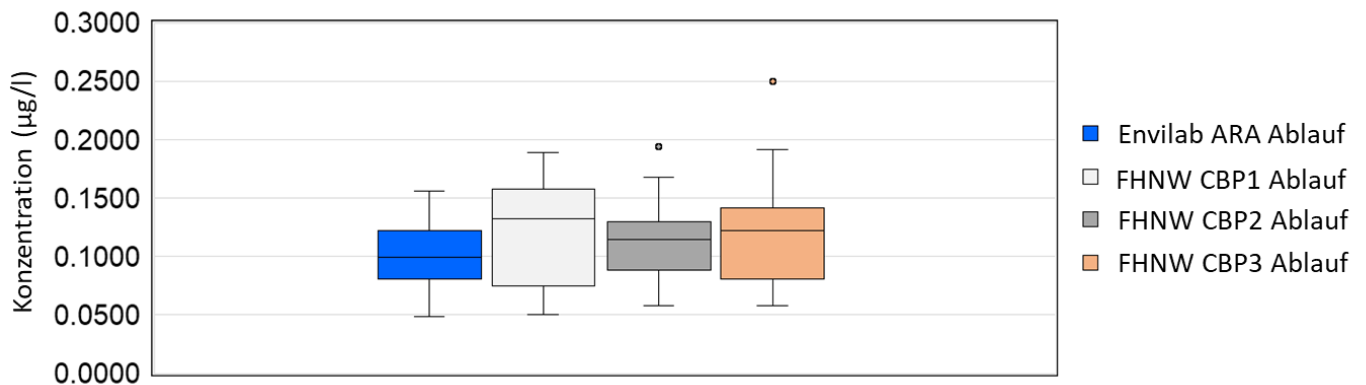


Abbildung 18: Diclofenac-Konzentration im Ablauf der STEP Delémont, gemessen von Envilab und FHNW.

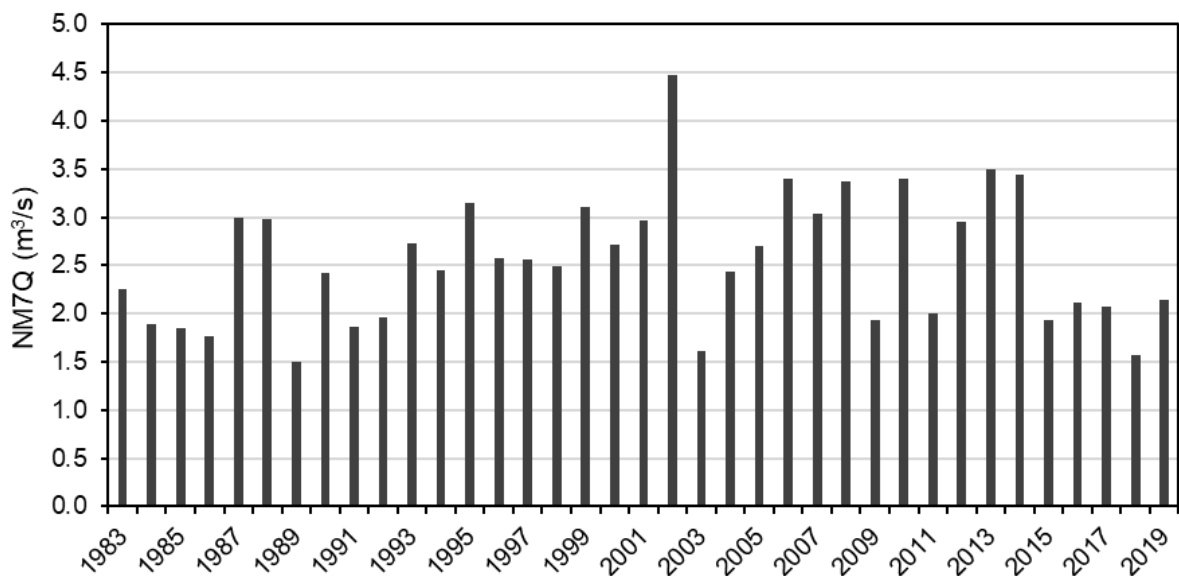


Abbildung 19: NM7Q (niedrigster durchschnittlicher Abfluss über 7 aufeinanderfolgende Tage während eines Jahres) in der Birs bei Soyhières, Bois du Treuil, im Zeitraum 1983–2019 (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2025).

Im "Worst-Case-Szenario" wird eine Diclofenac-Konzentration von 0.25 µg/l (höchster Messwert von FHNW und Envilab) zugrunde gelegt. Unter der Annahme einer Konzentration von 0.25 µg/l im Ablauf der ARA und einem Verdünnungsfaktor von sechs in der Birs während längerer Trockenperioden wird

die Konzentration im Fluss nach der Verdünnung auf 0.042 µg/l geschätzt. Dies liegt unter dem Grenzwert der Schweizer Gewässerschutzverordnung von 0.05 µg/l. Berücksichtigt man jedoch das Abwasser aus anderen ARA entlang der Birs, könnte der kumulative Abwassergehalt zu höheren Diclofenac-Konzentrationen führen.

## 4 Schlussfolgerung

Diese Studie untersuchte das Verfahren GAK im Schwebebett im grosstechnischen Massstab auf der STEP Delémont und konzentrierte sich dabei auf das Verhalten des Filterbetts, die Elimination von Mikroverunreinigungen, den Aktivkohlerückhalt und auf gesamte ungelöste Stoffe. Die wichtigsten Ergebnisse sind wie folgt:

### Elimination von Mikroverunreinigungen

- Wirksam bei Trockenwetter: Das Verfahren eliminiert Mikroverunreinigungen bei Trockenwetter ausreichend und erfüllt damit die Schweizer Anforderungen.
- Verminderte Leistung bei Regenwetter: Die Eliminationsleistung nimmt bei Regenereignissen ab, was wahrscheinlich auf eine Kombination aus kürzeren Kontaktzeiten und verdünntem Rohabwasser zurückzuführen ist. Der genaue Anteil der einzelnen Faktoren kann nicht quantifiziert werden.
- Trägheit bei Änderungen der GAK-Dosis: Kurzfristige Änderungen der GAK-Dosis hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die Elimination von Mikroverunreinigungen. Dies ist wahrscheinlich auf die lange Verweildauer der Aktivkohle von fast einem Jahr zurückzuführen.

### Aktivkohle- und Feststoffrückhalt

- Hoher Aktivkohlerückhalt: Das System hält Aktivkohle sehr effektiv zurück, mit Rückhaltungsraten von durchweg über 96 %, was dem vom VSA empfohlenen Wert entspricht. Die Leistung wurde durch erhöhte hydraulische Belastungen während Regenereignissen nicht beeinträchtigt.
- Variabler GUS-Rückhalt: Der GUS-Rückhalt in den Schwebebettreaktoren schwankte und lag im Durchschnitt bei etwa 50%. Dies führte phasenweise zu einer Anreicherung von GUS in den Filtern, was einen Anstieg der Filterbetthöhe zur Folge hatte.

Mögliche Verbesserungsstrategien:

- Verbesserung der Leistung bei Regenwetter: Dosierung von bereits benutzter  $\mu$ GAK in die biologische Behandlungsstufe könnte die Elimination von Mikroverunreinigungen möglicherweise erhöhen.

*Anmerkung: Um eine Sedimentation im Belebtschlammbecken zu verhindern, könnte es erforderlich sein,  $\mu$ GAK zu zermahlen, um eine geringere Partikelgrösse zu erreichen. Diese Strategie müsste in Pilotversuchen getestet werden.*

Vergleichende Analyse:

- Das Verfahren auf der STEP Delémont zeigte im Vergleich zur STEP Penthaz eine etwas geringere Elimination von Mikroverunreinigungen. Die Gründe für diesen Unterschied konnten im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden.

Gesamtbedeutung:

- Diese Studie liefert wertvolle Erkenntnisse über die Betriebsdynamik des Verfahrens GAK im Schwebebett und schliesst wichtige Wissenslücken für Ingenieure und Anlagenbetreiber in Bezug auf das Betriebsverhalten, den Aktivkohlerückhalt und die Eliminationsleistung bei unterschiedlichen Bedingungen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Albers, S., Baggenstos, M., Casazza, R., Le Goaziou, Y., Horisberger, M., Lambert, M., Margot, J., Rieck, T., Schneider, L., Fleiner, J., Morgado, A., Zöllig, H., Joss, A., Thomann, M., Liebich, C., Brander, A., Eugster, F., Tama, N., 2022. Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett.
- Federal Office for the Environment FOEN, 2025. Birse - Soyhières, Bois du Treuil [WWW Document]. URL <https://www.hydrodaten.admin.ch/en/seen-und-fluesse/stations/2478> (accessed 4.28.25).
- Grelot, J., Horisberger, M., Casazza, R., 2021. Elimination des micropolluants par CAG en lit fluidisé. Aqua & Gas.
- Kanton Waadt, 2019. Micropolluants dans les stations d'épuration vaudoises.
- Mailler, R., Gasperi, J., Coquet, Y., Buleté, A., Vulliet, E., Deshayes, S., Zedek, S., Mirande-Bret, C., Eudes, V., Bressy, A., Caupos, E., Moilleron, R., Chebbo, G., Rocher, V., 2016. Removal of a wide range of emerging pollutants from wastewater treatment plant discharges by micro-grain activated carbon in fluidized bed as tertiary treatment at large pilot scale. Science of The Total Environment 542, 983–996. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.153>
- Pulfer, M., Obrecht, J., Lutz, J.S., Tobias, B., Corvini, N., Hochstrat, R., Thomann, M., 2024. Mathematical image processing analysis of activated carbon (MIPA2C) in wastewater treatment plant effluents.
- UVEK, 2016. Verordnung des UVEK [WWW Document]. URL <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/671/de> (accessed 1.17.25).
- VSA, 2021. CAG en lit fluidisé a la STEP de Penthaz.
- VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2025. Aktivkohle-Schlupf [WWW Document]. VSA Micropoll. URL <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/aktivkohle-schlupf/> (accessed 3.4.25).
- VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, 2019. Aktueller Stand Beurteilung Aktivkohle Rückhalt.
- Zwickenpflug, B., Böhler, M., Sterkele, B., Joss, A., Siegrist, H., Traber, J., Gujer, W., Behl, M., Dorush, F., Hollender, J., Ternes, T., Fink, G., 2010. Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser.