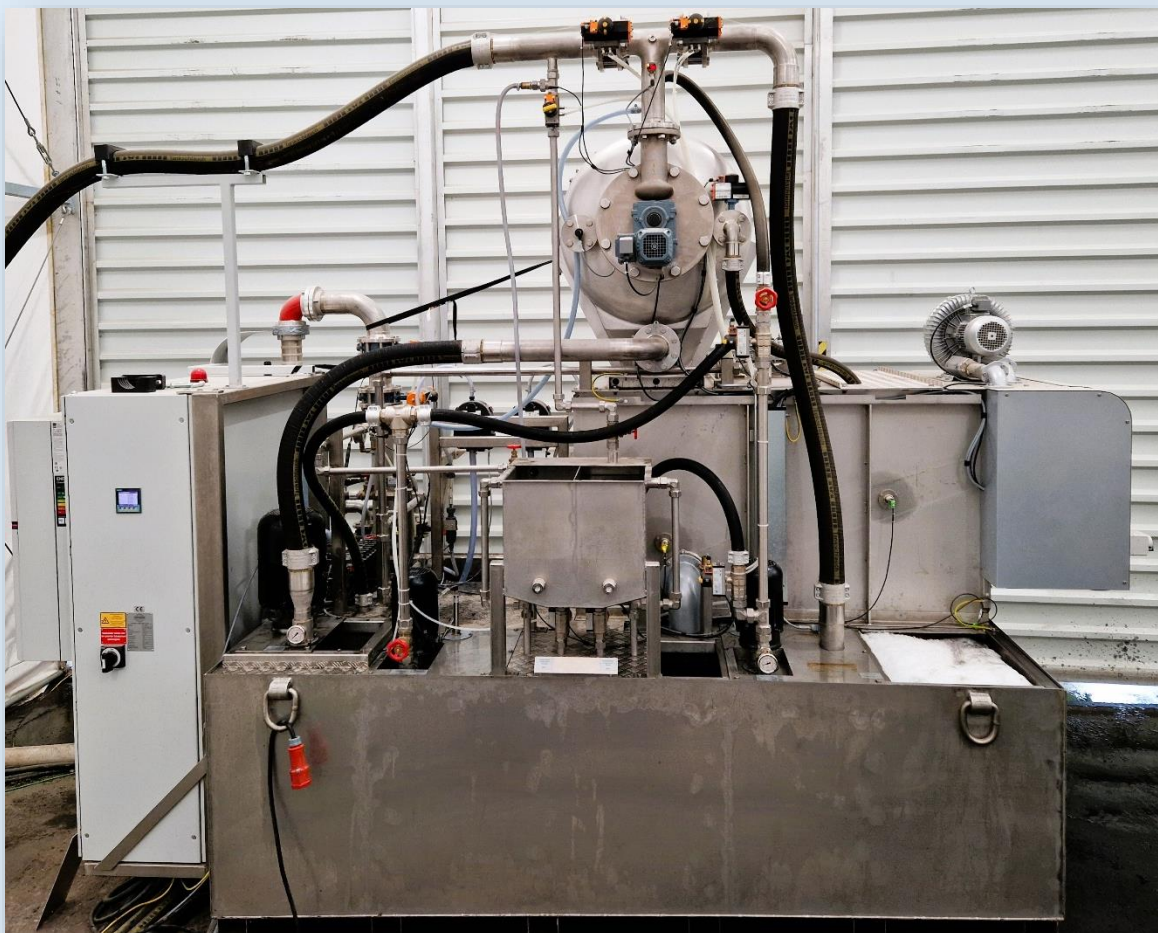


Abschlussbericht

Pilot-Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen AZ 38125/01



Lengede, Mai 2025

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „Pilot-Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen“ wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Kennzeichen AZ 38125/01 gefördert. Das Projekt ist dem Förderthema 10 „Integrierte Konzepte und Maßnahmen zu Schutz und Bewirtschaftung von Grundwasser und Oberflächengewässern“ zugeordnet.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	38125/01	Referat	Fördersumme 125.000 €		
Antragstitel	Pilot-Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen				
Stichworte	4. Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen, Anschwemmfilter, Pulveraktivkohle, Mikroplastik, anthropogene Spurenstoffe				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
31 Monate	15.10.2022	31.03.2025	n.a.		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Fa.Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH Hauerstr. 2 - 4 38268 Lengede			Tel	49 5344 9009 222
				Fax	49 5344 5773
				Projektleitung Helmut Geers	
			Bearbeiter A. Klinkert, H. Geers, K. Bauerfeld, M. Harder		
Kooperationspartner	Technische Universität Braunschweig Institut für Siedlungswasserwirtschaft Pockelsstr. 2a 38106 Braunschweig				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>In der industriellen Verfahrenstechnik, werden seit Jahrzehnten Anschwemmfilter (ASF) zur Reduktion von partikulären Verunreinigungen in Betriebsmitteln eingesetzt. Große Flüssigkeitsvolumina mit geringen Partikelkonzentrationen können mit geringen Aufenthaltszeiten behandelt werden. Damit ist grundsätzlich denkbar, ASF auch auf Kläranlagen zur Nachfiltration von Klarwasser nach der biologischen Reinigungsstufe einzusetzen. Eine erfolgreiche Adaption bedingt allerdings u.a. die Anpassung der Filterhilfsstoffe sowie betriebliche Optimierungen. ASF als 4. Reinigungsstufe versprechen einen sehr kompakten und modularen Aufbau.</p> <p>Ziel der vorliegenden Projektidee ist daher, die im Bereich der Kühlschmierstoffaufbereitung bewährten ASF der Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH zu modifizieren und als 4. Reinigungsstufe auf Kläranlagen zu erproben. Dabei soll ein ASF gleichermaßen mit zwei Zielfragestellungen optimiert werden: zum einen in Bezug auf den Rückhalt partikulärer (Suspensa, Mikroplastik) bzw. partikelgebundener Wasserinhaltsstoffe (z.B. Phosphat) zum anderen für die Reduktion adsorbierbarer Spurenstoffe (Pharmaka, Pflanzenschutzmittel, Industriechemikalien) durch geeignete Filterhilfsstoffe.</p> <p>Im Labormaßstab konnte die grundsätzliche Eignung des Verfahrens zur Abwassernachreinigung aufgezeigt werden. Dabei wurden wichtige Vorkenntnisse bezüglich der Adsorption und der Adsorptionskinetik gelöster Abwasserinhaltsstoffe durch den Einsatz von Pulveraktivkohle als Adsorbens in der Filterschicht als auch zu hydraulischen und betrieblichen Parametern erzielt. Eine orientierende Wirtschaftlichkeitsbeurteilung zeigte vergleichbare spezifische Behandlungskosten wie bereits großtechnisch realisierte 4. Reinigungsstufen.</p> <p>Der nächste Schritt beinhaltet daher ein Scale-Up, mit Bau einer Pilotanlage sowie deren längerfristigen Einsatz auf einer Kläranlage. Es muss sich dabei zeigen, ob die Technologie auch unter schwankenden Ablaufqualitäten die Erwartungen an die Partikelabscheidung und die Spurenstoffadsorption sicher gewährleisten und die Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann.</p> <p>Bei erfolgreichem Einsatz als vierte Reinigungsstufe kann die Anschwemmtechnologie maßgeblich zur Reduktion von Schmutzfrachten aus Kläranlagenabläufen in die Umwelt beitragen. Sie vereint in einem Aggregat die Möglichkeit der Reduktion von organischen und anorganischen Partikeln bzw. partikulär gebundenen Abwasserinhaltsstoffen mit der Elimination gelöster Spurenstoffe.</p>					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Nach erfolgreichen Voruntersuchungen im Labormaßstab sollte im vorliegenden DBU geförderten Projekt ein Scale-Up bisheriger Ergebnisse mit Bau einer Pilotanlage sowie ihres längerfristigen Einsatzes unter Betriebsbedingungen auf einer Kläranlage erfolgen. Im Einzelnen sind die folgenden Zielsetzungen zu benennen:

- Konstruktion und Bau einer Pilotanlage (ca. 2.500 EW) unter Berücksichtigung der Voruntersuchungsergebnisse (AP 1).
- Längerfristiger Betrieb und Optimierung der Pilotanlage (AP 2 und AP 3) mit Fokus auf:
 - der Ermittlung des Einflusses der vergrößerten Filterfläche auf die Trenncharakteristik.
 - der Dosiertechnik der Filterhilfsmittel.
 - der Reinigung der Filterscheiben.
 - der Stabilität der Filterschicht bei variierenden Anströmbedingungen.
 - der Betriebsstabilität bei variierender Abwasserbelastung.
 - der Elimination von Abwasserinhaltsstoffen (insbesondere Partikel und Spurenstoffe).
- Orientierende Abschätzung von Investitionen und Betriebskosten für den Einsatz als 4. Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen (AP 4).
- Physikalisch-chemische Charakterisierung der anfallenden Filterschlämme (ergänzendes AP).

Ergebnisse und Diskussion

Auf dem Klärwerk Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig wurde eine Pilotanlage zur Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe errichtet. Diverse Probleme führten schon in der Planungs- und Bauphase zu einer markanten Abweichung vom Zeitplan, so dass die Pilotanlage erst Mitte Dezember 2023 statt wie geplant im März 2023 in die Testphase gehen konnte. Der in AP 2 vorgesehene sichere Dauerbetrieb der Anlage wurde erst zu Projektende erreicht.



Pilotanlage mit Dosiertechnik © A. Klinkert 2024

Die Test- und Optimierungsphase war geprägt von nicht reproduzierbaren Störungen, die zu sehr wechselnden Filterlaufzeiten führten. In den Phasen, in denen die Anlage störungsfrei lief, konnten jedoch die guten Laufzeiten der Vorversuche reproduziert werden. Als Hauptursachen konnten schließlich ein fehlerhafter Strömungssensor sowie eine Feingutverschleppung durch einen zu klein ausgelegten Abschlammbehälter identifiziert werden. Hinzu kam eine größere Anzahl von weiteren Problemen mit Sensoren, Verstopfungen und Ähnlichem, die zeigten, dass ein Einsatz in der Abwassertechnik spezifische technische Anpassungen der Technologie zwingend erforderlich machen.

Eine grundsätzliche Voraussetzung für die Optimierung der Filterschicht in Hinblick auf minimalen Materialverbrauch bei ausreichender Filtrationsleistung und Spurenstoffentnahme ist der reproduzierbare Betrieb der Anlage. Dieser konnte erst zum Projektende erreicht werden. Die Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH wird die Anlage noch weitere 6 Monate über die Projektlaufzeit hinaus betreiben, um die Optimierungsarbeiten bezüglich der Filterschicht doch noch so weit wie möglich durchzuführen.

Parallel wurden Untersuchungen an einer Filteranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt. Die orientierenden Arbeiten zeigten, dass die Filterlaufzeiten deutlich von der Feststoffbeladung im Filterzulauf abhängen. Die Rückführung von aufbereitetem Filterschlamm als Anschwemmmaterial verkürzte die Filterlaufzeiten erheblich. Hier sind weitere Arbeiten hinsichtlich der Schlammaufbereitung notwendig, wenn durch die Rückführung eines Teils des Filterschlammes Betriebsmittelkosten reduziert werden sollen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentationen

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat S. 2023. Anschwemmtechnologie als vierte Reinigungsstufe - Erprobung einer neuen Technologie. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jg.70, Nr.1, pp. 45-50.

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023. Pre-Coat filter as advanced treatment step for further removal of dissolved and particulate emerging pollutants from municipal wastewater. Filtech 2023, 14.-16.2.2023, Köln.

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023. Anschwemmfilter für die weitergehende Entfernung von gelösten und ungelösten Mikroschadstoffen aus kommunalen Abwässern. DWA KläranlagenTage/MSR-Tage 2023, 20./21.06.2023, Osnabrück.

Schulz, T. 2024. Einfluss der Partikelkonzentration im Zulauf eines Anschwemmfilters zur weitergehenden Reinigung von geklärtem Abwasser auf die Filterstandzeit, den Partikelrückhalt und die Adsorptionsleistung. Bachelorarbeit in Kooperation von ISWW, TU Braunschweig und Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Wolfenbüttel, 12.06.2024.

Stand auf der Woche der Umwelt 2024.

Fazit

Die auf dem Klärwerk Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig errichtete Pilotanlage zur Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe konnte erst zum Schluss der Projektlaufzeit in einen Dauerbetrieb genommen werden.

Diverse nicht reproduzierbare Störungen, die zu sehr wechselnden Filterlaufzeiten führten, verhinderten systematische Untersuchungen zur optimalen Filterschicht und zur Schadstoffentfrachtung. In den Phasen, in denen die Anlage störungsfrei lief, konnten jedoch die guten Ergebnisse der Vorversuche reproduziert werden.

Die Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH wird die Anlage noch zusätzliche weitere 6 Monate betreiben, um die Optimierungsarbeiten bezüglich der Filterschicht doch noch so weit wie möglich durchzuführen.

Inhalt

Projektkennblatt	3
1 Projektpartner und Kontakt.....	9
2 Zusammenfassung.....	10
3 Einleitung und Zielsetzung	11
3.1 Umweltrelevanz des Projektes.....	11
3.2 Die Anschwemmtechnologie als Kombination aus Filtrations- und Adsorptionseinheit 12	
3.3 Zielsetzung des Projektes.....	14
3.4 Arbeits- und Zeitplanung.....	15
4 Voruntersuchungen und Zielvorgaben.....	16
4.1 Charakterisierung von PAK als Filterhilfsstoff	16
4.2 Hydraulische Eigenschaften der Anschwemmschicht	18
4.3 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	19
4.4 Zielvorgaben für die Pilotierung	20
5 Planung und Aufbau der Pilotanlage	21
5.1 Anlagenkonzept.....	21
5.2 Aufbauphase	23
6 Betrieb und Optimierung der Anlage	24
7 Begleitende Untersuchungen	27
7.1 Mobiler Anschwemmfilter.....	27
7.1.1 Aufbau der Anlage	27
7.1.2 Untersuchungsprogramm.....	28
7.1.3 Material und Methoden	28
7.1.4 Einfluss unterschiedlicher Partikelkonzentrationen im Zulauf der Filteranlage...29	
7.1.5 Ergebnisse zur Wiederverwendung des Filterschlammes	34
8 Charakterisierung des Filterschlammes.....	39
8.1 Material und Methoden	39
8.2 Ergebnisse der Charakterisierung.....	40
8.3 Charakterisierung der Rohcellulose und der Pulveraktivkohle	40

8.3.1	CSB-Freisetzung aus der Rohcellulose.....	41
8.3.2	Eigenschaften des Filterschlammes nach Filtration.....	42
8.4	Ergebnisse zur gemeinsamen Entsorgung mit dem Faulschlamm	43
8.4.1	Prognostizierter Anteil des Filterschlammes am Faulschlamm	43
8.4.2	Einfluss auf den Polymermittelverbrauch	43
8.4.3	Einfluss auf die Wasserabgabe bei der Entwässerung.....	44
8.4.4	Gemeinsame Entwässerung von Faul- und Filterschlamm.....	47
9	Fazit	48
10	Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit.....	49
11	Literaturverzeichnis	50
12	Projektkennblatt	52
13	Anhang.....	53

1 Projektpartner und Kontakt

Fördermittelempfänger: Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH

Ansprechpartner: Dipl. Ing. Helmut Geers

Hauerstraße 2-4

38268 Lengede

helmut.geers@hoffmann-filter.de

Tel. +49 5344 9009 222

Kooperationspartner: Technische Universität Braunschweig

Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW)

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Katrin Bauerfeld

M.Sc. Michel Harder

Pockelsstr. 2a

38106 Braunschweig

k.bauerfeld@tu-braunschweig.de

Tel. +49 531 391 7939

2 Zusammenfassung

Auf dem Klärwerk Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig wurde eine Pilotanlage zur Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe errichtet. Diverse Probleme führten schon in der Planungs- und Bauphase zu einer markanten Abweichung vom Zeitplan, so dass die Pilotanlage erst Mitte Dezember 2023 statt wie geplant im März 2023 in die Testphase gehen konnte. Der in AP 2 vorgesehene sichere Dauerbetrieb der Anlage wurde erst zu Projektende erreicht.

Die Test- und Optimierungsphase war geprägt von nicht reproduzierbaren Störungen, die zu sehr wechselnden Filterlaufzeiten führten. In den Phasen, in denen die Anlage störungsfrei lief, konnten jedoch die guten Laufzeiten der Vorversuche reproduziert werden. Als Hauptursachen konnten schließlich ein fehlerhafter Strömungssensor sowie eine Feingutverschleppung durch einen zu klein ausgelegten Abschlammbehälter identifiziert werden. Hinzu kam eine größere Anzahl von weiteren Problemen mit Sensoren, Verstopfungen und Ähnlichem, die verdeutlichten, dass ein Einsatz der Technologie in der Abwassertechnik grundsätzliche technische und betriebliche Anpassungen erfordert.

Zwingende Voraussetzung für die Optimierung der Filterschicht in Hinblick auf minimalen Materialverbrauch bei ausreichender Filtrationsleistung und Spurenstoffentnahme ist der reproduzierbare Betrieb der Anlage. Dieser konnte erst zum Projektende erreicht werden. Die Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH wird daher die Anlage noch weitere 6 Monate über die Projektlaufzeit hinaus betreiben, um die Optimierungsarbeiten bezüglich der Filterschicht doch noch so weit wie möglich durchzuführen.

Parallel wurden Untersuchungen an einer Filteranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt. Die orientierenden Arbeiten zeigten, dass die Filterlaufzeiten deutlich von der Feststoffbelastung im Filterzulauf abhängen. Die Rückführung von aufbereitetem Filterschlamm als Anschwemmmaterial verkürzte die Filterlaufzeiten erheblich. Hier sind weitere Arbeiten hinsichtlich der Schlammaufbereitung notwendig, wenn durch die Rückführung eines Teils des Filterschlammes Betriebsmittelkosten reduziert werden sollen.

3 Einleitung und Zielsetzung

3.1 Umweltrelevanz des Projektes

Die Debatte um die flächendeckende Realisierung der sogenannten vierten Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen zur weitergehenden Elimination von Mikroschadstoffen und gesetzlich geforderten Verschärfung der Einleitbedingungen umfasst den Einsatz einer ganzen Reihe verschiedener technischer Optionen, die v.a. die Partikelfiltration mit Ansätzen zur Adsorption oder Oxidation gelöster Abwasserinhaltsstoffe in mehrstufigen Systemen vorsieht. Damit sollen die punktuellen Einträge anthropogener Spurenstoffe und deren potenziell negativen Effekte auf die aquatische Umwelt an klar definierbaren Einleitstellen, dem Kläranlagenablauf, reduziert werden. Im Fokus der Untersuchungen steht dabei die Elimination unterschiedlicher Stoffgruppen, die z.T. mit konventioneller Kläranlagentechnik gar nicht oder nur teilweise reduziert werden können, wie z.B. die Inhaltsstoffe von pharmazeutischen Produkten, Reinigungs- und Körperpflegemitteln, Pflanzenschutzmitteln und Industriechemikalien (Benstöm et al., 2016).

Für die Reduktion gelöster Spurenstoffe finden sich primär nachgeschaltete Technologien im Einsatz, die auf der Oxidation oder Adsorption der gelösten Stoffe beruhen. Insbesondere der Adsorption an granuliert (Wunderlin et al., 2019) oder pulverförmige (Fuhrmann et al., 2021) Aktivkohle kommt dabei eine hohe Bedeutung zu, da sich in kompakten Einheiten oder in (vorhandenen) Becken hohe Eliminationsraten für unterschiedliche Stoffgruppen erzielen lassen. Anders als bei oxidativen Verfahren (z.B. Ozonung) können bei der Adsorption zudem keine potenziell gefährlichen Transformationsprodukte auftreten.

Neben den gelösten Spurenstoffen wird seit einigen Jahren auch der Verbleib partikulärer organischer Mikroschadstoffe, das Mikroplastik, auf Kläranlagen gezielt untersucht. Dabei erfährt die Elimination von kleinen Kunststoffpartikeln u.a. besondere Relevanz, da diese aufgrund ihrer hydrophoben und spezifisch hohen Oberfläche als Adsorbens für gelöste organische und anorganische Spurenstoffe im Abwasser wirken können. In der (inter)nationalen Mikroplastikforschung hat sich dabei gezeigt, dass auf kommunalen Kläranlagen mit konventioneller mechanisch-biologischer Reinigung hohe Eliminationsgrade für Mikroplastikpartikel erreicht werden können (Spelthahn et al., 2019; Braun et al., 2020, Scheer et al., 2022). Allerdings basieren die bis dato vorliegenden Ergebnisse, u.a. durch die besonderen Herausforderungen in der Probenaufkonzentrierung und Mikroplastikdetektion (u.a. Braun et al., 2020, Atugoda et al., 2021), auf der Betrachtung von Partikeln oberhalb des ein- bis zweistelligen Mikrometerbereichs des Äquivalenzdurchmessers.

Auch nachgeschaltete Filtrationseinheiten, die auf Kläranlagen bereits zur Feststoffreduktion, insbesondere zum Rückhalt von partikulär gebundenem Phosphor, im Kläranlagenablauf eingesetzt werden, haben sich auch für die weitergehende Reduktion von Mikroplastik mit Trenngrenzen im Bereich 5 - 10 µm des Partikeldurchmessers als geeignet erwiesen (Spelthahn et al., 2019; Scheer et al., 2022). Damit werden jedoch die kleinen Partikel bis in den Nanometerbereich, die grundsätzlich kritischer in Bezug auf ihre Wirkung als Spurenstoffadsorbens zu bewerten sind (Vieira et al., 2021), vernachlässigt. Darüber hinaus zeigen aktuelle Untersuchungen auch, dass bereits Partikel < 2 µm die Blut-Hirn-Schranke in Organismen überwinden und so zu Entzündungen und zum Absterben von Zellen führen können (Wookbong et al.,

2022). Der Vermeidung von Emissionen kleinster Kunststoffpartikel muss somit aus ökotoxikologischer und humantoxikologischer Sicht unbedingt vermehrt Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine weiterführende Abwassereinigung kombiniert daher im Idealfall sowohl die zusätzliche Reduktion gelöster umweltrelevanter Spurenstoffe als auch die Abscheidung möglichst kleiner Partikel vor dem Abwassereintrag in das aufnehmende Gewässer.

3.2 Die Anschwemmtechnologie als Kombination aus Filtrations- und Adsorptionseinheit

Anschwemmfilter werden in unterschiedlichsten Bereichen der Verfahrenstechnik zur Filtration von Suspensionen mit geringem Feststoffanteil eingesetzt. Die Technologie zeichnet sich durch eine sehr hohe Filterfeinheit auch für die Reinigung schwer zu filtrierender Suspensionen aus. Beispiele für Einsatzbereiche sind die Abtrennung von Hefen in der Getränkeindustrie oder die Abtrennung von grafithaltigen Schleifschlämmen aus Kühlschmierstoffen, die z.B. bei der Bearbeitung von Grauguss anfallen. Auch in der Schwimmbadtechnik werden Anschwemmfilter zur Reinigung des Badewassers eingesetzt (DIN 19643-2). Hier wird u.a. Aktivkohle als Anschwemmschicht verwendet, um zusätzlich gelöste organische Verbindungen zu adsorbieren.

Ein Anschwemmfilter erreicht seine vorteilhaften Filtereigenschaften durch einen mehrphasigen Verfahrensablauf (vgl. Abbildung 1).

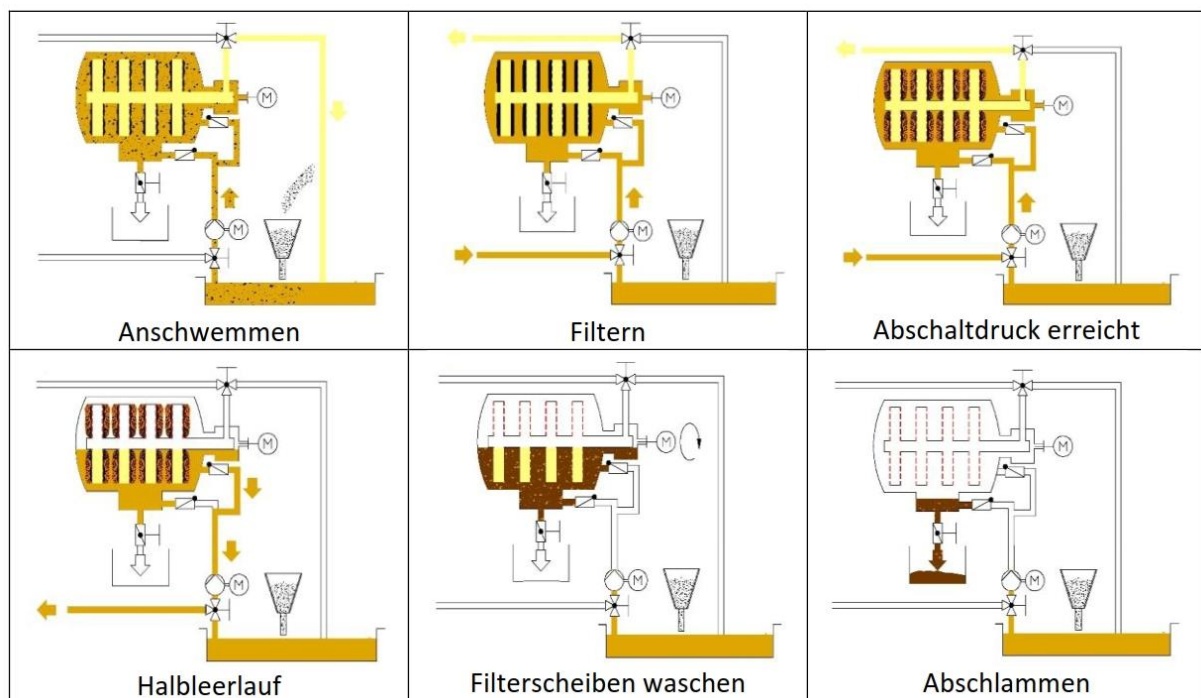


Abbildung 1: Ablaufschema eines Anschwemmfiltrationszyklusses (Schema: Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH, 2022)

Im ersten Verfahrensschritt (Anschwemmen) wird ein einfach zu filtrierendes Material, das Filterhilfsmittel (z.B. Cellulose, Perlit oder Kieselgur), in Flüssigkeit suspendiert und in einem internen Kreislauf auf einem relativ groben Filter (z.B. ein Edelstahlsieb) wieder abgeschieden. Der so entstandene Filterkuchen, die Anschwemmschicht, dient im zweiten Verfahrensschritt

(Filtern) als Filtermittel. Das Filterhilfsmittel ist dabei so zu wählen, dass eine sehr poröse, leicht zu durchströmende Anschwemmschicht entsteht.

Die eigentliche Filtration der Suspension erfolgt im zweiten Verfahrensschritt (Filtern). Während der Filtration setzen sich zunächst gröbere Teilchen auf der Oberfläche der Anschwemmschicht ab. Die feinsten Teilchen der Suspension können bis in die Anschwemmschicht eindringen und werden erst dort in den Poren und an den Partikeln der Anschwemmschicht abgetrennt. Der Druckverlust der Anschwemmschicht steigt vorerst nur langsam an. Ist ein nennenswerter Anteil der Poren in der Anschwemmschicht mit Schmutzpartikeln gefüllt, tritt ein deutlich erhöhter Druckverlust auf. Der Filter schaltet bei einem vordefinierten Druck ab, die Suspensionszufuhr wird gestoppt und die Filterfläche abgereinigt.

Die von der Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH angewandten Teller-Anschwemmfilter verwenden ein für das Filtergewebe sehr schonendes Reinigungsverfahren: Der Druckkessel wird hierbei zunächst halb entleert (Halbleerlauf). Im Anschluss werden die in dem halb gefüllten Kessel rotierenden Filterscheiben schonend gewaschen (Filterscheiben waschen) und der entstandene Schlamm abgelassen (Abschlammern). Der abgelassene Schlamm wird im Nachhinein einem Sekundärfilter zur weiteren Entwässerung zugeführt. Die bei Filterkerzen übliche Belastung des Filtergewebes durch Druckstöße für die Abreinigung wird bei dem von der Fa. Maschinen- und Apparatebau GmbH angewandten Verfahren vermieden und so werden Standzeiten der Filterscheiben über mehrere Jahre ermöglicht.

Moderne Anschwemmfilter arbeiten vollautomatisch. Üblich sind ein Betriebsmittelverbrauch von ca. 0,5 - 1 kg Anschwemmmaterial pro Quadratmeter Filterfläche sowie Filtergeschwindigkeiten im Bereich von 2 - 10 m/h.

Es kommt vor, dass sich auf der Anschwemmschicht eine schwer zu durchströmende Deckschicht bildet, die aus Partikeln, die nicht in die Anschwemmschicht eintreten können, besteht. In diesen Fällen wird der zu filtrierenden Suspension kontinuierlich Anschwemmmaterial (Bodyfeed) zugegeben. Dadurch bleibt auch die Deckschicht gut durchströmbar und der Differenzdruck steigt deutlich langsamer an.

In der kommunalen Abwasserreinigung wird die Anschwemmtechnologie bisher nicht eingesetzt. Dabei kann das Verfahren v.a. aufgrund der guten Filtereigenschaften für hohe Volumenströme für die Abwassernachfiltration u.a. zum weitergehenden Feststoffrückhalt (Belebtschlammuspensa) und damit verbunden einem erhöhten Nähr- und Schadstoffrückhalt vorteilhaft sein. Je nach verwendetem Anschwemmmaterial werden Trenngrenzen bis in den Submicronbereich erreicht, wodurch auch die Ablaufqualität, z.B. bzgl. Mikroplastikpartikel, verbessert werden kann. Verwendet man in der Anschwemmschicht geeignete Adsorbentien, wie z.B. Aktivkohle, so können neben partikulären auch gelöste Abwasserinhaltsstoffe weitergehend in einer Verfahrensstufe eliminiert werden.

Grundsätzlich werden für den Aufbau einer vierten Reinigungsstufe mit Anschwemmfiltern nur wenige Komponenten benötigt. Dadurch ist ein sehr kompakter Aufbau möglich, der deutlich weniger Platz beansprucht als Verfahren, die z. B. Kontaktbecken für die Pulveraktivkohle zur Spurenstoffadsorption verwenden. Ein modularer Aufbau ermöglicht eine flexible Anpassung an die Gegebenheiten der Kläranlagen. Es handelt sich bei der Technologie insgesamt um

eine reine Nachröstlösung, die keine Rückwirkungen auf den bestehenden Kläranlagenprozess hat.

3.3 Zielsetzung des Projektes

In der industriellen Verfahrenstechnik, aber auch in der Getränkeindustrie und zur Filtration von Kühlschmierstoffen werden seit Jahrzehnten Anschwemmfilter zur Reduktion von partikulären Verunreinigungen in Betriebsmitteln eingesetzt. Dabei vereint die Technologie den Vorteil der Behandlung großer Flüssigkeitsvolumina bei geringen Aufenthaltszeiten zur Elimination geringer Partikelkonzentrationen. Damit ist es grundsätzlich denkbar, die Anschwemmtechnologie auch auf Kläranlagen zur Nachfiltration von Klarwasser nach der biologischen Reinigungsstufe einzusetzen. Eine erfolgreiche Adaption der Technologie an dieses neue Einsatzgebiet bedingt allerdings u.a. die Anpassung der Filterhilfsstoffe sowie umfangreiche betriebliche Optimierungen.

Anschwemmfilter als vierte Reinigungsstufe versprechen dabei einen sehr kompakten Aufbau und die Möglichkeit der modularen Anpassung an örtliche Gegebenheiten. Ziel des Projektes ist daher, die seit Jahren im Bereich der Kühlschmierstoffaufbereitung bewährten Anschwemmfilter der Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH zu modifizieren und als vierte Reinigungsstufe auf Kläranlagen zu erproben. Dabei soll ein Anschwemmfilter gleichermaßen mit zwei Zielfragestellungen optimiert werden: zum einen in Bezug auf den Rückhalt partikulärer bzw. partikelgebundener Wasserinhaltsstoffe, zum anderen für die Reduktion adsorbierbarer Spurenstoffe durch geeignete Filterhilfsstoffe.

Nach erfolgreichen Voruntersuchungen im Labormaßstab sollte im vorliegenden DBU geförderten Projekt ein Scale-Up bisheriger Ergebnisse mit Bau einer Pilotanlage sowie ihres längerfristigen Einsatzes unter Betriebsbedingungen auf einer Kläranlage erfolgen. Im Einzelnen sind die folgenden Zielsetzungen zu benennen:

- Konstruktion und Bau einer Pilotanlage (ca. 2.500 EW) unter Berücksichtigung der Voruntersuchungsergebnisse (AP 1).
- Längerfristiger Betrieb und Optimierung der Pilotanlage (AP 2 und AP 3) mit Fokus auf:
 - der Ermittlung des Einflusses der vergrößerten Filterfläche auf die Trenncharakteristik.
 - der Dosiertechnik der Filterhilfsmittel.
 - der Reinigung der Filterscheiben.
 - der Stabilität der Filterschicht bei variierenden Anströmbedingungen.
 - der Betriebsstabilität bei variierender Abwasserbelastung.
 - der Elimination von Abwasserinhaltsstoffen (insbesondere Partikel und Spurenstoffe).
- Orientierende Abschätzung von Investitionen und Betriebskosten für den Einsatz als 4. Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen (AP 4).

- Physikalisch-chemische Charakterisierung der anfallenden Filterschlämme (ergänzendes AP).

3.4 Arbeits- und Zeitplanung

Die ursprüngliche Zeitplanung der Kernarbeitspakete ist gemäß der Antragsstellung in Tabelle 1 quartalsweise aufgeschlüsselt dargestellt.

Tabelle 1: Ursprüngliche Zeitplanung der Projektdurchführung

Quartale	1.	2.	3.	4.	5.	6.
AP 1: Planung und Bau der Pilotanlage						
AP2: Sicherer Dauerbetrieb						
AP3: Optimierungen						
AP 4: Evaluation, Wirtschaftlichkeit, Berichte						

Im Laufe der Projektbearbeitung kam es zu Verzögerungen bei der Bearbeitung der Arbeitspakete, die nachfolgend kurz aufgelistet werden:

- Die Bearbeitung des AP 1 verzögerte sich bedingt durch zusätzlich erforderliche Vorbereitungsmaßnahmen auf dem Kläranlagengelände, Lieferverzögerungen bei der Dosiertechnik und der Erkrankung des Mitarbeiters, der für die Programmierung verantwortlich war.
- Durch die Verzögerungen in AP 1 konnte die Pilotanlage erst mit einer Verzögerung von acht Monaten in Betrieb gehen.
- Ein sicherer Dauerbetrieb konnte bedingt durch Probleme bei der Anschwemmung, bei der Volumenstrommessung und durch Akkumulation von Feinstpartikeln im Prozess nicht erreicht werden.

4 Voruntersuchungen und Zielvorgaben

Im Rahmen von Vorversuchen zum Einsatz der Anschwemmtechnologie zur weitergehenden Abwasserreinigung untersuchten die Projektbeteiligten im Labor- und halbtechnischen Maßstab zum einen geeignete PAK in Bezug auf das Adsorptionsverhalten, sowie die hydraulischen Eigenschaften einer modifizierten Anschwemmschicht (vgl. auch Geers et al., 2023 a-d). Ziel dieser Voruntersuchungen war es, wesentliche orientierende Hinweise für die Auslegung und den Betrieb der Pilotanlage zu erhalten.

4.1 Charakterisierung von PAK als Filterhilfsstoff

Zum Vergleich des Adsorptionsvermögens verschiedener PAK wurden am ISWW der TU Braunschweig in Batchversuchen die sich einstellenden Konzentrationsgleichgewichte zwischen Adsorbens und aufkonzentriertem Klarwasser einer kommunalen Kläranlage untersucht und durch Adsorptionsisothermen nach Freundlich beschrieben (zur Vorgehensweise vgl. Kienle und Bäder, 1980; Sontheimer et al., 1985; EAWAG, 2010). Dadurch konnte das Adsorptionsverhalten beispielhaft für gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (bestimmt als CSB_f im Küvetten-Schnelltest) an sechs vorausgewählten PAK orientierend ermittelt werden.

Im Ergebnis zeigte sich, dass vier der sechs vorausgewählten Aktivkohlearten hohe Abreicherungen organischer Kohlenstoffverbindungen in Bezug auf die Aktivkohledosierung erzielten (Abbildung 2, PAK 2 bis 5) und für weitergehende Untersuchungen empfohlen werden konnten.

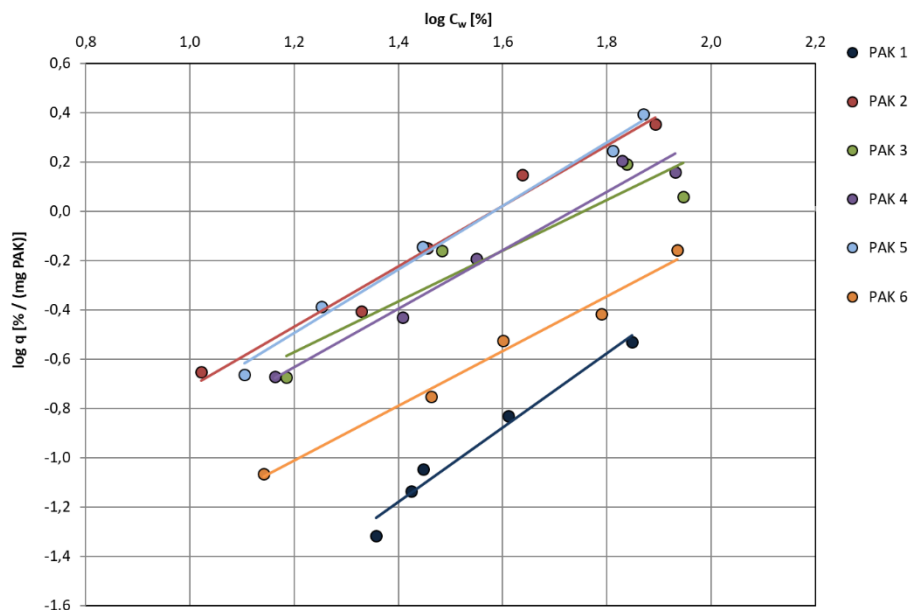


Abbildung 2: Freundlich-Isothermen für sechs Aktivkohlearten ermittelt im Batchversuch auf Basis von CSB_f

Zur Einschätzung der notwendigen Kontaktzeit (unbelasteter) PAK wurde zusätzlich die Adsorptionskinetik für ausgewählte PAK (auf Steinkohlebasis und aus Kokosnussschalen, nach den Auswahlkriterien hohe Adsorptionskapazität und Wirtschaftlichkeit des Adsorbens gewählt) im Laborversuch auf Basis der CSB_f -Konzentration bestimmt. Im Ergebnis ergaben sich für die verwendeten PAK bei zwei ausgewählten Dosierkonzentrationen (2 g/l und 5 g/l) charakteristische Verteilungsfunktionen. Tendenziell zeigte sich, dass der Adsorptionsprozess bei

den PAK unabhängig von der Dosierkonzentration nach etwa 30 min weitestgehend abgeschlossen war. Eine Reduktion von $>>75\%$ der gelösten Kohlenstoffverbindungen (CSB_I) ließ sich über den gesamten Versuchsverlauf in allen Ansätzen sicher erreichen, wobei die notwendige Kontaktzeit bis zum Erreichen dieses Reduktionsgrades zwischen wenigen Minuten und 30-40 min in Abhängigkeit der PAK und der Dosierkonzentration lag. Damit ließ sich für die Anschwemmtechnologie mit Einsatz von PAK ableiten, dass relativ niedrige Kontaktzeiten für eine hohe Reduktion gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen ausreichend sein können und ggf. auf eine längere und separate Zwischenspeicherung des Klarwassers zur Gewährung entsprechender Kontaktzeiten zwischen Sorbens und Adsorptiv verzichtet werden kann.

Schließlich wurde die Spurenstoffelimination (anhand ausgewählter Wirkstoffe aus der Gruppe der Antibiotika, Antiepileptika, Analgetika und Nahrungsergänzungsmittel) für repräsentative Filtergeschwindigkeiten (1 - 2,5 m³/(m²·h)) und Schichtdicken bzw. Dosierungen an PAK (1 - 2 kg PAK/m² Filterfläche) im Laborfiltrationsversuch auf einer Edelstahlträgerkonstruktion orientierend ermittelt (vgl. Abbildung 3).

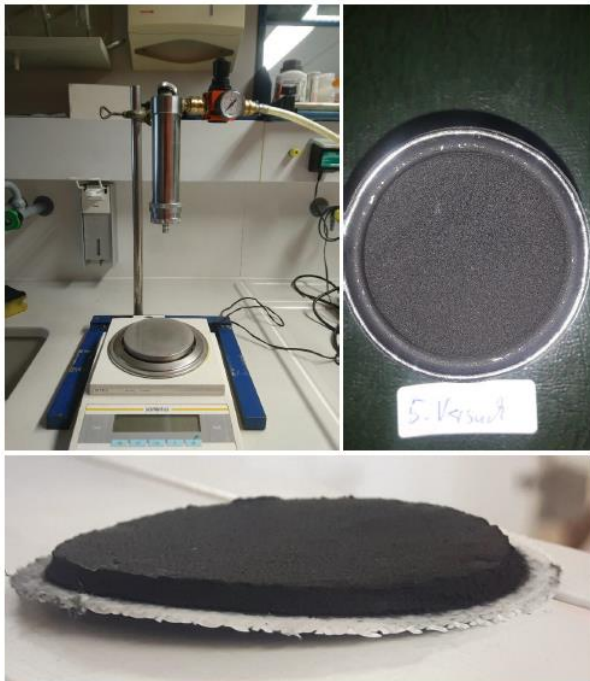


Abbildung 3: Voruntersuchungsphase: PAK-Anschwemmschicht im Laborversuch, Stärke der PAK Schicht ca. 2 mm (Fotos: S. Karwat, 2020)

Im Ergebnis konnte mit beiden PAK eine weitgehende Elimination der untersuchten Wirkstoffe bis unterhalb der Nachweisgrenze erreicht werden. Lediglich bis zu 4/14 Wirkstoffen im Klarwasser waren nach der Filtration über die Anschwemmschicht einer PAK noch im Filtrat nachweisbar. Ein Zusammenhang zur Filtergeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit ließ sich anhand der Datenlage nicht ableiten.

Die Voruntersuchungen zeigten somit insgesamt, dass die Adsorptionskapazität der verwendeten PAKs unter betriebsnahen Randbedingungen für die Filtration nicht nach einmaliger Filternutzung erschöpft wird, sondern eine aus wirtschaftlichen Gründen unumgängliche längere, kontinuierliche Beaufschlagung erfolgen kann (Geers et al., 2023a).

Diese Ergebnisse veranlassten weitergehende Untersuchungen zum Durchströmungsverhalten der Anschwemmschicht mit einer Labor- und einer halbtechnischen Versuchsanlage bei kontinuierlich anfallendem Klarwasser auf einer kommunalen Kläranlage.

4.2 Hydraulische Eigenschaften der Anschwemmschicht

Bei der Fa. Hoffmann GmbH wurde ein Teststand zur Ermittlung des Durchströmungsverhaltes der Anschwemmschicht im Labormaßstab konzipiert und auf einer kommunalen Kläranlage im Ablauf der Nachklärung betrieben (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Links: Versuchsanlage für die Untersuchungen zur Anschwemmschicht, Rechts: Filterkerze mit Anschwemmschicht (Fotos: H. Geers, 2022)

Erste Durchströmungsversuche wurden mit PAK-Dosierungen von 0,5 und 1 kg PAK/m² Filterfläche durchgeführt und zeigten, dass die Filtergeschwindigkeit innerhalb weniger Minuten von > 4 m³/(m²·h) auf < 1 m³/(m²·h) absanken. Die abzuschneidenden Partikel im Klarwasser bildeten auf der PAK Anschwemmschicht eine schwer zu durchströmende Deckschicht. Die alleinige Verwendung von PAK als Filterhilfsstoff zeigte somit unzureichende Standzeiten bzw. zu geringe filtrierbare Wassermengen für einen wirtschaftlichen Betrieb. In weiteren Versuchen wurde daher der PAK zusätzlich bis zu 70 % Rohcellulose als „gerüstbildender Stoff“ (Mischungsverhältnis) beigemischt. Mit dieser Kombination konnte die Durchströmbarkeit der Filterschicht in weiten Grenzen variiert werden. Zudem zeigte sich, dass eine dauerhafte (geringe) Zugabe von Cellulose in den zu filtrierenden Abwasserstrom (Bodyfeed) erfolgreich die Deckschichtbildung verhinderte. Die Anschwemmschicht war zudem in der Lage in der Konfiguration mit Mischung der Filterhilfsstoffe PAK+Rohcellulose und Bodyfeed sehr gute Feststoffabscheidegrade von ca. 70% bei 200 nm (ermittelt durch Nasssiebung mit Filtergewebe > 13 µm und Kernspurmembranen 100 nm - 13 µm Porenweite (TRAKETCH®, Sabeu GmbH & Co KG)) zu erreichen. Insgesamt konnte mit den Versuchen im Labormaßstab der Anteil an abfiltrierbaren Stoffen (AFS) von bis zu 10 mg/l im Klarwasser auf unter 1 mg/l im Ablauf des Filters reduziert werden.

Für die Versuchskonfiguration mit Filterhilfsstoffgemisch und Bodyfeed wurden schließlich weiterführende Untersuchungen im Labor- und halbertechnischen Maßstab (4 m² Filterfläche, Q = 80 l/min) zur Spurenstoffelimination durchgeführt. Die Auswahl der Spurenstoffe, Analysen und Auswertungen folgten dabei den Handlungsempfehlungen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS, 2018, Spurenstoffliste B-2017).

Die Versuchsdurchläufe zeigten, dass die Eliminationsleistung der untersuchten Wirkstoffe über den Versuchsbetrieb abnahm. Wenn der Bodyfeed keine Pulveraktivkohle enthielt, (Abbildung 5, Kurve Cellulose Bodyfeed), war ein stetiger Abfall der Eliminationsleistung über die Zeit zu beobachten. Die Mikroschadstoffe belegten offenbar sehr schnell die freie Oberfläche der Pulveraktivkohle und es ist davon auszugehen, dass die weitergehende Diffusion der Schadstoffe in die Poren nicht ausreichend schnell erfolgte. Zum Ende des Versuches nahm zudem die Durchströmungsgeschwindigkeit signifikant ab. Geringe Mengen (ca. 7 mg/l) PAK im Bodyfeed hingegen stabilisierten die Spurenstoffelimination. Auf der Filterschicht wurde somit konstant frische Pulveraktivkohle abgeschieden und die Entnahmekapazität stieg wieder leicht an. Die geforderte mittlere Spurenstoffentnahme von mehr als 80 % (vgl. KomS, 2018) wurde in diesen Versuchen sicher erreicht (Abbildung 5, Kurven PAK im Bodyfeed).

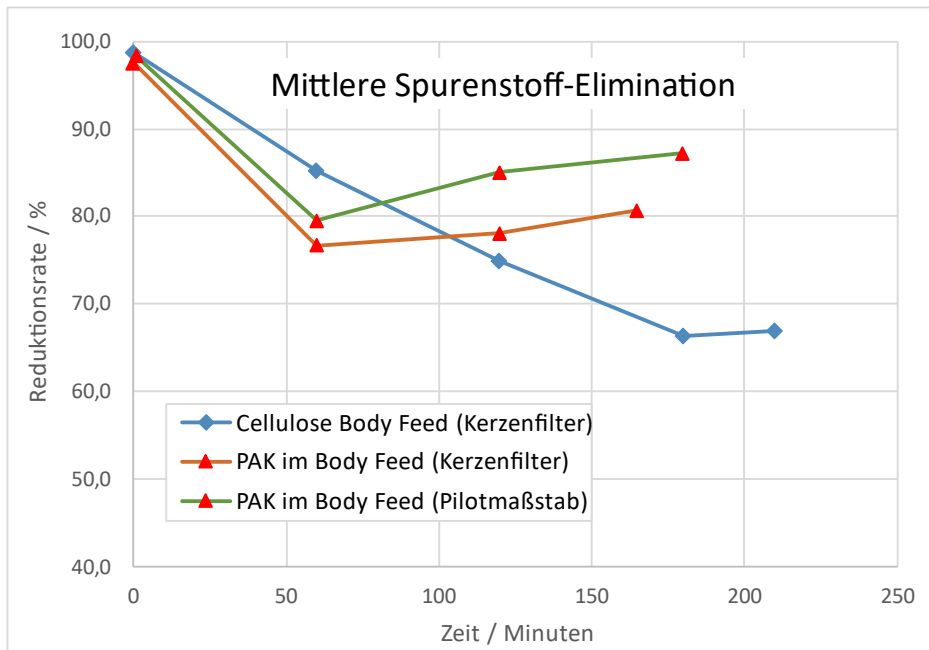


Abbildung 5: Spurenstoffelimination bei unterschiedlichen Versuchskonfigurationen

4.3 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Orientierend wurden erste Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit der Anschwemmtechnologie für die Abwassernachklärung durchgeführt. Hierzu wurden die Investitions- und Betriebskosten für eine Anlage für 50.000 EW abgeschätzt (Stand 2022). Der Betriebsmittelbedarf wurde anhand der Labor- und halbertechnischen Voruntersuchungen zur Optimierung der Filterschicht mit Cellulose / PAK Bodyfeed zu ca. 7 ct/m³ ermittelt. Förderungen und Ersparnisse in der Abwasserabgabe sowie die Filterschlamm Entsorgung wurden dabei nicht berücksichtigt. Bei einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren ergaben sich bei einer Anlage für 50.000 EW spezifische Kosten incl. Betriebsmittel in Höhe von 22 - 24 ct/m³. Bei größeren Anlagen ist mit einer

deutlichen Kostenreduktion zu rechnen. Die Kosten für die Entsorgung des Filterschlammes wurden hier nicht berücksichtigt. Aus Vorversuchen bei der Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH ist bekannt, dass sich die Entwässerbarkeit von Klärschlamm durch Zugabe von Cellulose verbessern lässt. Es besteht daher die Hoffnung, dass der Filterschlamm praktisch kostenneutral mit dem Klärschlamm entsorgt werden kann. Voraussetzung für diese Lösung ist, dass der Klärschlamm thermisch verwertet wird. Eine landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes unter Zugabe der (beladenen) Filterhilfsmittel wäre nicht zielführend.

4.4 Zielvorgaben für die Pilotierung

Als Fazit aus den Voruntersuchungsphasen ließen sich nachfolgende Zielvorgaben für die Pilotierung ausweisen:

- Die Anlage soll einen Volumenstrom von 800 l/min entsprechend ca. 2500 EW verarbeiten können.
- Die Anschwemmschicht ist aus einem Gemisch aus Rohcellulose und PAK aufzubauen. Damit benötigt die Pilotanlage entsprechend Speicher- und Dosiervorrichtungen für zwei Filterhilfsstoffe.
- Die Anlage soll vollautomatisch betrieben werden. Regelmäßige Wartungsarbeiten, z.B. zum Auffüllen der Speicher für die Filterhilfsstoffe, sind aber zulässig.
- Die Filterhilfsstoffe werden der Filteranlage als Suspension zugegeben um eine sichere Benetzung und Dispergierung zu gewährleisten.
- Die Anlage ist auf einen Filterhilfsstoffverbrauch von ca. 0,5 - 2 kg/m²_{Filterfläche} auszulegen. Die Massenverhältnisse der Hilfsstoffe müssen variiert werden können.
- Für einen wirtschaftlichen Filtrationsbetrieb sind Standzeiten von etwa 4 h bei einer Filtergeschwindigkeit von ca. 5 m/h zu realisieren, auch wenn eine deutlich kürzere Kontaktzeit in den Vorversuchen noch eine hohe Adsorption ausgewählter Spurenstoffe > 80% bewirkte. Zielgröße für einen wirtschaftlichen Betrieb ist ein Filtratvolumen von > 20 m³/m²_{Filterfläche}.
- Der Filtrationsprozess sollte für eine ausreichende Standzeit mit Cellulose / PAK-Bodyfeed im Konzentrationsbereich < 60 mg Cellulose+PAK/l betrieben werden. Die Zusammensetzung des Bodyfeeds ist variabel zu gestalten.
- Der anfallende Filterschlamm wird einem Sekundärfilter zugeführt und vorgetrocknet.

5 Planung und Aufbau der Pilotanlage

5.1 Anlagenkonzept

Die Pilotanlage wurde auf dem Klärwerk Steinhof des Abwasserverbands Braunschweig in einer Zelthalle errichtet. Das Klarwasser der Kläranlage wurde aus dem Ablaufgerinne mit einer Hebepumpe der Filteranlage zugeführt.

Die Pilotanlage wurde auf der Basis der in Serie gefertigten Anschwemmfilter der Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH konzipiert. Die Gestaltung des Filterkessels, der Behälter und des Sekundärfilters zur Filterschlammmentwässerung konnte mit geringen Änderungen aus der Serienfertigung übernommen werden. Abweichend zur Serienfertigung, in der fast ausschließlich Normalstahl verarbeitet wird, musste die Pilotanlage in Edelstahl gefertigt werden. Größere Anpassungen gab es auch bei der Filtersteuerung, um die neuen Gegebenheiten zu berücksichtigen.

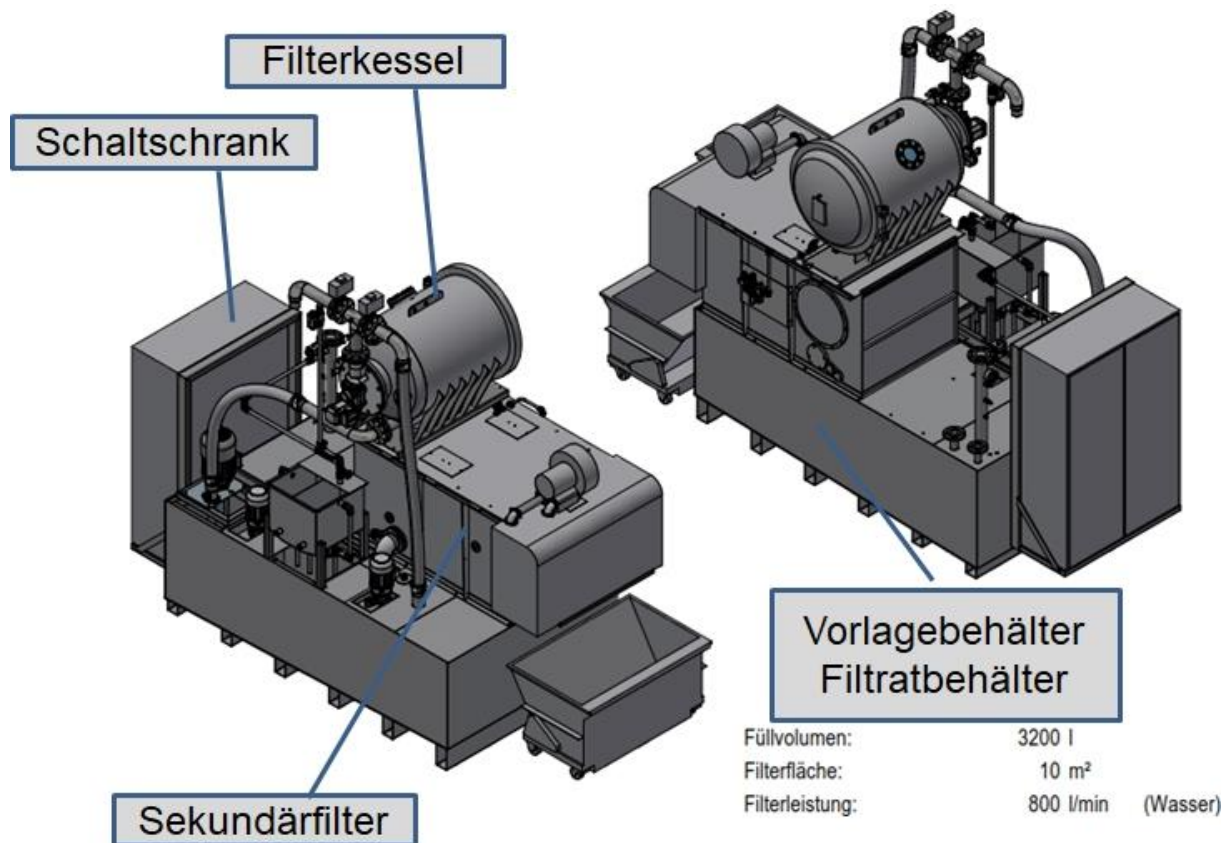


Abbildung 6: 3D-Zeichnung der geplanten Anlage

Der anfallende entwässerte Filterschlamm wird in einem Container gesammelt und kann anschließend dem entwässerten Klärschlamm der Kläranlage zur Entsorgung beigemischt werden.

Die Dosierung und Dispergierung der Filterhilfsmittel erforderten eine Neuentwicklung. Abweichend von den Serienanlagen, in denen nur Cellulose verwendet wird, müssen zwei Filterhilfsmittel (Rohcellulose und PAK) in vorzugebendem Verhältnis gemischt und für die Anschwemmung bereitgestellt werden. Außerdem sind die Filterhilfsmittel in Wasser deutlich schwerer zu benetzen und zu dispergieren, als in Schleiföl.



Abbildung 7: Pilotanlage mit Dosiertechnik (Foto A. Klinkert, 2024)

Um die Entwicklungszeit zu reduzieren, wurde auf ein fertiges Konzept der Fa. Sodimate Deutschland GmbH gesetzt. Die zugekaufte Dosieranlage besteht aus zwei getrennten Strängen. Jeder Strang hat eine Big-Bag Entleerstation, eine Dosiereinheit für das trockene Pulver und einen gerührten Ansetztank, in dem das trockene Pulver (Cellulose oder PAK) in Wasser dispergiert wird. Die fertig angesetzte Suspension wird dem Filter jeweils über eine Kreiselpumpe (Anschwemmbetrieb) oder eine Schlauchpumpe (Body-Feed Betrieb) zugeführt. Die Dosierstation verfügt über eine eigene Steuerung, die mit der Filtersteuerung kommuniziert. Über die Steuerung können die Feststoffkonzentrationen und die Dosiermengen eingestellt werden.



Abbildung 8: Filteranlage (Foto A. Klinkert, 2024)

5.2 Aufbauphase

In der Aufbauphase traten erste Verzögerungen gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung auf:

- Die von der Kläranlage zur Verfügung gestellte Fläche für die Pilotanlage wurde noch für die Durchführung von Instandsetzungsarbeiten benötigt. Dadurch verzögerte sich der Baubeginn um ca. 6 Wochen.
- Lieferprobleme bei den Komponenten der Steuerung für die Dosiertechnik resultierten in einer mehrwöchigen Verzögerung der Lieferung.
- Die Erkrankung des Mitarbeiters, der die Steuerung der Dosiertechnik programmierte, führte zu weiteren Verzögerungen.

Zusammen mit verschiedenen weiteren, kleineren Problemen ergab sich eine Verzögerung, die dazu führte, dass die Pilotanlage erste Mitte Dezember 2023 in Betrieb gehen konnte.

6 Betrieb und Optimierung der Anlage

Ab Mitte Dezember 2023 konnten erste Testläufe mit der Versuchsanlage durchgeführt werden. Die Testläufe waren geprägt durch deutlich zu geringe und nicht reproduzierbare Standzeiten. Die Standzeiten lagen dabei im Bereich von ca. 20 Minuten bis zu 6 Stunden. Eine gezielte Änderung von Parametern war dadurch nicht möglich. Die erwarteten Änderungen im Anlagenverhalten wurden immer wieder durch die nicht reproduzierbaren Effekte von Störungen überlagert.

Schon ab der Anfangsphase waren die erreichten Filterstandzeiten deutlich zu niedrig. Dies hatte, wie nachfolgend beschrieben, mehrere Ursachen, die sukzessive beseitigt werden mussten. Die folgende Beschreibung ist nicht chronologisch, weil die Probleme parallel auftraten und sich gegenseitig beeinflussten.

Zunächst zeigte sich, dass die Rohcellulose nicht aus den angelieferten Big-Bags gefördert werden konnte. Der Rüttler der Big-Bag Entleerstation reichte nicht aus, um das Material aus dem unteren Auslass des Big-Bags ausfließen zu lassen. Das Material in den Big-Bags war zu fest gepackt. Um weiterhin mit dem vorhandenen Material arbeiten zu können, wurden die Big-Bags manuell in größere Big-Bags umgefüllt. Hierzu wurde der zu entleerende Big-Bag über den neuen Big-Bag gehängt. Da das Material nicht frei ausfloss, musste es mit einem Spaten so weit aufgelockert werden, dass es durch den Big-Bag-Auslass nach unten in den neuen Big-Bag fiel. Das in den größeren Big-Bags nun lockerer gepackte Material war schließlich für die Entleerung in der vorhandener Big-Bag-Entleerstation geeignet. Bei weiteren Lieferungen wird der Hersteller der Rohcellulose die Big-Bags weniger dicht befüllen. Ein Test mit entsprechend befüllten Big-Bags war erfolgreich.

Diverse Probleme mit der Steuerung und der Kommunikation zwischen der Filtersteuerung und der Steuerung der Dosieranlage erforderten Programmanpassungen. Mehrfach wurde nur PAK angeschwemmt, was im Nachgang jeweils eine aufwändige manuelle Reinigung der Filteranlage zur Folge hatte.

Das Volumen des Anschwemmkreislaufes war zu groß. Dies führte zu einer ungleichmäßigen Ablagerung der Anschwemmschicht auf den Filterscheiben. Zwischen den Filterscheiben entstanden Feststoffbrücken, die nicht bei der Abreinigung der Filterscheiben entfernt werden konnten und schließlich die Filterscheiben verformten. Die Verformung konnte durch neu konstruierte Abstandshalter zwischen den Filterscheiben begrenzt werden. Schließlich wurde aber der Abstand zwischen den Filterscheiben vergrößert. Hierzu wurde nur die halbe Anzahl der Filterscheiben (7 statt 14) eingebaut und die fehlenden Scheiben durch Abstandsringe ersetzt. Dadurch reduzierte sich die Filterfläche und damit der erzielbare Volumenstrom der Anlage auf die Hälfte. Zusätzlich wurde der Anschwemmkreislauf deutlich verkleinert, um eine gleichmäßigere Anschwemmung zu erreichen. Die verbogenen Filterscheiben mussten ersetzt werden, weil Versuche, die Scheiben zu richten, nicht erfolgreich waren.

Die Filteranlage wird mit einem konstanten Durchsatz betrieben. Hierzu wird der Filtratvolumenstrom mit einem Strömungssensor gemessen. Die Filtersteuerung regelt dann die Beschiebungspumpe der Anlage so, dass auch bei ansteigendem Druck in der Anlage der Filtratvolumenstrom konstant bleibt. Es zeigte sich nach einiger Zeit, dass die gemessenen Volumenströme sehr fehlerbehaftet (bis zu 50 % zu niedrig) waren. Durch die Regelung wurde

dann ein viel höherer Filtratvolumenstrom eingestellt und damit die Filterstandzeit entsprechend reduziert. Der Strömungssensor wurde ausgetauscht. In der Folge wurden Standzeiten über 4 Stunden erreicht. Nach einer Betriebszeit von ca. einem halben Jahr fiel der Sensor mit den gleichen Problemen wieder aus. Die Ursachen für den Ausfall konnten nicht ermittelt werden. Der Sensor wurde schließlich durch einen nach einem anderen Prinzip arbeitenden Strömungssensor ersetzt.

Die bei der Regeneration der Anschwemmschicht anfallende Suspension wird mit Hilfe eines Schrägbandfilters (Sekundärfilter) eingedickt und entwässert. Das dabei anfallende Filtrat ist nicht vollständig feststofffrei und wird im sogenannten Abschlammbehälter gesammelt. Am Schluss eines Filtrationszyklus wird der Abschlammbehälter über den Filterkessel entleert und der enthaltene Feststoff mit der Filterschicht dem Sekundärfilter zugeführt. Es zeigte sich, dass der Abschlammbehälter zu klein ausgelegt wurde. Je nach Spülwassermenge bei der Abreinigung der Filterscheiben lief der Abschlammbehälter über. Mit dem überlaufenden Wasser gelangte in erster Linie Feinstmaterial in den Filterkreislauf, welches beim nächsten Filterlauf schnell zu einer Verblockung der Filterschicht führte. Das Überlaufen des Abschlammbehälters war von verschiedenen Faktoren abhängig, so dass sich plötzlich nach einer Phase mit guten Filterstandzeiten ohne zunächst erkennbaren Grund Filterstandzeiten unter 30 Minuten ergaben.

In Absprache mit der Kläranlage wurde, nach Erkennen der Problematik, der Inhalt des Abschlammbehälters in einen Gully auf dem Kläranlagengelände gepumpt und somit in den Zulauf der Kläranlage geleitet.

Gelegentlich wurden die Filterläufe durch Fehlermeldungen der für die Pumpensteuerung verwendeten Frequenzumrichter unterbrochen. Dies konnte durch eine Programmänderung (Anfahrampen) behoben werden.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Problemen bestand immer wieder der Verdacht, dass sich das Edelstahlgewebe der Filterscheiben zusetzt und den hohen Druckaufbau bzw. die kurze Filterstandzeit verursacht. In diesen Fällen mussten die Filterscheiben aufwändig aus dem Kessel ausgebaut und manuell gereinigt werden. Das ISWW hat in diesem Zusammenhang orientierende Durchströmungsversuche an den Filterscheiben durchgeführt um den Einfluss verschiedener Abreinigungstechniken und die mögliche Bildung eines filtrationshemmenden Biofilms zu untersuchen. Hierbei wurde herausgearbeitet, dass die Reinigungsintensität die Durchlässigkeit der Scheibe klar beeinflusste und sich die Kombination aus manuellem Abbürsten und Hochdruckreinigung am effektivsten in Bezug auf die Durchlässigkeit erwies (vgl. Abbildung 9). Die Rückstände, die auf den Filterscheiben im Kessel verbleiben, deuteten eher auf Ablagerungen der Anschwemmmaterialien (PAK und Rohcellulose) hin. Eine Biofilmbildung, auch im Inneren der Scheiben, konnte nicht nachgewiesen werden.

Inwieweit eine reduzierte Filterstandzeit durch Ablagerungen auf den Filterscheiben in Wechselwirkung mit der oben beschriebenen Problematik bzgl. des Strömungssensors stand, kann nicht eindeutig geklärt werden.



Abbildung 9: Linkes Bild: ausgebaute Filterscheibe mit Feinmesh auf Stützgewebe. Rechtes Bild: aus Filterkessel ausgebaute Filterscheiben (links), Hochdruck gereinigte Scheibe (rechts) (Foto: K. Bauerfeld, 2024)

7 Begleitende Untersuchungen

Parallel zu den Arbeiten in Kapitel 6 und 8 wurden begleitende Versuche mit einer kleineren mobilen Filteranlage auf der Kläranlage durchgeführt. Die ergänzenden Versuchsreihen wurden zur Untersuchung von kleinteiligen Fragestellungen durchgeführt, die sich während der Projektbearbeitung ergeben haben. Die Vorteile der kleineren mobilen Versuchsanlage lagen vor allem in der Möglichkeit, die Randbedingungen der Filtrationsdurchläufe individuell anpassen zu können.

7.1 Mobiler Anschwemmfilter

7.1.1 Aufbau der Anlage

Der Aufbau der mobilen Filteranlage (Abbildung 10) entspricht prinzipiell dem der Pilotanlage. Die Peripherie der Pilotanlage, bestehend aus der Dosierung und Suspendierung der Filterhilfsmittel, ist bei dieser Anlage jedoch nicht vorhanden. Die Anlage verfügt lediglich über eine Filterscheibe mit einer Fläche von etwa $0,5 \text{ m}^2$. Der nominelle Volumenstrom liegt bei $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ und entspricht damit einer spezifischen Filterflächenbeschickung von $4,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Der Zulauf der mobilen Anlage wurde für die Untersuchungsreihen in Kapitel 7.1.4 aus dem Vorlagetank der Pilotanlage gezogen und für die Untersuchungen in Kapitel 7.1.5 aus dem Ablaufgerinne hinter der Nachklärung der Kläranlage gezogen.

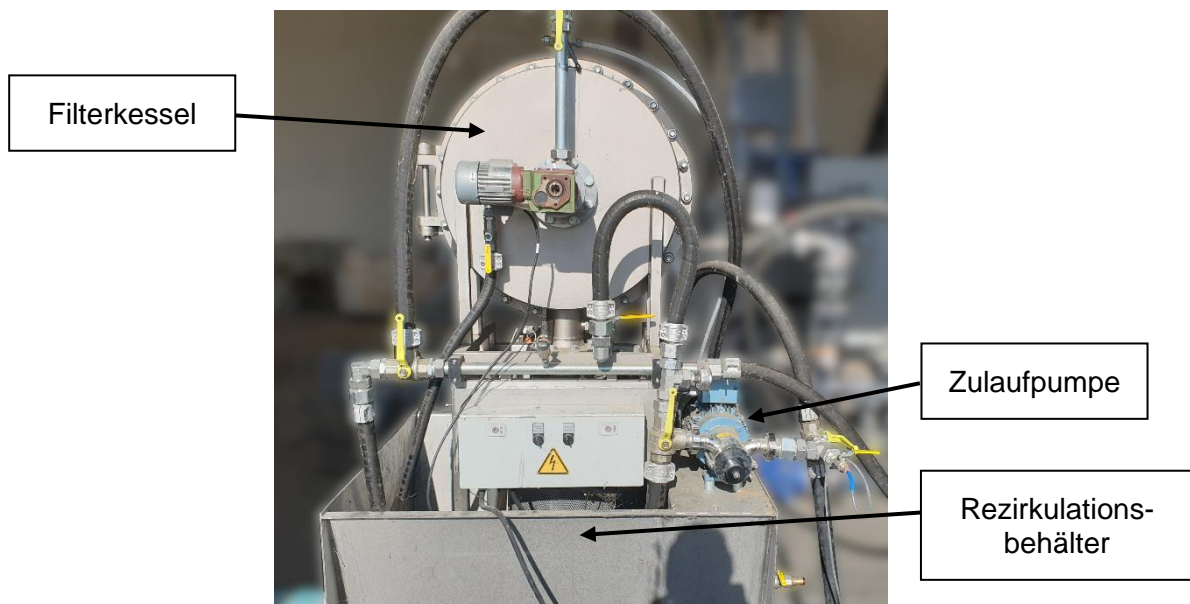


Abbildung 10: Mobile Filteranlage (Harder, 2024)

Die Anschwemmung der Anlage erfolgte durch händische Zugabe der zuvor suspendierten bzw. eingeweichten Filterhilfsmittel in den Rezirkulationsbehälter. Der Bodyfeed wurde über ein T-Stück an der Saugseite der Pumpe zugegeben. Nach Beendigung des Filtrationsvorgangs kann der Filterkuchen durch Rotation der Filterscheibe bei halb gefülltem Kessel abgeschwemmt und in den, mit einem Filtertuch ausgekleideten Behälter, abgelassen werden. Bei den nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde der Filterkuchen hingegen ohne Abschwemmung von der Filterscheibe abgeschabt und für weitere Analysen und

nachgeschaltete Versuchsreihen aufgefangen. Anschließend wurde die Filterscheibe händisch mit einer Bürste gereinigt.

7.1.2 Untersuchungsprogramm

Im Laufe der Projektbearbeitung ergaben sich Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeiten mit der Pilotanlage nicht beantwortet werden konnten. Die mobile Anschwemmfilteranlage bietet aufgrund des händischen Betriebs und dem deutlich geringeren Volumenstrom die Möglichkeit, die Randbedingungen bei der Anschwemmung und der Filtration gezielt zu variieren.

Die folgenden Fragestellungen wurden ergänzend untersucht:

1. Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Partikelkonzentrationen im Zulauf der Filteranlage.
2. Erprobung der Wiederverwendung von Filterschlamm als Filterhilfsmittel und Bestimmung dessen Einflusses auf die Elimination ausgewählter Abwasserparameter.

Zudem wurden mehrere Filtrationsdurchläufe mit der mobilen Anlage mit einer definierten Referenzeinstellung gefahren um einen Abgleich zur Pilotanlage zu ermöglichen.

7.1.3 Material und Methoden

Anschwemmung und Bodyfeed

Die Anschwemmung erfolgte in zwei Schritten mit einer Anschwemmdauer (Dauer der Rezirkulation) von jeweils 10 Minuten. Die erste Anschwemmung wurde mit einer spezifischen Zugabe von 250 g Rohcellulose pro m² Filterscheibe durchgeführt. Die zweite Anschwemmung erfolgte mit weiteren 250 g Rohcellulose und zusätzlich 75 g Pulveraktivkohle pro m² Filterscheibe.

Der Bodyfeed wurde spezifisch mit 54 g Rohcellulose und 6 g Pulveraktivkohle pro m³ Filtrat zugegeben. Dazu wurde eine Stammlösung mit einer hohen definierten Konzentration an Rohcellulose und Aktivkohle in dem genannten Verhältnis angesetzt und daraus der Bodyfeed abgezogen. Die suspendierte und gerührte Stammlösung stand dabei auf einer Waage, wodurch eine stetige Justierung des Kugelhahns zur definierten Zugabe des Bodyfeeds möglich war.

Die Filtrationsdurchläufe mit wiederverwendetem Filterschlamm wurden abweichend in einem Schritt angeschwemmt. Dafür wurde auf Trockenmassebasis 575 g TM des dekantierten Filterschlammes je m² Filterscheibe angeschwemmt. Der Bodyfeed wurde analog aus dem dekantierten Filterschlamm mit einer spezifischen Zugabe von 60 g TM je m³ zugegeben.

Probenahme

Der Filterzulauf wurde als Mischprobe über den gesamten Filterlauf genommen. Vom Ablauf wurden in Abhängigkeit der zu erwartenden Filterstandzeit 0,5h- bzw. 1h-Mischproben genommen. Teilproben (vom Zu- und Ablauf) wurden über die erste Stunde alle 10 Minuten und anschließend alle 20 Minuten volumenproportional entnommen.

Analysemethoden der untersuchten Abwasserparameter

Die Zu- und Ablaufproben der Filtrationsdurchgänge wurden entsprechend der nachfolgend gelisteten Methodik analysiert.

Tabelle 2: Analysemethoden der Untersuchungen mit der mobilen Filteranlage

Parameter	Methode
Trockenmasse (TM) Feststoffanteil (TR)	Bestimmung nach DIN EN 12880 (2001)
Abfiltrierbare Stoffe (AFS)	Bestimmung in Anlehnung an DIN 38409 Teil 2 (1987) mit Kernspurmembranen 0,2 µm (Sartorius Track-Etched Membranes, 47 mm, 0,2 µm)
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), gelöster chemischer Sauerstoffbedarf (CSB (gelöst))	Bestimmung mit Küvettentests Hach Lange LCK1414
Gesamtphosphor (Pges)	Bestimmung mit Küvettentest Hach Lange LCK349
Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK (254nm))	Bestimmung mit UV/VIS Analytik Jena Specord 210 Plus und 50 mm LLG-Quarzküvette
Spezifischer Filtrationswiderstand	Bestimmung nach DIN EN 14701-2 (2006) mit Filterdurchmesser von 47 mm, digitaler Erfassung des Abtropfgewichts, Glasfaserfilter (Roth Rotilabo CR263, 47 mm), 65 kPa Druck und 100 ml Probenvolumen mit 20 g TM/l.

Für die Analyse der gelösten Parameter wurden die Proben vorbereitend mit Spritzenvorsatzfiltern (LabClub Nylon LC-OL 124784, 25 mm, 0,45 µm) filtriert.

Die Fraktionierung der Partikel in den Kläranlagenabläufen und von dem desintegrierten Schlamm wurde durch konsekutive Filtration über Membranfilter mit 8 µm (Sartorius Cellulose Nitrate Filter, 50 mm, 8 µm), 3 µm (Sartorius Cellulose Nitrate Filter, 50 mm, 3 µm) und 0,45 µm (GVS NC WHT sterile, 47 mm, 0,45 µm) erreicht. Bei den jeweiligen Filtrationsschritten wurde darauf geachtet, dass bei Reduktion des Filtratstroms die Filtration beendet wurde, um die Trenngrenze des Filters nicht zu weit zu reduzieren. Die auf den drei Filtern zurückgehaltene Partikelmasse wurde für die Darstellung in Summe zu 100 % angenommen.

7.1.4 Einfluss unterschiedlicher Partikelkonzentrationen im Zulauf der Filteranlage

Eine erhöhte Partikelkonzentration bzw. AFS-Konzentration im Zulauf zur Filteranlage führt tendenziell zu einer kürzeren Filterstandzeit, da sich die Filterschicht schneller mit den abfiltrierten Partikeln zusetzt und der Druckverlust entsprechend schneller ansteigt. Um den Einfluss der AFS-Konzentration im Zulauf auf die Filterstandzeit quantifizieren zu können, wurden Filterläufe mit künstlich erhöhten AFS-Konzentration im Zulauf durchgeführt. Zudem sollte durch die Erfassung weiterer Abwasserparameter untersucht werden, ob die AFS-Konzentration neben dem Einfluss auf die Filterstandzeit auch einen Einfluss auf die Elimination der betrachteten Abwasserparameter hat.

Für die künstliche Erhöhung der AFS-Konzentration im Zulauf sollten Partikel zugegeben werden, die den Eigenschaften der realen Partikel im Ablauf der Nachklärung möglichst nahekommen. Die Partikel, die in den Ablauf der Nachklärung übergehen, werden durch die Sedimentation in der Nachklärung nicht abgetrennt und sollten daher sehr klein sein und eine geringe Dichte aufweisen.

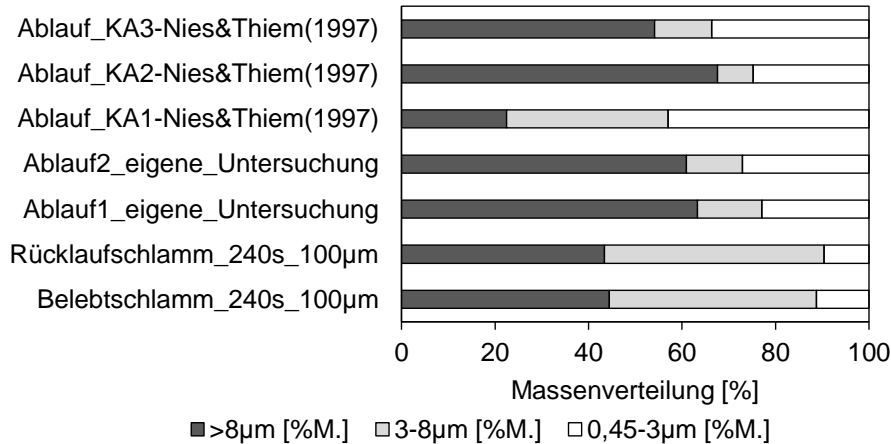


Abbildung 11: Partikelgrößenverteilung von Kläranlagenabläufen

In Abbildung 11 sind Partikelgrößenverteilungen von fünf Kläranlagenabläufen und von zwei speziell behandelten Schlammproben aufgetragen. Die Partikelgrößenverteilungen sind in drei Größenklassen eingeteilt, die sich aus den nominellen Porenweiten der verwendeten Membranfilter ergeben. Die aus Neis und Thiem (1997) übertragenen Werte wurden für die entsprechenden Partikelgrößengrenzen aus den Abbildungen abgelesen bzw. durch lineare Interpolation berechnet. Auch bei dieser Untersuchung wurde die Partikelgrößenverteilung durch Filtration über Membranfilter ermittelt. Die Kläranlagenabläufe sind, bis auf die Probe der Kläranlage 2 aus Neis und Thiem (1997), geprägt durch eine große Massenfraktion von Partikeln über 8 µm und einen wesentlichen Anteil der feinen Partikel zwischen 0,45 und 3 µm. Die Fraktion zwischen 3 und 8 µm weist hingegen einen geringen Anteil der Partikelmasse auf.

Da eine Abtrennung bzw. Aufkonzentrierung der Partikel aus dem Kläranlagenablauf als nicht praktikabel eingestuft wurde, wurden alternativ Partikel aus der Belebung (Belebtschlamm) genutzt und durch eine mechanische Desintegration die Partikelgröße manipuliert. Die typische Größe von Belebtschlammflocken ist mit rund 50 bis 500 µm deutlich größer als die Partikel im Ablauf der Kläranlage. Zur Zerkleinerung der Schlammflocken wurde ein Ultraschallhomogenisator (Bandelin SonoPlus HD4200 mit UW200) genutzt. Auf Basis von Vorversuchen mit unterschiedlicher Intensität des Ultraschallaufschlusses und Ergänzung einer Siebung wurde die folgende Vorbehandlungsmethode entwickelt: Etwa 600 ml des Belebtschlammes wurden mit einer Amplitude von 70 % über zweimal 2 Minuten desintegriert. Nachfolgend wurden die verbleibenden Grobstoffe durch Siebung über Analysesiebe mit Maschenweiten von 1 mm und anschließend 100 µm abgetrennt. Dadurch konnte die durchschnittliche Partikelgröße des Schlammes reduziert werden. Allerdings war somit eine Annäherung an die Partikelgrößenverteilung der Kläranlagenabläufe nur bedingt möglich. Durch die Desintegration wurden die Schlammpartikel hauptsächlich bis zu einer Größe von 3 bis 8 µm zerkleinert. Partikel in der Größenklasse von 0,45 bis 3 µm konnten durch die Desintegration nicht in einem vergleichbaren Maße wie in den beprobten Kläranlagenabläufen erzeugt werden. Eine höhere

Intensität des Ultraschallaufschlusses führte in erster Linie zu einer noch größeren Fraktion der Partikel zwischen 3 und 8 μm .

Für die Anhebung der AFS-Konzentration im Zulauf wurden Erhöhungen um 2 mg/l bis maximal 6 mg/l gewählt. Die real gemessenen AFS-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage während der Projektlaufzeit variierten von etwa 3 bis 6 mg/l. Durch die Dosierung desintegrierten Belebtschlammes konnte die AFS-Konzentration bis auf das Doppelte angehoben werden. Damit sollte einerseits die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Kläranlagen mit höheren AFS-Konzentrationen im Ablauf ermöglicht und andererseits sollte die Auswirkung von Betriebszuständen mit vermehrtem Schlammabtrieb untersucht werden.

Die sich nach Dosierung des desintegrierten Belebtschlammes ergebene AFS-Konzentration im Zulauf der Filteranlage wurde rechnerisch ermittelt, da eine Probenahme hinter dem Zuga-
bepunkt an der mobilen Anlage nicht möglich war. Dafür wurde die gesamte zugegebene Masse an Schlamm suspension über den Filterlauf gewogen und mit der entsprechenden AFS-Konzentration der Suspension auf die gemessenen AFS-Konzentration des Zulaufs addiert (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnete AFS-Konzentrationen im Zulauf der mobilen Filteranlage

Filterlauf	AFS-Konzentration Zulauf (0,2 μm) [mg/l]	AFS-Konzentrations- erhöhung aus Zugabe [mg/l]	Berechnete AFS-Konzentration [mg/l]
Referenz	4,48	0	4,48
+2 mg/l	4,87	1,93	6,81
+4 mg/l	5,45	3,97	9,42
+6 mg/l	5,88	6,05	11,93

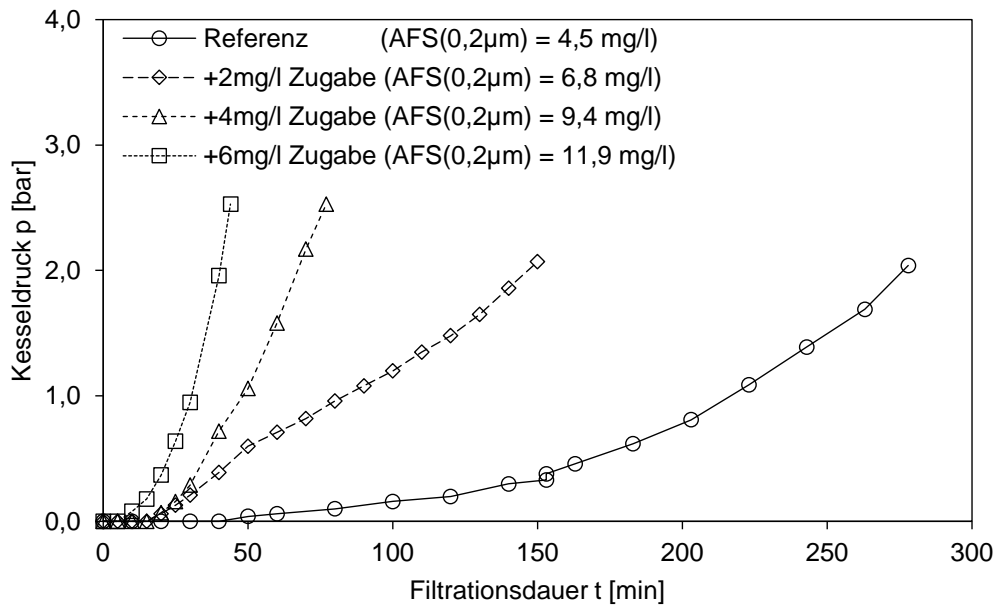


Abbildung 12: Verläufe des Kesseldrucks der Filterläufe der mobilen Filteranlage mit unterschiedlichen AFS-Konzentrationen im Zulauf

Anhand der Druckverläufe und der erreichten Filtrationsdauern in Abbildung 12 ist der Einfluss der AFS-Konzentration im Zulauf klar erkennbar. Schon innerhalb der ersten 10 bis 30 Minuten ist bei erhöhten AFS-Konzentrationen der Kesseldruck deutlich angestiegen. Dies deutet auf eine schnelle Verblockung der Filterschicht hin. Eine Erhöhung der spezifischen Zugabe von Bodyfeed bei höheren AFS-Konzentrationen bietet sich hier als Abhilfemaßnahme an. Dadurch sollte der Effekt der Verblockung reduziert werden können. Eine Trübungsmessung im Zulauf zu der Filteranlage könnte hier mit einer Regelung verknüpft werden um die Dosierung automatisch zu steuern.

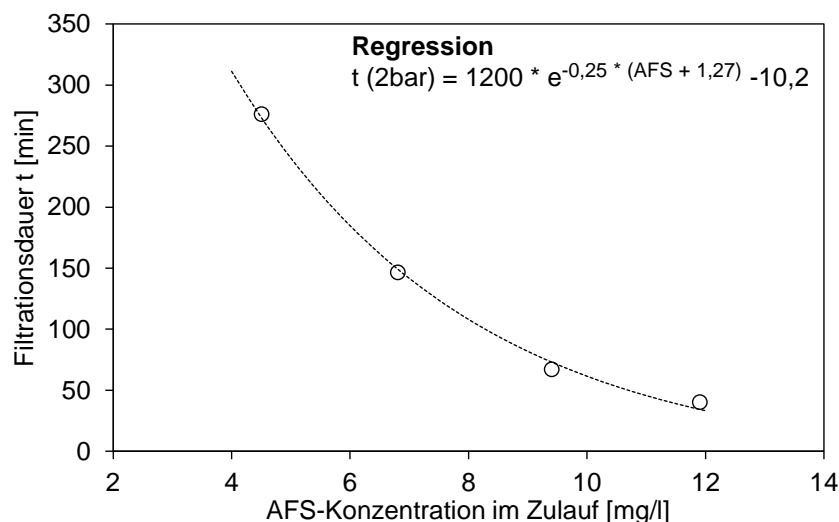


Abbildung 13: Abhängigkeit der Filterstandzeit von der AFS-Konzentration im Zulauf

Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der Filterstandzeit und der AFS-Konzentration im Zulauf wurden in Abbildung 13 die erreichten Filtrationsdauern bis zu einem Kesseldruck von 2 bar gegen die AFS-Konzentrationen im Zulauf aufgetragen. Es deutet sich ein

exponentieller Zusammenhang zwischen den beiden Variablen an, der durch die Regressionsgleichung in der Abbildung beschrieben werden kann.

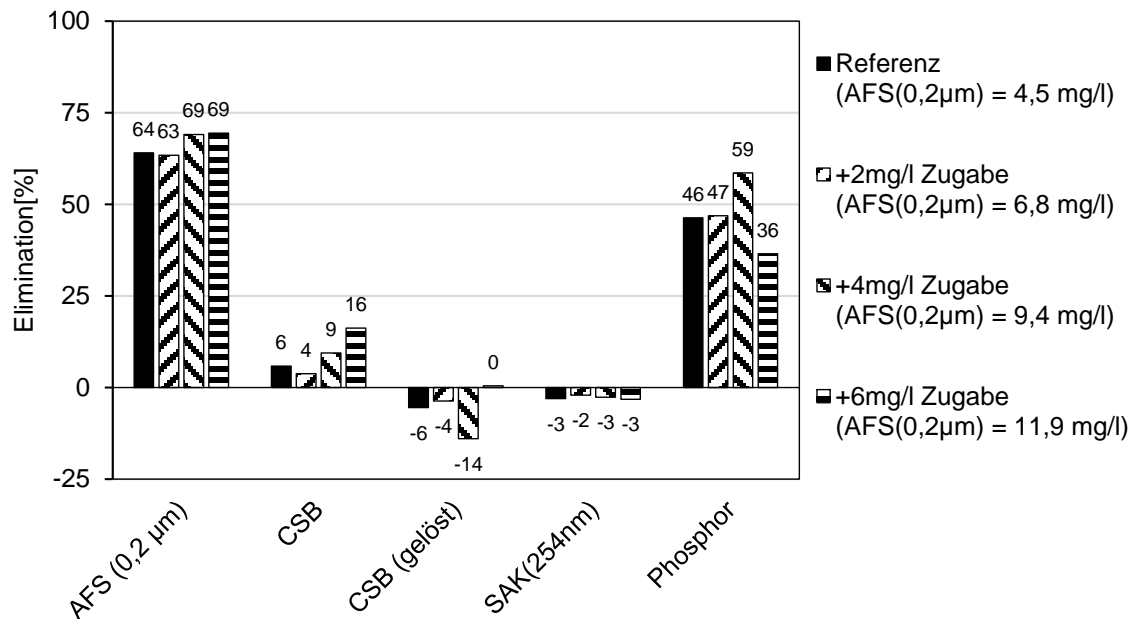


Abbildung 14: Eliminationsgrade ausgewählter Abwasserparameter in Abhängigkeit der AFS-Konzentration in Zulauf

In Bezug auf die Elimination der betrachteten Abwasserinhaltsstoffe in Abbildung 14 zeigt sich im Hinblick auf die AFS- und die CSB-Elimination in der Tendenz eine zunehmende Elimination mit steigender AFS-Konzentration. Dies kann durch die Partikelgrößenverteilung der zugegebenen Schlammpartikel bedingt sein. Diese weist im Vergleich zum typischen Kläranlagenablauf einen geringeren Anteil besonders kleiner Partikel auf, wodurch der prozentuale Rückhalt im Filter eventuell höher ausfällt. Andererseits kann auch das schnellere Zusetzen der Filterschicht zu einem verbesserten Partikelrückhalt durch eine verkleinerte Trenngrenze und damit zu einem besseren Rückhalt kleiner Partikel führen (vgl. auch Abbildung 15). Im Hinblick auf die gelösten Parameter und die Phosphorelimination ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen. Durch die Freisetzung gelöster organischer Verbindungen kommt es zu einer geringfügigen Zunahme des SAK(254nm) und der gelösten CSB-Konzentration (vgl. Kapitel 8.3.1).

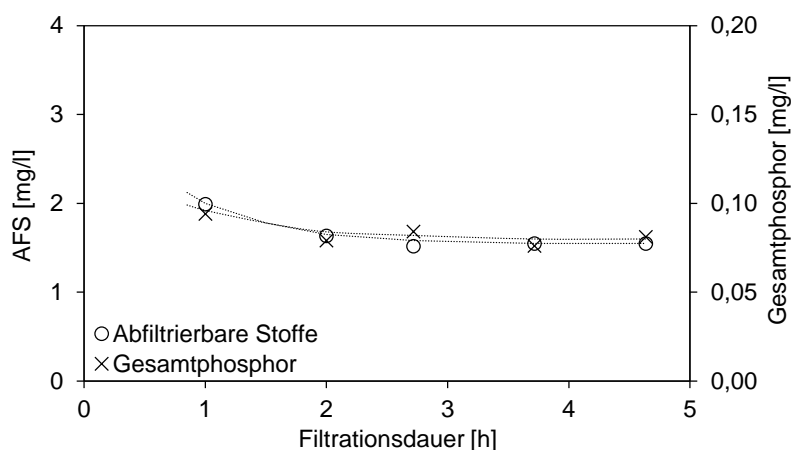


Abbildung 15: AFS- und Gesamtposphorkonzentration im Filterablauf über den Filterlauf (Referenz)

In Abbildung 15 sind die AFS- und Gesamtposphorkonzentrationen im Ablauf der Filteranlage für den Referenzdurchlauf aufgetragen. Die Mischprobe über die erste Stunde weist höhere Konzentrationen auf, als die Mischproben im weiteren Verlauf. Dies kann gegebenenfalls durch den zuvor beschriebenen Kuchenfiltrationseffekt erklärt werden. Durch die zunehmende Abscheidung von Partikeln im Filterkuchen schließen sich die größeren Poren und verbessern dadurch potenziell die Abtrennung besonders kleiner Partikel. Ein weiteres (optisches) Indiz dafür sind die nachfolgend abgebildeten Filter, die für die Probenaufbereitung des Filterablaufs genutzt wurden.

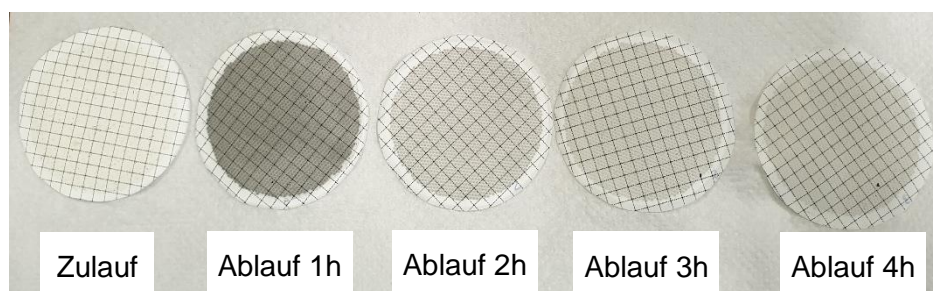


Abbildung 16: Membranfilter der Zulaufprobe (links) und der 1h-Mischproben des Ablaufs in zeitlicher Reihenfolge rechts davon (Harder, 2024)

Die Filter der vier Ablaufproben in Abbildung 16 zeigen, dass über die ersten 60 Minuten vergleichsweise viel Pulveraktivkohle im Ablauf des Filters vorhanden ist (Schwarzfärbung). Die Partikel der Pulveraktivkohle sind vergleichsweise klein und können vermutlich durch größere Poren in der Anschwemmschicht den Filter passieren. Im Verlauf der Filtration reduziert sich die aufgrund der Filterfärbung optisch abschätzbare PAK-Konzentration im Ablauf, was auf einen verbesserten Rückhalt hindeuten kann.

7.1.5 Ergebnisse zur Wiederverwendung des Filterschlammes

Das zur Filtration eingesetzte Filterhilfsmittel nimmt einen signifikanten Anteil der Betriebskosten ein (vgl. Kapitel 4.3). Eine Wiederverwendung des verbleibenden Filterschlammes könnte, bedingt durch die eingesparten Anschaffungskosten der Rohcellulose und die reduzierten Kosten bei der Filterschlammmentsorgung, die Wirtschaftlichkeit weiter optimieren. Dafür ist es

erforderlich, die feinen Partikel aus dem Filterschlamm zu entfernen, um den dadurch hervorgerufenen Druckverlust zu reduzieren.

Es wurden die folgenden drei Verfahren zur Trennung der abwasserbürtigen Partikel von der Rohcellulose und der Pulveraktivkohle im entwässerten Filterschlamm untersucht:

- Intensives Dispergieren des resuspendierten Filterschlammes. (20 Minuten Rühren bei 800 RPM mit Propellerrührorgan)
- Natronlaugebehandlung des Filterschlammes. (0,01 M NaOH mit anschließendem langsamen Rühren über eine Stunde)
- Ultraschallbehandlung des resuspendierten Filterschlammes. (Eine bzw. zwei Minuten Ultraschallbehandlung)

Das intensive Rühren des Filterschlammes stellt eine einfach umzusetzende Möglichkeit dar, die Agglomerationen der Feststoffe im Filterschlamm durch mechanische Scherkräfte aufzulösen. Die Natronlaugebehandlung umfasst die vorherige Zugabe von Natronlauge mit anschließend langsamer Umwälzung. Ziel der Natronlaugezugabe ist dabei die Auflösung der schleimartigen extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), die einen wesentlichen Anteil der Belebtschlammmatrix ausmachen (Nielsen et al., 2004). Die dritte Behandlungsvariante ist eine weitere mechanische Behandlung durch Ultraschall zur Auflösung der Agglomerationen.

Nach dem Vorbehandlungsschritt zur Auflösung der Agglomerationen wurden die Proben in einen 1 Liter Standzylinder gegeben, auf 1 Liter aufgefüllt und nach fünf Minuten Absetzdauer der Überstand mit einem dünnen Rohr abgezogen. Die fünf Minuten Absetzdauer erschienen einerseits ausreichend lang um die größeren Partikel der Rohcellulose sedimentieren zu lassen und andererseits die feinen Partikel in Suspension zu halten. Das verbliebene Sediment wurde anschließend aus dem Zylinder ausgespült und in einer Becherzentrifuge bei 3.500 G über 10 Minuten zentrifugiert. Nach Dekantieren der zentrifugierten Probe wurde von dem verbliebenden Sediment der Feststoffanteil für weitergehende Untersuchungen ermittelt.

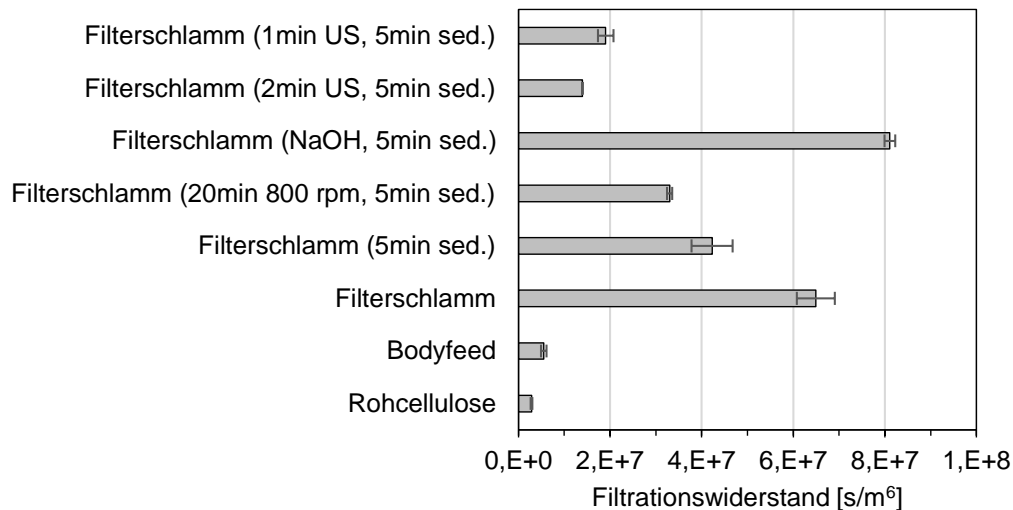


Abbildung 17: Filtrationswiderstände unterschiedlich behandelter Filterschlammproben (Fehlerbalken bilden die Min- und Max-Werte der Doppelbestimmung ab)

In Abbildung 17 sind die gemessenen Filtrationswiderstände des vorbehandelten und dekantierten Filterschlammes, des nicht vorbehandelten dekantierten Filterschlammes und des unbehandelten Filterschlammes aufgetragen (vgl. Kapitel 8.1). Zusätzlich sind als Referenz die Filtrationswiderstände der (eingeweichten) Rohcellulose und des (eingeweichten) unbenutzten Bodyfeeds aufgetragen. Bis auf die Vorbehandlung mit der Natronlauge reduzieren alle Verfahren den Filtrationswiderstand des Filterschlammes. Schon das alleinige Resuspendieren mit anschließendem Dekantieren reduziert den Filtrationswiderstand um rund 35 %. Das vorherige intensive Rühren reduziert den Widerstand noch weiter. Die geringsten Filtrationswiderstände des behandelten Filterschlammes ergeben sich nach der Ultraschallbehandlung (US). Allerdings sind auch diese im Vergleich zu den Filtrationswiderständen des Bodyfeeds und der Rohcellulose um ein Vielfaches höher.

Die weiteren Untersuchungen beschränkten sich auf die Vorbehandlungsmethode durch intensives Rühren und Dekantieren, da diese eine deutliche Reduktion des Filtrationswiderstands ermöglichte und die Umsetzung einfach und damit praxisnah ist. Zur Beurteilung der Praktikabilität dieser Vorbehandlung wurden Filtrationsdurchläufe mit der mobilen Filteranlage bei Verwendung von recycelten Anschwemmmaterial und Bodyfeed durchgeführt. Die Vorbehandlung des Filterschlammes wurde dafür größer skaliert, das prinzipielle Vorgehen aber beibehalten. Der verwendete Filterschlamm stammt aus vorherigen Filterläufen mit der mobilen Anlage. Für die Vorbehandlung wurde 1 kg entwässertes Filterschlamm in einer 5 Liter Schütte mit rund 3,5 Liter Leitungswasser vermischt und 30 Minuten bei 1.100 RPM mit einem axialen Propellerrührer intensiv dispergiert. Anschließend wurde der vorbehandelte Schlamm in einem zylindrischen 10 Liter Glasreaktor über 8 bis 10 Minuten sedimentiert und anschließend der Überstand mit einem dünnen Rohr abgezogen. Der Schlamm wurde so zweimal hintereinander dekantiert, indem nach dem ersten Dekantieren der Reaktor erneut mit Wasser aufgefüllt, umgerührt und das Dekantieren nach weiteren 8 bis 10 Minuten wiederholt wurde.

Tabelle 4: TM-Bilanz der Dekantierung von vorbehandeltem Filterschlamm

	Anteil im Überstand 1 [%]	Anteil im Überstand 2 [%]	Anteil im Sediment [%]
1.te Vorbehandlung	4,4 vom TM_0	1,9 vom TM_0	94,2 vom TM_0
2.te Vorbehandlung	4,6 vom TM_0	2,5 vom TM_0	95,0 vom TM_0

Zur Abschätzung des wiederverwendbaren Anteils der Filterschlamm-trockenmasse wurden TM-Bilanzen von zwei Vorbehandlungen ermittelt. Dabei zeigt sich, dass rund 6 % der Trockenmasse über den Überstand entnommen und 94 bis 95 % der TM als wiederverwendbares Sediment verbleiben. Das Sediment wurde anschließend für zwei Filterläufe als Anschwemm-material und als Bodyfeed genutzt.

Zur optischen Charakterisierung der Filterschlamm- und Überstandsproben wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt (vgl. Abbildung 18).

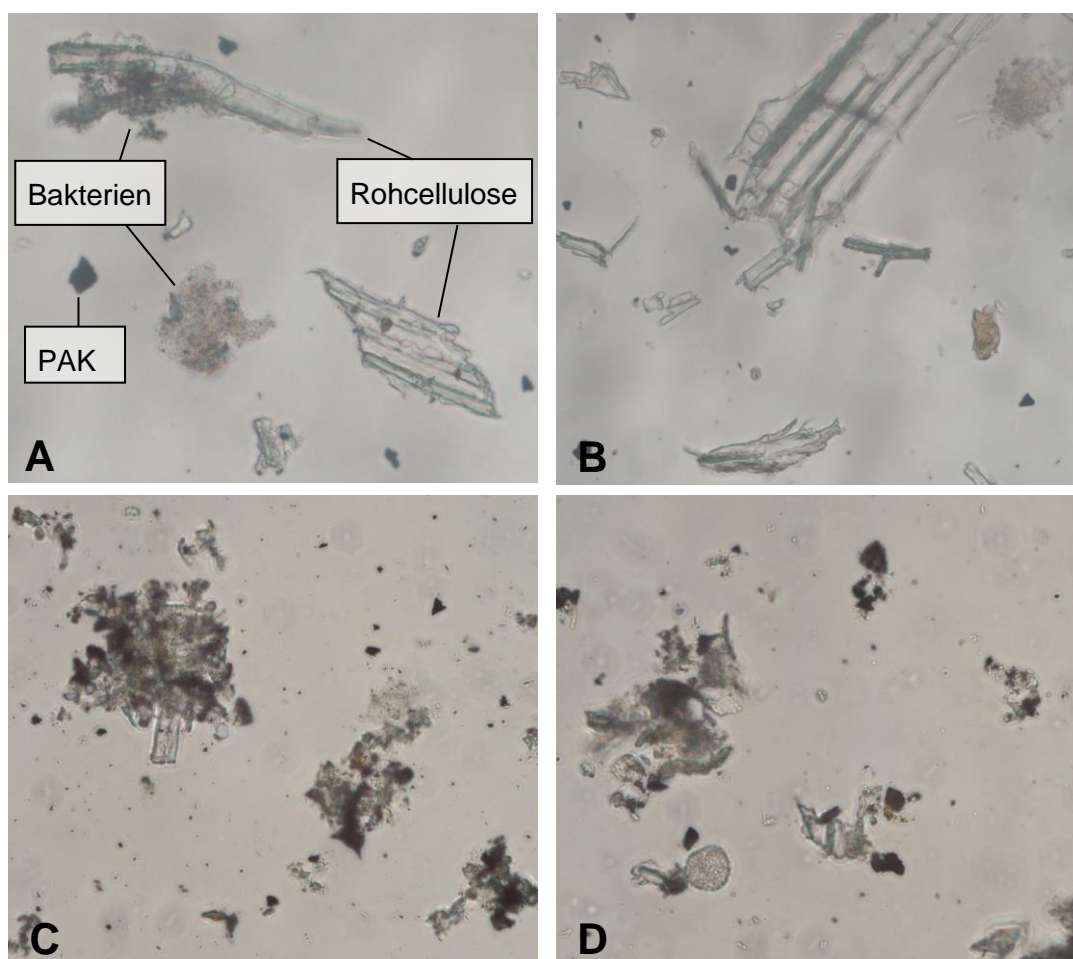


Abbildung 18: Mikroskopische Aufnahmen der Filterschlamm- und Überstandsproben (A: unbehandelter Filterschlamm, B: Sediment nach Dekantierung, C: erster Überstand, D: zweiter Überstand) (Harder, 2024)

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen qualitativ die Zusammensetzung des Filterschlammes und der über den abgezogenen Überstand entnommenen Partikel. Die Rohcellulose bzw. die Holzfasern sind dabei als transparente, faserartige Partikel, die Pulveraktivkohle als einheitlich

schwarze, klar abgegrenzte Partikel und die Bakterien- bzw. Belebtschlammflocken als ungleichmäßig geformte, teilweise transparente Partikelmassen zu erkennen. Der Filterschlamm (Bild A) setzt sich erwartungsgemäß hauptsächlich aus Holzfasern mit geringem Anteil an Aktivkohlepartikeln und Bakterienflocken zusammen. Dabei erscheinen die Bakterienflocken überwiegend an den Holzfasern anzuhaften. Diese Form der Agglomeration soll durch die Vorbehandlung aufgelöst werden. Die Überstände (Bilder C und D) enthalten große Anteile an Bakterienflocken und Aktivkohlepartikeln, aber auch Holzfasern. Dies zeigt, dass durch das Dekantieren gezielt die kleinen und leichten Partikel entfernt werden. Die Entnahme von Pulveraktivkohle ist dabei grundlegend nicht erwünscht, da eine längere Kontaktzeit mit dem Abwasser potenziell eine höhere Beladung mit adsorbierbaren Abwasserinhaltsstoffen und damit eine bessere Ausnutzung der Aktivkohle ermöglicht. Das Abziehen der feinen Aktivkohlepartikel über den Überstand lässt sich allerdings aufgrund ihrer geringen Sinkgeschwindigkeit nicht vollständig verhindern. Das verbleibende Sediment (Bild B) zeigt ein ähnliches Bild wie der Ausgangsschlamm, mit einem hohen Anteil an Holzfasern, aber auch immer noch Bakterienflocken.

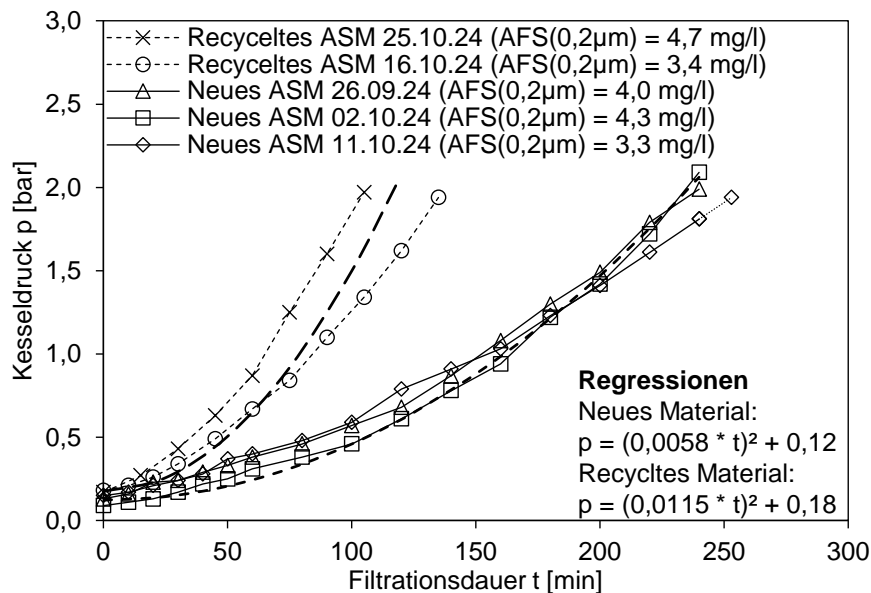


Abbildung 19: Verläufe des Kesseldrucks der Filterläufe der mobilen Filteranlage mit neuen und recycelten Filterhilfsmitteln

In Abbildung 19 sind die Verläufe des Kesseldrucks der beiden Filterläufe mit recyceltem Anschwemmmaterial und Bodyfeed zusammen mit drei Filterläufen mit neuen Filterhilfsmitteln aufgetragen. Die Verwendung von recyceltem Filterschlamm hat zu einer Reduktion der Filterstandzeit von rund 50 % gegenüber der Filtration mit unbenutztem Anschwemmmaterial geführt. Ein Betrieb mit komplett recyceltem Anschwemmmaterial und der vorgestellten Vorbehandlung erscheint daher nicht zielführend. Durch ein alternatives Vorgehen, z.B. eine Ultraschallvorbehandlung oder eine weitere Optimierung des genutzten Vorbehandlungsverfahrens, bspw. durch noch häufigeres Dekantieren, lässt sich die Filterstandzeit wahrscheinlich noch verbessern. Vor dem Hintergrund der großen Unterschiede, die sich bei den Filtrationswiderstandsmessungen zwischen dem frischen Anschwemmmaterial und dem unterschiedlich vorbehandelten Filterschlamm ergaben (vgl. Abbildung 17), ist auf Basis der vorliegenden

Untersuchungsergebnisse nicht davon auszugehen, dass sich mit recycelten Filterhilfsmitteln vergleichbare Filterstandzeiten erreichen lassen.

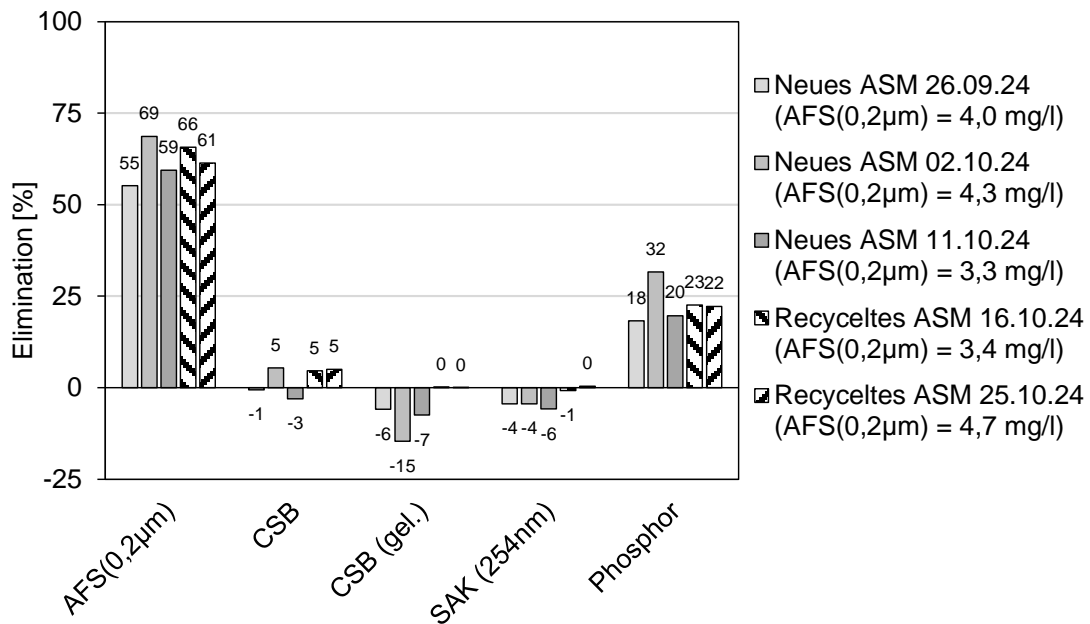


Abbildung 20: Eliminationsgrade ausgewählter Abwasserparameter bei Verwendung von neuen und recyceltem Filterhilfsmitteln (ASM = Anschwemmmaterial)

Die Eliminationsgrade bei Verwendung von neuen und recyceltem Filterhilfsmitteln in Abbildung 20 unterschieden sich hinsichtlich der erreichten AFS- und Phosphorreduktion nicht erkennbar. Bei den gelösten Parametern SAK (254nm) und CSB (gelöst) zeigt sich hingegen bei Verwendung von neuen Filterhilfsmitteln eine geringe Erhöhung, vermutlich durch die Freisetzung von löslichen organischen Substanzen aus der Rohcellulose. Dieser Effekt ist bei der Wiederverwendung des Filterschlammes nicht zu erkennen, allerdings ist dabei auch keine Reduktion durch Adsorptionseffekte zu verzeichnen.

8 Charakterisierung des Filterschlammes

Durch die Zugabe der Filterhilfsmittel Rohcellulose und Aktivkohle sowie der Abscheidung von Partikeln aus dem Kläranlagenablauf fällt stetig Filterschlamm an. Dieser Filterschlamm ist als Abfallprodukt der Abwasserreinigung gemäß der AbfKlärV (§2 Absatz 2) als Klärschlamm der kommunalen Abwasserreinigung einzuordnen und fällt damit auch unter die entsprechenden gesetzlichen Bestimmungen zur Entsorgung. Nachfolgend wird der Filterschlamm charakterisiert und hinsichtlich unterschiedlicher Entsorgungsmöglichkeiten untersucht.

8.1 Material und Methoden

Filterschlammproben

Für die Untersuchungen wurden zwei Filterschlammproben genutzt. Eine Probe wurde aus dem Vakuumbandfilter der Pilotanlage am 20.08.24 entnommen. Zum Zeitpunkt der Probenahme betragen die Filtrationsdauern 3 bis 4 Stunden, was der angestrebten Filterstandzeit für den kontinuierlichen Betrieb entspricht, so dass die Zusammensetzung dieser Probe als repräsentativ für einen idealen Filtrationsgang angesehen wird. Diese Probe wurde für

Entwässerungsversuche und für Versuche zur gemeinsamen Entwässerung des Filterschlammes mit Faulschlamm der kommunalen Kläranlage genutzt.

Eine weitere Filterschlammprobe stammte aus der mobilen Filteranlage vom Filterlauf am 26.04.24 mit einer Filtrationsdauer von rund 4,5 Stunden und wurde für die chemische Charakterisierung genutzt.

Analysemethoden zur Charakterisierung des Filterschlammes

Die Analyse der Parameter zur Charakterisierung des Filterschlammes erfolgte entsprechend der nachfolgenden Auflistung.

Tabelle 5: Analysemethoden der Filterschlammcharakterisierung

Parameter	Methode
Trockenmasse (TM), Trockenmasseanteil (TR)	Bestimmung nach DIN EN 12880 (2001)
TR(A)-Wert	Bestimmung nach Kopp (2001) bei 30 °C und 0,17 l/s Luftvolumenstrom. Graphische Auswertung mit Origin-Pro 2021
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), gelöster chemischer Sauerstoffbedarf (CSB (gelöst))	Bestimmung mit Küvettentests Hach Lange LCK514, LCK 314 und LCK1414
Gesamtphosphor (Pges)	Bestimmung mit Küvettentest Hach Lange LCK350
Gesamtstickstoff (TNb)	Bestimmung mit Küvettentest Hach Lange LCK 338 (Laton)
Brennwert (H _o)	Bestimmung nach DIN 51900-3 (2005) mit adiabatischem Bombenkalorimeter IKA C400 bei 25 °C.
Aerobe Abbaubarkeit	Die aerobe Abbaubarkeit wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 9888 (1999) mit reduzierter Versuchsdauer von 7 Tagen und einem TS-Gehalt von 1,4 g/l bestimmt.
Capillary Suction Time (CST)	Bestimmung mit Filterpapier Schleicher & Schüll 2668 und elektrischer Zeiterfassung

8.2 Ergebnisse der Charakterisierung

8.3 Charakterisierung der Rohcellulose und der Pulveraktivkohle

In Tabelle 6 sind wesentliche Eigenschaften der zur Filtration eingesetzten Hilfsmittel aufgeführt.

Tabelle 6: Charakterisierung der zur Filtration eingesetzten Rohcellulose und Pulveraktivkohle

Parameter	Rohcellulose	Pulveraktivkohle
Glühverlust	97 %	90 %
CSB	1.349 g O ₂ /kg TM	1.869 g O ₂ /kg TM
TN _b	0,99 g N/kg TM	Nicht nachweisbar
P _{ges}	0,12 g P/kg TM	0,64 g P/kg TM
TR(A)	49,8 %	52,9 %
H _o	19.675 MJ/kg TM	26.846 MJ/kg TM

Beide Filterhilfsmittel weisen hohe organische Anteile mit hohen Brennwerten auf. Zudem ist gemäß der hohen TR(A)-Werte eine gute Entwässerbarkeit und damit auch ein hoher Heizwert zu erwarten.

8.3.1 CSB-Freisetzung aus der Rohcellulose

Bei den Filterläufen der mobilen Anlage war stets eine geringfügige Zunahme der gelösten CSB-Konzentration und des SAK (254nm)-Wertes im Ablauf zu beobachten. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zur Erwartung, dass die gelösten organischen Verbindungen durch Adsorption an der Aktivkohle abnehmen würden und sich auch in den analysierten Konzentrationen an CSB und des SAK(254 nm) widerspiegeln (vgl. Kapitel 7.1.4 und 7.1.5). Daher wurde nachfolgend eine mögliche CSB-Freisetzung aus der Rohcellulose untersucht.

Durch wiederholtes Spülen der eingeweichten Rohcellulose mit demineralisiertem Wasser in einer Druckfiltration bei etwa 2 bar und anschließender CSB-Messung, konnte eine CSB-Freisetzung aus der Rohcellulose bestätigt und quantifiziert werden. Daneben wurde durch die Messung der CSB-Freisetzung einer Mischung aus Rohcellulose und Pulveraktivkohle auch die spezifische Adsorption durch die Aktivkohle bestimmt.

Tabelle 7: CSB-Freisetzung durch die Rohcellulose

	CSB-Freisetzung
Rohcellulose	47,3 g CSB/kg TM Rohcellulose
Rohcellulose + Pulveraktivkohle	20,3 g CSB/kg TM Rohcellulose

Die spezifische CSB-Freisetzung der Rohcellulose reduziert sich durch die Adsorption an der Aktivkohle um rund 57 %. Bei einer Filtrationsdauer je Durchgang von etwa vier Stunden, einem spezifischen Volumenstrom von 2,4 m³/(m²·h), einer initialen Anschwemmung mit 500 g Rohcellulose pro m² und 54 g Rohcellulose pro m³ Filtrat ergibt sich überschlägig ein spezifischer Verbrauch von 106,1 g Rohcellulose je m³ Filtrat. Multipliziert mit der CSB-Freisetzung

aus Tabelle 7 kann die mittlere Zunahme der gelösten CSB Konzentration so mit 2,2 mg/l abgeschätzt werden. Dies deckt sich mit der mittleren absoluten Erhöhung der gelösten CSB-Konzentration der Filterläufe mit neuen Filterhilfsmitteln in Kapitel 7.1.4. mit durchschnittlich 2,2 mg/l (siehe Anhang).

In einem aeroben Batchversuch wurde zudem die Abbaubarkeit der freigesetzten Verbindungen untersucht. Nach 7 Tagen Inkubationsdauer wurde dabei ein CSB-Abbaugrad von 84 % erreicht. Dies spricht für eine gute biologische Abbaubarkeit der freigesetzten organischen Verbindungen.

8.3.2 Eigenschaften des Filterschlammes nach Filtration

Nachfolgend sind die wesentlichen Eigenschaften des nach der Filtration verbleibenden Filterschlammes (als Gemisch aus Rohcellulose, Pulveraktivkohle und Suspensa) aufgeführt. Die Messwerte wurden aus zwei Filterschlammproben stichprobenartig ermittelt (Zuordnung in der Tabelle).

Tabelle 8: Wesentliche Eigenschaften des Filterschlammes

Filterschlamm	
TR ^{*1}	33,4 %
TR(A) ^{*1}	45,9 %
GV ^{*2}	98 %
CSB _{ges} ^{*2}	1.453 g O ₂ /kg TM
P _{ges} ^{*2}	1,57 g P/kg TM
N _{ges} ^{*2}	5,27 g N/kg TM
H _o ^{*2}	21.068 MJ/kg TM
H _u ^{*3}	5.409 MJ/kg OS

^{*1} Probe aus der Pilotanlage vom 20.08.24

^{*2} Probe aus der mobilen Anlage vom 26.04.24

^{*3} Berechnet mit TR = 33,4 %

Der Vergleich der Eigenschaften des Filterschlammes (Tabelle 8) und der Eigenschaften der Filterhilfsmittel in Tabelle 6 zeigt den Einfluss der abgeschiedenen abwasserbürtigen Partikel auf. Die in dem Filterschlamm zurückgehaltenen Partikel erhöhen die Nährstoffgehalte und reduzieren den zu erwartenden Trockenrückstand nach Entwässerung. Der Trockenrückstand nach Entwässerung mit dem Vakuumbandfilter ist dabei geringer als der über den TR(A)-Wert prognostizierte Trockenrückstand.

Hinsichtlich der Nährstoffgehalte im Filterschlamm ist besonders der Phosphorgehalt von Interesse. Ab Ende 2029 müssen kommunale Klärschlämme großer Kläranlagen mit Phosphorgehalten über 20 g P/kg TM gemäß der AbfKlärV einer Phosphorrückgewinnung unterzogen werden. Dies trifft auf den Filterschlamm mit rund 1,6 g P/kg TM eindeutig nicht zu, sodass für

die separate Entsorgung des Filterschlammes der Weg der Mitverbrennung, bspw. in Zementwerken oder Müllverbrennungsanlagen, offensteht. Diesbezüglich ist auch der hohe Brenn- und Heizwert zu erwähnen, der eine thermische Verwertung attraktiv erscheinen lässt. Der Heizwert lässt sich durch eine optimierte Entwässerung potenziell noch weiter steigern.

8.4 Ergebnisse zur gemeinsamen Entsorgung mit dem Faulschlamm

Neben einer separaten Entsorgung des Filterschlammes kann auch eine gemeinsame Entsorgung mit dem auf kommunalen Kläranlagen anfallenden Faulschlamm aus der Primär- und Überschussschlammbehandlung Vorteile bieten. Einerseits würde eine gemeinsame Entsorgung den organisatorischen und logistischen Aufwand gegenüber einer getrennten Entsorgung reduzieren, da ein gewohnter Entsorgungsweg unverändert weitergenutzt werden könnte. Andererseits kann die gemeinsame Behandlung vom Faul- und Filterschlamm auch prozesstechnische Vorteile haben. Die Eigenschaften des Filterschlammes, wie z.B. gute Filtrierbarkeit, hoher Anteil an Strukturstoffen und geringer Anteil an gebundenem Wasser, können sich potenziell positiv auf das Wasserabgabevermögen und damit auf den Trockenrückstand nach Entwässerung, die Durchsatzleistung des Entwässerungsaggregats und den Polymermittelverbrauch auswirken. Diese hypothetischen Vorteile werden nachfolgend genauer untersucht.

8.4.1 Prognostizierter Anteil des Filterschlammes am Faulschlamm

Unter Annahme einer durchschnittlichen Filtrationsdauer von vier Stunden je Durchlauf, einem spezifischen Volumenstrom von $2,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, der entsprechenden Zugaben von Filterhilfsmitteln (siehe 7.1.3) und ohne Filterschlammrecycling ergeben sich folgende spezifische Schlammanfälle:

- 106,1 g TM Rohcellulose je m^3 Filtrat
- 13,8 g TM PAK je m^3 Filtrat
- 2,8 g TM abfiltrierte Partikel je m^3 Filtrat (61,8 % AFS-Elimination bei 4,5 mg/l AFS-Konzentration)

Das ergibt in Summe einen spezifischen Trockenmasseanfall von 122,7 g TM je m^3 Filtrat. Im Jahresmittel ist in Deutschland statistisch mit einem Abwasseranfall von 228,6 l je Einwohnerwert und Tag zu rechnen (Destatis 2014). Entsprechend ergibt sich ein Filterschlammfall im Mittel von 28,0 g TM je Einwohnerwert und Tag. Der spez. Faulschlammanfall liegt bei großen Kläranlagen bei etwa 44,5 g TM je Einwohnerwert und Tag (Knerr et al., 2014), woraus sich in Summe ein Anteil des Filterschlammes an der TM-Fracht des zu entsorgenden Schlammes von knapp 39 % ergibt. Die nachfolgenden Untersuchungen mit Vermischung von Faulschlamm wurden entsprechend mit einem TM-Anteil des Filterschlammes von etwa 40 % (Zielwert) durchgeführt.

8.4.2 Einfluss auf den Polymermittelverbrauch

Bei der maschinellen Schlammmentwässerung auf Kläranlagen werden dem anfallenden stabilisierten Klärschlamm Konditionierungsmittel zugefügt um die Oberflächenladungen der Schlammteilchen zu destabilisieren und eine Koagulation zur Verbesserung des

Entwässerungsergebnisses zu ermöglichen. Auf Kläranlagen mittlerer und hoher Anschlussgröße wird anfallender Faulschlamm aus der anaeroben Stabilisierung i.d.R. auf Zentrifugen unter Dosierung synthetischer Polymere entwässert.

Der Einfluss einer Beimischung von Filterschlamm zu einem vergleichsweise feststoffarmen Faulschlamm (charakteristisch sind 2 bis 4 % TR) auf den Polymermittelverbrauch wurde mittels eines Becherglas-/Flockungsversuch bestimmt (siehe DWA-M 383 (2019)). Mit diesem relativ einfachen Versuchsaufbau lässt sich vergleichsweise schnell und einfach der erforderliche Polymermittelbedarf für einen Schlamm abschätzen. Eine aufwändigere Bestimmung der optimalen Polymermitteldosis erschien in diesem Zusammenhang nicht zielführend. Die erforderliche Polymermitteldosis für den verwendeten Faulschlamm und das verwendete Polymer (Zetag 8185) konnte somit zu 21,7 g Wirksubstanz (WS) pro kg TM abgeschätzt werden. Durch die Zugabe des Filterschlammes reduzierte sich die erforderliche Polymermitteldosis bezogen auf die Trockenmasse deutlich. Um eine Vergleichbarkeit der Polymermittelzugabe zum Ausgangsszenario (ohne Filterschlammzugabe) beizubehalten, wird die Polymermitteldosis nur auf die Trockenmasse des Faulschlammes bezogen und erhöht sich so rechnerisch auf 23,2 g WS pro kg TM Faulschlamm. Somit ist bei einer anteiligen Erhöhung der Trockenmasse um rund 41 % lediglich mit einer Zunahme der Polymermitteldosis um knapp 7 % zu rechnen. Bezogen auf die Trockenmasse des Filterschlammes ergibt dies eine spezifische Polymermitteldosis von 3,7 g WS pro kg TM. Dies deutet darauf hin, dass die Oberflächenladung der Partikel im Filterschlamm deutlich geringer ausfällt als die Ladung der Partikel im Faulschlamm. Auch ist davon auszugehen, dass die Partikel im Filterschlamm größer sind als die Partikel im Faulschlamm und damit eine spezifisch deutlich kleinere Oberfläche aufweisen.

8.4.3 Einfluss auf die Wasserabgabe bei der Entwässerung

Ein einfaches Messverfahren zur Abschätzung der Wasserabgabegeschwindigkeit von Schlämmen stellt die Messung des CST-Werts dar. In Abbildung 21 sind die direkt gemessenen Zeitdauern und die spezifisch auf die Trockenmasse bezogenen Werte dargestellt. Im Vergleich zum Faulschlamm ist das Wasserabgabevermögen des Filterschlammes um ein Vielfaches höher. In der Mischung aus dem strukturreichen Filterschlamm und dem Faulschlamm ergibt sich eine Reduktion des spezifischen CST-Werts, die absolute Dauer ist jedoch fast identisch zu dem Faulschlamm. Die Reduktion des spezifischen CST-Werts ist daher nur rechnerisch durch den höheren Anteil der Trockenmasse des Filterschlammes gegeben, eine verbesserte Wasserabgabe des Faulschlammes lässt sich so aber nicht ableiten.

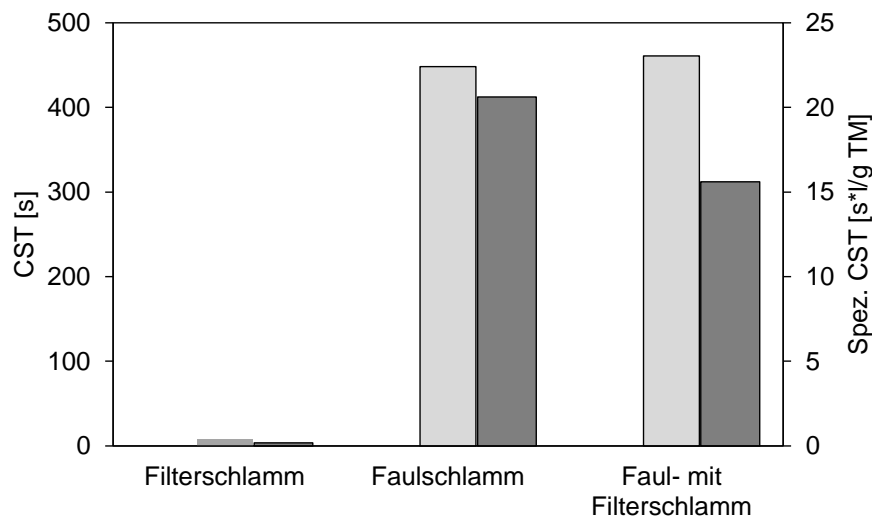


Abbildung 21: CST-Messwerte vom Filter- und Faulschlamm und deren Mischung

Die Messung vom CST wird mit unkonditionierten Schlämmen durchgeführt und hat daher orientierenden Charakter, aber keinen unmittelbaren Praxisbezug. Um den Einfluss der Konditionierung auf die Wasserabgabe berücksichtigen zu können, wurden Laborzentrifugentests bei unterschiedlichen G-Zahlen mit konditionierten Schlammproben durchgeführt. Dazu wurde der Faulschlamm und der mit Filterschlamm versetzte Faulschlamm einmal mit der optimalen Polymermitteldosis und je in einem weiteren Ansatz mit einer geringfügig unterkonditionierten Polymermitteldosis versehen. Den unterkonditionierten Proben wurde rund 13 % weniger Polymer zugegeben, sodass erkennbar kleinere und weniger stabile Flocken ausgebildet wurden. Die beiden unterschiedlich konditionierten Ansätze wurden entsprechend typischer Zentrifugalbeschleunigungen in Dekanterzentrifugen (vgl. DWA-M 366 (2013)) bei 1.000, 3.000 und 4.500 G für jeweils 10 Minuten zentrifugiert und anschließend der Trockenrückstand des Sediments bestimmt. Die so ermittelten TR-Konzentrationen wurden anschließend ins Verhältnis zu dem theoretisch höchsten Trockenrückstand gesetzt. Der maximale Trockenrückstand nach Entwässerung wurde dafür aus dem TR(A)-Wert des Filterschlammes und dem TR des Sediments vom konditionierten Faulschlamm nach Zentrifugation bei 48.000 G über das TM-Verhältnis ermittelt.

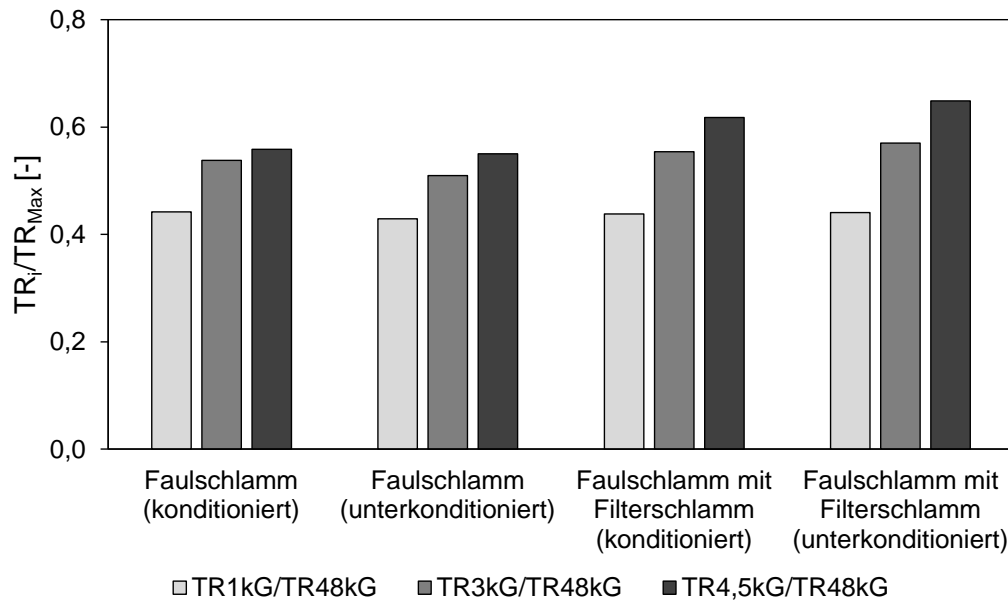


Abbildung 22: Einfluss der G-Zahl und der Konditionierung auf den erreichbaren Trockenrückstand nach Zentrifugation

Anhand der TR-Verhältnisse in Abbildung 22 zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Zentrifugalkraft die Trockenrückstände der Sedimente steigen. Für den reinen Faulschlamm ist zwischen dem optimal konditionierten und dem unterkonditionierten Faulschlamm kein relevanter Unterschied bezüglich der TR-Verhältnisse erkennbar. Hingegen zeigt sich ein Unterschied bedingt durch die Beimischung vom Filterschlamm, insbesondere bei den höheren G-Zahlen. Der Anteil an freiem Wasser, der im Sediment verbleibt, ist in Relation zu dem Faulschlamm ohne Beimischung geringer. Dies deutet darauf hin, dass das in den Flocken befindliche freie Wasser durch die Zugabe der Strukturstoffe bei vergleichbarem Energieaufwand (entspr. identischer G-Zahl) einfacher abtrennbar ist. Eine Erklärung dafür könnte die unterschiedliche Kompressibilität der Schlammpartikel und der Rohcellulose sein. Die Schlammpartikel bzw. die Schlammflocken sind im Verhältnis zu den Holzfasern der Rohcellulose kleiner, weicher und strukturschwach. Der sich bei der Zentrifugation bildende Schlammkuchen weist daher wenige Poren auf, durch die das freie Wasser austreten kann. Struktureiche Stoffe, wie z.B. Holzfasern, können Drainagekanäle im Sediment bilden und so die Wasserabgabe verbessern. Im Praxisbetrieb kann dies womöglich den Zentrifugenbetrieb verbessern, indem entweder die Zentrifuge mit einer geringeren Umdrehungszahl oder aber mit einem höheren Durchsatz bei gleichbleibend gutem Entwässerungsergebnis gefahren werden kann. Dabei muss allerdings auch die deutlich erhöhte Feststofffracht beachtet werden, die sich bei Zugabe von Filterschlamm zum Faulschlamm ergibt. Eine höhere Feststofffracht kann wiederum das Entwässerungsergebnis negativ beeinflussen. Um die erhöhte Feststofffracht durch die Zentrifuge zu fahren, kann es daher notwendig sein, die Differenzdrehzahl zu erhöhen, was wiederum einen negativen Einfluss auf das Entwässerungsergebnis haben kann (Schlegel 1996).

8.4.4 Gemeinsame Entwässerung von Faul- und Filterschlamm

Eine Mischung von feststoffarmem Faulschlamm und Filterschlamm mit einem TM-Anteil des Filterschlammes von 36 % wurde hinsichtlich des erreichbaren Trockenrückstands nach der Entwässerung (TR(A)) untersucht.

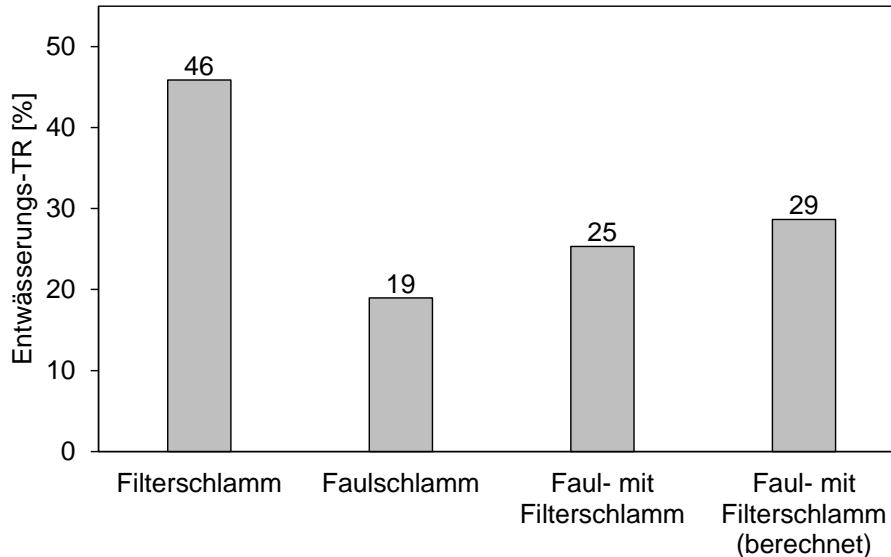


Abbildung 23: Prognostizierte Trockenrückstände nach maschineller Entwässerung

Um den Trockenrückstand nach Entwässerung der Mischung einschätzen zu können, wurden beide Schlämme zuvor separat untersucht. In Abbildung 23 sind links die prognostizierten Trockenrückstände nach Entwässerung der beiden Schlämme separat aufgetragen. Mit einem TR(A)-Wert von knapp 46 % weist der Filterschlamm einen deutlich geringeren gebundenen Wasseranteil als der Faulschlamm auf. Mit gut 19 % Trockenrückstand nach Entwässerung des Faulschlammes ergibt sich rechnerisch in der Mischung ein Trockenrückstand nach Entwässerung von knapp 29 %. Der versuchstechnisch ermittelte Trockenrückstand der konditionierten Schlammischung nach Zentrifugation bei 48.000 G liegt mit gut 25 % knapp unter dem berechneten Wert. Unter der Annahme eines Trockenrückstands des Faulschlammes von rund 19 % in der Mischung ergibt sich rechnerisch ein Trockenrückstand des Filterschlammes von knapp 37 % und damit geringfügig höher als die Probe im Austrag des Vakuumbandfilters (vgl. Tabelle 8). Für den untersuchten Faulschlamm kann damit schlussendlich bei einer Mischung mit einem TM-Anteil des Filterschlammes von 36 % eine Zunahme der zu entsorgenden Schlammmasse von rund 17 % erwartet werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich keine eindeutigen Vorteile aus der gemeinsamen Entwässerung von Faul- und Filterschlamm abzeichnen. In Anbetracht der zukünftigen Kosten der unterschiedlichen Entsorgungswege von kommunalen Klärschlämmen ist auf Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse die separate Entsorgung über die Mitverbrennung zu präferieren. Ein Großteil der zu entsorgenden kommunalen Klärschlämme wird zukünftig in die Klärschlammmonoverbrennung mit anschließendem Phosphorrecycling gehen. Mit prognostizierten Entsorgungskosten der Monoverbrennung von 125 bis 175 € pro Tonne entwässerten Klärschlamm liegen die Kosten hier deutlich über den spezifischen Kosten der Mitverbrennung von 60 bis 90 € pro Tonne (Könemann et al., 2024).

9 Fazit

Auf dem Klärwerk Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig wurde eine Pilotanlage zur Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe errichtet. Diverse Probleme (führten schon in der Planungs- und Bauphase zu einer markanten Abweichung vom Zeitplan, so dass die Pilotanlage erst Mitte Dezember 2023 in die Test- und Optimierungsphase gehen konnte.

Die Optimierungsphase war geprägt von nicht reproduzierbaren Störungen, die zu sehr wechselnden Filterlaufzeiten führten. In den Phasen, in denen die Anlage störungsfrei lief, konnten jedoch die guten Laufzeiten der Vorversuche reproduziert werden. Als Hauptursachen wurden ein fehlerhafter Strömungssensor sowie eine Feingutverschleppung durch einen zu klein ausgelegten Abschlammbehälter identifiziert. Hinzu kam eine größere Anzahl von weiteren Problemen mit Sensoren, Verstopfungen und Ähnlichem.

Zwingende Voraussetzung für die Optimierung der Filterschicht in Hinblick auf minimalen Materialverbrauch bei ausreichender Filtrationsleistung und Spurenstoffentnahme ist ein reproduzierbarer Betrieb der Anlage. Dieser konnte erst zum Projektende erreicht werden. Die Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH wird die Anlage noch weitere 6 Monate betreiben, um die Optimierungsarbeiten bezüglich der Filterschicht doch noch so weit wie möglich durchzuführen. Zu diesem Zweck stellt die Fa. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau einen neuen Mitarbeiter zur Fortführung der Projektarbeiten außerhalb der geförderten Laufzeit ein.

Parallel wurden Versuche an einer Filteranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt um zum einen den Einfluss variierender Abwasserqualitäten als auch der Zugabe von Bodyfeed bzw. recyceltem Filterhilfsmittel auf den Filtrationsprozess für Standzeiten nahe den Zielvorgaben unabhängig von der Einsatzfähigkeit der Pilotanlage zu untersuchen. Die orientierenden Arbeiten zeigten, dass die Filterlaufzeiten erheblich von der Feststoffbeladung im Filterzulauf abhängen. Die Rückführung von aufbereitetem Filterschlamm als Anschwemmmaterial verkürzte zudem die Filterlaufzeiten erheblich. Hier sind weitere Arbeiten hinsichtlich der Schlammaufbereitung notwendig, wenn durch die Rückführung eines Teils des Filterschlammes Betriebsmittelkosten reduziert werden sollen.

Der anfallende Filterschlamm wurde chemisch-physikalisch charakterisiert und das Entwässerungsverhalten bei einer gemeinsamen Entwässerung mit Faulschlamm, wie es für die Gesamtprozesskette auf Kläranlagen denkbar wäre, ermittelt. Hierbei zeigten sich keine eindeutigen Vorteile der Beimischung des Filterschlammes.

10 Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat S. 2023. Anschwemmtechnologie als vierte Reinigungsstufe - Erprobung einer neuen Technologie. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jg.70, Nr.1, pp. 45-50.

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023. Pre-Coat filter as advanced treatment step for further removal of dissolved and particulate emerging pollutants from municipal wastewater. Filtech 2023, 14.-16.2.2023, Köln.

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023. Anschwemmfilter als 4. Reinigungsstufe für die weitergehende Entfernung von gelösten und ungelösten Mikroschadstoffen in kommunalen Abwässern, Jahrestreffen der DECHEMA-Fachgruppen Kristallisation, Grenzflächenbestimmte Systeme und Prozesse sowie Mechanische Flüssigkeitsabtrennung, Frankfurt a.M., 9.-10.03.2023

Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023. Anschwemmfilter für die weitergehende Entfernung von gelösten und ungelösten Mikroschadstoffen aus kommunalen Abwässern. DWA KläranlagenTage/MSR-Tage 2023, 20./21.06.2023, Osnabrück.

Schulz, T. 2024. Einfluss der Partikelkonzentration im Zulauf eines Anschwemmfilters zur weitergehenden Reinigung von geklärtem Abwasser auf die Filterstandzeit, den Partikelrückhalt und die Adsorptionsleistung. Bachelorarbeit in Kooperation von ISWW, TU Braunschweig und Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Wolfenbüttel, 12.06.2024.

Stand auf der Woche der Umwelt 2024.

11 Literaturverzeichnis

- Atugoda, T., Vithanage, M., Wijesekara, H., Bolan, N., Sarmah, A., Bank, M., You, S., Ok, Y. 2021. Interactions between microplastics, pharmaceuticals and personal care products: Implications for vector transport. *Environ. Internat.*, 149 (2021), 106367, DOI: 10.1016/j.envint.2020.106367
- Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J. 2016. Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen, Ein Überblick über halb- und großtechnische Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jg. 63, Nr. 3, pp. 187-192.
- Braun, U., Stein, U., Schritt, H., Altmann, K., Bannick, C. G., Becker, R., Bitter, H., Bochow, M., Dierkes, G., Enders, K. et al. 2020: Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt. *Mikroplastik-Analytik Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren*, Stand: November 2020, <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/statuspapier-mikroplastik-analytik>
- Destatis. 2014. Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen. Teil 1: Abwasserbehandlung. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61 (12), pp. 1106–1112.
- DWA. 2019. Kennwerte der Klärschlammmentwässerung. Merkblatt DWA-M 383. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.
- DWA. 2013. Maschinelle Schlammmentwässerung. Merkblatt DWA-M 366. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.
- EAWAG. 2010. Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Abschlussbericht, September 2010. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/abwasser/Einsatz_von_Pulveraktivkohle/Abschlussbericht_MicroPoll_PAK.pdf, Zugriff 10.02.2020.
- Fuhrmann, T., Urban, I., Scheer, H., Lau, P., Reinhold, L., Barjenbruch, M., Bauerfeld, K., Meyer, S. 2021. Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen - Welche Rolle spielt die Abwasserbehandlung? *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jg. 68, Nr. 9, pp. 730-741.
- Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat S. 2023 a. Anschwemmtechnologie als vierte Reinigungsstufe - Erprobung einer neuen Technologie. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jg.70, Nr.1, pp. 45-50.
- Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023 b. Pre-Coat filter as advanced treatment step for further removal of dissolved and particulate emerging pollutants from municipal wastewater. *Filtech 2023*, 14.-16.2.2023, Köln.
- Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023 c. Anschwemmfilter für die weitergehende Entfernung von gelösten und ungelösten Mikroschadstoffen aus kommunalen Abwässern. *DWA KläranlagenTage/MSR-Tage 2023*, 20./21.06.2023, Osnabrück.
- Geers, H., Bauerfeld, K., Karwat, S. 2023 d. Anschwemmfilter als 4. Reinigungsstufe für die weitergehende Entfernung von gelösten und ungelösten Mikroschadstoffen in kommunalen Abwässern, Jahrestreffen der DECHEMA-Fachgruppen Kristallisation, Grenzflächenbestimmte Systeme und Prozesse sowie Mechanische Flüssigkeitsabtrennung, Frankfurt a.M., 9.-10.03.2023
- Knerr, H., Dilly, T., Schmitt, T. G., Hansen, J., Hien, S. 2016. Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS. Sachstandsbericht 2016. Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF).
- KomS (Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg) (Hrsg.) 2018. Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur

- gezielten Spurenstoffelimination, Stand 03/2018. https://koms-bw.de/cms/content/media/KomS_Handlungsempfehlung_2018.pdf
- Könemann, R., Lehrmann, F., Hochgürtel, H. 2024. Aktuelle Preise sowie zukünftige Kosten der Klärschlamm Entsorgung. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 71 (10), pp. 792–796.
- Kopp, J. 2001. Wasseranteile in Klärschlamm suspensionen, - Messmethode und Praxisrelevanz. Dissertation TU Braunschweig. Braunschweig: Gesellschaft zur Förderung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Braunschweig e.V (Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, Heft 66).
- Neis, U., Thiem, A. 1997. Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 36, No. 4 (1997).
- Nielsen, P. H.; Thomsen, T. R.; Nielsen, J. L. 2004. Bacterial composition of activated sludge - importance for floc and sludge properties. In: *Water Science and Technology* 49 (10), pp. 51–58. DOI: 10.2166/wst.2004.0606.
- Scheer, H., Fuhrmann, Wulf, P., T., Urban, I., Barjenbruch, M., Lau, P., Reinhold, L., Stein, J., Bauerfeld, K., Scheele, J., Jakobi, A.P., Loges, B., Hänschen, R., Schmelz, K.-G., Nafo, I., Holte., A., Grabbe, U., Fundneider, T., Sack, A., Lenz, H., Winandi, S., Ordonez, J., Meyer, S. 2022. Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt – Schlussbericht, August 2022. Online Version unter <https://www.replawa.de> und <https://bmbf-plastik.de>.
- Schlegel, S. 1996. Schlammkonditionierung. In: R. Leschber und U. Loll (Hg.): *ATV Handbuch Klärschlamm*. Ernst & Sohn Verlag.
- Sontheimer, H., Fettig, J., Frick, R., Hörner, G., Hubele, C., Zimmer, G. 1985. Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. Engler-Bunte Institut der TH Karlsruhe.
- Spelthahn, V., Dolny, R., Giese, C., Giebel, K., Leuchthaler, S., Pinnekamp, J., Linnemann, V. 2019. Mikroplastik aus Mischsystemen. Beitrag zur 52. Essener Tagung am 20.-22.03.2019. In: *GWA - Gewässerschutz, Wasser & Abwasser*, Bd. 250, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft a. d. RWTH Aachen
- Vieira, Y., Lima, E. C., Foletto, E. L., Dotto, G.L., 2021. Microplastics physicochemical properties, specific adsorption modeling and their interaction with pharmaceuticals and other emerging contaminants. *Sci. Total Environ.*, 753 (2021), 141981, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141981
- von Kienle, H., Bäder, E. 1980. Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung. Enke Verlag, Stuttgart.
- Wunderlin, P., Meier, A., Grelot, J. 2019. Pulveraktivkohle: Verfahren und Abtrennstufen. Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/06/2019_VSA_SB_Pulveraktivkohle-Verfahren-un_d.pdf
- Wookbong, K., Daehwan, K., Hee-Yeon, K. Sang Won, J., Se-Guen, L., Hyun-Chul, K., Young-Jae, L., Mi Kyung, K., Jun-Seong, H., Jee Eun, H., Jin-Kyu, P., Sung-Jun, L., Seong-Kyoon, C. 2022. Microglial phagocytosis of polystyrene microplastics results in immune alteration and apoptosis in vitro and in vivo, *Science of The Total Environment* (807), 2022, 150817, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150817

12 Projektkennblatt

Anschwemmfilter zur weitergehenden Abwasserreinigung

Kombination aus Partikelelimination und Adsorption im Kläranlagenablauf

Anschwemmfilter werden seit Jahrzehnten in der industriellen Verfahrenstechnik als anpassungsfähige Aggregate zur Reduktion partikulärer Verunreinigungen in Betriebsmitteln genutzt. Das Anschwemmprinzip kann grundsätzlich auch zur Nachfiltration von Klarwasser im Ablauf der biologischen Reinigungsstufe von Kläranlagen genutzt werden. Bei Anpassung der Filterhilfsstoffe lassen sich der Rückhalt partikulärer Abwasserbestandteile (Suspensa, Mikroplastik) und damit partikelgebundener Wasserinhaltsstoffe (z.B. Phosphate) mit der Reduktion adsorbierbarer Spurenstoffe (u.a. Pharmaka, Pflanzenschutzmittel, Industriechemikalien) in einer kompakten Technologie vereinen.

Herausforderung weitergehende Abwasserreinigung

Kommunale Kläranlagen leisten viel – und doch gilt es, punktuelle Einträge von umweltrelevanten Schadstoffen im Kläranlagenablauf und deren potentiell negative Effekte auf die aquatische Umwelt stetig zu verringern. Die Debatte um die flächendeckende Realisierung weitergehender Reinigungsstufen zur Elimination u.a. von Mikroschadstoffen, umfasst eine Reihe an technischen Optionen, die v.a. die Partikelfiltration mit Ansätzen zur Adsorption oder Oxidation gelöster Abwasserinhaltsstoffe in mehrstufigen Systemen vorsieht. Mit der Anschwemmtechnologie lassen sich prinzipiell die zusätzliche Reduktion gelöster Spurenstoffe als auch die Abscheidung möglichst kleiner Partikel in einer kompakten technischen Einheit kombinieren – die Kläranlage wird als neues Anwendungsfeld dieser Technologie erschlossen.

Erfolgersprechende Vorarbeiten

Im Labor und Technikumsmaßstab zeigte sich in Voruntersuchungen mit Pulveraktivkohle als Filterhilfsstoff eine hohe Eliminationsleistung für Feststoffe und ausgewählte Spurenstoffe. Dabei konnten geeignete Kohleprodukte und Dosierungsszenarien getestet und die Betriebsführung erprobt werden.



Anschwemmfilter Pilotanlage, bestehend aus Filterkessel und Sekundärfilter (Bild: Hoffmann Maschinen und Apparatebau GmbH)



2 mm Pulveraktivkohle-Anschwemmsschicht auf Trägermaterial, Laborversuche (Bild: ISWW)

In den Vorversuchen konnte die Filterstandzeit erfolgreich durch die Zugabe von Cellulose zur Pulveraktivkohle als Drainagehilfsmittel erhöht werden. Damit wird die hydraulische Leistungsfähigkeit der Filterschicht wesentlich verbessert. Gleichzeitig kann die Filterschicht über das Verhältnis Pulveraktivkohle / Cellulose an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden um auf wechselnde Betriebsverhältnisse reagieren zu können. Es zeigte sich, dass trotz der Kontaktzeiten im Sekundenbereich Eliminationsraten für gelöste Schadstoffe > 80 % sicher erreicht werden. Gleichzeitig wurden Partikel bis in den Submicronbereich mit hoher Effizienz abgeschieden.

Erprobung im Pilotmaßstab auf kommunaler Kläranlage

Im Rahmen der Projektarbeiten hat Fa. HOFFMANN eine Pilotanlage entwickelt, die mit dem ISWW der TU Braunschweig aktuell für den dauerhaften Einsatz zur Abwassernachreinigung auf einer kommunalen Kläranlage der Größenklasse 5 erprobt wird. Dabei werden folgende Schlüsselfragen adressiert:

- Hat ein Upscaling einen Einfluss auf die Trenncharakteristik und die Adsorptionsleistung?
- Wie verhält sich die Technologie bei schwankenden Abwasserqualitäten?
- Wie stabil ist die Filterschicht und welche Filterhilfsstoffe sind im Dauerbetrieb am effektivsten?
- Wie hoch ist der Betriebsmittelverbrauch und welche Entsorgungsoptionen ergeben sich für die Abfallstoffe?

Neben der technisch-wissenschaftlichen Erhebung von Leistungskennzahlen und Betriebsparametern werden die spezifischen Verfahrenskosten ermittelt.



Das Projekt „Pilot-Erprobung eines Anschwemmfilters als 4. Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen (AZ 38125/01)“ wird von der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU) gefördert.

HOFFMANN Maschinen und Apparatebau GmbH
Dr.-Ing. Annika Klinkert
Hauerstr. 2-4, 38268 Lengede
☎ 05344-9009 225
✉ annika.klinkert@hoffmann-filter.de

TU Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Dr.-Ing. Katrin Bauerfeld
Pockelsstr. 2a, 38106 Braunschweig
☎ 0531-391 7939
✉ K.Bauerfeld@tu-braunschweig.de

Projektlaufzeit 15.10.2022 – 31.03.2025

Stand: Mai 2024

13 Anhang

Nachfolgend werden die Analysewerte zu den Auswertungen der Untersuchungen zum Einfluss der AFS-Konzentration im Zulauf zur Filteranlage und zur Wiederverwendung des Filterschlammes ergänzend aufgeführt.

Die beiden nachfolgenden Tabellen enthalten die Messwerte der volumenproportionalen Mischproben der Zu- und Abläufe der Versuchsreihen zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher AFS-Konzentrationen im Zulauf zur Filteranlage (Kapitel 7.1.4).

Tabelle 9: Messwerte des Referenzversuchslaufs und des Versuchslaufs mit zusätzlicher Zugabe von 2 mg/l AFS.

	Referenz		+2 mg/l	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
AFS (0,2 µm)	4,48 mg/l	1,61 mg/l	6,81 mg/l	2,45 mg/l
CSB	31,7 mg/l	29,9 mg/l	40,0 mg/l	38,5 mg/l
CSB (gelöst)	26,2 mg/l	27,7 mg/l	33,3 mg/l	34,6 mg/l
DOC	6,23 mg/l	6,87 mg/l	8,38 mg/l	8,46 mg/l
SAK (254 nm)	21,4 m ⁻¹	22,0 m ⁻¹	24,8 m ⁻¹	25,3 m ⁻¹
P _{ges}	0,15 mg/l	0,08 mg/l	0,30 mg/l	0,16 mg/l

Tabelle 10: Messwerte der Versuchsläufe mit zusätzlicher Zugabe von 4 mg/l AFS und 6 mg/l AFS.

	+ 4mg/l		+6 mg/l	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
AFS (0,2 µm)	9,41 mg/l	2,92 mg/l	11,93 mg/l	3,65 mg/l
CSB	38,9 mg/l	35,2 mg/l	44,1 mg/l	36,9 mg/l
CSB (gelöst)	28,0 mg/l	31,9 mg/l	33,4 mg/l	33,3 mg/l
DOC	7,33 mg/l	8,33 mg/l	8,26 mg/l	8,79 mg/l
SAK (254 nm)	23,4 m ⁻¹	24,1 m ⁻¹	24,4 m ⁻¹	25,2 m ⁻¹
P _{ges}	0,34 mg/l	0,14 mg/l	0,63 mg/l	0,40 mg/l

In den beiden folgenden Tabellen sind die Messwerte der volumenproportionalen Mischproben der Zu- und Abläufe der Untersuchungen zur Wiederverwendung des Filterschlammes zusammengefasst (Kapitel 7.1.5).

Tabelle 11: Messwerte der Versuchsläufe mit neuem Anschwemmmaterial.

	Neues ASM (26.09.24)		Neues ASM (02.10.24)		Neues ASM (11.10.24)	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
AFS (0,2 µm)	3,96 mg/l	1,77 mg/l	4,27 mg/l	1,34 mg/l	3,28 mg/l	1,33 mg/l
CSB	30,9 mg/l	31,1 mg/l	25,2 mg/l	23,9 mg/l	26,3 mg/l	27,1 mg/l
CSB (gelöst)	27,9 mg/l	29,6 mg/l	20,7 mg/l	23,7 mg/l	23,6 mg/l	25,4 mg/l
SAK (254 nm)	21,5 m ⁻¹	22,5 m ⁻¹	15,7 m ⁻¹	16,4 m ⁻¹	18,4 m ⁻¹	19,4 m ⁻¹
P _{ges}	0,19 mg/l	0,15 mg/l	0,24 mg/l	0,16 mg/l	0,24 mg/l	0,19 mg/l

Tabelle 12: Messwerte der Versuchsläufe mit recyceltem Anschwemmmaterial.

	Recyceltes ASM (16.10.24)		Recyceltes ASM (25.10.24)	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
AFS (0,2 µm)	3,37 mg/l	1,16 mg/l	4,67 mg/l	1,80 mg/l
CSB	27,9 mg/l	26,6 mg/l	34,3 mg/l	32,6 mg/l
CSB (gelöst)	25,2 mg/l	25,1 mg/l	30,4 mg/l	30,4 mg/l
SAK (254 nm)	20,4 m ⁻¹	20,6 m ⁻¹	25,9 m ⁻¹	25,8 m ⁻¹
P _{ges}	0,35 mg/l	0,27 mg/l	0,30 mg/l	0,23 mg/l