

## Abschlussbericht Forschungsvorhaben

### SUPREMES

Verbundprojekt:

Nachhaltige und kostengünstige Produktion von  
Trinkwasser aus eutrophiertem und mit  
Mikroschadstoffen belastetem Wasser durch ein  
Membran-Hybridverfahren

Förderkennzeichen 01DS21012A



**cornelsen**  
Umwelttechnologie  
GmbH



DLR

Projektträger  
Luftfahrtforschung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Inhalt.....	I
1 Einleitung und Zielsetzung .....	1
1.1 Gesamtziel des Vorhabens .....	1
1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens.....	1
1.3 Berichtszeitraum.....	1
2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse .....	2
2.1 Arbeitspaket 1a: Optimierung der Membranfiltration und Inline-Flockung.....	2
2.1.1 Vorversuche zur Flockung .....	2
2.1.2 Halbtechnische Untersuchungen .....	3
2.2 Arbeitspaket 1b: PAK-Auswahl und -dosierung .....	5
2.2.1 Arbeiten an der UDE.....	5
2.2.2 Arbeiten an der CEP .....	6
2.3 Arbeitspaket 2: Entwässerung von Schlamm aus der Trinkwasseraufbereitung.....	7
2.4 Arbeitspaket 3: Herstellung von Pulveraktivkohle aus vorkonditionierten Wasseraufbereitungsschlämmen.....	8
2.5 Arbeitspaket 4: Algenstudie .....	11
2.6 Arbeitspaket 5: Einfluss verschiedener Algenarten auf die Prozessleistung und -optimierung.....	12
2.6.1 Einfluss verschiedener Algenarten auf Prozessleistung und Optimierung durch vorgeschaltete Flockung.....	12
2.6.2 Einfluss verschiedener Algenarten auf Adsorptionsleistung .....	14
2.7 Arbeitspaket 6: Filtrationsversuche mit natürlichem Oberflächenwasser .....	15
2.7.1 Kurzzeitversuche .....	15
2.7.2 Langzeitversuche .....	16
3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	17
4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten .....	18
5 Fortschreibung des Verwertungsplans .....	18
6 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	18
7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	19
7.1 Vorträge .....	19
7.2 Artikel in Journalen.....	19
7.3 Artikel in Vorbereitung .....	20
7.4 Abschlussarbeiten.....	20
8 Anhang.....	21

## Inhalt

---

8.1	Analyse Duisburger Leitungswasser .....	21
8.2	Analysen der Blumenerde-Extrakte.....	21
8.3	Rohmaterialien zur Herstellung der nachhaltigen Adsorbentien .....	21
8.4	Foto und Anlagenschema der SIMA-tec-Versuchsanlage .....	22
8.4.1	Untersuchte kommerzielle Pulveraktivkohlen.....	22
8.4.2	Zusätzliche Ergebnis-Diagramme .....	23
8.5	Referenzen.....	25
8.6	Abkürzungen.....	27
8.7	Vorhabenbeteiligte .....	28

## 1 Einleitung und Zielsetzung

### 1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Hauptziel des Projekts war die Bereitstellung eines optimierten Membran-Hybridverfahrens als innovative Technologie für die nachhaltige und kosteneffektive Produktion von Trinkwasser aus eutrophiertem und mit Mikroschadstoffen belastetem Wasser.

### 1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Nachfolgend sind die Namen der beteiligten Partner wie folgt abgekürzt:

- Fakultät für Chemie, Biochemie und Umweltschutz, Prof. Dr. Ivana Ivančev-Tumbas – **CEP**
- Fakultät für Biologie und Ökologie, Prof. Dr. Jelica Simeunović – **B&E**
- Lehrstuhl für Mech. Verfahrenstechnik / Wassertechnik, Prof. Dr. Stefan Panglisch – **UDE**
- Cornelsen Umwelttechnologie GmbH, Herr Martin Cornelsen – **CU**

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens umfassten im Einzelnen:

- Die Optimierung der PAK-UF (Pulveraktivkohle-Ultrafiltration) Prozessparameter.  
**CEP:** bestmögliche Spurenstoffentfernung  
**UDE:** optimale Performance des Membranfiltrationsprozesses
- Die Aufklärung kritischer Einflussparameter auf das Membranfouling in Bezug auf Algen.  
**B&E:** Einfluss der phylogenetischen Gruppe der Algen (z.B. grüne Mikroalgen, Cyanobakterien), der Art des Algen-Talus (z.B. ein- und mehrzellig, wie filamentös), der Algenzellform, des Algenalters (verschiedene Wachstumsphasen) und der Nährstoffversorgung.
- Die Entwicklung, Erprobung und Anpassung einer neuen Methode zur Herstellung einer nachhaltigen und für den PAK-UF Prozess optimierten Hochleistungs-PAK aus recyceltem UF-Rückspülschlamm.  
**CU:** Bereitstellung eines Rohproduktes aus entwässertem UF-Rückspülschlamm  
**UDE:** Aktivierung des Rohproduktes im Labor-Drehrohrföfen
- Die Verbesserung der Spurenstoffentfernung durch Auswahl eines optimalen Adsorptionsmittels, seiner Partikelgröße und des Dosiermodus.  
**UDE:** Herstellung von unterschiedlichen Aktivkohlen und -Partikelgrößen  
**CEP:** Filtrationsversuche sowie Batch-Tests mit unterschiedlichen Produkten

### 1.3 Berichtszeitraum

01.06.2021 bis 31.12.2024

## 2 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

### 2.1 Arbeitspaket 1a: Optimierung der Membranfiltration und Inline-Flockung

*Hauptziel dieses Arbeitspaketes (AP) war die Minimierung des Membranfouling.*

In AP 1 wurden die drei folgenden synthetischen Modellwässer (SMW) verwendet:

- SMW1: Duisburger Leitungswasser (Analyse siehe Kapitel 8.1 im Anhang), dem die Grünalge *Chlorella vulgaris* in Konzentrationen von  $10^{-8}$  –  $10^{-9}$  Zellen/L zugesetzt wurde
- SMW2: Duisburger Leitungswasser unter Zugabe eines alkalischen Extraktes aus Blumenerde zur Einstellung einer DOC (dissolved organic carbon)-Konzentration von 3,75 mg/L, (entsprechend der mittleren DOC-Konzentration des in Novi Sad verwendeten Oberflächenwassers)
- SMW3: Reinstwasser (Permeat einer Nanofiltrationsanlage, Leitfähigkeit < 20  $\mu$ S/cm), versetzt mit 0,5 mmol/L  $\text{NaHCO}_3$ , 0,3 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  und 0,2 mmol/L  $\text{MgSO}_4$  sowie dem organischen Mikroschadstoff Diclofenac in einer Konzentration von 5 mg/L.

#### 2.1.1 Vorversuche zur Flockung

Die optimalen Bedingungen für den Flockungsprozess (Flockungsmittelkonzentration und -art, Flockenbildungszeit, Energieeintrag, pH-Wert) wurden zunächst mit SMW1 und sog. „Jar Tests“ untersucht (angelehnt an das DVGW-Arbeitsblatt W218: Flockung in der Wasseraufbereitung - Teil 2: Flockungstestverfahren). Im Gegensatz zur im Arbeitsblatt beschriebenen Methode, bei der die gebildeten Makroflocken nach einer Flockenbildungszeit von etwa 20 Minuten durch Sedimentation abgetrennt werden, wurde das Verfahren in diesem Versuch erweitert. Zusätzlich erfolgte eine direkte Filtration der nach einer Flockenbildungszeit von ca. 1 Minute entstandenen Mikrofloccen mittels eines 0,45  $\mu$ m-Filter. Diese Vorgehensweise diente der Simulation der bei Hybridverfahren üblichen Inline-Flockung.

Auf Grundlage einer Literaturstudie und vorliegenden Erfahrungen aus anderen Projekten wurden vier verschiedene Flockungsmittel verwendet:

- Eisen(III)chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ),
- zwei verschiedene teilhydrolysierte Poly Eisenchloride (PEC40 und PEC80)
- und ein teilhydrolysiertes Polyaluminiumchlorid (PACL, Nüscofloc UF-A).

In den Versuchen konnten lediglich  $\text{FeCl}_3$  und PACL eine signifikante Entfernung der organischen Wasserinhaltsstoffe bewirken (Bestimmung der UV-aktiven Substanzen, gemessen als  $\text{SAK}_{254}$ ); dabei zeigte  $\text{FeCl}_3$  diese Wirkung nur bei unüblich hohen Dosierkonzentrationen. Bei praxisrelevanten, geringeren Dosierkonzentrationen war ausschließlich PACL in der Lage, die organischen Inhaltsstoffe wirksam zu reduzieren. Die auf die Dosiermenge bezogene spezifische Entfernung nahm dabei mit steigender Dosierkonzentration ab – von etwa 20 %/mg bei 0,5 mg Al/L auf rund 5 %/mg bei 10 mg Al/L. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Entfernung nur in geringem Maße vom pH-Wert beeinflusst wurde.

Die beiden untersuchten Methoden zur Flockenabtrennung – Sedimentation und Membranfiltration – erzielten trotz der deutlich kürzeren Flockenbildungszeit im Membranprozess eine vergleichbare Entfernungsleistung. Als Ergebnis der

Voruntersuchungen wurde für die nachfolgenden Versuche mit den Pilotanlagen das PACL (Produkt Nüscofloc UF-A) mit einer Konzentration von 2 bis 4 mg Al/L eingesetzt.

### 2.1.2 Halbtechnische Untersuchungen

#### 2.1.2.1 Arbeiten an der UDE

Für die Untersuchungen war vorgesehen, eine labor-technische Membrananlage (Membranfläche: 0,02 m<sup>2</sup>) mit einem SMW mit Algen und Blumenerdeextrakt zu betreiben (Mischung aus SMW1 und SMW2). Durch die bei den kleinen Membranflächen sehr geringen Durchflussmengen bei der Inline-Flockung kam es jedoch zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen. Deshalb mussten alle Untersuchungen zur Inline-Flockung an einer halbtechnischen Pilotanlage durchgeführt werden, die für einen Versuch etwa 600 bis 1000 Liter Wasser benötigt. Für diese großen Volumina war es nicht möglich, SMW mit Algen zu realisieren. Der Einfluss verschiedener Algen auf den Prozess wurde daher nur in AP 5 (Kapitel 2.6.1) mit und ohne vorgeschaltete Becher-Flockung untersucht.

Zum Einsatz kam die halbtechnische Pilotanlage der Firma SIMA-tec GmbH, die mit einem Inside-Out-Multibore<sup>®</sup>-Membranmodul von DuPont (Länge: 1,15 m; Membranfläche: 3,3 m<sup>2</sup>) ausgestattet ist. Ein Bild der Anlage zeigt Abbildung 9 und ein Anlagenschema Abbildung 10 (beides in Kapitel 8.4). Zur Untersuchung des Foulings kam SMW2 zum Einsatz, was auf Basis verschiedener Voruntersuchungen hergestellt wurde. Kouchaki Shalmani et al. (2021) konnten zeigen, dass durch diese Extrakte entstehendes organisches Fouling vergleichbar ist, mit dem Fouling von natürlichen Wässern und zudem sehr große Mengen reproduzierbar und kostengünstig produziert werden können. Für die Versuche wurden vier aktuell auf dem Markt verfügbare Blumenerden ausgewählt. Je 4 kg Erde wurden mit 15 Litern 1 %-iger NaOH-Lösung bei 60 °C vermischt und 24 Stunden verschlossen extrahiert. Es folgten Charakterisierungen der einzelnen Extrakte (siehe Kapitel 8.1 ) sowie Kurzzeitversuche an der Membran-Anlage. Schließlich wurde aufgrund hoher DOC-Konzentrationen Extrakt 4, aus der FloraSelf Graberde (Eigenmarke von Hornbach), für die weitergehenden Untersuchungen ausgewählt. Extrakt 3 wies zwar einen noch höheren DOC-Gehalt auf, zeigte jedoch in den Membranversuchen ein nur sehr geringes Fouling.

Für die Fouling-Untersuchungen wurde SMW2 durch eine Verdünnung des Extrakt-Konzentrats hergestellt. Alle Versuche wurde auf diese Weise mit einem vergleichbaren SAK<sub>254</sub> von 24 m<sup>-1</sup> durchgeführt. Der eingestellte Membranflux lag bei 100 L·m<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> (im weiteren Bericht wird die Kurzschreibweise LMH für L·m<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> verwendet) was einem Volumenstrom von 330 L/h entspricht. Zwischen den einzelnen Filtrationszyklen erfolgte eine Spülung mit Filtrat für 40 sec, welche aufgrund der Installation einer nicht regulierbaren Pumpe bei Maximaldruck und einem Flux von 500 LMH erfolgte. Am Ende der Versuchsreihe (in der Regel nach vier Zyklen) erfolgte jeweils eine alkalisch-oxidative Reinigung (30 min) mit 200 ppm NaOCl bei einem pH-Wert von 10 (eingestellt mit Natriumhydroxid) sowie eine saure Reinigung (30 min) bei einem pH-Wert von 4 (eingestellt mit Zitronensäure). Eine rein oxidative Reinigung erzielte bei einmaligem Einsatz nicht immer den erwünschten Erfolg, weshalb die pH-Anhebung in den ersten Schritt integriert wurde.

Zunächst wurde der Einfluss einer Inline-Flockung mit verschiedenen Konzentrationen des PACL Nüscofloc UF-A untersucht. Zudem erfolgte eine kontinuierliche Dosierung von PAK 2 (siehe Kapitel 8.4.1) in einer Konzentration von 5 mg/L. Im Referenzversuch ohne Dosierung von Flockungsmittel oder PAK fiel die Permeabilität sehr schnell ab (siehe Abbildung 1 ) und

lag nach vier Zyklen nur noch bei 57 % ihrer Anfangspermeabilität. Wie gewünscht, verursachte SMW2 ein hohes hydraulisch irreversibles Fouling, welches jedoch nach jedem Versuch durch die chemische Reinigung vollständig entfernt werden konnte. Die Dosierung von PACL in einer Konzentration von mindestens 3 mg Al/L führte zu einer stabilen Permeabilität über den gesamten Versuchszeitraum. Es zeigte sich ein nur sehr geringer Permeabilitätsverlust in den einzelnen Zyklen, der jedoch hydraulisch reversibel war (durch die einzelnen Spülungen). Eine höhere Dosierung von 4 mg Al/L erbrachte keine signifikante Verbesserung gegenüber 3 mg Al/L, während 2 mg Al/L zwar einen positiven Effekt zeigte, jedoch keinen stabilen Prozessbetrieb ermöglichte.

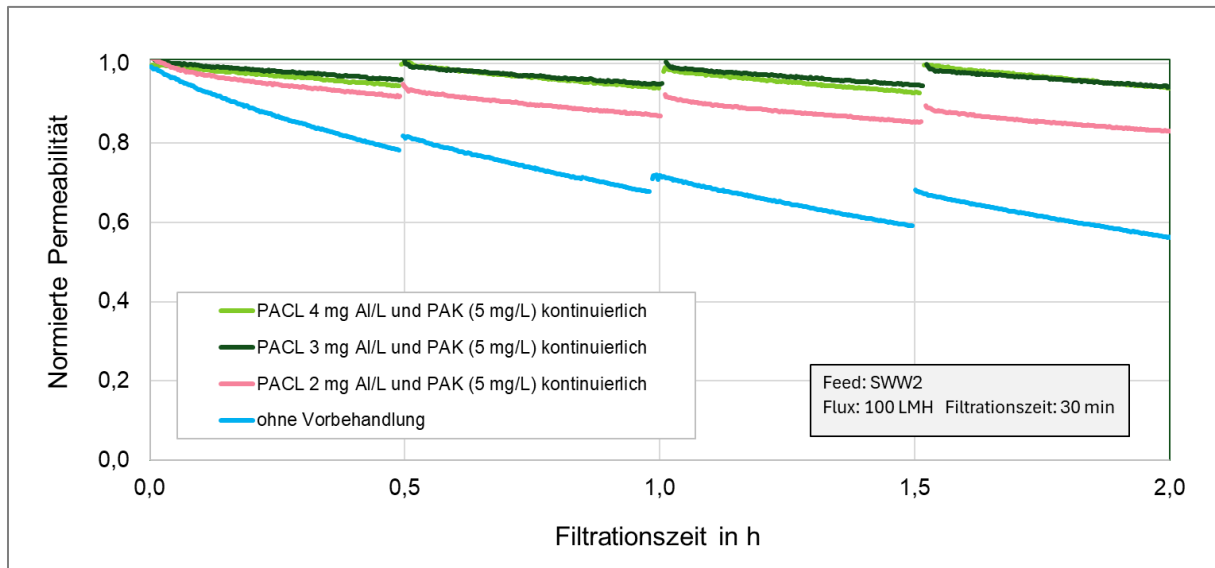


Abbildung 1: Einfluss der PACL-Konzentration auf das Fouling im hybriden Prozess bei der kontinuierlicher PACL- und PAK-Dosierung

In den weiteren Versuchen wurde der Einfluss der PAK-Dosierung auf das Fouling untersucht. Beide möglichen Dosiervarianten (Einmaldosierung/kontinuierlich; siehe Kapitel 2.2.1) wurden durchgeführt und der Permeabilitätsverlauf mit dem des Referenzversuchs verglichen. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 11 in Kapitel 8.4.2) zeigen, dass sich die Dosierung von PAK unabhängig von der eingesetzten Dosiervariante weder positiv noch negativ auf den Prozess auswirkt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die direkte Filtration des künstlichen Oberflächenwassers zu starkem, irreversiblen Fouling führte, welches jedoch durch die chemische Reinigung vollständig entfernt werden konnte. Durch eine kontinuierliche Flockung mit PACL in einer Konzentration ab 3 mg Al/L konnte das Fouling deutlich reduziert und eine stabile Permeabilität erreicht werden. Im Gegensatz dazu hatte die alleinige Zugabe von PAK – sowohl kontinuierlich als auch einmalig – keinen erkennbaren Einfluss auf das Foulingverhalten. Weitere Optimierungsversuche sind im späteren Verlauf des Projektes im realem Oberflächenwasser durchgeführt worden (siehe 2.7.1).

## 2.2 Arbeitspaket 1b: PAK-Auswahl und -dosierung

*Hauptziel dieses AP waren die Optimierungen des hybriden UF-PAK Prozesses in Bezug auf die Auswahl und Dosiermethode der PAK*

### 2.2.1 Arbeiten an der UDE

Zu Projektbeginn konnten die PAK nicht nach Serbien transportiert werden, sodass die Untersuchungen zunächst in Deutschland stattfinden mussten. Dabei kam die in AP 1b (Kapitel 2.1.2) beschriebene Versuchsanlage zum Einsatz. Basierend auf Erkenntnissen aus einem früheren Projekt PAK/UF 4.0 (Panglich et al. 2018) fokussierte die UDE sich zunächst auf die Optimierung der PAK-Dosierung. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Einmaldosierung von PAK im hybriden PAK/UF-Verfahren der kontinuierlichen Dosierung hinsichtlich der Adsorptionseffizienz überlegen sein kann (Campos et al., 1998; Matsui et al., 2001). Bei der Einmaldosierung wird die gesamte für einen Filtrationszyklus benötigte PAK-Menge direkt zu Beginn des Zyklus zudosiert. Ziel ist die Ausbildung einer gleichmäßig verteilten und homogenen PAK-Schicht auf der Membranoberfläche, an der die organischen Mikroschadstoffe (OMP) im weiteren Filtrationsverlauf adsorbieren. In vorangegangenen Untersuchungen zeigte sich allerdings, dass es bei zu stark konzentrierten PAK-Dosiersuspensionen zu PAK-Agglomeraten kommt, die einen erheblichen negativen Einfluss auf die Prozesseffizienz haben (Hoffmann et al. 2021). Zunächst wurde daher in AP 1b untersucht, welche Konzentration in der PAK-Dosiersuspension eingestellt werden muss. Zum besseren Vergleich der Ergebnisse mit den vorherigen Untersuchungen wurden ebenfalls PES-Membranen im inside-out-Modus verwendet sowie mit PAK 1 (Kapitel 8.4.1) die gleiche PAK dosiert. In den vorherigen Untersuchungen wurden die Konzentration der Dosiersuspension schrittweise von 1,8 auf 0,2 g/L verringert und die Elimination eines OMP (Diclofenac) aus einem Modellwasser überwacht. Hierbei zeigte sich, dass mit jedem Schritt die Anzahl und Größe der Agglomerate geringer wurde und gleichzeitig eine Verbesserung der Elimination erfolgte. Es konnte gezeigt werden, dass die Agglomerate die Ausbildung einer homogenen und gleichmäßig verteilten PAK-Schicht auf der Membranoberfläche in den Kapillaren verhindern und es so zu Kurzschlussströmen ohne Adsorption kommt.

Um die optimale Konzentration für den Prozess zu ermitteln, wurde in AP 1b die Konzentration der Dosiersuspension ausgehend von 0,2 g/L weiter verringert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 (im Anhang) dargestellt. Nach einmaliger PAK-Dosierung wurde das Feed (SMW3 + 5 mg/L Diclofenac) über die durch die Dosierung zu Beginn der Filtration entstandene PAK-Schicht filtriert. Um den Diclofenac-Verbrauch zu minimieren, wurde das Filtrat in den Feed-Tank rezirkuliert, bis sich ein Gleichgewicht einstellte. Dies war in allen drei untersuchten Fällen nach etwa 60 min der Fall. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass mit weiter abnehmender Konzentration der PAK-Suspension die Effektivität des Adsorptionsprozesses verbessert wird. Die Elimination stieg von 21 % (0,2 g/L) bis auf 35 % (0,05 g/L). Auf weitere Verringerungen der Konzentration der Dosiersuspension wurde verzichtet, da bereits eine Konzentration von 0,05 g/L großtechnisch schwer realisierbar sein wird. Für eine großtechnische Umsetzung der Einmaldosierung sollte die PAK-Suspension direkt vor der Dosierung verdünnt werden. Dies könnte durch einen Zwischentank realisiert werden, in dem die hochkonzentrierte Ausgangssuspension (üblicherweise im Bereich von mehreren g/L) vor jedem Filtrationszyklus auf die Zielkonzentration verdünnt wird.

In weiteren Experimenten wurden Möglichkeiten zur Verbesserung der Ausbildung einer homogenen und gleichmäßig verteilten PAK-Schicht auf der Membranoberfläche untersucht.

Zu diesem Zweck wurde die Anschwemmung der PAK an die Membran mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bzw. Fluxen bei einer Konzentration der Dosiersuspension von 0,2 g/L durchgeführt – die allgemeine Versuchsdurchführung erfolgte analog zum vorherigen Experiment. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 13) ergaben eine deutliche Verbesserung der Elimination bei höheren Einspülgeschwindigkeiten. Vermutlich führen die mit den höheren Geschwindigkeiten verbundenen erhöhten Scherkräfte zur Zerschlagung der Agglomerate. Diese Theorie konnte nicht abschließend geklärt werden. Für eine endgültige Bewertung sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

### 2.2.2 Arbeiten an der CEP

Die in Serbien eingesetzte Pilotanlage mit einer maximalen Kapazität von 30 L/h ist mit dem dizzyer® Labor-Membranmodul (Länge: 1,5 m) von DuPont ausgestattet, das eine Multibore®-Polyethersulfon (PES)-Hohlfasermembran mit einer Fläche von 0,2 m<sup>2</sup> verwendet. Die Versuche erfolgten im Inside-Out-Dead-End-Modus bei einem Flux von 100 LMH in 30-minütigen Zyklen. Zwischen den Filtrationszyklen erfolgte eine 20 sec Rückspülung mit Filtrat bei 230 LMH, gefolgt von einem 10 sec Forward-Flush. Vor Beginn der Versuchsreihe wurde jeweils eine chemische Reinigung mit Natriumhypochlorit (NaOCl) bei einer Konzentration von 200 ppm freiem Chlor (15 min) sowie eine saure Reinigung mit Schwefelsäure durchgeführt.

Untersucht wurde zunächst in entchlorigem Trinkwasser, inwiefern sich verschiedene Dosierstrategien des doppelten hybriden Membranprozesses mit PACL- und PAK-Dosierung auf die Adsorptionsleistung von Ibuprofen, Koffein und Diclofenac (Startkonzentration jeweils 1.2 µg/L) auswirken. Die Dosierstrategien waren: PAK-Einmaldosierung und anschließende kontinuierliche Flockung, simultane kontinuierliche Dosierung von PACL- und PAK sowie eine alternierende Dosierung im 5-min Rhythmus. Über eine Inline-Dosierung wurde das von der UDE in AP 3 hergestellte Adsorbens (Rohmaterial: Schlamm aus Oberflächenwasseraufbereitung) dosiert, welches die besten Adsorptionseigenschaften zeigte (PAK-Dosis = 20 mg/L) sowie das PACL Nüscofloc UF-A mit einer Konzentration von 2 mg Al/L. Beprobte wurden die jeweiligen Filtrationszyklen (Anzahl 3 bis 8) als jeweilige Sammelprobe über den gesamten Zyklus hinweg. Die wichtigsten untersuchten Varianten sowie die erzielten Ergebnisse zeigt Tabelle 1.

Basierend auf den Erfahrungen bisheriger Untersuchungen (wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben) wurde erwartet, dass die PAK-Einmaldosierung besser geeignet ist als die simultane Dosierung, da so die Kapazität der PAK bestmöglich ausgenutzt wird und eine zusätzliche Flockung den Prozess bei kontinuierlicher PAK-Dosierung verschlechtert (Schwaller et al. 2021). Tatsächlich stört in der simultanen Dosierung die Flockenbildung die Ausbildung einer gleichmäßig verteilten und homogenen PAK-Schicht, da die sich bildenden Flockenagglomerate aus Flockungsmittel und PAK aufgrund ihrer Größe an das Ende des Membranmoduls transportiert werden. Zudem wurde erwartet, dass die alternierende Dosierung die Nachteile der simultanen Dosierung ausgleicht und die Elimination vergleichbar ist, mit der Einmaldosierung.

Diese Erwartung erfüllte sich jedoch nicht. Nur für Koffein konnte mit  $73 \pm 7$  % Elimination bei der Einmaldosierung ein Ergebnis erzielt werden, welches im Mittel zwar etwas besser war als das bei der kontinuierlichen Dosierung, jedoch im Rahmen der Standardabweichung vergleichbar war. Eine deutliche Reduktion der Elimination von Koffein ergab sich wie erwartet bei einer zusätzlichen simultanen Flockung. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der anderen beiden OMPs, so zeigt sich ein anderes Bild. Der simultane Prozess zeigt hier ein

besseres Ergebnis, wenn auch nicht immer signifikant. Die alternierende Dosierung zeigte lediglich im Falle von Diclofenac das beste Ergebnis. Allgemein zeigt sich, dass Diclofenac aufgrund seiner guten Adsorbierbarkeit mit einer maximalen Entfernung von 94 % deutlich effizienter entfernt werden konnte als die beiden anderen Substanzen.

Die Untersuchungen ergaben, dass kein Dosierverfahren alle Zielsubstanzen gleichermaßen gut eliminieren konnte. Dies unterstreicht, dass sich auf Basis der maximalen Entfernungsraten kein Verfahrensansatz eindeutig hervorheben lässt, da die Leistungsfähigkeit stark substanzspezifisch variiert.

Tabelle 1: Ergebnisse der OMP-Elimination für verschiedene Dosierstrategien im hybriden Prozess

Dosierung (Zyklen)	Einmalig zu Beginn		Kontinuierlich		Alternierend (5 min)
	PAK (8)	PAK+PACL (8)	PAK (8)	PAK+PACL (8)	PAK+PACL (3)
<b>Ibuprofen</b>					
Mittelwert alle Zyklen	47	58	32	75	59
RSD, %	16	22	13	19	16
<b>Koffein</b>					
Mittelwert alle Zyklen	73	51	68	37	59
RSD, %	7	6	7	26	9
<b>Diclofenac</b>					
Mittelwert alle Zyklen	77	89	82	91	94
RSD, %	9	0	10	1.6	0.3

### 2.3 Arbeitspaket 2: Entwässerung von Schlamm aus der Trinkwasseraufbereitung

*Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwässerung und Vorkonditionierung von Schlämmen aus der Wasseraufbereitung, um auf diese Weise ein granuläres Grundmaterial für die Herstellung nachhaltiger Adsorbentien im Drehrohrofen zu gewinnen.*

Es wurden insgesamt vier verschiedene Schlämme aus Oberflächenwasser-Aufbereitungsanlagen auf ihre Eignung zur Produktion von Adsorbentien geprüft (Tabelle 4, Kapitel 8.3). Drei Schlämme (Ruhr, Rhein, Talsperre) konnten ohne Zusatz entsprechender Bindemittel für das AP 3 in eine granuläre Form überführt werden (Abbildung 2). Eine Sonderstellung nahm der vierte Schlamm aus der Rhein-Uferfiltrat-Aufbereitung ein. Durch den enthaltenen Anteil an Pulveraktivkohle erhält dieser Schlamm eine besondere Charakteristik, die ihn damit nicht nur durch seinen erhöhten Organik-Gehalt von herkömmlichen Schlämmen abhebt. In diesem Fall war zudem der gezielte Einsatz von Bindemitteln erforderlich, um ihn in eine granuläre Form zu überführen. Als Bindemittel wurden Melasse, Bentonit, Knochenleim, Stärke und Zellulose in unterschiedlichen Konzentrationen untersucht. Knochenleim, auch Glutinleim genannt, ist ein natürlicher, organischer Klebstoff, der durch Auskochen tierischer Abfälle gewonnen wird. Von allen untersuchten Varianten erzielten ausschließlich die mit Knochenleim konditionierten Produkte eine ausreichende mechanische Stabilität und Abriebfestigkeit – allerdings nur bei Verwendung großer Leimmengen. Deshalb wurde die Entwicklung mit diesem Ausgangsmaterial nicht weiterverfolgt.

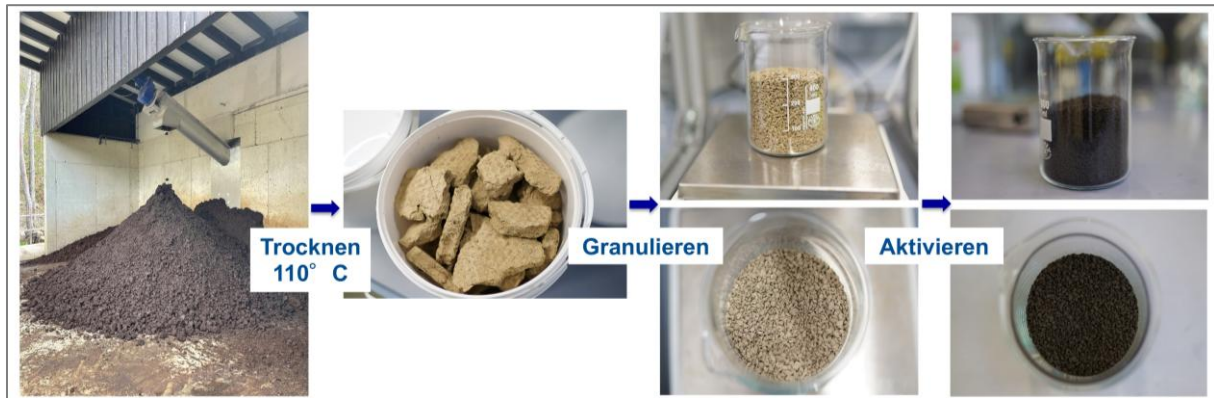


Abbildung 2: Herstellung des granulierten Grundmaterials zur Aktivierung

## 2.4 Arbeitspaket 3: Herstellung von Pulveraktivkohle aus vorkonditionierten Wasseraufbereitungsschlämmen

*Ziel dieses Arbeitspaketes war die Weiterverarbeitung der in AP2 gewonnen Grundmaterialien zu nachhaltigen Adsorbentien durch thermische Aktivierung.*

Zwei der in AP 2 hergestellten Grundmaterialien (Rhein, Ruhr) wurden im Labor-Drehrohrföfen zunächst auf je vier unterschiedliche Arten aktiviert. Die erhaltenen Adsorbentien wiesen eine niedrige Adsorptionskapazität für org. Spurenstoffe sowie eine sehr niedrige Iodzahl zwischen 46 mg/g und 84 mg/g auf. Die Iodzahl bezeichnet die Beladung eines Adsorbens mit Jod unter definierten Testbedingungen und wird häufig als Ersatzparameter für die innere Oberfläche und damit als Indikator für die Adsorptionskapazität eines Adsorbens verwendet. Die geringe Adsorptionskapazität ist vermutlich auf den niedrigen Gehalt an organischen Verbindungen und den hohen Anorganik-Anteil von 70 bis 75 % (siehe Tabelle 4 im Anhang) zurückzuführen.

Die innere Oberfläche und die Adsorptionseigenschaften hängen jedoch nicht nur von der Auswahl des zur Herstellung verwendeten Rohmaterials ab, sondern auch in hohem Maß von den Aktivierungsbedingungen. Um dies genauer zu untersuchen, wurde ein Testprogramm unter Verwendung statistischer Versuchsplanung entwickelt, bei dem die folgenden vier Faktoren in gleichmäßigen Schritten systematisch variiert wurden:

Aufheizrate – Aufheizdauer – Haltezeit bei  $T_{\text{Max}}$  – Menge Aktivierungsgas (hier Wasserdampf)

Hieraus resultierte eine Gesamtzahl von 27 unterschiedlich aktivierten Adsorbentien. Als Ausgangsmaterial diente dabei der Schlamm aus der Talsperren-Wasseraufbereitung, da er aufgrund seines hohen Organik-Gehalts (niedriger Glührückstand) als besonders vielversprechend galt.

Zur Herstellung wurde das Material zunächst unter Stickstoffatmosphäre auf 350° erhitzt. Danach folgte ein Aktivierungsprogramm, bei dem die o.g. vier Faktoren wie in Tabelle 2 beschrieben variiert wurden. Um Nichtlinearitäten besser abbilden zu können und zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde hier ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan verwendet, bei dem die Faktoren um sog. Sternpunkte und einen Zentralpunkt erweitert wurden. Sternpunkte sind axiale Punkte, die das Design über die faktoriellen Ebenen hinaus erweitern. Für jeden Faktor wurden zwei Sternpunkte hinzugefügt, bei welchen der entsprechende Faktor auf einen extremen Wert gesetzt wurde (entweder höher oder niedriger als die faktoriellen Ebenen), während alle anderen Faktoren auf mittlerer Einstellung verblieben. Sternpunkte sind entscheidend für die Erkennung von Nichtlinearitäten, da bei einem Design mit nur zwei Faktoreinstellungen Krümmungen im Verhalten bestimmter

Qualitätskriterien sonst nicht erkannt werden können. Der Zentralpunkt (alle Faktoren auf mittlerer Einstellung) wurde insgesamt viermal wiederholt, um so eine Schätzung des experimentellen Fehlers zu gewinnen.

Tabelle 2: Faktoreinstellungen für das Aktivierungsprogramm

	Aufheizrate in °C/h	Dauer der Heizrampe in min	Verweilzeit bei Maximaltemperatur	Verhältnis H <sub>2</sub> O/N <sub>2</sub>
<b>hoch</b>	300	60	40	0.2
<b>niedrig</b>	200	120	80	0

In diesen Versuchen wurde zur Bewertung die BET-Oberfläche gemessen – ein Parameter, der die innere Oberfläche eines Adsorbens beschreibt und maßgeblich die Adsorptionskapazität bestimmt. Der Rohschlamm wies eine spezifische Oberfläche von 26 m<sup>2</sup>/g auf, während die BET-Oberflächen der aktivierten Adsorbentien zwischen 112 m<sup>2</sup>/g und 201 m<sup>2</sup>/g lagen.

Obwohl diese Werte deutlich unter denen kommerziell erhältlicher Aktivkohlen liegen, entsprechen sie den in der Literatur angegebenen Daten für aktivierte Schlämme aus der Wasseraufbereitung. Shumiye et al. (2013) berichteten von einer BET-Oberfläche von 279 m<sup>2</sup>/g für einen chemisch aktivierten Wasseraufbereitungs-Schlamm, während Belzile & Chen (2015) in ihrer Metastudie angaben, dass spezifische Oberflächen durchschnittlich ~ 100 m<sup>2</sup>/g betragen und stark zwischen 28 und 230 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> variieren. Röntgenspektroskopische Untersuchungen ergaben, dass es sich bei den Adsorbentien mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein Ton-Kohlenstoff-Kompositmaterial handelt, da der anorganische Anteil im Schlamm nach der Aktivierung verbleibt.

Zur Untersuchung der Adsorptionseigenschaften der Adsorbentien wurden sog. „Batchversuche“ durchgeführt, bei denen wässrigen Lösungen verschiedener organischer und anorganischer Substanzen jeweils eine definierte Menge der einzelnen Adsorbentien zugesetzt wurde. Während in Deutschland ein synth. Modellwasser (Reinstwasser mit Zugabe verschiedener Salze und der org. Modellsubstanz Brilliantblau FCF, im Folgenden als BBF abgekürzt) verwendet wurde, konnten in Serbien Versuche mit einem dechlorierten Trinkwasser und den org. Spurenstoffen Koffein, Diclofenac und Ibuprofen durchgeführt werden. Die Startkonzentration betrug 5 mg/L für BBF und jeweils 1 µg/L für die anderen org. Substanzen. In Abbildung 3 sind beispielhaft für BBF und Ibuprofen die relativen Eliminationen für alle hergestellten Adsorbentien dargestellt. Die Stoffe Koffein und Diclofenac zeigten ein ähnliches Muster. Adsorbens #16 zeigte die höchste Entfernungsleistung für alle Substanzen, gefolgt von den Adsorbentien #8 und #5. Die großen Fehlerbalken (experimenteller Gesamtfehler) resultieren aus der hohen kombinierten Messunsicherheit der GC-MS-Analytik, die bspw. für Ibuprofen 16 % betrug. Eine solche Messunsicherheit ist im Bereich der Spurenstoffanalytik gängig, die US-EPA gibt beispielsweise einen Richtwert von 30 % vor (Munch et al., 2012).

Die erzielten Ergebnisse konnten für die Entwicklung sog. Antwortflächenmodelle für die Substanzen Ibuprofen, Koffein und BBF verwendet werden. Solche statistischen Modelle beschreiben die Ausprägung eines bestimmten Qualitätskriteriums (hier beispielsweise die rel. Elimination eines bestimmten Störstoffes) in Abhängigkeit von ausgewählten Einflussfaktoren, hier also der o.g. vier Faktoren bei der Aktivierung. Mithilfe eines aussagekräftigen Modells ist es zum einen möglich, Vorhersagen zu treffen („Wie ist die Ausprägung des entsprechenden Qualitätskriteriums bei einer vordefinierten Faktoreinstellung?“) zum anderen kann der Einfluss einzelner Faktoren auf bestimmte Qualitätskriterien untersucht werden.

Für keine der drei o.g. Substanzen konnte ein Einfluss der Verweilzeit bei Maximaltemperatur auf die Adsorptionsleistung für die untersuchten Störstoffe festgestellt werden. Der kombinierte Einfluss von Aufheizrate und Aufheizzeit ist beispielhaft für die Elimination von BFF in Abbildung 14 (Anhang, Kapitel 8.4.2) dargestellt. Die farbigen Ebenen im 3D-Diagramm visualisieren die vom RSM-Modell vorhergesagte Entfernung der jeweiligen Substanz. Die Farben im Diagramm variieren von grün (geringe Entfernung) bis rot (hohe Entfernung). Sowohl für BFF als auch für alle anderen Zielsubstanzen führten höhere Heizraten und längere Heizrampen zu einer höheren Elimination. Die Dosierung von Wasserdampf ermöglichte es, bei niedrigeren Heizraten und kürzeren Heizrampen (und damit geringeren Endtemperaturen) Adsorbentien herzustellen, die eine vergleichsweise gute Adsorptionskapazität für BFF aufwiesen. Die Kombination von hohem thermischen Energieeintrag und Wasserdampfdosierung erzielte jedoch einen gegenteiligen Effekt.

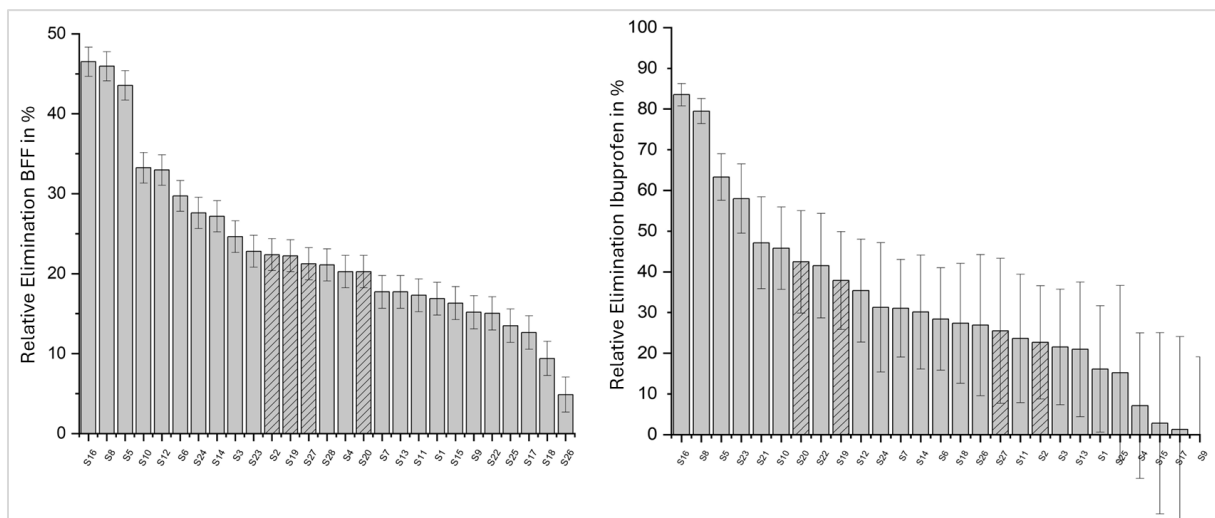


Abbildung 3: Relative Eliminationen für BFF (links) und Ibuprofen (rechts). Schraffierte Balken kennzeichnen die Zentralpunkte. Die Fehlerbalken kennzeichnen den experimentellen Gesamtfehler.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass aus einem Schlamm aus der Talsperren-Wasseraufbereitung erfolgreich ein Adsorbens für die Wasseraufbereitung hergestellt werden konnte. Besonders geeignet für die Herstellung solcher Adsorbentien sind Schlämme mit einem hohen Organik-Anteil. Während die Aufheizrate des Ofens und die Dauer der Heizrampe einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der produzierten Adsorbentien hatten, erwies sich eine verlängerte Behandlung des Materials bei der finalen Aktivierungstemperatur als unbedeutend. Höhere Heizraten und längere Heizrampen führten zu einer besseren Adsorptionskapazität. Der Einsatz von Wasserdampf ist hilfreich, um Adsorbentien bei geringstmöglichem thermischen Energieeinsatz herzustellen. Allerdings kann Wasserdampf bei zu langen Heizrampen und hohen Heizraten die Adsorptionskapazität beeinträchtigen. Daher ist der Einsatz eines statistischen Modells unerlässlich, um eine optimale Kombination aus maximaler Adsorptionsleistung und minimalem Energieverbrauch zu erreichen und zugleich einer „Überaktivierung“ (sprich dem Kollaps des Mikroporensystems) vorzubeugen.

Abhängig von der Rohwasserqualität und den Eigenschaften des Schlammes, insbesondere dessen organischem Gehalt, erscheint eine Substitution vor Ort benötigter PAK durch lokal produzierte Öko-Adsorbentien theoretisch denkbar. Da für die Adsorption von unpolaren organischen Mikroschadstoffen hauptsächlich der organische Anteil der Adsorbentien verantwortlich ist, bleibt der Tonanteil des Materials weitgehend ungenutzt. Dieser könnte –

aufgrund der Kationenaustauschfähigkeit von Tonmineralen (Püttmer, 2003) – zur Adsorption von Schwermetallen genutzt werden. Somit ist eine Doppelfunktion des Materials denkbar, insbesondere in Situationen, in denen neben organischen Mikroschadstoffen auch Schwermetalle ein Problem darstellen. Diese Doppelnutzung soll – neben der energetischen Optimierung – in weiteren Untersuchungen am Lehrstuhl Wassertechnik vertieft untersucht werden. Die vollständigen Ergebnisse der in diesem Arbeitspaket durchgeführten Untersuchungen sind in Landwehrkamp et al. 2025 (siehe Kapitel 7.2) veröffentlicht.

## 2.5 Arbeitspaket 4: Algenstudie

*Ziel dieses Arbeitspaketes war die Identifikation von besonders relevanten Algenarten und -Gruppen in serbischen Oberflächengewässern.*

Es wurde ein saisonales Monitoring der Algengattungen in drei für die Wasserversorgung genutzten Oberflächenwasserreservoirs (Vrutci, Čelije und Bovan) in Serbien durchgeführt (Probennahmetiefe: 0-22 m). Zur Bestimmung der aktiven Biomasse der Algenpopulationen wurden biologische Parameter wie die Gesamtzellzahl mittels Hämozytometer (LeGresley & McDermott, 2010) sowie die spektrophotometrische Bestimmung der Chlorophyll-a-Konzentration (APHA, 1995) als Indikator für die Biomasseproduktivität und den trophischen Zustand herangezogen. Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Algenpolysaccharide, die Bestandteile der extra- und intrazellulären organischen Substanz von Algen sind.

Im Reservoir Vrutci wurde in allen vier Jahreszeiten eine dominante Präsenz von Algen der Stämme *Cyanobacteria* und *Bacillariophyta* beobachtet. Vorwiegend traten filamentöse Cyanobakterien auf, wobei *Planktothrix rubescens* die häufigste Art darstellte und im Herbst 2021 die höchste Abundanz aufwies. Neben Cyanobakterien wurden im Herbst 2021 und Frühjahr 2022 auch einzellige (*Gyrosigma acuminatum*) und koloniale (*Fragilaria crotonensis* und *Asterionella formosa*) Mikroalgen des Stammes *Bacillariophyta* identifiziert. Die Chlorophyll-a-Konzentration variierte zwischen 1,3 und 4,7 mg/m<sup>3</sup>, was auf einen oligotrophen bis oligo-mesotrophen Zustand des Gewässers hindeutet.

Im Reservoir Čelije zeigten die Ergebnisse eine dominante Präsenz von Vertretern der drei Stämme *Cyanobacteria*, *Chlorophyta* und *Bacillariophyta*. In allen untersuchten Wasserproben war die Abundanz der Algen des Stammes *Bacillariophyta* signifikant höher als in anderen Stämmen. Als dominante Algengattungen wurden *Fragilaria*, *Synedra* und *Nitzschia* (Stamm *Bacillariophyta*), *Actinastrum*, *Coelastrum*, *Tetraedron* und *Scenedesmus* (Stamm *Chlorophyta*) sowie Cyanobakterien der Gattung *Lymnothrix* identifiziert. Die Analyse der Chlorophyll-a-Konzentration während der Frühlings- (0 m, 3,5 m, 7 m), Sommer- (0 m, 3,5 m, 7 m) und Herbstperioden (0 m) ergab Werte zwischen 3,3 und 10 mg/m<sup>3</sup>, was auf einen oligo-mesotrophen Zustand des Gewässers (Trophiestufe III) hindeutet. In Proben aus der größten Tiefe (22 m) im Frühling, Sommer und Herbst sowie in allen Tiefen (0-22 m) im Winter zeigte das Wasser oligotrophe Eigenschaften (Chlorophyll-a-Konzentration: 0,7 bis 1,3 mg/m<sup>3</sup>). Die Polysaccharid-Analyse ergab Werte unterhalb der Nachweisgrenze.

Im Reservoir Bovan wurde eine dominante Präsenz von Vertretern zweier Stämme, *Chlorophyta* und *Bacillariophyta*, festgestellt. In allen untersuchten Wasserproben war die Abundanz der Kieselalgen signifikant höher als die der Grünalgen, mit Ausnahme der Herbstperiode in 0 m Tiefe. Als dominante Gattungen wurden *Fragilaria*, *Synedra*, *Cyclotella* und *Navicula* (Stamm *Bacillariophyta*) sowie *Pediastrum*, *Coelastrum*, *Scenedesmus*, *Tetraedron* und *Cosmarium* (Stamm *Chlorophyta*) identifiziert. Die Analyse der Chlorophyll-a-Konzentration (0,7 bis 2,7 mg/m<sup>3</sup>) deutete auf ein oligotrophes Gewässer (Trophiestufe II) in

fast allen Jahreszeiten hin. Lediglich in der Sommerperiode zeigte das Wasser oligomesotrophe Eigenschaften (Trophiestufe III) mit Chlorophyll-a-Konzentrationen von 4,7 mg/m<sup>3</sup> (0 m Tiefe) und 4 mg/m<sup>3</sup> (10 m Tiefe). Die Polysaccharid-Analyse ergab auch hier Werte unterhalb der Nachweisgrenze.

Basierend auf o.g. Untersuchungen wurden die einzellige Grünalge *Chlorella vulgaris* und das filamentöse solitäre Cyanobakterium *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) als nicht-toxische Arten für die Laborversuche in Serbien ausgewählt und kultiviert. Für die in Deutschland durchgeführten Versuche zum Einfluss verschiedener Algenarten auf die Prozessleistung des hybriden Membranprozesses wurden ebenfalls *Chlorella vulgaris* und *Spirulina platensis* kultiviert sowie zusätzlich das limnische Cyanobakterium *Microcystis panniformis* und die Kieselalge *Asterionella formosa*.

### 2.6 Arbeitspaket 5: Einfluss verschiedener Algenarten auf die Prozessleistung und -optimierung

*Ziel dieses Arbeitspaketes war die Untersuchung des Einflusses verschiedener Algenarten und -morphologien auf die Filtrationsleistung und Adsorptionseffizienz.*

Sowohl in Serbien als auch in Deutschland wurden Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Algenarten auf das Adsorptionsverhalten (CEP) sowie das Fouling im hybriden Prozess (UDE) durchgeführt. Hierfür kamen Filtrationsexperimente mit unterschiedlichen Algenarten zum Einsatz, die sich hinsichtlich ihrer Zellmorphologie unterscheiden. Die Auswahl der Algenarten erfolgte auf Grundlage der Ergebnisse aus Arbeitspaket 4 (siehe Kapitel 2.5). Die Filtrationsexperimente wurden unter optimierten Prozessbedingungen mit zwei vollautomatischen Membranfiltrationsanlagen durchgeführt.

#### 2.6.1 Einfluss verschiedener Algenarten auf Prozessleistung und Optimierung durch vorgeschaltete Flockung

Die UDE nutzte eine Anlage der Firma Demcon convergence, die mit einem Inside-Out-Multibore®-Membranmodul von DuPont (Länge: 0,3 m; Membranfläche: 0,01 m<sup>2</sup>) ausgestattet wurde. Sie arbeitete mit konstantem Druck (TMP etwa 250 mbar) und einem Start-Flux von etwa 70 LMH. Jeder Test bestand aus fünf Zyklen von jeweils 30 Minuten Filtration. Zwischen den einzelnen Zyklen erfolgten Spülungen bei gleichem Druck für jeweils 20 Sekunden. Nach jedem Test wurde die Membran mit 200 ppm NaOCl (10 min) sowie Zitronensäure bei pH4 (10 min) gereinigt.

Die Algen *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis*, *Microcystis panniformis* und *Asterionella formosa* wurden sowohl im intakten als auch lysierten Zustand untersucht. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den Einfluss des Zellzustands auf die jeweiligen Prozesse differenziert zu bewerten und potenzielle Unterschiede im Verhalten der Algen unter verschiedenen Bedingungen zu erfassen. Außerdem erfolgte der Einsatz einer 1:1-Mischung (intakt/lysiert), was die natürlichen Bedingungen in Gewässern besser widerspiegelt. Lysiert wurden die Algen mit Hilfe eines Hochleistungs-Dispergiergeräts (beschrieben in Laksono, 2021). Die Algen-Konzentration lag in allen Fällen bei etwa 1 bis 3·10<sup>8</sup> Zellen/L.

Die Abbildung 4a zeigt beispielhaft das Ergebnis der Fouling-Untersuchung für *Microcystis panniformis*. In allen drei Fällen ist eine Abnahme der normierten Permeabilität über fünf Filtrationszyklen zu beobachten. Die lysierten Zellen verursachen das stärkste Fouling. Nach fünf Zyklen beträgt der Permeabilitätsverlust hier bereits mehr als 36 %. Im Vergleich dazu

führen die intakten Zellen im gleichen Zeitraum lediglich zu einer Einbuße von etwa 19 %. Dies unterstreicht, dass die bei der Zell-Lyse freigesetzten organischen Zellbestandteile deutlich stärker zum Membranfouling beitragen als intakte Algenzellen, was in anderen Studien zu dieser Algenart bestätigt wurde (Liu et al. 2017).

Intakte Zellen führen lediglich zu einem Fouling auf der Membran, was jedoch nur leicht hydraulisch reversibel war, da die einzelnen Spülungen nur zu einer leichten Regeneration führten. Die Zellen dieser Algenart sind mit 3 bis 7  $\mu\text{m}$  deutlich größer als die Membranporen (etwa 20 nm), weshalb sie nicht in die Poren eindringen können. Zudem bilden sie häufig Kolonien (von wenigen zehn  $\mu\text{m}$  bis hin zu mehreren 100  $\mu\text{m}$ ), die aufgrund starker EPS-Bildung sehr schleimig sein können (Xu et al., 2014), was die geringe hydraulische Reversibilität erklären könnte. Die gelösten organischen Substanzen aus den lysierten Zellen hingegen können in die Membranporen eindringen und diese verblocken, was zu einem schnellen und irreversiblen Rückgang der Permeabilität geführt hat (20 % allein im ersten Zyklus), der sich nur durch gezielte chemische Reinigungsmaßnahmen wieder beheben lässt.

Ein völlig anderes Bild ergab sich bei der Filtration nach einer vorgeschalteten Flockung. Hierbei wurde erneut das auf Basis der Voruntersuchungen ausgewählte PACL Nüscofloc UF-A eingesetzt, dosiert mit einer Konzentration von 2 mg Al/L. Aufgrund der geringen Durchflüsse war eine Inline-Flockung anlagentechnisch nicht realisierbar, sodass die Flockung des Feed stattdessen als Becher-Flockung erfolgte.

Abbildung 4b zeigt deutlich, dass die Flockung die Filtrationseigenschaften aller Proben signifikant verbessert. Die Spülungen zeigen bessere Wirksamkeit, somit eine bessere Rückspülbarkeit des Systems und auch das hydraulisch irreversible Fouling wird deutlich verringert und liegt nach fünf Zyklen bei nur noch 10 bis 12 %. Auch in den Versuchen mit lysierten Zellen kann die Flockung die negativen Auswirkungen auf die Membranpermeabilität erheblich abmildern. Der Grund dafür liegt in der vorgeschalteten Entfernung der bei der Zell-Lyse freigesetzten gelösten organischen Substanzen – wie Proteine, Polysaccharide und Nukleinsäuren – durch eine Mitfällung, also die Einbindung in die entstehenden Flocken während des Flockungsprozesses.

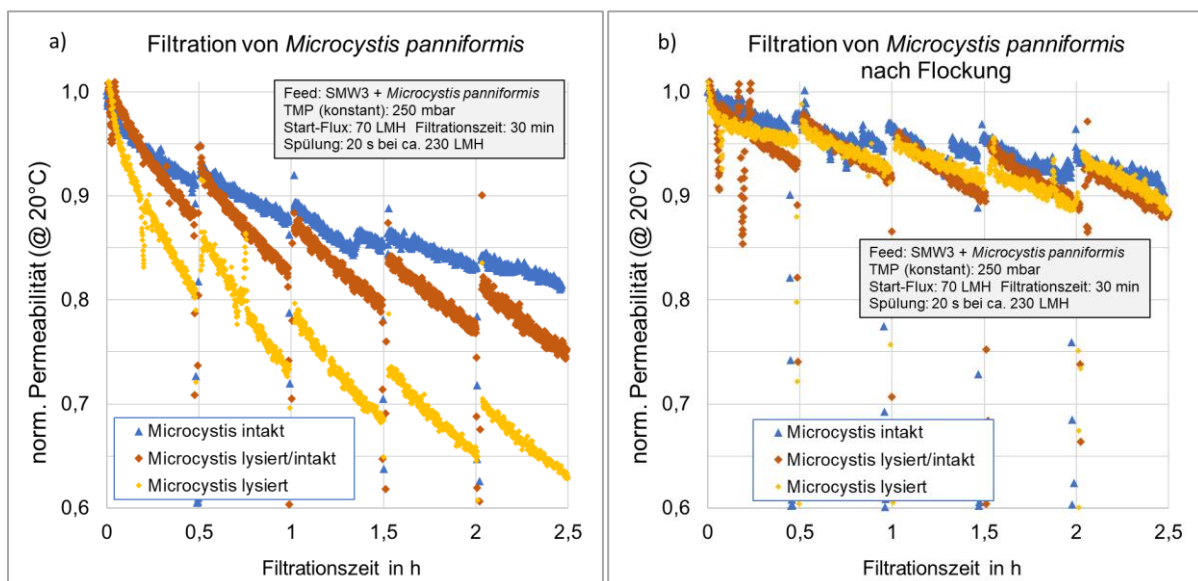


Abbildung 4: Fouling-Untersuchungen für die Algenart *Microcystis panniformis* ohne Flockung (a) und nach vorherigem Flockungsschritt (b)

Neben *Microcystis panniformis* wurden drei weitere Algenarten in den drei Zuständen/Mischungen untersucht. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass bei der Filtration von *Chlorella vulgaris* sehr hohe und konstante Permeabilitätsverluste für alle untersuchten Zustände entstehen. Dies ist möglicherweise auf ihre kleine Größe (ca. 2 bis 10 µm) zurückzuführen, was eine kompakte Deckschicht verursacht. *Asterionella formosa* (sternförmig mit einem Durchmesser zwischen 20 bis 160 µm) zeigt im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Arten ein eher moderates Fouling, jedoch steigt auch hier der Permeabilitätsverlust mit zunehmender Zell-Lyse, allerdings nur auf 22 %. Es handelt sich um eine Kieselalge (Diatomee) mit Silikat-Zellwänden, deren Bruchstücke beim Lysieren weniger gelöste organische Substanzen freisetzen.

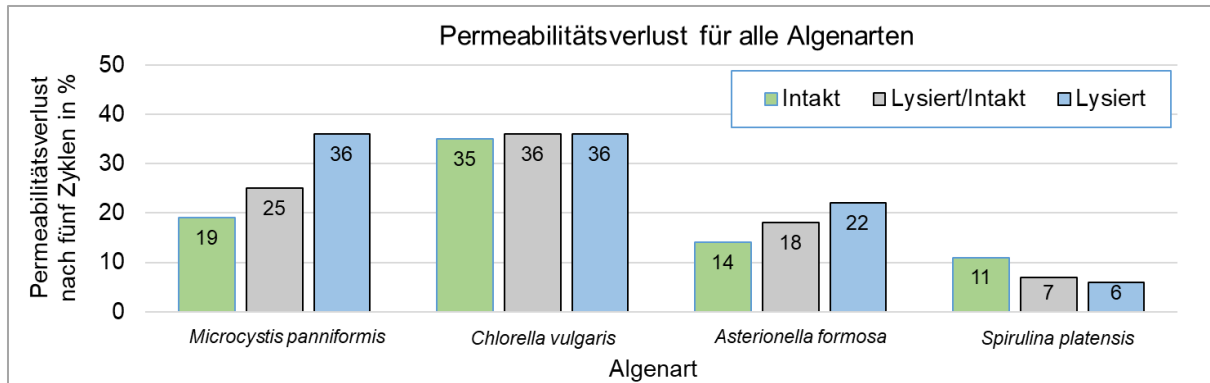


Abbildung 5: Permeabilitätsverlust nach fünf Filtrationszyklen (ohne vorherige Flockung) für alle Algenarten

Die letzte Algenart *Spirulina platensis* ist filamentös und relativ groß (>100 µm lang), was der Grund dafür sein könnte, dass sie am wenigsten Fouling verursacht. Als einzige Algenart provoziert sie überraschenderweise im lysierten Zustand geringere Permeabilitätsverluste als im intakten, wenn auch nur mit kleinen Unterschieden. Anscheinend werden bei der Zell-Lyse kaum foulingrelevante gelöste Stoffe freigesetzt. Von allen Arten zeigt sie die besten Filtrationseigenschaften. Der Einfluss der vorgeschalteten Flockung wirkte sich für *Spirulina platensis*, *Asterionella formosa* und *Chlorella vulgaris* wie bei der bereits diskutierten *Microcystis panniformis* positiv auf die Prozessstabilität aus.

### 2.6.2 Einfluss verschiedener Algenarten auf Adsorptionsleistung

Der serbische Partner (CEP) hat zunächst in umfangreichen Batch-Untersuchungen getestet, inwiefern die Anwesenheit der zwei Mikroalgenarten *Chlorella vulgaris* und *Spirulina platensis* in verschiedenen Wachstumsphasen (exponentiell und stationär) die Adsorption von Ibuprofen, Koffein und Diclofenac an zwei kommerziell erhältlichen PAKs beeinflusst. Die Experimente wurden mit und ohne vorheriger Filtration durchgeführt, um zu überprüfen, ob unterschiedliche Einflüsse zu beobachten sind, wenn die gesamte organische Algenmasse (tAOM) oder nur die gelösten organischen Algensubstanzen (dAOM) vorhanden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Morphologie der Mikroalgen nur geringe Auswirkungen auf die Effizienz der Mikroschadstoff-Elimination hat. In einigen Fällen wurden variationsabhängige Unterschiede in Abhängigkeit von der Wachstumsphase beobachtet. Beispielsweise war die Elimination von Diclofenac durch das Vorhandensein von *S. platensis* in der stationären Phase deutlich geringer als in Versuchen mit dieser Alge in der exponentiellen Phase. Die vollständigen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Khakimova et al. (siehe 7.2) veröffentlicht.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden vom serbischen Partner (CEP) zusätzlich Untersuchungen zum Einfluss der Algen *Chlorella vulgaris* und *Arthrospira platensis* auf die Adsorptionsleistung von Ibuprofen, Koffein und Diclofenac (Startkonzentration jeweils 1.2 µg/L) im hybriden Membranprozess untersucht. Zum Einsatz kam die bereits in AP 1b (Kapitel 2.2.2) beschriebene Labor-Versuchsanlage. Dosierte wurde (über eine Inline-Dosierung) das von der UDE in AP 3 hergestellte Adsorbens (Rohmaterial: Schlamm aus Oberflächenwasseraufbereitung), welches die besten Adsorptionseigenschaften zeigte (PAK-Dosis = 20 mg/L) sowie das PACL Nüscofloc UF-A mit 2 mg Al/L. Die Tests erfolgten basierend auf vorherigen Optimierungsversuchen mit einer simultanen/kontinuierlichen Dosierung von PAK und PACL sowie einer alternierenden Variante (im fünf-Minuten-Wechsel) in vier verschiedenen Wässern: zwei synthetischen Wässern, die entweder mit den beiden genannten Algen versetzt waren oder nicht, sowie zwei unterschiedlichen Oberflächenwässern.

In den algeneisernen synthetischen Wässern erzielten beide Dosier-Methoden hohe Eliminationsgrade – insbesondere für Diclofenac (> 83 %) und Ibuprofen (bis zu 96 %), wobei die Entfernung von Koffein bei alternierender Dosierung leicht höher war. Die Anwesenheit von Algen verringerte im Allgemeinen die OMP-Elimination, insbesondere während der stationären Wachstumsphase. In natürlichen Gewässern war die OMP-Entfernung deutlich geringer, was auf das Vorhandensein von konkurrierender gelöster Hintergrund-Organik zurückzuführen ist. Die vollständigen Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Bogunović Koljaja et al. (siehe 7.3, aktuell in Vorbereitung) veröffentlicht werden.

### 2.7 Arbeitspaket 6: Filtrationsversuche mit natürlichem Oberflächenwasser

Um die Prozessstabilität des hybriden Prozesses in einem realen Wasser zu überprüfen, wurde die bereits in AP 1a (Kapitel 2.1.2) beschriebene SIMA-tec-Pilotanlage der deutschen Partner in einer Oberflächenwasser-Aufbereitungsanlage an der Ruhr eingesetzt. Dosierte wurde (über eine Inline-Dosierung) ein kommerziell erhältliches Pulveraktivkohleprodukt (PAK 2 – siehe Kapitel 8.4.1), da das in AP 3 mit dem Labordrehrohrföfen hergestellte Adsorbens nicht in ausreichend großen Mengen zur Verfügung gestellt werden konnte (PAK-Dosis: 5 und 20 mg/L). Eine Flockung erfolgte ebenfalls Inline unter erneuter Verwendung des PACL Nüscofloc UF-A mit einer Konzentration von 2 mg Al/L, da der DOC-Gehalt der Ruhr zu Beginn der Untersuchungen niedrig war (2 mg DOC/L).

#### 2.7.1 Kurzzeitversuche

Zunächst erfolgten aufbauend auf den Untersuchungen aus AP 1a Kurzzeitversuche zum Einfluss verschiedener Dosierstrategien auf die Prozessstabilität (siehe Abbildung 6). Die direkte Filtration von unbehandeltem Ruhrwasser führte zu hohem irreversiblen Fouling und einem deutlichen Permeabilitätsverlust über die Zeit (37 % nach fünf Zyklen). Die alleinige Dosierung von PAK – selbst in höherer Dosierung – reduzierte das Fouling nur geringfügig (32 % bei 20 mg PAK/L) und reichte nicht aus, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Erst durch den Einsatz von PACL wurde das Fouling deutlich verringert (10 % Permeabilitätsverlust), was auf die wirksame Entfernung organischer und kolloidaler Foulingsubstanzen hinweist. Die Kombination von PACL und PAK lieferte ein vergleichbares Ergebnis (12 % Permeabilitätsverlust). Nach jedem Versuch erfolgte zunächst eine alkalisch-oxidative Reinigung (30 min) mit 200 ppm NaOCl bei einem pH-Wert von 10 (eingestellt mit Natriumhydroxid), gefolgt von einer sauren Reinigung (30 min) bei einem pH-Wert von 4 (eingestellt mit Zitronensäure). Eine rein oxidative Reinigung erzielte bei einmaligem Einsatz

nicht immer den erwünschten Erfolg, weshalb die pH-Anhebung in den ersten Schritt integriert wurde.

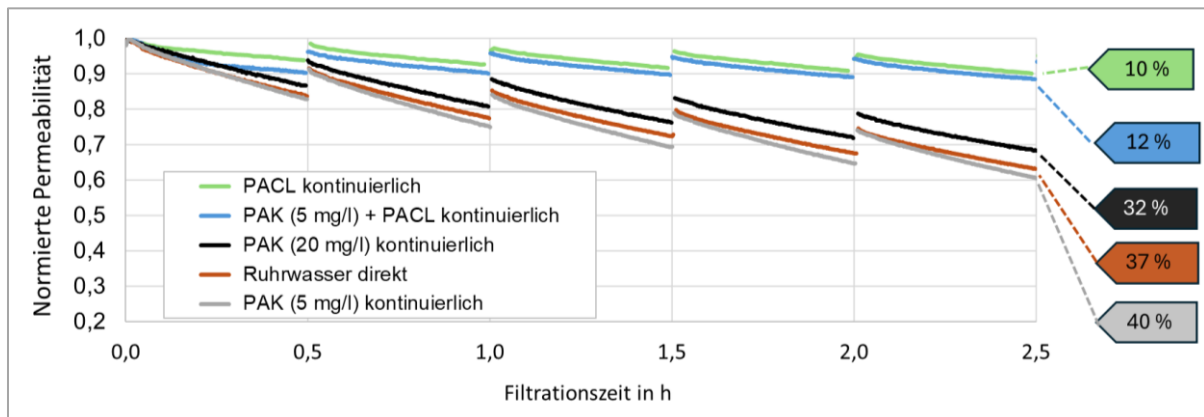


Abbildung 6: Einfluss verschiedener Dosierstrategien auf die Prozessstabilität in Kurzzeitversuchen

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Flockung mit PACL, vergleichbar zum Ergebnis von AP 1a, die effektivste Maßnahme zur Reduktion des Membranfouling darstellt. Der Einsatz von PAK zeigt nur dann Potenzial, wenn die Dosierung ausreichend hoch ist, was jedoch aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nicht zu rechtfertigen ist. Der primäre Zweck einer PAK-Dosierung liegt allerdings nicht in der Foulingkontrolle, sondern einer effektiven OMP-Elimination.

### 2.7.2 Langzeitversuche

Im Anschluss erfolgten Langzeitversuche mit dem Oberflächenwasser der Ruhr (siehe Abbildung 7). Wie bereits in den Kurzzeitversuchen fällt die Permeabilität bei direkter Ruhrwasser-Aufbereitung (Referenzversuch) schnell ab. In zwei durchgeführten Versuchen verursachte ein hohes hydraulisch irreversibles Fouling bereits nach wenigen Stunden einen Permeabilitätsverlust von etwa 70 %. Die nach jedem Versuch durchgeführten chemischen Reinigungen (analog zu Kapitel 2.7.1) erwiesen sich jedoch auch hier als ausreichend, um das vorhandene Fouling vollständig zu entfernen.

Bei kontinuierlicher Dosierung von PACL in den nächsten beiden Versuchen zeigt sich erneut der positive Effekt einer Flockung durch die vorhergehende Entfernung foulingverursachender Substanzen. In beiden Versuchen verlief der Prozess über mehrere Tage stabil. Im zweiten Versuch wurde im Rohwasser ein Anstieg der DOC-Konzentration von vorher 2 auf nun 2,5 mg/L verzeichnet, was den leicht stärkeren Abfall der Permeabilität in diesem Versuch erklären kann. Jedoch stellte sich auch hier am Ende des Versuches ein stabiler Betrieb ein.

Im nächsten Versuch wurde PACL ausschließlich während der ersten acht Minuten eines Filtrationszyklus zudosiert (Precoating), um zu untersuchen, ob trotz der insgesamt geringeren Dosiermenge ein stabiler Betrieb erreicht werden kann. Dabei zeigte sich in den einzelnen Filtrationszyklen ein deutlich erhöhter, jedoch hydraulisch reversibler Permeabilitätsverlust. Im Vergleich zum Versuch mit kontinuierlicher Flockung lag das mittlere Permeabilitätsniveau niedriger, dennoch wurde am Ende ein stabiler Betrieb erreicht. Die in den Anfangsminuten gebildete Flockendeckschicht erwies sich somit als wirksam, Foulingsubstanzen durch Adsorption oder sterische Effekte zurückzuhalten und verhinderte dadurch ein weitergehendes, irreversibles Fouling an der Membran. Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wäre für diesen Prozess zwar mit einem leicht erhöhten Energiebedarf zu rechnen, da bei gleichbleibender Aufbereitungsmenge ein höherer

Betriebsdruck erforderlich ist. Dem gegenüber steht jedoch eine signifikante Reduktion der Betriebskosten, da durch die verringerte Dosierung des Flockungsmittels Einsparungen von etwa 70 % erzielt werden können. Da Flockungsmittel ohnehin einen wesentlichen Kostenfaktor im hybriden Prozess darstellen, wirkt sich deren Reduktion besonders positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus.

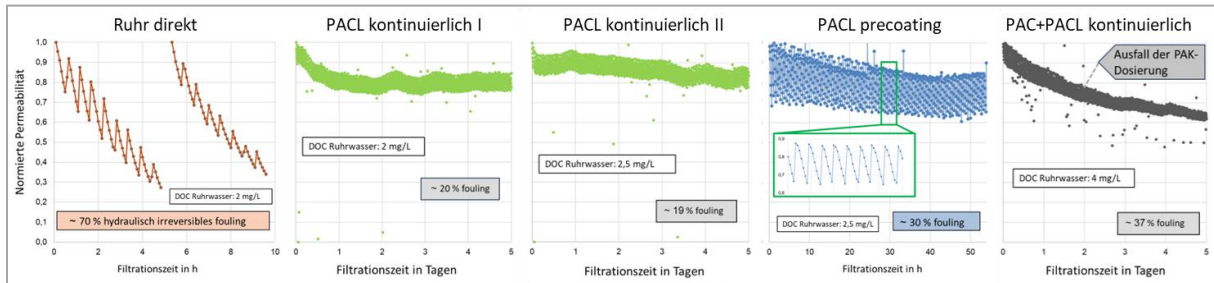


Abbildung 7: Einfluss verschiedener Dosierstrategien auf die betriebliche Stabilität in Langzeitversuchen

Im letzten Versuch wurde neben der kontinuierlichen Dosierung von PACL auch PAK mit einer Dosis von 5 mg/L dosiert. Dabei zeigte sich ein deutlicherer Rückgang der Permeabilität (nach fünf Tagen etwa 37%). Auf Grundlage der Kurzzeituntersuchungen war nicht von einem negativen Einfluss des PAK auszugehen. Daher könnte die an diesem Versuchstag ungewöhnlich hohe DOC-Konzentration im Ruhrwasser (4 mg/L) für den beobachteten Effekt verantwortlich sein. Dass PAK nicht allein ursächlich ist, zeigt sich auch daran, dass nach einem anlagenbedingten Ausfall der PAK-Dosierung (nach etwa zwei Tagen) der Abfall der Permeabilität dennoch anhielt. Um einen stabilen Betrieb wiederherzustellen, wären daher andere Gegenmaßnahmen erforderlich, beispielsweise eine Erhöhung der PACL-Konzentration.

Zusammenfassend zeigten die Langzeitversuche, dass die direkte Aufbereitung des Oberflächenwassers ohne Dosierung von Flockungsmittel zu starkem, überwiegend irreversiblen Fouling führt, welches nur durch chemische Reinigungen entfernt werden kann. Eine kontinuierliche Inline-Flockung ermöglicht dagegen einen stabilen Betrieb und reduziert das Fouling deutlich, selbst bei leicht ansteigendem DOC-Gehalt. Das Flockungs-Precoating erwies sich ebenfalls als wirksam, wobei das Fouling hydraulisch reversibel blieb und durch geringeren Flockungsmiteleinsatz wirtschaftliche Vorteile entstehen. Die Kombination aus PACL und PAK führte unter höherer DOC-Belastung zu verstärktem Fouling, was auf die Notwendigkeit zusätzlicher Steuerungsmaßnahmen hinweist, wie beispielsweise eine Erhöhung der PACL-Konzentration.

### 3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

	Personal	Verbrauchsmittel	Reisemittel	sonstige Ausgaben
UDE	207.131,04 €	-	6.305,83 €	4.319,34 €
UNS	11.059.827 RSD	2.470.531,32 RSD	-	50.000 RSD
Projekt-Gesamtausgaben	beantragt: 345.535,37 €		verausgabt: 345.417,99 €	

#### **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Zur Erreichung der Projektziele des Verbundvorhabens waren die geleisteten Arbeiten unbedingt notwendig.

#### **5 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die im Projekt erzielten Ergebnisse finden an der UDE in den Vorlesungen „Water Treatment I: Adsorption“ und der Vorlesungsreihe „Membrane Technology“ Berücksichtigung. Darüber hinaus wurde in der Vorlesungsreihe „Water Treatment II“ eine Vorlesung „Hybrid Processes“ ins Leben gerufen, welche sich explizit mit dem PAK-UF Prozess beschäftigt. In einem aktuellen Forschungsprojekt namens „WE-Africa“ können die im Projekt gewonnen Erkenntnisse zudem international und sehr direkt verbreitet werden. Das Projekt „WE-Africa“ zielt darauf ab, an den akademischen Partnerinstitutionen in Ägypten, Ghana und Marokko ein Wissenszentrum für Membrantechnologie einzurichten. Dieses Zentrum soll als Plattform dienen, um innovative und nachhaltige Lösungen für Herausforderungen im Wasser- und Energiesektor in Afrika bereitzustellen. Nachhaltige Lösungen wie bspw. die lokale Herstellung von Adsorbentien aus Abfallprodukten wie im Projekt demonstriert sind aufgrund der ökonomischen und infrastrukturellen Situation in einigen der Partnerländer von besonderer Bedeutung. Die Zusammenarbeit mit den deutschen Wasserwerken (Betrieb der Ultrafiltrationsanlage mit Oberflächenwasser, Gewinnung von Schlämmen zur Adsorbensherstellung) intensivierte zum einen die Vernetzung der UDE mit entscheidenden Akteuren in der Region, zum anderen profitieren diese unmittelbar von den im Projekt erzielten Erkenntnissen.

An der UNS konnte im Rahmen des Projektes eine Promotion im Fachgebiet B&E angefertigt werden, die voraussichtlich Ende 2025 eingereicht wird. Zwei Forschungsaufenthalte einer deutschen Doktorandin an der Universität Novi Sad sowie ein einmonatiger Aufenthalt einer serbischen Nachwuchswissenschaftlerin in Deutschland wurden realisiert. Zusätzlich fanden Besuche leitender Wissenschaftler beider Partnerinstitutionen statt. Die bereits bestehenden Beziehungen zwischen der UNS und der UDE konnten so nochmals vertieft und verstetigt werden und bilden die Basis für zukünftige Kooperationsprojekte, bspw. auf EU-Ebene. Durch die Einbeziehung des UTVSI als serbischem Branchenverband und die Mitarbeit verschiedener Wasserwerke konnte nun auch eine Brücke hin zu wichtigen Akteuren der serbischen Wasserbranche geschlagen werden. Die Zusammenarbeit mit den beteiligten serbischen Wasserwerken erwies sich als sehr produktiv. Diese stellten regelmäßig Wasserproben für Experimente zur Verfügung und beteiligten sich aktiv an Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit, wie einem Webinar und einem zweitägigen Workshop zu innovativen Technologien zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus Wasser. Im Rahmen des Projekts wurden an der UNS mehrere neue experimentelle und analytische Methoden entwickelt und etabliert, darunter Verfahren zur GC/MS-Analyse organischer Mikroschadstoffe, zur Bestimmung von Polysacchariden und zur Vorbereitung von Algenlösungen. Diese Methoden stehen künftig zur Verfügung und werden in weiteren Forschungsarbeiten genutzt.

#### **6 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen**

Im Verlauf des Vorhabens wurden an anderen Stellen keine weiteren Fortschritte auf diesem Gebiet bekannt.

## 7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden bzw. werden in zahlreichen Vorträgen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorgestellt:

### 7.1 Vorträge

Bogunović M., Khakimova N., Denizer D., Landwehrkamp L., Simeunović J., Ivančev-Tumbas I., Panglisch S. (2023) Sustainable and cost-effective production of drinking water from eutrophic and micro-polluted water using a membrane hybrid process  
*9th Symposium on Chemistry and Environment, EnviroChem 2023, 4-7th June 2023, Kladovo.*

Denizer D. (2024): Optimisation of the PAC/UF process with focus on PAC dosing  
*Jahrestreffen der DECHEMA/VDI-Fachgruppe Membrantechnik, 21.02.2024 bis 22.02.2024, Frankfurt am Main*

Landwehrkamp L. (2024): Aktivierung von Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung im Labor-Drehrohrofen mithilfe statistischer Versuchsplanung  
*DWA-Expertengespräch „Aktivkohle aus Biomasse für eine nachhaltige Abwasserreinigung“, 21.03.2024 bis 22.03.2024, Kassel*

Manufacturing of Bio-Adsorbents: A statistically enhanced systematic approach  
*Seminar zum Projekt SUPREMES an der Universität Novi-Sad, 01.02.2024*

Ivančev-Tumbas I., Bogunović M., Khakimova N., Simeunović J. (2024) Contaminants of emerging concern and innovation in drinking water treatment  
*Konferenz “Water supply and Sewage Systems”, Banja Koviljača 29.05.2024 – 31.05.2024,*

Bogunović Koljaja M., Khakimova N, Denizer D., Landwehrkamp L., Hoffmann G., Simeunović J., Panglisch S., Ivančev-Tumbas I. (2025) Influence of algae species on pharmaceuticals removal by inline dosing of eco-adsorbent and coagulant prior to ultrafiltration process  
*19th International Conference on Chemistry and the Environment, 08.06.2025 bis 12.06.2025, Belgrad*

Panglisch S. (2025): Keynote “Application of membranes in hybrid processes for the removal of micropollutants”  
*19th International Conference on Chemistry and the Environment, 08.06.2025 bis 12.06.2025, Belgrad*

### 7.2 Artikel in Journalen

Ivančev-Tumbas, I.; Denizer, D.; Landwehrkamp, L.; Simeunović, J.; Bogunović, M.; Panglisch, S.: Organski mikropolutanti u vodi za piće-nauka u susret praksi. / Organic micropollutants in drinking water – Science meets practice  
*Voda i sanitarna tehnika 2022, L XII, (1), 5-16.*

Khakimova N., Bogunović Koljaja M., Simeunović J., Landwehrkamp L., Panglisch S. and Ivančev-Tumbas I. (2025) Influence of microalgae on organic micropollutants removal from water by powdered activated carbon  
*J. Serb. Chem. Soc., Sep. 2025. <https://doi.org/10.2298/JSC241229071K>*

Landwehrkamp L., Bogunović-Koljaja M., Sultana M., Ivančev-Tumbas I., Panglisch S. (2025): A systematic approach towards a zero-waste water treatment: clay-carbon composite adsorbents made from drinking water treatment sludge  
*npj Clean Water 8, 69 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00507-w>*

### **7.3 Artikel in Vorbereitung**

Bogunović Koljaja M., Khakimova N. Landwehrkamp L, Simeunović J., Ivančev-Tumbas I., Panglisch S. (2025): Influence of algae species on organic micropollutants removal by hybrid ultrafiltration and eco-adsorption

*Status: geplante Einreichung Herbst 2025*

### **7.4 Abschlussarbeiten**

Moayed I. (2023): Investigation of different coagulants and flocculation conditions for fouling minimization of ultrafiltration process for the treatment of algae-contaminated waters

*Masterarbeit*

Dewi Zafira F. (2024): Optimisation of the dosage of powdered activated carbon for inside-out ultrafiltration

*Masterarbeit*

Yousefi-Jolandan H. (2025): The Impact and Sequence of In-Line Adsorption and Coagulation Pretreatment on Ultrafiltration Membrane Fouling

*Masterarbeit*

Krause J. (2025): Influence of various algae on fouling behavior during ultrafiltration

*Bachelorarbeit*

## 8 Anhang

### 8.1 Analyse Duisburger Leitungswasser

Tabelle 3: Analyse vom Duisburger Leitungswasser im Jahr 2024 (aus Futterlieb & Panglich, 2025)

Parameter	Unit													
Temperature	°C	17.1	17.3	15.4	16.0	16.0	16.2	15.9	15.9	16.8	16.2	15.8	15.8	15.9
pH	-	7.7	7.9	7.9	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	8.0	7.8	7.8
Conductivity	µS/cm		501.0	504.0	505.0	502.0		500.0	530.0	526.0	525.0	504.0	498.0	499.0
Sodium		30.9	18.8	21.1	19.1	18.7	18.3	18.5	18.5	18.2	19.7	20.7	18.5	18.9
Calcium	mg/L	89.3	75.8	84.5	75.1	74.8	74.6	75.5	75.5	74.4	76.8	76.3	75.3	77.2
Magnesium		9.5	7.2	7.5	7.1	7.1	7.1	7.1	7.2	7.1	7.3	7.2	7.2	7.2
HCO3			170.7	168.4	166.2	173.1	159.1	168.9	159.9	173.3	170.1	169.2	165.7	
DOC	mgC/L		3.6	4.0	3.4	3.6	3.5	3.4	3.7	3.7	3.6	3.8	3.6	
SAC254	1/m	10.0	9.3	9.2	9.2	9.1	9.1	9.1	9.3	9.2	9.2	9.8	10.6	9.2
SUVA254	L/(mgC*m)		2.60	2.27	2.73	2.55	2.57	2.69	2.50	2.51	2.58	2.56	2.95	

### 8.2 Analysen der Blumenerde-Extrakte

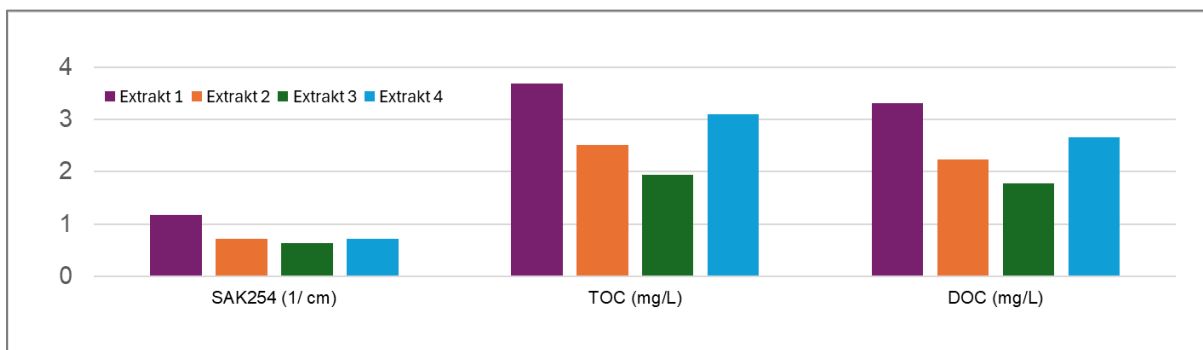


Abbildung 8: Analysen des Blumenerde-Extraktes

### 8.3 Rohmaterialien zur Herstellung der nachhaltigen Adsorbentien

Tabelle 4: Untersuchung der Rohmaterialien zur Herstellung der nachhaltigen Adsorbentien auf Gehalt an Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel sowie Glührückstand (anorganische Bestandteile)

Herkunft des Schlammes	Rhein-Uferfiltrat Filterspülwasser	Ruhrwasser	Rheinwasser	Talsperren- wasser
C in Gew. -%	48	11	5	
H in Gew. -%	0,8	1,4	1,5	
N in Gew. -%	0,52	1,2	0,2	
S in Gew. -%	0,22	< NG	< NG	
Glührückstand in Gew.- %	46	70	75	45

## 8.4 Foto und Anlagenschema der SIMA-tec-Versuchsanlage



Abbildung 9: SIMA-tec-Membranfiltrationsanlage

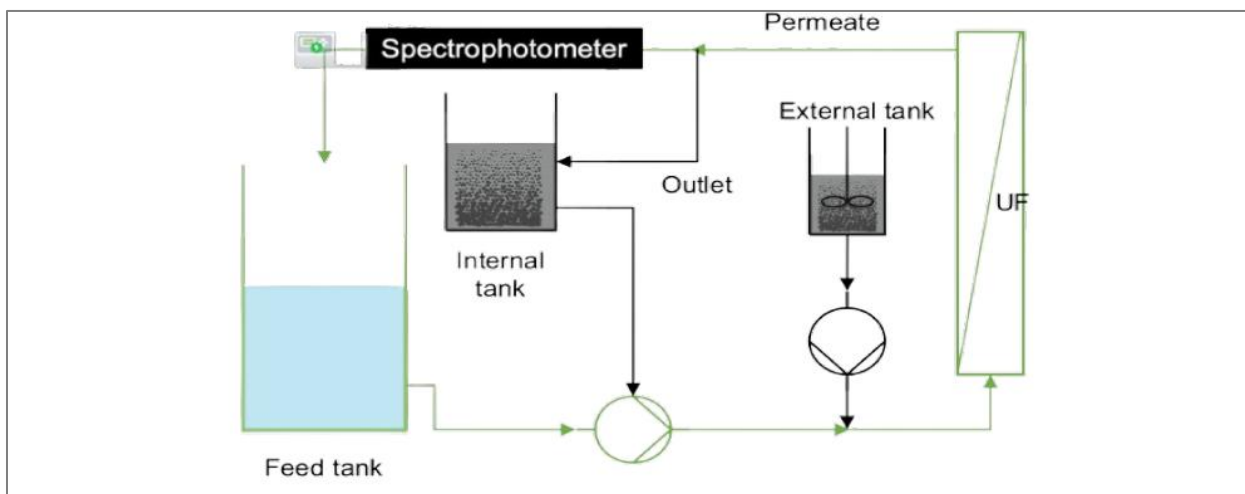


Abbildung 10: Anlagenschema SIMA-tec-Membranfiltrationsanlage

### 8.4.1 Untersuchte kommerzielle Pulveraktivkohlen

Tabelle 5: Untersuchte Pulveraktivkohlen

	PAK 1	PAK 2
Name	Aquasorb PAC-MG	Pulsorb WP260 UF
Rohmaterial	Braunkohle	Steinkohle
BET-Oberfläche in m <sup>2</sup> /g	1.425	1.145
Iodzahl in mg/g	1.290	1.200
Partikelgröße (Volumenverteilung, Laser-Beugung))	d10 = 1 µm <b>d50 = 4 µm</b> d90 = 10 µm	d10 = 1 µm <b>d50 = 5 µm</b> d90 = 14 µm

## 8.4.2 Zusätzliche Ergebnis-Diagramme

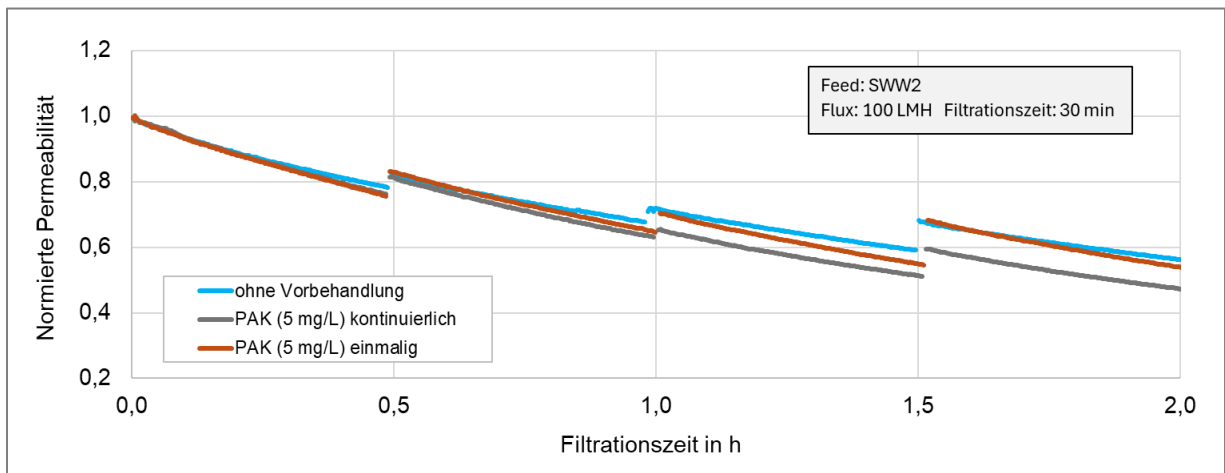


Abbildung 11: Einfluss der PAK-Dosierung auf das Fouling im hybriden Prozess bei kontinuierlicher sowie einmaliger PAK-Dosierung

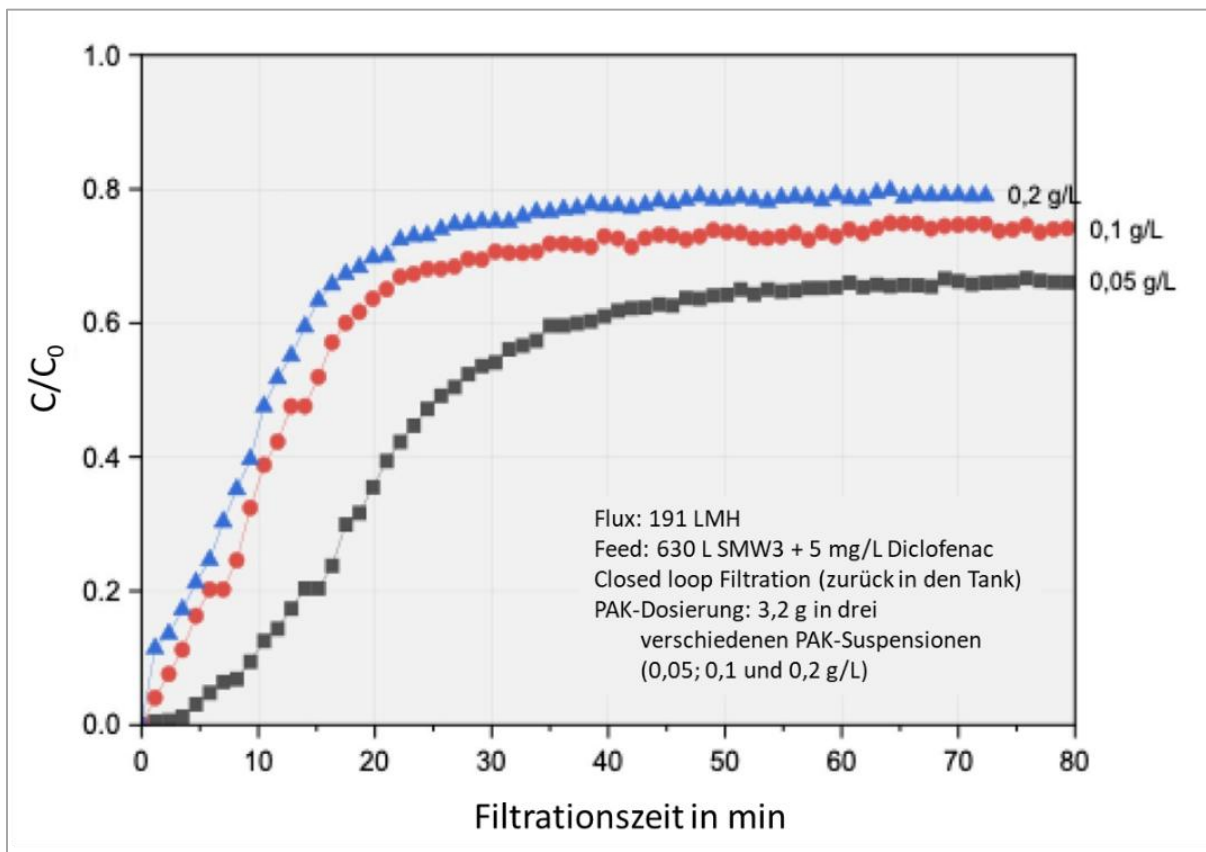


Abbildung 12: Einfluss der Konzentration einer PAK-Suspension im hybriden Prozess bei Einmaldosierung der PAK

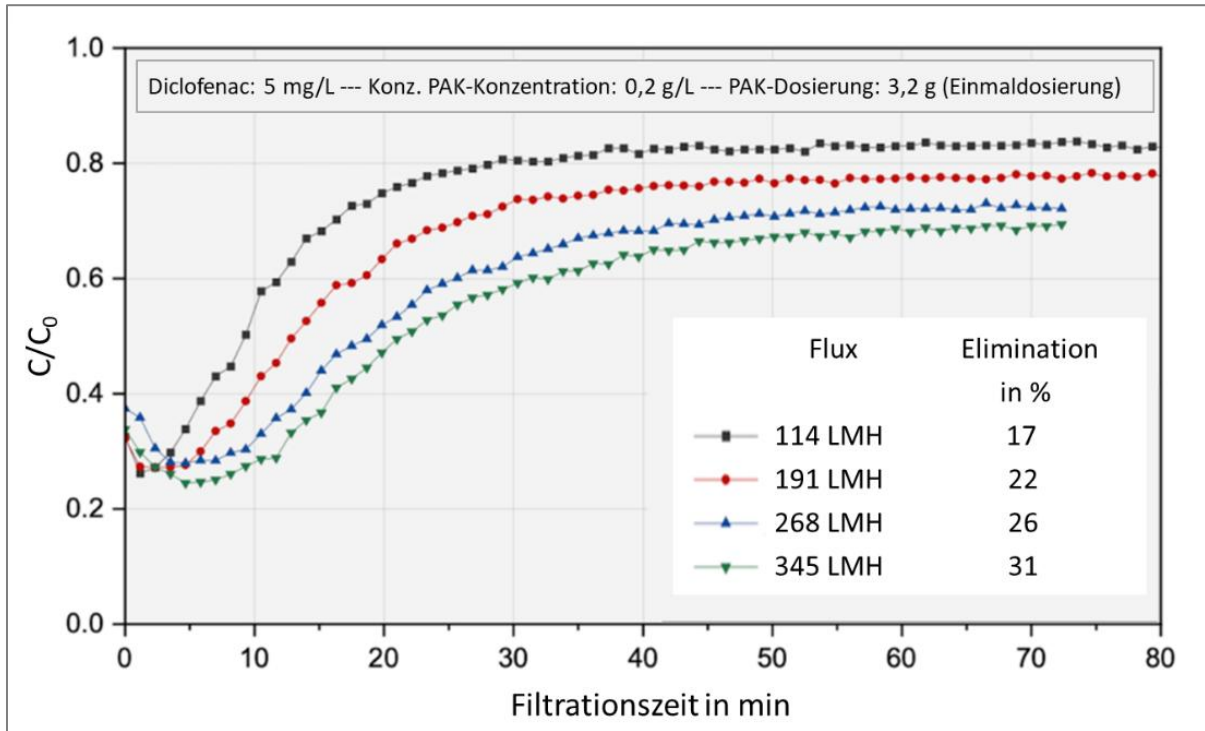


Abbildung 13: Einfluss des PAK-Dosier-Flux im hybriden Prozess bei Einmaldosierung der PAK

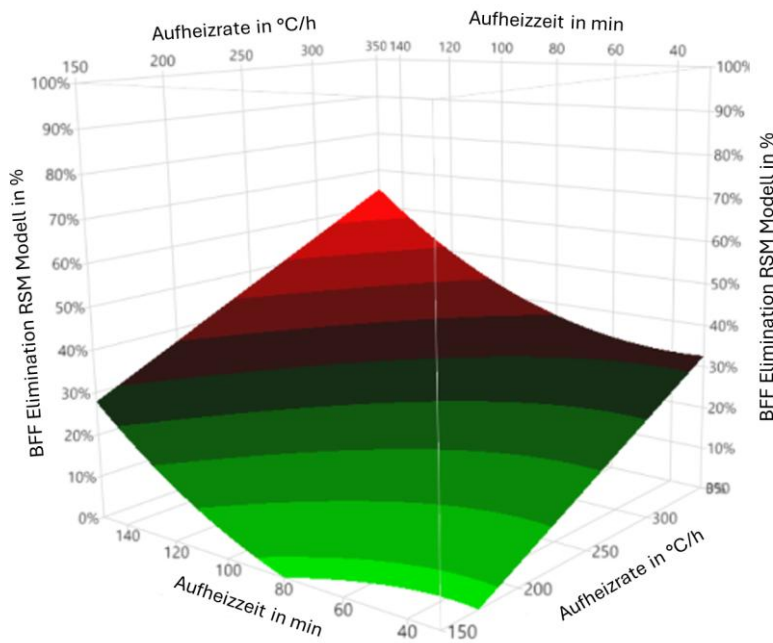


Abbildung 14: Oberflächendiagramm für BFF

## 8.5 Referenzen

- APHA (American Public Health Association), 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. Washington, D.C.: APHA, Method 10200 H.
- Belzile, N. & Chen, Y. W. (2024): Re-utilization of drinking water treatment residuals (DWTR): a review focused on the adsorption of inorganic and organic contaminants in wastewater and soil. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10, 1019–1033. <https://doi.org/10.1039/d3ew00927k>
- Campos et al. (1998). Adsorption of trace organic compounds in CRISTAL® processes. *Desalination*, 117(1-3):265-271.
- Futterlieb, M. & Panglisch, S. (2025) Incipient CaCO<sub>3</sub>-scaling detection for scaling mitigation. *Desalination*, 613, article 119023.
- Hoffmann et al. (2021). Influence of Carbon Agglomerate Formation on Micropollutants Removal in Combined PAC-Membrane Filtration Processes for Advanced Wastewater Treatment. *Water*, 13(24), article 3578.
- Laksono, S., 2021. Mini-plant and bench-scale studies on the fouling mechanisms as well as the responsible organic foulants during direct filtration of algal-containing waters using hollow-fiber membranes. *Dissertation, Universität Duisburg-Essen*
- LeGresley, M. & McDermott, G., 2010. Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis: Haemocytometer, Palmer-Maloney cell and Sedgewick-Rafter cell. In: Karlson, B., Cusack, C. & Bresnan, E. (eds.) *Microscopic and Molecular Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis. IOC Manuals and Guides No. 55, UNESCO, Paris*, pp. 25–30.
- Liu, B., et al. (2017): Microcystis aeruginosa-laden surface water treatment using ultrafiltration: Membrane fouling, cell integrity and extracellular organic matter rejection. *Water research*, 112, 83-92. <http://doi:10.1016/j.watres.2017.01.033>
- Matsui et al. (2001). Removal of a synthetic organic chemical by PAC-UF systems. II: model application. *Water Research*, 35(2):464-470.
- Munch, J. W., et al. (2012): EPA Method 525.3 - Determination of Semivolatile Organic Chemicals in Drinking Water by Solid Phase Extraction and Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). *U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC*
- Panglisch et al. (2018). Optimierter Einsatz von Pulveraktivkohle und Ultrafiltration als 4. Reinigungsstufe, (UF/PAK 4.0), Untersuchungen im Labor- und Pilotmaßstab. *Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*.
- Püttmer, A., 2003. Bindungsmechanismen und Mobilität von Schwermetallen in Tonmineralen. *Dissertation, Universität Hamburg*.
- Schwaller et al. (2021). Inline dosing of powdered activated carbon and coagulant prior to ultrafiltration at pilot-scale – Effects on trace organic chemical removal and operational stability. *Chemical Engineering Journal*, 414, article 128801.
- Shumiye, E., et al. (2024): Preparation of an activated adsorbent from water treatment plant sludge for phosphate removal from wastewater: optimization, characterization, isotherm,

and kinetics studies. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 14, 122–143. <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.278>

Xu, H. et al. (2014): Towards understanding the role of extracellular polymeric substances in cyanobacterial *Microcystis* aggregation and mucilaginous bloom formation. *Chemosphere*, 117, pp. 815–822. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.061>

## 8.6 Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
AOM	Algenorganische Materie (tAOM = total, dAOM = dissolved)
BBF	Brilliantblau FCF
BET	Brunauer-Emmett-Teller
B&E	Fakultät für Biologie und Ökologie
CEP	Fakultät für Chemie, Biochemie und Umweltschutz
CU	Cornelsen Umwelttechnologie GmbH
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
GC-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie
LMH	Liter pro Quadratmeter und Stunde (Einheit des Flux)
NaOCl	Natriumhypochlorit
OMP	organische Mikroschadstoffe (engl. organic micropollutants)
PACL	Polyaluminiumchlorid
PAK	Pulveraktivkohle
PEC	Polyeisenchlorid
PES	Polyethersulfon (Membranmaterial)
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
RSD	Relative Standardabweichung (engl. Relative Standarddeviation)
SAK254	Spezifische Absorption bei 254 nm
SMW	Synthetisches Modellwasser
TMP	Transmembraner Druck (engl. Transmembrane Pressure)
UF	Ultrafiltration
UNS	University of Novi Sad
UDE	Universität Duisburg-Essen

## 8.7 Vorhabenbeteiligte

### Koordination

Prof. Dr.-Ing. Stefan Panglisch

Universität Duisburg-Essen

Zentrum für Wasser- und Umweltforschung und Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik/Wassertechnik

Lotharstr. 1, D-47057 Duisburg

Tel: +49 203 3793477

Email: [stefan.panglisch@uni-due.de](mailto:stefan.panglisch@uni-due.de)

### Serbische Partner

Prof. Dr. Ivana Ivančev-Tumbas

University of Novi Sad, Faculty of Sciences

Department of Chemistry, Biochemistry and Environmental Protection

Trg Dositeja Obradovića 3, 21000 Novi Sad

Tel: + 381 21 4852746

Email: [ivana.ivancev-tumbas@dh.uns.ac.rs](mailto:ivana.ivancev-tumbas@dh.uns.ac.rs)

Prof. Dr. Jelica Simeunović

University of Novi Sad, Faculty of Sciences

Department of Biology and Ecology,

Trg Dositeja Obradovića 2, 21000 Novi Sad

Tel: +381 21 485 2680

Email: [jelica.simeunovic@dbe.uns.ac.rs](mailto:jelica.simeunovic@dbe.uns.ac.rs)

### Kleine und mittelständische Unternehmen

Cornelsen Umwelttechnologie GmbH

Martin Cornelsen

Graf-Beust-Allee 33, 45141 Essen

Tel.: +49 (0)201 52037-0

Email: [cornelsen@cornelsen-umwelt.de](mailto:cornelsen@cornelsen-umwelt.de)

### Assoziierte Partner

Udruzenje za Tehnologiju Vode i Sanitarno Inzentjerstvo / UTVSI

Predrag Bogdanovic

Terazije 23/11/203, 11000 Beograd

Tel: +381 11 2442228

Email: [office@utvsi.com](mailto:office@utvsi.com)

Wasserwerk Uzice

Duško Ljujić, Direktor

H. Luna 2, 31000 Užice

Tel.: + 381 31 519 142

Email: [dusko.ljujic@vodovod.uzice.rs](mailto:dusko.ljujic@vodovod.uzice.rs)