

Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Stufe 1

– Abschlussbericht –

im Auftrag der

Universität Stuttgart

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Hochschule Biberach

Institut für GEO und UMWELT

M. Sc. Lilia Acosta, Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Marie Launay, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Zettl, Hochschule Biberach

März 2021

Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

Eine Kooperation von

DWA Landesverband Baden-Württemberg • Hochschule Biberach • Universität Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	6
1. Veranlassung und Zielsetzung.....	7
2. Stand der Technik und Entwicklungen.....	9
2.1 Bindungsformen des Phosphors	9
2.2 Phosphorbilanz für kommunale Kläranlage.....	10
2.2.1 Übersicht.....	12
2.2.2 Verfahrenskonzepte zur chemischen Fällung	12
2.2.3 Erreichbare Ablaufkonzentrationen	14
2.3 Synergien mit Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung.....	17
2.3.1 Übersicht.....	17
2.3.2 Anwendung von Filtrationsverfahren.....	19
2.3.3 Untersuchungen zur P-Elimination auf Kläranlagen mit PAK-Verfahren.....	21
2.3.4 Untersuchungen zur P-Elimination in GAK-Filtern	23
2.3.5 Kombination von Filtrations- und Ozonungsanlagen.....	24
2.4 Zwischenfazit aus der Literaturrecherche.....	24
3. Mikroplastik und P-Recycling	26
3.1 Elimination von Mikroplastik in Filtrationsanlagen	26
3.2 Auswirkungen einer weitestgehenden chemischen P-Elimination auf Wirkungsgrade von P- Recyclingverfahren, die den Überschuss- bzw. Klärschlamm behandeln	26
3.3 Thermische Verwertung von Klärschlamm	27
4. Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination.....	28
4.1 Übersicht zu Fragestellungen aus der Ingenieurpraxis	28
4.2 Teilstrombetrieb der Filterstufe zur Spurenstoffelimination - Vollstrombetrieb für die P-Elimination?.....	29
4.3 Implementierung der Filterstufe in den gesamten Abwasserreinigungsprozess.....	30
4.4 Bemessungsansätze für die Filtrationsverfahren	32
4.5 Entnahmeleistungen der Filtrationstufen	33
4.6 Zwischenfazit zu Verfahrenskombinationen und Bemessungskennwerten	33
5. Auswerten vorhandener Messdaten aus Projekten des KomS Baden-Württemberg.....	35
5.1 Auswahl von Kläranlagen	35
5.2 Beschreibung der ausgewählten Kläranlagen	36

Inhaltsverzeichnis

5.2.1	Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen	36
5.2.2	Kläranlage des Eigenbetriebs Stadtentwässerung Mannheim	38
5.2.3	Kläranlage Böblingen-Sindelfingen	39
5.3	Auswertungen	40
5.3.1	Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen	40
5.3.2	Kläranlage Mannheim	43
5.3.3	Kläranlage Böblingen-Sindelfingen	47
5.4	Zusammenfassende Diskussion der Messdatenauswertungen	50
6. Zusammenfassung und weiteres Vorgehen.....		52
Literaturverzeichnis		56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der P-Fractionen im Abwasser, modifiziert von [3]	10
Abbildung 2.2 Phosphorbilanz im Abwasser[5].....	11
Abbildung 2.3 Dosierstellen für Phosphorfällung [2]	13
Abbildung 2.4 Trenngrenzen von Filterverfahren [10].....	21
Abbildung 2.5 Reinigungseffekte nach Ausbau des Ulmer Verfahrens in Kläranlagen in Baden- Württemberg [18].....	22
Abbildung 4.1 Verfahrenskombinationen und Dosierstellen für Fäll-/Flockungsmittel [35].....	31
Abbildung 5.1 Anlagenkonfiguration der Versuchsanlage HKW Stuttgart-Mühlhausen	37
Abbildung 5.2 Vereinfachtes Fließschema der Kläranlage Mannheim	38
Abbildung 5.3 Verfahrensprozess Kläranlage Böblingen-Sindelfingen.....	39
Abbildung 5.4 PO ₄ -P Werte im Zulauf und Ablauf der Versuchsanlage bei unterschiedlichen Fällmitteldosierungen	41
Abbildung 5.5 Summenhäufigkeit des Versuchsbetriebs auf dem HKW Stuttgart-Mühlhausen	42
Abbildung 5.6 Summenhäufigkeit P-Konzentrationen.....	44
Abbildung 5.7 P _{ges} Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe in Abhängigkeit der Konzentration im Ablauf der Nachklärung	45
Abbildung 5.8 P _{ges} -Konzentrationen in Abhängigkeit des mittleren täglichen Zufluss	46
Abbildung 5.9 Summenhäufigkeit des CSB im Ablauf Flockungsfilter	47
Abbildung 5.10 Summenhäufigkeiten der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf Flockungsfilter	48
Abbildung 5.11 AFS-Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe vs. AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung (aus Trübungsmessungen hochgerechnet).....	49
Abbildung 5.12 Summenhäufigkeiten der P _{ges} -Konzentrationen im Ablauf Flockungsfilter	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Hinweis zur notwendigen Verfahrenstechnik im Kontext der Anforderungen - hier: Jahresmittelwerte [6]	15
Tabelle 2.2 P-Fractionen, Verfahrenstechniken und erzielbare Ablaufkonzentrationen	16
Tabelle 2.3 Verfahren zur Entfernung von Spurenstoffen, modifiziert und ergänzt nach [10]	18
Tabelle 2.4 Möglichkeiten der Abwasserfiltration (typische Werte) [6]	19
Tabelle 2.5 Abschätzung sicher unterschrittener Feststoffgehalte im Ablauf von Filtrationsanlagen [6]	20
Tabelle 4.1 Anteil der Machbarkeitsstudien zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen	28
Tabelle 4.2: Bemessungswerte für Filtrationsanlagen [35]	32
Tabelle 5.1 Betriebsparameter der Versuchsbetriebs des HKW Stuttgart-Mühlhausen	40

Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
BAK	Biologisch Aktiver Aktivkohlefilter
Bio-P	Biologischer Phosphor
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
EBS	Eigenbetrieb Stadtentwässerung Mannheim
EW	Einwohnergleichwert
GAK	Granulierte Aktivkohle
GK	Größenklasse
HKW	Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen
KomS BW	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammmasche
N.fällb.	Nicht fällbar
P	Phosphor
PAK	Pulveraktivkohle
P _{gel}	Gelöste Phosphorverbindungen
P _{ges}	Gesamtphosphor
PO ₄ -P	Orthophosphat-Phosphor (bei der Konzentration wird nur der P-Anteil angegeben)
P _{org}	Organische Phosphorverbindungen
P _{part}	Partikulärer Phosphor
P _{poly}	Polyphosphate
RSF	Rotationsscheibenfilter
RÜB	Regenüberlaufbecken
SES	Stadtentwässerung Stuttgart
SLoPE-Phase 2	Studie zur Entwicklung von Werkzeugen zur verbesserten Lokalisierung von Phosphor-Emissionen.
Phosphor-Emissionen.	Phase 2: Berechnung nur für den Eintragspad kommunaler Kläranlagen
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1. Veranlassung und Zielsetzung

Zur Umsetzung der Maßnahmen der WRRL (Wasserrahmenrichtlinie) wurde in den zurückliegenden Jahren landesweit die P (Phosphor)-Elimination auf kommunalen Kläranlagen intensiviert. Bei vielen Gewässern zeigt sich, dass diese Maßnahmen nicht ausreichend sind (SLoPE-Phase 2) und für den Parameter Pges (Gesamtphosphor) noch höhere Eliminationsleistungen anzustreben sind. Kläranlagen der GK (Größenklasse) 3-5 mit Filtrationsanlagen sollen 0,2 mg/L Pges im Jahresmittel unterschreiten. Optional kann bei einer sehr gut funktionierenden Fällung und Feststoffabscheidung in der Nachklärung die Fällungsvariante mit $P_{ges} \leq 0,3$ mg/L und $PO_4-P \leq 0,16$ mg/L (jeweils im Jahresmittel) gewählt werden.

Unabhängig von den Maßnahmen der WRRL wurden in Baden-Württemberg in den letzten Jahren bereits siebzehn Kläranlagen mit einer Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination ausgestattet und weitere sind in Planung. Bei Kläranlagen, welche ein nachgeschaltetes PAK (Pulveraktivkohle)-Verfahren betreiben, wird Fällmittel zur Abtrennung der PAK dosiert.. Somit weisen die Anlagen auch höhere P-Eliminationsleistungen auf.

Bei den beiden Verfahren GAK-Filter und Ozonung wird für die Spurenstoffelimination keine zusätzliche Fällmitteldosierung benötigt. Durch den alleinigen Betrieb des Verfahrens ergeben sich keine höheren P-Eliminationen. Es besteht jedoch die Möglichkeit eine zusätzliche Fällmitteldosierung zu integrieren.

Um die Feststoffbelastung auf den GAK-Filter zu reduzieren, kann ein Filter für den Feststoffrückhalt vorgeschaltet werden, welcher als Flockungsfilter betrieben wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Dosierung von Fällmittel direkt vor den GAK-Filter. Inwieweit sich dies bei der GAK-Filtration als praktikabel erweist bzw. welche Mengen dauerhaft vor einen GAK-Filter dosiert werden können, muss sich in der Praxis noch zeigen.

Da bei der Ozonung eine biologische Nachbehandlung des Abwassers empfohlen wird, besteht hier die Möglichkeit eine zusätzliche Fällmitteldosierung zu integrieren.

Die Reinigungsziele P-Elimination und Spurenstoffelimination sind daher auch kombinierbar.

Sowohl für die Fällungs- als auch für die Filtervariante kann eine Förderung nach FrWw2015 gewährt werden, bei der Filtervariante jedoch nur, wenn gleichzeitig eine Anlage zur Spurenstoffelimination gebaut werden soll. Das Land BW möchte die Synergieeffekte nutzen, um auch den Ausbau zur Spurenstoffelimination weiter voran zu bringen.

Ziel dieses Projektes ist es daher, die gegenwärtig von der Fachwelt als umsetzbar eingestuften Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination hinsichtlich ihrer Potenziale zur weitestgehenden P-Elimination (herstellerunabhängig) zu bewerten, um anderen Betreibern damit Empfehlungen zu geben, mit welchen Verfahrenstechniken sich die weitestgehende P-Elimination und die Spurenstoffelimination sinnvoll kombinieren und ggf. auch schrittweise umsetzen lässt. Insbesondere sollen dabei die in Baden-Württemberg bislang zur Anwendung kommenden Techniken näher untersucht werden. Ein wesentlicher Aspekt wird dabei auch die Betriebsweise im Teil- (Spurenstoffelimination mittels PAK) oder Vollstrom (Filtration zur P-Elimination) sein. Ergänzend dazu sollen für bereits realisierte Anlagen zur Spurenstoffelimination die Potenziale für eine weitestgehende P-Elimination sowie für eine

Veranlassung und Zielsetzung

Verbesserung der CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)-(Rest)Elimination aufgezeigt werden. Die Wechselwirkungen der Prozesse zur Spurenstoffelimination, CSB-(Rest)Entnahme und zur weitestgehenden P-Elimination in großtechnischen Anlagen sind aufzuzeigen und Empfehlungen zur Betriebsweise auszuarbeiten.

Das Projekt wird stufenweise aufgebaut:

- Stufe 1: Recherchen, Konzeption, vorbereitende Arbeiten
- Stufe 2: Durchführen der großtechnischen Untersuchungen, begleitende Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
- Stufe 3: Empfehlungen für Verfahrenskombinationen, planerische/konzeptionelle und betriebliche Hinweise

In Stufe 1 sollen Forschungs- und Projektberichte sowie vorliegende Messdaten hinsichtlich der gestellten Fragestellungen ausgewertet und darauf aufbauend für die folgenden Stufen offene Fragestellungen konkretisiert, ein Untersuchungsprogramm konzipiert und letztendlich in Stufe 2 auch durchgeführt werden. Das Untersuchungsprogramm in Stufe 2 soll auf ausgewählten großtechnischen Anlagen erfolgen, bei denen ggf. zusätzliche Laboranalytik in den kläranlageneigenen Abwasserlaboren ausgeführt werden kann. Die Ergebnisse sind auszuwerten und zu interpretieren und sollen schlussendlich in Handlungsempfehlungen für Betreiber und Planer münden (Stufe 3).

Stufe 1 bildet somit die Basis für alle weiteren Untersuchungen und stellt die Grundlage dar, den Arbeitsumfang für die Stufen 2 und 3 zu konkretisieren.

2. Stand der Technik und Entwicklungen

2.1 Bindungsformen des Phosphors

Phosphor wird von allen Lebewesen und Pflanzen zum Leben benötigt. Durch die Nahrung nehmen Menschen und Tiere das lebenswichtige Spurenelement auf, scheiden es aber auch wieder aus. Ebenso wird Phosphor in Industriechemikalien- und der Landwirtschaft als Bestandteil von Düngemitteln eingesetzt. Aufgrund dieser Prozesse gelangt Phosphor mit den Abwässern über die Kläranlagen und bei Regenereignissen durch Abflüsse, beispielsweise von Regenwasserentlastungsanlagen aus dem Kanalnetz oder von intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen, auch in die Gewässer. Durch einen übermäßigen Eintrag des Pflanzennährstoffes Phosphor kann es zu einer Überdüngung der Gewässer und damit zu einem erhöhten Algenwachstum kommen, was zu einem Sauerstoffdefizit führt und damit negative Auswirkungen auf Fische und andere Wasserorganismen hat. Daher ist es wichtig, die endliche Ressource Phosphor aus dem Abwasser weitestgehend zu eliminieren und anschließend aus dem Klärschlamm zu recyceln, um es wieder in den Nährstoffkreislauf einzuführen.

Phosphor kommt im Wasser gelöst, kolloidal und partikulär vor. Die P-Fractionen werden über verschiedene punktuelle Quellen, wie Kläranlagen und Direkteinleitern aus der Industrie sowie diffuse Quellen, wie Erosion und Abschwemmung, in die Gewässer eingetragen. Hierbei verantworten die Punktquellen den größeren Anteil des Eintrages an Phosphor in die Gewässer. In Abbildung 2.1 sind die P-Fractionen im Abwasser dargestellt.

Die gelösten Fractionen machen dabei 64% der Menge in unbehandeltem kommunalen Abwasser aus. Die gelösten P-Fractionen lassen sich in reaktive (z.B. Orthophosphate) und nicht reaktive Phosphate einteilen. Zu den nicht reaktiven gehören kondensierte Polyphosphate mit mehr als einem P-Atom pro Molekül und organische Phosphate. Orthophosphate bilden den größten Anteil des gelösten Phosphates in unbehandeltem kommunalem Abwasser; sie sind biologisch verfügbar. Polyphosphate und organische Phosphate werden in der Natur durch langsame Prozesse zu Orthophosphaten hydrolysiert, sodass sie nach und nach auch den Pflanzen zur Verfügung stehen. Der gelöste nicht reaktive Phosphor bestimmt die minimale Ablaufkonzentration, die für P_{ges} erreicht werden kann [1], da er sich nicht hydrolysieren lässt. Organisch gebundener Phosphor spielt im Ablauf kommunaler Kläranlagen eine untergeordnete Rolle, in industriellen Abwässern kann er jedoch in größeren Mengen vorkommen [2].

Zu den gelösten nicht reaktiven Phosphorverbindungen gehören auch die Phosphonate. Sie sind Komplexbildner und finden zahlreiche Anwendungen in der Industrie. Damit sie die Fällungsprozesse in der Kläranlage mit ihren komplexbildenden Eigenschaften nicht stören, indem sie das Fällmittel blockieren, sollten sie bereits innerbetrieblich entfernt werden.

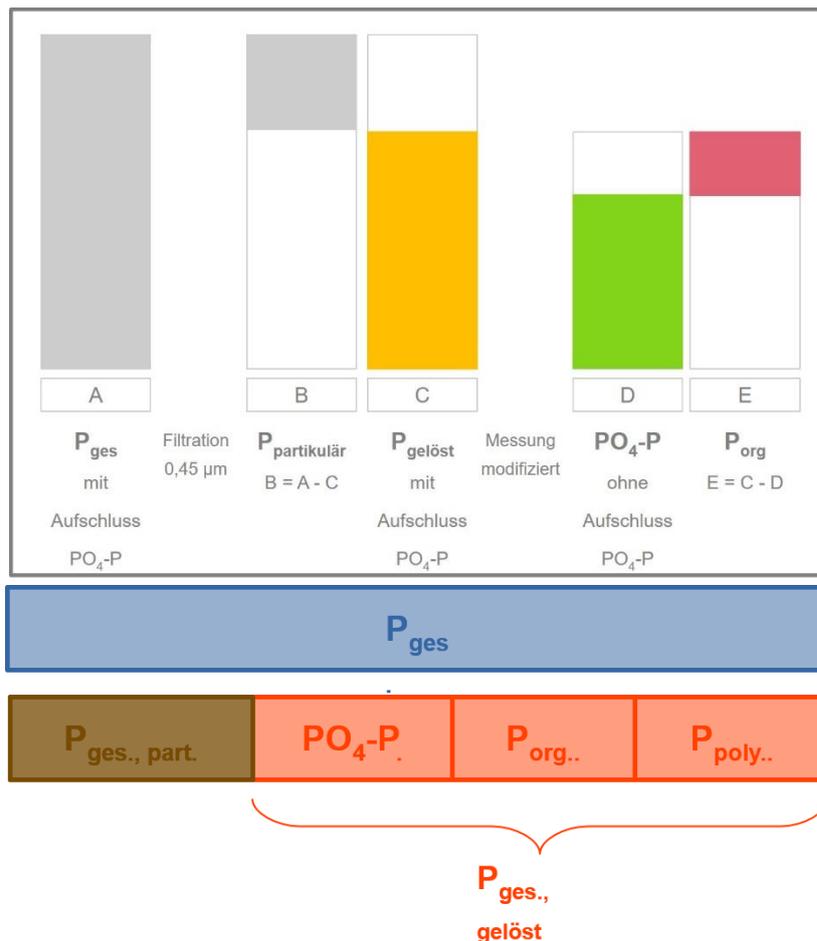


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der P-Fractionen im Abwasser, modifiziert von [3]

Aufgrund natürlicher Abbaumechanismen und der dadurch erfolgenden langsamen Freisetzung von bioverfügbarem Phosphat ist es wahrscheinlich, dass Phosphonate zur Eutrophierung beitragen. Des Weiteren wird untersucht, ob sie zur Remobilisierung von Schwermetallen beitragen, die in hohen Konzentrationen für Fische toxisch sein können. In konventionellen Kläranlagen werden Phosphonate weder aerob noch anaerob abgebaut [4].

Der Nachweis von Phosphor kann kolorimetrisch mit Molybdän erfolgen. Dabei werden sowohl Orthophosphate als auch hydrolysierte organische Phosphatverbindungen und Polyphosphate erfasst. Zur Hydrolyse kann zuvor eine Behandlung mit Säure nötig sein [1].

2.2 Phosphorbilanz für kommunale Kläranlage

In der Abwassertechnik erfolgen die Konzentrationsangaben der verschiedenen Phosphorverbindungen ausschließlich für den jeweiligen P-Anteil. Dies wird beim Orthophosphat durch die Schreibweise $PO_4\text{-P}$ kenntlich gemacht. Somit lassen sich die Konzentrationsangaben der einzelnen P-Verbindungen zu P_{ges} aufsummieren.

Abbildung 2.2 stellt die P-Bilanz einer kommunalen Kläranlagen nach dem Belebungsverfahren dar. Ausgehend von einer einwohnerspezifischen Schmutzfracht von 1,8 g P/(E·d) werden in der mechanischen Reinigungsstufe (Vorklärung) ca. 0,2 g P/(E·d) partikulär gebundener Phosphor sedimentiert und über den Primärschlamm ausgetragen.

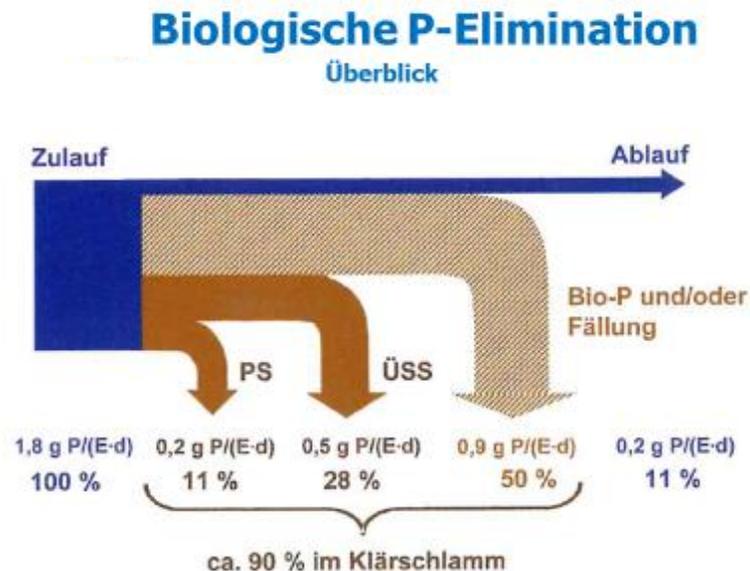


Abbildung 2.2 Phosphorbilanz im Abwasser¹[5]

Bei der biologischen Reinigung im Belebungsbecken werden rund 0,5 g P/(E·d) durch den Zellaufbau der Biomasse im Überschussschlamm gebunden. Bei Tropfkörpern oder Rotationstauchkörpern sind ähnliche Ergebnisse zu erwarten. Bei einem Wechsel von anaeroben und aeroben Verhältnissen, die auch fast immer in aeroben Schlammstabilisierungsanlagen mit Denitrifikation zu beobachten sind, kann über die vermehrte biologische Phosphorelimination (Bio-P) zusätzlich Phosphor in der Biomasse gebunden werden. Durch Bio-P und/oder chemischer Fällung sind bis zu 0,9 g P/(E·d) zu entnehmen, um die Ablaufanforderungen einzuhalten. Ca. 0,2 g P/(E·d) verbleiben im gereinigten Abwasser und werden ins Gewässer eingeleitet.

Bei der chemischen Fällung wird Orthophosphat in eine unlösliche Verbindung überführt und als Fällschlamm gemeinsam mit dem Überschussschlamm aus dem System abgezogen. Bei einer technisch gut durchgeführten chemischen Fällung sind Ablaufkonzentrationen niedriger als 1,0 mg/L P_{ges} möglich. Bei der Anwendung von Flockungsfiltration und Membranbelebungsverfahren können Konzentrationen unter 0,3 mg/L P_{ges} erreicht werden [5] [6] [7].

¹ Zur Bestimmung von P_{ges} werden alle Verbindungen in Orthophosphat überführt und bestimmt. Die Rücklösung von Phosphat aus anaerobem Klärschlamm wird ebenso wie andere zusätzliche Belastungen bei der P-Bilanz vernachlässigt [9].

Die Fällung kann an unterschiedlichen Punkten im Prozess und auch an mehreren Orten stattfinden. Bei der Vor- und Simultanfällung werden die vorhandenen Sedimentationsbecken (Vorklärung, Nachklärung) zur Abscheidung der Fällungsprodukte genutzt. Bei der Nachfällung oder der Flockungsfiltration ist dagegen eine Abscheidung durch eine eigene Filtrations-, Flotations- oder Sedimentationsstufe nötig.

2.2.1 Übersicht

Zur Elimination von Phosphor gibt es verschiedene Verfahren, welche auf Kläranlagen eingesetzt werden. Teilprozesse in mechanisch-biologischen Kläranlagen sind beispielsweise:

- Ungezielte P-Elimination durch Sedimentation in der Vorklärung (falls vorhanden)
- Einbau in die Biomasse des belebten Schlammes
- Erhöhte biologische P-Elimination durch Schaffung der verfahrenstechnisch notwendigen Randbedingungen einer anaeroben Zone
- Chemische Fällung mit Metallsalzen, Aluminaten oder in Ausnahmefällen mit Kalkhydrat
- Abscheidung von partikulärem Phosphor durch Sedimentation und/oder Filtration

Diese Teilprozesse sind abgesehen von der ungezielten P-Elimination beliebig kombinierbar [6].

2.2.2 Verfahrenskonzepte zur chemischen Fällung

Bei der chemischen Fällung werden je nach Einsatzpunkt des Fällmittels unterschiedliche Verfahren definiert:

- Vorfällung (Chemikaliengabe vor der Vorklärung oder im Sandfang)
- Simultanfällung (Chemikaliengabe im Bereich der biologischen Stufe)
- Nachfällung (Chemikaliengabe nach der Nachklärung in einer separaten Fällungsstufe oder vor einer Filtrationsanlage)

Abbildung 2.3 zeigt die verschiedenen Orte für die Zugabe des Fällmittels.

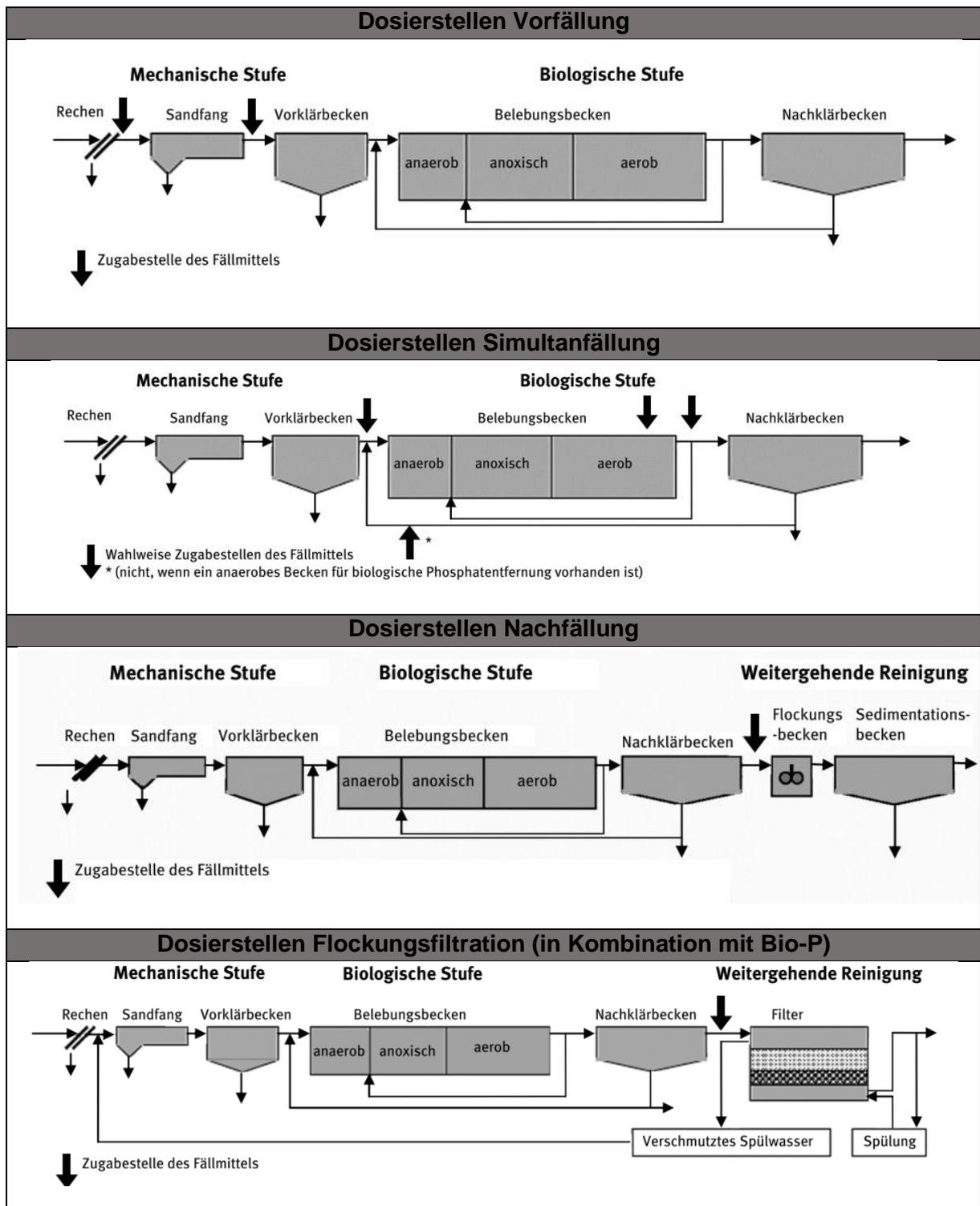


Abbildung 2.3 Dosierstellen für Phosphorfällung [2]

Bei der Simultanfällung werden die Fällungsprodukte im Nachklärbecken abgetrennt. Bei der Vorfällung geschieht dies im Vorklärbecken. In den nachgeschalteten Prozessen (Nachfällung und Flockungsfiltration) werden die Fällungsprodukte mit unabhängigen Stufen (Sedimentation, Flotation oder Filtration) abgetrennt. Flockungsfiltrationsverfahren können nur als Ergänzung nach einem anderen Verfahren eingesetzt werden, z.B. nach einer Vor- oder Simultanfällung oder einer biologischen Phosphatentfernung.

Durch die erhöhte CSB-Elimination und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Stickstoffelimination sind Anlagen mit Vorfällung kaum in Betrieb. Ebenso selten sind Nachfällungsanlagen mit Flockungs- und Sedimentationsbecken zu finden. Anlagen mit einer Flockungsfiltration sind gelegentlich im Einsatz.

Das am meisten verbreitete Verfahren in Deutschland ist die Simultanfällung. Empfohlene Dosierstellen für das Fällmittel sind der Zulauf des Nachklärbeckens (nur für dreiwertige Fällungsmittel empfohlen), der Zulauf zum Belebungsbecken oder in den Rücklaufschlamm. Eine Kombination mehrere Dosierstellen als Zweipunkt- oder Dreipunktfällung ist möglich.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden Fe^{3+} , Al^{3+} , Fe^{2+} und Ca^{2+} als Wirksubstanz im Fällmittel verwendet. Der Fällungsprozess bildet als Folge unlösliche Metallphosphate, die die Alkalität des Abwassers beeinflussen [8]. Fe^{2+} kann nur dann mit Erfolg angewendet werden, wenn es in sauerstoffhaltigem Wasser zu Fe^{3+} oxidiert wird. Für sauerstoffarme Abwässer ist es nicht zu empfehlen. Bei Flockungsfiltrationsverfahren muss das Fällungsmittel in den Zulauf des Flockungsfilters dosiert werden, was besondere Sorgfalt bei der Auswahl von Art und Menge des Fällmittels erfordert. Im Falle von Fe^{2+} muss die Verweilzeit lang genug oder der Sauerstoffgehalt groß genug sein, um die Oxidation Fe^{3+} zu gewährleisten. Zusätzlich muss die Phosphorkonzentration im Filterzulauf niedriger als etwa 1 mg/L sein, damit der Filter eine tolerierbare Standzeit erreicht.

2.2.3 Erreichbare Ablaufkonzentrationen

Der einhaltbare Überwachungswert (in der qualifizierten Stichprobe) beträgt bei der Vorfällung 2,0 mg P/L, bei der Simultan,- sowie Nachfällung 1,0 mg P/L und bei der Flockungsfiltration 0,5 mg P/L, jedoch können unter optimalen Betriebsbedingungen niedrigere Werte erzielt werden [2].

In Tabelle 2.1 sind die im Jahresmittel (aus der 24h-Mischprobe) erreichbaren Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit des verfahrenstechnischen Aufwands zusammengefasst.

Stand der Technik und Entwicklungen

Tabelle 2.1 Hinweis zur notwendigen Verfahrenstechnik im Kontext der Anforderungen - hier: Jahresmittelwerte [6]

P_{ges} Jahresmittel	Randbedingungen	PO₄-P [mg/L] Jahresmittel	Randbedingungen
≤ 0,5 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Angemessenes Automatisierungskonzept	≤ 0,5 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Angemessenes Automatisierungskonzept
≤ 0,4 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Angemessenes Automatisierungskonzept Solide Nachklärung und moderater Schlammindex	≤ 0,4 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Angemessenes Automatisierungskonzept
≤ 0,3 [mg/L]	Gut strukturierte 2- Punktfällung Höherwertiges Automatisierungskonzept Sehr gute Nachklärung bzw. guter Schlammindex	≤ 0,3 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Höherwertiges Automatisierungskonzept 2-Punktfällung sinnvoll
≤ 0,25 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Höherwertiges Automatisierungskonzept Abwasserfiltration	≤ 0,25 [mg/L]	Gut strukturierte Fällung Höherwertiges Automatisierungskonzept 2-Punktfällung
≤ 0,1 [mg/L]	Sehr gut strukturierte Fällung Höherwertiges Automatisierungskonzept Abwasserfiltration oder Membranfiltration, bei P _{ges} << 0,1 [mg/l] nur Membranfiltration	≤ 0,1 [mg/L]	Sehr gut strukturierte Fällung Hochwertiges Automatisierungskonzept 2-Punkt- oder 3- Punktfällung

Da P_{ges} im Kläranlagenablauf sich aus verschiedenen P-Fractionen zusammensetzt, bedarf es einer differenzierteren Betrachtung der P-Fractionen, der geeigneten Verfahrenstechniken und der erreichbaren Ablaufkonzentrationen (s. Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 P-Fractionen, Verfahrenstechniken und erzielbare Ablaufkonzentrationen

Fraktion	Verfahrenstechniken zur P-Reduktion im Kläranlagenablauf	mögliche Ablaufkonzentration für die jeweilige Fraktion (im Jahresmittel)
$P_{\text{ges,partikulär}}$	<p>Guter Feststoffrückhalt in Nachklärung als Schutz für die Filtration erforderlich (es gilt: $\sim 0,03 \text{ mg } P_{\text{part.}}/\text{mg AFS}$) besserer Feststoffrückhalt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Nachklärung, Verbesserung ISV • Filtration 	<p>je nach Filtrationsverfahren [3], Werte für P_{ges} (d.h. inkl. der anderen P-Fractionen):</p> <ul style="list-style-type: none"> -Membranfiltration $\leq 0,1 \text{ mg/L}$ -Raumfiltration $\leq 0,2 \text{ mg/L}$ -Tuch-/Flächenfiltration $\leq 0,2 - 0,3 \text{ mg/L}$
$\text{PO}_4\text{-P}$	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung 	<p>0,05 - 0,15 mg $\text{PO}_4\text{-P/L}$ mit einer höheren spezifischen Dosiermenge</p>
$P_{\text{gel., n.fällb.}}$ ($P_{\text{gel.org.}}, P_{\text{gel.poly.}}$)	<p>Summenparameter mit unbekanntem Einzelstoffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elimination an Einleitstelle (vor Ort) • unspezifisch in Kläranlage (Mitfällung) 	<p>0,05 bis 0,1 mg/L $P_{\text{gel., n.fällb.}}$ in kommunalen Kläranlagen [9]</p>
P_{ges} im Jahresmittel (24h-MP)		<p>$\leq 0,2 - 0,55 \text{ mg/L}$ je nach gewählten Verfahren(skombinationen)</p>

2.3 Synergien mit Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung

2.3.1 Übersicht

Die gesetzlichen Mindestanforderungen gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung (AbwV) können mithilfe von konventionellen Verfahren der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung eingehalten werden. Darüberhinausgehende Anforderungen an die Einleitung von gereinigtem Abwasser sind Teil der „Weitergehenden Abwasserreinigung“. Diese können entweder Verschärfungen der Anforderungen aus Anhang 1 oder neue Parameter sein.

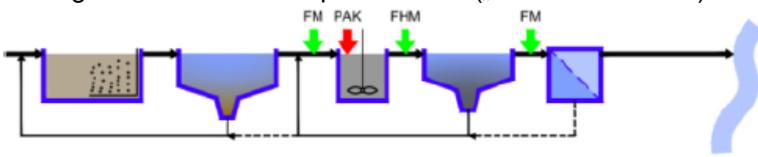
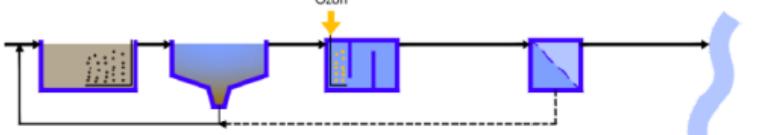
Folgende Ziele können neben einer weitergehenden Nährstoffelimination Teil der weitergehenden Abwasserreinigung sein [10] [11]:

- Rückhalt von suspendierten Stoffen im Kläranlagenablauf
- Elimination von anthropogenen Spurenstoffen
- Elimination von pathogenen Keimen
- Elimination von Mikroplastik
- Elimination von Nanopartikeln

Verfahren mit Aktivkohle oder Ozon werden derzeit zur Elimination von gelösten organischen Spurenstoffen eingesetzt. Neben der Spurenstoffelimination wird infolge von Synergieeffekten auch eine Verbesserung anderer Parameter, wie CSB und P erzielt.

Bei den derzeit verwendeten Verfahren zur Spurenstoffelimination ist die Filtration Bestandteil der Verfahrenskombinationen. Somit kann auch partikulärer Phosphor zurückgehalten werden. Einige Verfahren erfordern auch die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln, um die Feststoffabscheidung in der Filtrationsstufe zu unterstützen. Dies trägt zur chemischen P-Elimination durch Fällung bei. Tabelle 2.3 stellt die derzeit üblichen Verfahren hierfür dar. Diese sind häufig auch als „4. Reinigungsstufe“ bekannt.

Tabelle 2.3 Verfahren zur Entfernung von Spurenstoffen, modifiziert und ergänzt nach [10]

Verfahren	Mögliche Filtersysteme
<p>Dosierung von PAK in eine separate Stufe („Ulmer Verfahren“)</p> 	Tuchfilter, Einzel-/Mehrschichtfilter, Membranfiltration
<p>PAK Dosierung vor dem Filter</p> 	Tuchfilter, Einzel-/Mehrschichtfilter, Membranfiltration
<p>PAK Dosierung in Belebungsbecken</p> 	Tuchfilter, Einschicht-/Mehrschichtfilter, Membranfiltration
<p>GAK-Filter</p> 	GAK Filter=Raumfilter
<p>GAK-Filter mit Vorfilter</p> 	Vorfilter: Tuchfilter, Mikrosieb, Raumfilter
<p>Ozonung</p> 	Biologisch aktiver Einschicht-/Mehrschichtfilter

Bei Prozessen mit **Pulveraktivkohle (PAK)** ist der Filtrationsschritt für die Abtrennung der PAK notwendig. Eine wichtige Voraussetzung für eine effektive PAK-Abscheidung ist, falls der Filter nicht als Membranfiltration ausgelegt ist, eine optimale Flockung der PAK durch Zugabe von Fällungs- und Flockungsmitteln, die zwangsläufig zu einer Phosphat-Mitausefällung führen [10] [12].

Für die PAK-Flockung wird deutlich weniger Fällmittel benötigt als für die reine P-Fällung in der biologischen Stufe. Aus diesem Grund kann die P-Fällung in der biologischen Stufe nur reduziert, aber nicht vollständig in die Spurenstoffeliminationsstufe verlagert werden [10] [13].

Granulierte Aktivkohle (GAK) wird häufig im Festbettfilter eingesetzt, kann aber auch als kontinuierlich arbeitenden Filtern betrieben werden. Über die Höhe des Filterbetts finden Adsorptionsprozesse zur Spurenstoffeentfernung statt, während gleichzeitig eine weitestgehende Phosphorentfernung möglich ist [13]. Obwohl Aktivkohle selbst keinen Phosphor adsorbiert, können Orthophosphate durch den Einsatz von Fällmitteln gefällt werden. Dieses kann entweder direkt vor den GAK-Filter oder einen Vorfilter dosiert werden.

Nach der **Ozonierung** ist ein ein- oder mehrschichtiger biologisch aktiver Einschicht-/Mehrschichtfilter erforderlich, um die Umwandlungsprodukte biologisch abzubauen. Vor diesen Raumfiltern ist eine P-Fällung möglich.

2.3.2 Anwendung von Filtrationsverfahren

Fein suspendierte Feststoffe, Phosphor und auch gelöste Bestandteile können durch die von der Schwerkraft unabhängigen Filtrationsverfahren entfernt werden. Auf, an oder zwischen Filtermedien werden die Partikel und Flocken zurückgehalten und abgetrennt. Die reine Filterwirkung kann kombiniert werden mit chemischen und biologischen Prozessen [14] [15]. Dabei werden entweder nur die aus der vorhergehenden Stufe ausgetragenen Feststoffe zurückgehalten oder es werden in der nachgeschalteten Einheit durch Zugabe von Chemikalien oder Pulverkohle zusätzlich Feststoffe erzeugt [6].

Möglichkeiten der Abwasserfiltration sind die Membranfiltration, der Raumfilter, die Flächenfiltration oder Mikrosiebe, diese sind in Tabelle 2.4 aufgelistet.

Tabelle 2.4 Möglichkeiten der Abwasserfiltration (typische Werte) [6]

Verfahren	Membranfiltration	Raumfilter	Flächenfiltration	Mikrosieb
Wirkprinzip	Membranfiltration	Tiefenfiltration	Filtration/Siebung	Siebeffekt
Filtermaterial	Kunststoff/Keramik	Sand/Anthrazit	Polstoff	Edelstahl/Kunststoff
Höhe Filtermedium	< 1 mm	300-2000 mm	3-6 mm	< 1 mm
Porengröße	0,01-10 µm	-	3-20 µm	10-100 µm
Filtration	Extrem hoch	Sehr hoch	Hoch	Klein
Siebung	Nicht vorhanden	Sehr gering	Mittel	Moderat groß
Kuchenfiltration	Nicht vorhanden	Sehr gering	Gering	Sehr gering

Raumfilter können entweder als aufwärts oder abwärts durchströmte Filter ausgelegt werden. Dabei wird unterschieden zwischen Einschichtfiltern und Mehrschichtfiltern, bei welchen sich eine Schicht aus grobem Hydroanthrazit über einer Schicht aus feinem Sand befindet. Im Gegensatz zu den nur aus Sand oder Basalt bestehenden Einschichtfiltern wird bei einem Zweischichtfilter eine bessere Raumwirkung erzielt, was zu einem geringeren Druckverlust und damit längeren Laufzeiten führt. Mithilfe einer Rückspülung wird der Filter gereinigt. Bei kontinuierlich arbeitenden Filtern hingegen, welche nur als von unten nach oben durchströmte Einschichtfilter realisierbar sind, erfolgt die Reinigung des Filtermaterials fortlaufend und es ist keine Unterbrechung nötig.

Die Entnahmewirkung der (Raum-)Filtrationsstufe ist in weiten Bereichen nahezu unabhängig von der Filtergeschwindigkeit. Sie wird vielmehr von der Partikelgrößenverteilung im Zufluss bestimmt, weshalb die Entnahmewirkung durch Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln verbessert wird [16].

Stand der Technik und Entwicklungen

Zu den **Flächenfiltern** zählen Mikrosiebe aus meist feinmaschigem Edelstahl sowie Tuch- und Polstofffilter, mit Gewebe bespannte und dehbare Aggregate, welche neben der reinen Siebung den Effekt der Kuchenfiltration nutzen [14]. Flächenfilter haben keine Raumwirkung oder biologische Aktivitäten und müssen maschinell mit Wasser gereinigt werden. Jedoch hat diese Art von Filter gegenüber Raumfiltern durch einen baulich und energetisch geringeren Aufwand einen Vorteil [6].

Membranfiltrationsverfahren, wie Mikro- und Ultrafiltration, erfüllen je nach Betriebsweise und eingesetzten Materialien unterschiedliche Ziele und beruhen auf den Prinzipien der Oberflächenfiltration. Beispielsweise können mit der Umkehrosmose sehr kleine Moleküle (< 0,001 µm) zurückgehalten werden (Entsalzung).

Die Partikelgrößenverteilung von Pulveraktivkohlen und die Entnahmewirkung unterschiedlicher Filtertypen in Abhängigkeit der Partikelgrößen wurde in [17] untersucht. Prinzipiell verringert sich die Entnahmeleistung mit abnehmender Zulaufkonzentration. Im Ablauf der Membrananlagen sind keine abfiltrierbaren Stoffe mehr nachweisbar (s. Tabelle 2.5). Die Abläufe für Flächenfilter entsprechen ebenfalls den Werten der Raumfiltration, Mikrosiebe erreichen etwas schlechtere Werte [6].

Tabelle 2.5 Abschätzung sicher unterschrittener Feststoffgehalte im Ablauf von Filtrationsanlagen [6]

	Ablauf NKB [mg/L]	Filtration Raum [mg/L]	Entnahme [%]	Filtration Membrane [mg/L]
AFS	40	< 10	< 75	n.n
AFS	30	< 10	< 65	n.n
AFS	20	< 8	< 60	n.n
AFS	10	< 5	< 50	n.n
AFS	5	< 3	< 40	n.n

In Abbildung 2.4 wird ersichtlich, dass aufgrund der Trenngrenzen die Wirksamkeit des Feststoffrückhaltes der Verfahren unterschiedlich ist. Durch die Zugabe von Fällmittel wird bei der Tuch- und Raumfiltration die Rückhalteeffizienz verbessert.

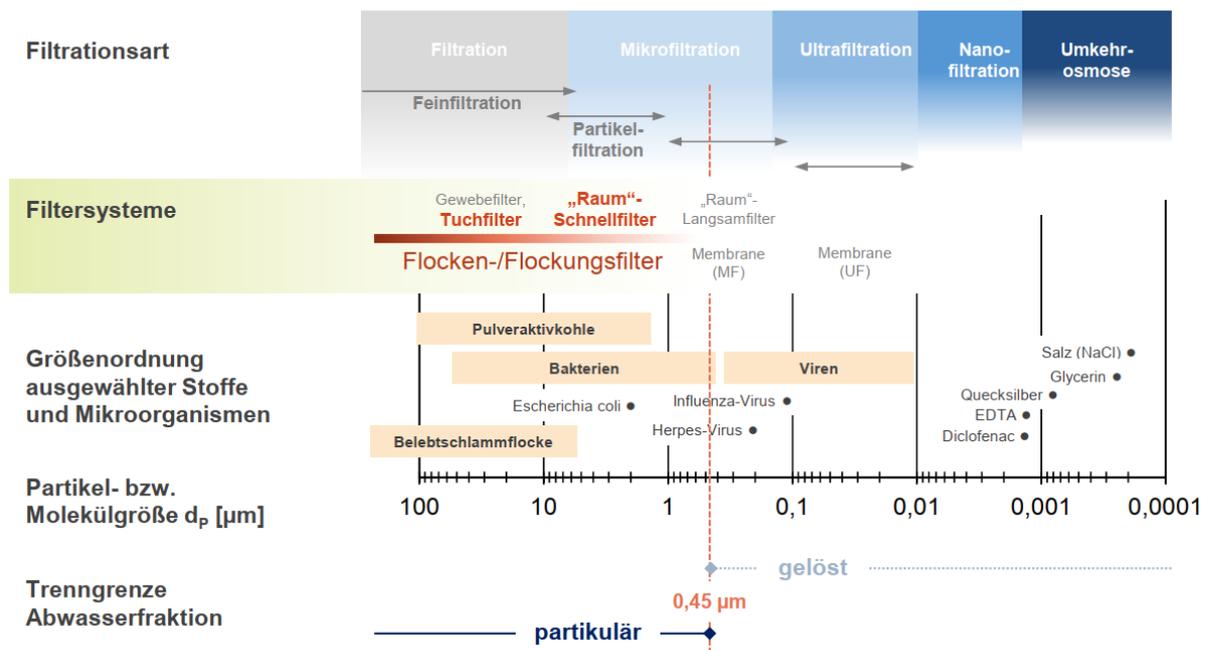


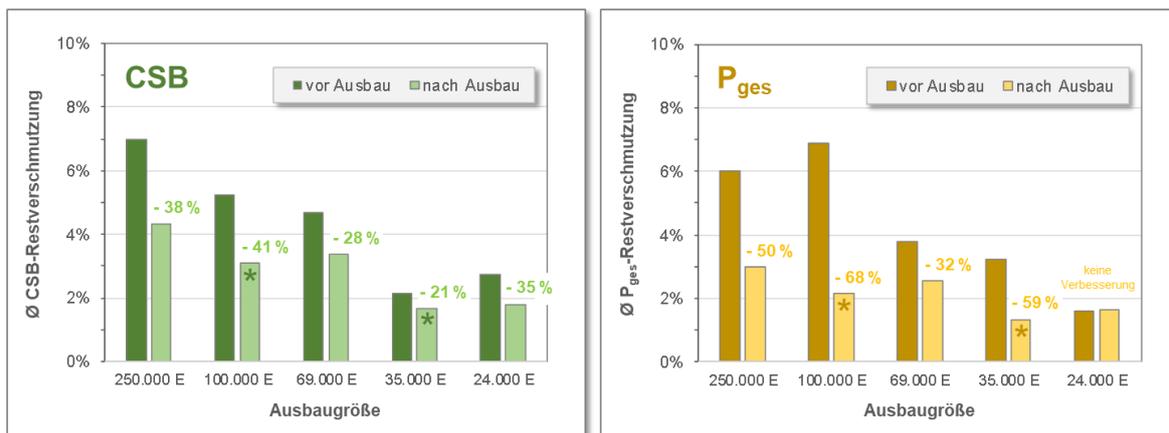
Abbildung 2.4 Trenngrenzen von Filterverfahren [10]

2.3.3 Untersuchungen zur P-Elimination auf Kläranlagen mit PAK-Verfahren

Pulveraktivkohle (PAK) kann zur gezielten Spurenstoffelimination an unterschiedlichen Stellen der Kläranlage zugegeben werden. Ein Überblick der PAK-Verfahren ist Tabelle 2.3 im Kapitel 2.2.1 zu entnehmen.

Die PAK-Dosierung in einer separaten Adsorptionsstufe wird in mehreren Kläranlagen in Baden-Württemberg bereits großtechnisch angewendet [20]. Diese Kläranlagen zeigen eine Verbesserung der P-Elimination des Gesamtsystems von 96,3 % auf 98 %. Darüber hinaus ist aufgefallen, dass im Vergleich zum Betrieb ohne PAK-Stufe der Bedarf an Fällungsmitteln in der Kläranlage nicht erhöht wird [10].

Abbildung 2.5 zeigt die CSB und P_{ges} -Werte von Kläranlagen in Baden-Württemberg mit verschiedenen Ausbaugrößen aus drei aufeinanderfolgenden Jahren (bzw. ein Jahr) vor und nach dem Ausbau zur Spurenstoffelimination mittels PAK-Adsorptionsstufe. Eine zusätzliche CSB-Entnahme von 21 bis 41 % und eine zusätzliche P_{ges} -Entnahme von 32 bis 68 % wurde nach dem Ausbau erreicht, wobei bei einer Ausbaugröße von 24.000 Einwohnern keine Verbesserung in der P_{ges} -Entnahme festgestellt wurde [18].



dargestellt sind Mittelwerte, basierend auf Daten aus 3 Jahre aufeinanderfolgenden Jahren
 Resultate, die auf den Daten eines Jahr basieren, sind mit * gekennzeichnet

Abbildung 2.5 Reinigungseffekte nach Ausbau des Ulmer Verfahrens in Kläranlagen in Baden-Württemberg [18]

Ähnliche Ergebnisse wurden auch in der Schweiz beobachtet, beispielsweise auf der Kläranlage Thunersee mit einer Ausbaugröße von 200.000 EW. Seit Juni 2018 ist dort eine Adsorptionsstufe mit PAK nach dem „Ulmer Verfahren“ in Betrieb. Die Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination kann einen Teilstrom von bis zu 800 L/s Abwasser reinigen, gefolgt von einer nachgeschalteten Zweischichtfiltration mit Sand und Anthrazit [19]. Untersuchungen an der Kläranlage Thunersee zeigen, dass mit der gleichen Fällmittelmenge niedrigere P-Werte im Ablauf der Kläranlage erzielt werden können als bisher. Bei erhöhten PO₄-P-Werten im Zulauf des Filters erfolgt eine zusätzliche Dosierung des Fällmittels vor den Zweischichtfilter [12].

Im Juni 2015 wurde auf der Schweizer Kläranlage Herisau mit einer Ausbaugröße von 34.000 EW ebenfalls eine PAK-Adsorptionsstufe in Betrieb genommen. Die Adsorptionsstufe ist als Teilstrombehandlung mit einer maximalen Behandlungskapazität von 170 L/s konzipiert [20]. Erste empirische Werte haben gezeigt, dass durch die Drei-Punkt-Fällung (in der Biologie, in der PAK-Stufe, sowie vor dem Sandfilter) tendenziell weniger Fällungsmittel bei gleicher P-Elimination erforderlich ist [12].

Es wurde jedoch auch gezeigt, dass eine hohe Dosierung von Fällmittel und Flockungshilfsmittel in der PAK-Stufe, und damit kurz vor den Filtern, zu aufschwimmendem Fällmittel und Flockungshilfsmittel in den Filtern führte. Es wird daher angestrebt, wieder mehr Fällmittel in der Schwachlastbiologie zuzugeben [21].

Die Stadtentwässerung Stuttgart (SES) hat in Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS BW) mittels einer halbtechnischen Versuchsanlage die Spurenstoffentnahmeleistung des Verfahrens der „Direktdosierung von PAK vor einen Filter“ im Rahmen von Vorversuchen getestet [22]. Im Laufe des Projekts wurde auch die P-Elimination untersucht (s.a. Kapitel 5.1.1).

In einer Pilotanlage auf dem Klärwerk Münchehofe wurde ebenfalls PAK-Dosierung vor der Filtrationsstufe getestet. Diese besteht aus zwei baugleichen, abwärts durchströmten Zweischichtfiltern. Der Zweischichtfilter besteht aus Anthrazit als obere und Sand als untere Filterschicht. Die Filtergeschwindigkeit beträgt 2,2-15 m/h. Eisen-III-Chloridlösung wurde als Flockungsmittel frachtproportional zur PO₄-P-Konzentration dosiert. Während der

Pilotversuche wurden verschiedene PAK-Mengen (10-50 mg/L) dosiert. Die zusätzliche Dosierung von Pulveraktivkohle ist einflussreich in Bezug auf die P-Elimination während des gesamten Versuchszeitraums. Die Ablaufkonzentrationen liegen unabhängig von der PAK-Dosierung und schwankenden Zulaufkonzentrationen unter 0,1 mg/L P_{ges} . In 80 % aller Messungen wurde im Ablauf des PAK-Filters ein Wert von 70 µg/L P_{ges} unterschritten [23].

2.3.4 Untersuchungen zur P-Elimination in GAK-Filtern

Viele Anlagen in Deutschland haben im Rahmen verschiedener Projekte den Einsatz von granulierten Aktivkohlefiltern zur Eliminierung von Spurenstoffe getestet [24]. Allerdings ist es wichtig hervorzuheben, dass Phosphorverbindungen an Aktivkohle nicht adsorbieren, daher ist die Zugabe eines Fällmittels zur Phosphatfällung und Fällungs-/Koagulationsflockung notwendig. In konventionellen Anlagen mit gezielter Abtrennung von Phosphor kann durch die überstöchiometrische Dosierung von Eisen- oder Aluminiumsalzen (aufgrund konkurrierender Reaktionen) mit β -Werten zwischen 1 - 3 und bei einem pH-Wert von 6 – 7 eine P-Elimination von 90 % in kommunalen Abwässern erreicht werden [8] [13]. Um Konzentrationen unter 0,3 mg/L Phosphor im Abfluss zu erreichen, können höhere Dosierungen von Fällmittel nötig sein [8], obwohl die praktische Anwendbarkeit der Zugabe eines Fällmittels vor den Aktivkohlefiltern noch nachgewiesen werden muss [10].

Die Integration von Technologien wie GAK-Adsorption und Koagulation/Filtration sind eine valide Alternative, um die Entfernungsraten von Phosphor und Spurenstoffen im Vergleich zu komplexeren Behandlungsoptionen zu erreichen [25]. Dabei bestehen auch Möglichkeiten zur Prozessoptimierung (Größe des Filtermaterials in Bezug auf Adsorptionskapazität, geeignetes Filterbettvolumen [13]), obwohl das Vorhandensein hoher AFS-Konzentrationen die Effizienz des Filters und die Adsorption von Spurenstoffe reduzieren kann [25].

Die Kläranlage Münchehofe behandelt durchschnittlich 42.250 m³ Abwasser pro Tag. Mittels einer halbtechnischen GAK-Filter-Anlage wurden Untersuchungen durchgeführt. Die Anlage besteht aus zwei identischen Filtersäulen. Eine der beiden Säulen wurde als Aufstromfilter mit GAK als Mono-Filterschicht betrieben, die zweite Filtersäule im Abstrom als Zweischichtfilter mit oberer GAK-Schicht und darunter liegender Sandschicht. Die halbtechnische GAK-Filteranlage wurde mit einer Filtergeschwindigkeit von 6 m/h und 20 Minuten Leerbettkontaktzeit (EBCT) betrieben. [23].

Die Untersuchungen zeigen P_{ges} -Konzentrationen im Abwasser von <0,1 mg/L und einer AFS-Konzentration von 0,1 bis 0,2 mg/L bei einer Zuflusskonzentration von 2,6 mg/L [23]. Ähnliche Entnahme wurden auch bei der Aufstromfiltration erreicht, was auf eine effektive Flockenbildung im Zulauf des Filters und eine anschließende Retention im Filterbett hinweist.

Übermäßiger Druckverlust bei der Aufwärtsfiltration kann zu einer Ausdehnung des Filterbettes und einer Ablösung von Partikeln führen, wohingegen eine Filterüberladung im Abflussfilter typischerweise eine Filterblockierung anstelle eines Partikeldurchbruchs verursachte. Die hydraulischen Bedingungen für die Flockenbildung sind bei der Abwärtsfiltration günstiger, da die schonenden Mischbedingungen im Filterüberstand das Flockenwachstum unterstützen. Flocken im Aufwärtsfilter können beim Passieren des Filterbodens aufgrund erhöhter Scherbeanspruchung teilweise zerstört werden [23].

2.3.5 Kombination von Filtrations- und Ozonungsanlagen

Die Ozonierung zur Entfernung von Spurenstoffen hängt von folgenden Variablen ab: Menge des Ozons, Reaktivität des Spurenstoffes mit Ozon und dem Abbau von Hintergrund-Verunreinigungen [26].

Der limitierende Faktor bei der Verwendung der Ozonierung ist die Bildung von möglicherweise toxischen Nebenprodukten, die bei der Oxidation entstehen, wie zum Beispiel Bromat. Nach der Ozonierung zur Oxidation von Spurenstoffen ist ein biologisch aktiver Filter erforderlich, um die Oxidationsprodukte biologisch abzubauen (biologisch aktiver Sandfilter, ein verflüssigter und fixierter Bettreaktor oder ein biologisch aktiver Aktivkohlefilter (BAK)) [24] [27]. In manchen Studien wird eine Reduktion des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC) zwischen 15 und 20 % durch eine Ozonierungsanlage mit einem nachgeschalteten Filter festgestellt [24]. Einige Studien stellten eine 99 % Entfernung organischer Spurenstoffe durch einen BAK-Filter nach der Ozonierung fest. Dazu wurde auch die Menge der toxischen Nebenprodukte um 54 % reduziert. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Ozondosis und der Leerbettkontaktzeit einen positiven Effekt auf die Entfernung von DOC, Spurenstoffen und unspezifischen toxischen Komponenten hat, dieser lässt sich aber nicht linear beschreiben [24] [27].

Bei Verwendung einer Ozonierungsstufe und anschließendem GAK-Filter ist damit zu rechnen, dass sich nach längerer Betriebszeit eine biologisch aktive Schicht bildet, ohne die Durchsatzleistung zu beeinträchtigen. Weiter ist hinzuzufügen, dass das Ozon die Menge des für den Biofilm verfügbaren Sauerstoffes erhöht [24].

Vor dem Filter kann Fällmittel zudosiert und diese Stufe somit auch zur Nachfällung eingesetzt werden. Die Betriebseinstellungen zur optimalen Dosierung des Fällmittels vor den GAK-Filter müssen jedoch noch erprobt werden [10] [28].

2.4 Zwischenfazit aus der Literaturrecherche

Im Abwasser liegt Phosphor in verschiedenen Bindungsformen vor. Um die Reinigungsanforderungen im Kläranlagenablauf einhalten zu können, ist eine chemische Fällung des Orthophosphats erforderlich. Mit einer gut strukturierten Zwei-Punktfällung sowie einer hohen AFS-Abtrennleistung in der Nachklärung können Jahresmittelwerte bis zu 0,3 mg P/L im Kläranlagenablauf erzielt werden. Mit einer zusätzlichen Filtrationsstufe lassen sich noch niedrigere Jahresmittelwerte bis 0,1 mg P/L erreichen.

Die Filtrationsstufe ist zudem ein wichtiger Bestandteil von Anlagen zur Spurenstoffelimination. Die Filter werden zur Abtrennung der feinpulverigen Aktivkohle benötigt (PAK-Verfahren), tragen als Festbettverfahren zur Adsorption (GAK-Verfahren) und auch zum Feststoffrückhalt bei oder werden zur biologischen Nachbehandlung zum Abbau von Oxidationsprodukten benötigt (biologisch aktive Einschicht-/Mehrschicht-Filter). Bei den GAK- und Einschicht-/Mehrschicht-Filtern wird eine Phosphorentnahme durch den Feststoffrückhalt erreicht. Bei den PAK-Verfahren muss zur Verbesserung der Flockenbildung und Feststoffabscheidung Fäll- und Flockungsmittel zugegeben werden, sodass bei den PAK-Verfahren zusätzlich eine Phosphorentnahme stattfindet.

Stand der Technik und Entwicklungen

Die Untersuchungen fokussieren sich auf das Kernthema „Spurenstoffelimination“. In einigen Studien wurde auch die P- und/oder AFS-Ablaufkonzentrationen gemessen und als mittlere Ablaufkonzentration genannt. Wechselwirkungen mit der Belebungsstufe bzw. der Simultanfällung und der Nachklärung werden nicht betrachtet.

3. Mikroplastik und P-Recycling

3.1 Elimination von Mikroplastik in Filtrationsanlagen

Neben der weitergehenden Entfernung von Nährstoffen und Spurenstoffen wird derzeit auch die Entfernung von Mikroplastik aus dem Abwasser diskutiert. Auch Mikroplastik kann in einer weitergehenden Reinigungsstufe zu einem größeren Ausmaß als bei herkömmlicher Reinigung entfernt werden. Da es sich bei den Eliminationsverfahren unter anderem um Absetzen und Adsorption handelt, wird das Mikroplastik dabei hauptsächlich vom Abwasser in den Klärschlamm überführt. Als Teil der Synergieeffekte der weitergehenden Abwasserreinigung kann die Reduktion von Verunreinigungen wie Schwebstoffen, Nährstoffen und chemischem Sauerstoffbedarf als ein Nebeneffekt beobachtet werden [10] [29].

Eine Variante zur Entfernung von Mikroplastik ist die Kombination der Flockung mit einem anderen Behandlungsprozess, beispielsweise RSF (Rotationsscheibenfilter), Membranfiltration oder Oxidation durch Ozon. Nach der Flockung kann das Mikroplastik durch Filtrationsprozesse, zum Beispiel Membranfiltration bzw. RSF, abgefangen werden. Dabei werden Eliminationsraten von 79 % bzw. 73 % erreicht. Viele Verfahren der vierten Reinigungsstufe nutzen Aktivkohle, um andere Verunreinigungen per Adsorption zu entfernen, es wird jedoch vermutet, dass durch Aktivkohle kein Mikroplastik entfernt wird. Durch die Filtration mit Aktivkohle kann das Mikroplastik aber möglicherweise beim Durchlaufen der Säule abgefangen werden [29].

3.2 Auswirkungen einer weitestgehenden chemischen P-Elimination auf Wirkungsgrade von P-Recyclingverfahren, die den Überschuss- bzw. Klärschlamm behandeln

Chemische Fällung ist die am weitesten verbreitete Methode zur Phosphorelimination aufgrund der großen Zuverlässigkeit, dem geringen Fußabdruck, der Robustheit und der verhältnismäßig einfachen Anwendung, verglichen mit der Bio-P Elimination [8].

In Deutschland wurde eine Verordnung erlassen, die verlangt, dass alle Kläranlagen mit mehr als 50.000 EW bis 2032 aus dem Klärschlamm oder der Klärschlammasche 20 g P/kg Trockenmasse wiedergewinnen [8], obwohl die verbreiteten Verfahren nicht zur Rückgewinnung des Phosphors, sondern zu dessen Elimination entworfen wurden. In biologischen Kläranlagen erreicht das Rückgewinnungspotential aus der wässrigen Phase 40 %. Im Klärschlamm beträgt das Rückgewinnungspotential bis zu 90 %, erfordert jedoch größeren Aufwand [30].

Deshalb gibt es aktuell Interesse an der Erforschung der Optimierung der Betriebsbedingungen, um weitere Phosphor-Elimination und -Rückgewinnung in Kläranlagen mit ungezielter Phosphor-Elimination erreichen zu können. Des Weiteren müssen die bestehenden Verfahren adaptiert werden, um den sich verändernden Gesetzesanforderungen nachkommen zu können. Indem Verfahren zur Phosphorrückgewinnung angewendet werden, könnte ein großer Teil der Düngemittel durch rückgewonnenen Phosphor ersetzt werden [29].

Heutzutage ist die gängigste Methode die chemische Fällung. Der dadurch erzeugte Klärschlamm enthält Metallphosphate, die in einer schwer löslichen Form vorliegen. Durch den niedrigen Düngewert und die enthaltenen Verunreinigungen kann der erhaltene Klärschlamm nicht direkt in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen [8].

3.3 Thermische Verwertung von Klärschlamm

Zur thermischen Verwertung von Klärschlamm gibt es unterschiedliche Verfahren: Monoverbrennung, Mitverbrennung sowie alternative bisher noch nicht ausreichend entwickelte Verfahren. Oftmals ist vor der Verbrennung eine Trocknung des Klärschlammes nötig. Die Monoverbrennung ist zur anschließenden P-Rückgewinnung aus der Klärschlammmasche gut geeignet. Bei der Mitverbrennung muss vor der Verbrennung Phosphor zurückgewonnen werden, da die Entfernung aus der anfallenden Asche zu aufwändig ist. Die Rückgewinnung des Phosphors vor der Verbrennung hat jedoch den Nachteil, dass ein größerer Stoffstrom mit einer geringeren P-Konzentration behandelt werden muss [31]. Der Klärschlamm und die Klärschlammmasche haben ein hohes Potential zur Rückgewinnung von Phosphor, da die P-Konzentration hoch ist. In der Klärschlammmasche liegt sie bei bis zu 8 % [31].

In nicht entwässertem Klärschlamm, liegt gelöster Phosphor vor. Dieser kann beispielsweise mit Magnesiumsalzen ausgefällt werden. In der Klärschlammmasche liegt der Phosphor nur chemisch gebunden vor, im entwässerten Klärschlamm chemisch und organisch gebunden. Dieser gebundene Phosphor muss chemisch oder thermisch behandelt werden, um den Phosphor bioverfügbar zu machen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die im Klärschlamm in hohen Mengen vorhandenen Schadstoffe das Endprodukt nicht verunreinigen [32]. Zum Aufschluss des Phosphors aus der Klärschlammmasche gibt es drei mögliche Verfahren:

Beim thermochemischen Verfahren wird der Phosphor in eine verfügbare Form überführt, indem der KS oder die KSA auf Temperaturen zwischen 500°C und 1000°C erhitzt werden. Organische Schadstoffe und Schwermetalle können abgeführt werden, indem sie verdampfen. Die Bildung von Magnesium-Phosphat oder Kalzium-Magnesium-Phosphat-Salzen wird gefördert [32].

Beim nasschemischen Aufschluss wird chemisch gebundener Phosphor aus der KSA durch Absenken des pH-Wertes in die Flüssigphase überführt. Dann werden Feststoffe abgetrennt und die Lösung anschließend neutralisiert. Abschließend kann der Phosphor durch Fällung oder Adsorption gewonnen werden [32].

Beim metallurgischen Verfahren wird der KS beziehungsweise die KSA auf über 1500°C erhitzt. Die enthaltenen Phosphorverbindungen werden dadurch reduziert und in der Schlacke angereichert. Enthaltene Schwermetalle werden bei diesen Temperaturen verdampft oder in die flüssige Phase überführt [32].

4. Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination

4.1 Übersicht zu Fragestellungen aus der Ingenieurpraxis

Insgesamt 34 vom Land Baden-Württemberg geförderten Machbarkeitsstudien zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen aus den Jahren 2015 – 2020 wurden untersucht, inwieweit auf Fragestellungen zur weitestgehenden P-Elimination eingegangen wird.

In fast allen Studien wurde auf die P-Elimination eingegangen. Als allgemeiner Synergieeffekt wird in der überwiegenden Zahl der Machbarkeitsstudien eine Senkung der Abwasserabgabe erwähnt. In Tabelle 4.1 wird der Detaillierungsgrad der Untersuchungen aufgelistet.

Tabelle 4.1 Anteil der Machbarkeitsstudien zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Jahr	P-Elimination nicht betrachtet	P-Elimination nur erwähnt	Einfluss auf Filterauswahl	Detaillierte Betrachtung
2015			66,6%	33,3%
2016		100%		
2017	20%			
2018		31%	46%	23%
2019	16,6%	16,6%	16,6%	50%
2020				100%

In den Jahren 2018 – 2020 hat die detaillierte Betrachtung der Synergieeffekte zwischen weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination in den Machbarkeitsstudien an Bedeutung zugenommen.

Für Kläranlagen mit bestehenden Filtrationsstufen zur weitergehenden Phosphorelimination werden die vorhandenen Filtertypen bei der Verfahrensauswahl für die Spurenstoffelimination berücksichtigt. Verfahren wie beispielsweise eine Aktivkohle-Direktdosierung vor eine Filtrationsstufe oder eine Ozonung, bei der ein Sandfilter zur biologischen Nachbehandlung benötigt wird, haben somit bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Vorteile.

Vor allem bei Studien aus den Jahren 2015 – 2020 wird oftmals eine bessere P-Elimination als wichtiger Aspekt bei der Auswahl der Filter nach einer Aktivkohlestufe angeführt.

Neuere Studien bevorzugen aus Platz- und Kostengründen eine Tuchfiltration und geben an, dass bei ausreichender Fällung damit eine gleichwertige P-Elimination erreicht werden kann. Andererseits gehen einige Machbarkeitsstudien aus 2019/2020 davon aus, dass eine Raumfiltration gegenüber Tuch- oder DynaSand-Filtern eine bessere P-Elimination bewirkt. Einige Studien schlagen aufgrund der bestehenden Wissensdefizite eine Pilotanlage vor, um die *Effektivität von Tuchfiltern* für die weitestehende Phosphorelimination zu untersuchen.

Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination

Da für die Filtrationsstufe eine *typabhängige Druckhöhe* benötigt wird, wird bei einzelnen Kläranlagen ein Zwischenhebewerk erforderlich sein. Da die Druckhöhen bei Tuchfiltern geringer sind als bei Raumfilteranlagen (und die Filterbetthöhe entfällt), können auf einigen Kläranlagen die Tuchfilter im freien Gefälle aus dem Absetzbecken durchflossen werden, wohingegen Raumfilter aufgrund der erforderlichen Höhenlage ein Zwischenhebewerk benötigen.

Reinigungsstufen zur gezielten Spurenstoffelimination werden häufig als *Teilstrombehandlung* ausgeführt. Die Filtrationsstufe zur weitestgehenden P-Elimination wird oftmals für den *Vollstrom* ausgelegt, um auch bei maximalen Mischwasserzufluss eine stabile P-Elimination zu erzielen. Dies wirkt sich insbesondere auf den *Platzbedarf* sowie die *Kosten für die Filterstufe* aus.

Oftmals wird ein stufenweiser Ausbau der Kläranlage untersucht, wobei meist die Filterstufe als erster Schritt und die Spurenstoffelimination als weiterer Schritt vorgeschlagen wird. Hier ist bei der *Auswahl des Filtertyps ergänzend zu beachten, dass zwar sowohl Raum- als auch Tuchfilter für die Flockungsfiltration geeignet sind, jedoch Tuchfilter nicht für alle Verfahren der Spurenstoffelimination geeignet sind.*

Im Falle einer alleinigen P-Elimination ist die Tuchfiltration oftmals das günstigste Filtrationsverfahren, kann aber nur in Verbindung mit einer PAK-Adsorptionsstufe (Ulmer-Verfahren) oder als Vorstufe einer GAK-Filtration eingesetzt werden. Es muss in diesem Anwendungsfall immer eine Aktivkohlestufe zusätzlich installiert werden. Des Weiteren ist die Tuchfiltration auch für den Einsatz bei der Ozonung nicht nutzbar, da für die Ozonierung eine biologisch aktive Nachbehandlungsstufe erforderlich ist. *Wird daher für die Phosphorelimination ein bestimmtes Filterverfahren ausgewählt, so bewirkt dies automatisch eine Einschränkung der möglichen Verfahren für die Spurenstoffelimination.* Daher sollte dieser Aspekt bei der Filterauswahl unbedingt beachtet werden.

Auch die Nutzung von *GAK Filtern zur Flockungsfiltration* wird in mehreren Studien in Betracht gezogen. Jedoch werden hier *mangelnde Praxiserfahrungen* auch in Bezug auf die durchlaufenen Bettvolumina bis zum Austausch erwähnt. In einigen Studien wird hier auch erwähnt, dass für GAK-Filter die Effektivität der P-Elimination noch weiter untersucht werden muss.

Beim Vergleich unterschiedlicher Verfahrenskombinationen für die gezielte Spurenstoffelimination wird oftmals die P-Elimination direkt in die Verfahrensauswahl einbezogen, insbesondere dann, wenn auch eine Nutzwertanalyse durchgeführt wurde.

4.2 Teilstrombetrieb der Filterstufe zur Spurenstoffelimination - Vollstrombetrieb für die P-Elimination?

In Baden-Württemberg kann das Verfahren zur Spurenstoffelimination für einen Teilstrombetrieb ausgelegt werden, wobei mindestens der maximale Trockenwetterabfluss $Q_{T,max}$ und mindestens 70 % der Jahresabwassermenge zu behandeln sind [33].

Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination

In Nordrhein-Westfalen ist nach einem emissionsbasierten Ansatz mindestens die Jahresschmutzwassermenge zu behandeln und die Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination auf das Jahresmittel des maximal stündlichen Trockenwetterabflusses $Q_{T,h,max}$ auszulegen. Unter bestimmten wasserwirtschaftlichen Randbedingungen ist die Auslegungswassermenge nach einer immissionsbasierten Einzelfallprüfung höher als nach dem emissionsbasierten Ansatz festzulegen [11].

In der Schweiz ist die Anlage zur Entfernung von Mikroverunreinigungen grundsätzlich auf die hydraulische Kapazität der biologischen Stufe auszulegen. Nur in begründeten Fällen kann von der Vollstrombehandlung abgewichen werden [34].

Sofern die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination für einen Teilstrombetrieb ausgelegt wird, ließe sich die Filtrationsstufe ebenfalls nur für den Teilstrombetrieb konzipieren. Dann wird bei einem entsprechend hohen Mischwasserzufluss ein Teil des Zuflusses in einem Bypass an der Filtrationsstufe vorbeigeführt und die beiden Teilströme vor der Einleitung in das Gewässer wieder vermischt werden.

Die vom „Handlungskonzept Abwasser Stufe 2“ betroffenen Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 müssen zukünftig im Jahresmittel eine P_{ges} -Ablaufkonzentration von 0,2 mg/L einhalten („Filtervariante“). Für den Fall einer sehr gut funktionierenden Fällung und Feststoffabtrennung in der Nachklärung kann die Option „Fällungsvariante“ mit einer mittleren P_{ges} -Konzentration von 0,3 mg/l und einer PO_4 -P-Konzentration von 0,16 mg/L gewählt werden. Diese Ablaufkonzentrationen sind im Jahresmittelwert einzuhalten. Der Jahresmittelwert ermittelt sich auf Basis der Eigenkontrolle und den volumen- bzw. durchflussproportionalen 24 h-Mischproben im Ablauf der Kläranlagen [6].

Weiterhin ist der in der wasserrechtlichen Erlaubnis festgelegte Überwachungswert für P_{ges} in der qualifizierten Stichprobe einzuhalten.

Da die Überwachungsanforderungen im Kläranlagenablauf einzuhalten sind, also nach der Vermischung der beiden Teilströme, muss die Ablaufkonzentration nach der Filtrationsstufe entsprechend niedrig sein, um die höhere Ablaufkonzentration aus dem Ablauf der Nachklärung auszugleichen. Es ist somit eine Mischungsrechnung durchzuführen. Dies gilt nicht nur für die P_{ges} -Ablaufwerte, sondern auch für alle anderen überwachungsrelevanten Verschmutzungsparameter.

Bei der Mischungsrechnung sind für den Nachweis in der qualifizierten Stichprobe (Überwachungswert aus der wasserrechtlichen Erlaubnis) und als Jahresmittelwert in der 24h-Mischprobe (Handlungskonzept Abwasser) unterschiedliche Ansätze für Konzentrationen und Durchflüsse anzusetzen [35]. Festzuhalten bleibt, dass im Teilstrombetrieb noch höhere Eliminationsleistungen zu erreichen sind, um bei Mischwasserzufluss bzw. im Jahresmittel die Anforderungen einzuhalten.

4.3 Implementierung der Filterstufe in den gesamten Abwasserreinigungsprozess

Die Verfahren zur Spurenstoffelimination und weitestgehende P-Elimination sind nicht beliebig miteinander kombinierbar, sondern folgen zunächst den Anforderungen an den Feststoffrückhalt und somit der Partikelgrößenverteilung und der Feststoffbeladung. Mögliche Verfahrenskombinationen wurden bereits in Kapitel 2.2.1, Tabelle 2.3 aufgezeigt.

Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination

Um die hohen Anforderungen an die weitestgehende P-Elimination einhalten zu können, darf die Filtrationsstufe nicht als „end of pipe-Lösung“ gesehen werden, sondern ist in den gesamten verfahrenstechnischen, biologischen und chemischen Abwasserreinigungsprozess zu integrieren. Es sind folgende Aspekte zu beachten [35]:

- hohe AFS-Trennleistung in der Nachklärung (niedrige AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung)
- Dosierstellen für Fällmittel vor der Filtration zur Phosphatfällung und verbesserten AFS-Abtrennung vorsehen
- weitgehende und stabile Simultanfällung in der biologischen Stufe

Auch wenn zur Spurenstoffelimination bei den GAK-Filtern und den biologisch aktivierten Filtern keine Fällmitteldosierung erforderlich ist, sollte dies bei Einsatz zur weitestgehenden Phosphorelimination durch zusätzliche Fällmitteldosierstellen berücksichtigt werden (s. Abbildung 4.1). Allerdings werden durch die Zugabe von Fällmitteln die Partikelgrößen der Flocken und die Feststoffbelastung der Filterstufe verändert, was wiederum bei der Auslegung der Filterstufe zu berücksichtigen ist.

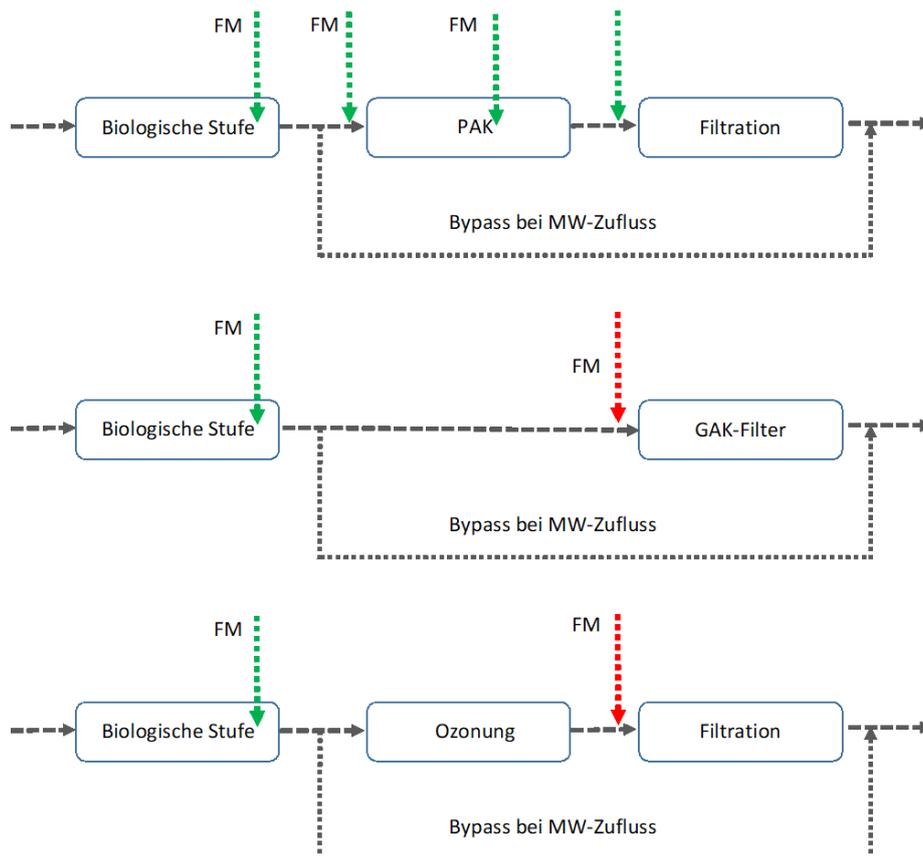


Abbildung 4.1 Verfahrenskombinationen und Dosierstellen für Fäll-/Flockungsmittel [35]

Die geeigneten Verfahrenskombinationen zur Spurenstoffelimination und weitestgehender Phosphorelimination ist unter Beachtung der lokalen Verhältnisse wie Abwasserzusammensetzung, verfügbare Flächen, Höhenlagen, Baugrund etc. ingenieurtechnisch zu untersuchen.

4.4 Bemessungsansätze für die Filtrationsverfahren

Filtrationsanlagen werden für Filtergeschwindigkeiten und Feststoffbelastungen ausgelegt. Typische Bemessungswerte für unterschiedliche Filtertypen und Einsatzziele sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Bemessungswerte für Filtrationsanlagen [35]

Filtertyp	Filtergeschwindigkeit	Zulässige Feststoffbelastung	Quelle
Raumfilter als Flockungsfilter	15 m/h	2 -3 kgTS/(m ³ Filterbett * Spülzyklus)	[36]
Raumfilter zur Restnitrifikation oder Restdenitrifikation	10 m/h	2 -3 kgTS/(m ³ Filterbett * Spülzyklus)	[36]
Raumfilter zur Abtrennung von PAK	10 – 12 m/h	k. A.	[37]
Tuchfilter zur Abtrennung von PAK	5 m/h	k. A.	[37]
Tuchfilter zur Abtrennung von PAK	8 m/h	Feststoffflächenbelastung B _A = 0,2 kgTS/(m ² *h)	[38]

Weitere zahlreiche Dimensionierungsbeispiele zur Abtrennung von PAK in Kombination mit unterschiedlichen Vorabtrennungseinheiten wie beispielsweise Sedimentationsbecken oder Lamellenabscheidern sind in [12] dargestellt.

Die Auslegung der GAK-Festbetten erfolgt hinsichtlich der Adsorptionswirkung über die Leerbettkontaktzeit. [39] nennt in einer Versuchsanlage Filtergeschwindigkeiten von abwärts durchströmten Filtern zwischen 2 – 10 m/h.

Für die Auslegung der Filterstufe ist insbesondere die Feststoffbelastung relevant, da sie die Spülzyklen und folglich die verfügbare Filterfläche bestimmt. Die Feststoffbelastung hängt wiederum von der Trennleistung der Vorabtrenneinheit (Nachklär- bzw. Sedimentationsbecken) ab. Je nach Filtertyp und Einsatzziel sind somit unterschiedliche Bemessungsansätze für die Filtergeschwindigkeit zu wählen. Beispielsweise können Filter, die zur Verbesserung der P-Elimination ausgelegt sind, nicht ohne weiteres zur Abtrennung von PAK genutzt werden. Erhöht sich infolge der „Umnutzung“ die Feststoffbelastung, ist die Filtergeschwindigkeit zu senken. Entweder muss die Filtrationsstufe erweitert oder der Zufluss vermindert werden.

Somit hängt die Auslegung der Filtrationsstufe von der Reinigungsaufgabe (AFS, PAK), der Abtrennleistung der Vorstufe (Nachklärung, Tuchfilter von GAK, etc.), der Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmittel und dem Filtertyp selbst ab.

4.5 Entnahmeleistungen der Filtrationsstufen

Die Grundlagen zur Feststoffentnahme werden in Kapitel 2.4.2 erläutert. Die Zusammenhänge zwischen Feststoffbelastung, hydraulischer Belastung, Entnahmewirkung AFS und Verbesserung der Phosphorelimination werden in [35] anhand von Messdaten einer ausgewählten Beispielanlage verdeutlicht. Bei der Beispielanlage handelt es sich um eine PAK-Anlage mit einem Zweischicht-Filter zur PAK-Abtrennung, für die umfangreiche Messdaten zu den Parametern AFS und P_{ges} vorliegen.

Die Beispielanlage verfügt über eine gut funktionierende Nachklärung. Bei Mischwasserzufluss ist kein signifikanter Anstieg der AFS-Konzentrationen zu beobachten, sehr wohl aber ein Anstieg der Feststofffracht und somit der Feststoffbelastung der nachfolgenden Filtrationsstufe. Infolge der höheren Feststoffbelastung werden die Filter bei Mischwasserzufluss häufiger gespült.

Die konzentrationsbezogene Entnahmewirkung ist praktisch unabhängig von der hydraulischen Belastung der Filtrationsstufe und bestätigt [6]. Die frachtgewichtete AFS-Entnahmewirkung beträgt ca. 60 %. Vereinzelt ist die AFS-Ablaufkonzentration aus der Filtrationsstufe höher als die Ablaufkonzentration aus der Nachklärung.

Für die P-Elimination ergibt sich ein ähnliches Bild. Die P-Elimination setzt sich hier aus der Fällung und der Feststoffentnahme zusammen. Die P_{ges} -Ablaufkonzentration kann trotz des Fällungsanteils an der P-Elimination als unabhängig von der hydraulischen Belastung gesehen werden.

Auch hier sind vereinzelt die P_{ges} -Ablaufkonzentrationen der Filtrationsstufe höher als die im Ablauf der Nachklärung. Dieser Sachverhalt wird leider in der Darstellung der Ablaufkonzentrationen als Summenlinienkurven nicht sichtbar. Trotz dieser vereinzelt negativen Wirkungsgrade beträgt die mittlere, frachtgewichtete P-Entnahmewirkung ca. 45 %.

Um die hohen Anforderungen an die weitestgehende P-Elimination mittels einer Filtrationsstufe einzuhalten, muss laut [35] auf eine stabile Simultanfällung und eine hohe AFS-Abtrennleistung in der Nachklärung geachtet werden. Dies gilt umso mehr für einen Teilstrombetrieb, der sich aus der Nutzung von Filtrationsstufen als Bestandteil einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ergeben könnte. Vor den Filtrationsstufen sollte - unabhängig vom Spurenstoffeliminationsverfahren - Fällmittel zudosiert werden können, um die P-Entnahme durch Phosphatfällung zu erhöhen.

4.6 Zwischenfazit zu Verfahrenskombinationen und Bemessungskennwerten

Auch wenn eine stufenweise Realisierung von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination angestrebt wird, sind beide Verfahrenskonzepte zwingend aufeinander abzustimmen und in die bestehende Anlage zu integrieren. Das gewählte Filtrationsverfahren bestimmt maßgeblich die Höhenlagen der Bauwerke für die weitergehende Reinigungsstufe, aber auch den Flächenbedarf für die Bauwerke und die späteren Betriebskosten.

Wird für die weitestgehende P-Elimination ein bestimmtes Filtrationsverfahren ausgewählt, so wirkt dies automatisch einschränkend auf die Auswahl an Verfahren zur Spurenstoffelimination und umgekehrt.

Typische Fragestellungen zur Kombination von Verfahren zur Spurenstoffelimination und Filtration zur weitestgehenden Phosphorelimination

Auch die Fragestellung des Teil- oder Vollstrombetriebs der Filterstufe ist sorgfältig zu erörtern, und ggf. eine modulare Erweiterung der Anlage in Betracht zu ziehen. Die Bemessungskennwerte für Filtrationsanlagen basieren auf Erfahrungswerten für unterschiedliche Einsatzzwecke und sind an die jeweiligen Randbedingungen anzupassen. Dies gilt insbesondere dann, wenn durch die Zugabe von Fäll- oder Flockungshilfsmitteln oder Zugabe von PAK die Partikelgrößen und die Feststoffbelastung verändert wird. Die Bemessungskennwerte im technischen Regelwerk beschränken sich bislang auf Raumfilter. Für andere Filtertypen muss auf Erfahrungswerte der Hersteller zurückgegriffen werden.

Die P-Entnahmewirkung bestehender Filterstufen wird über die P_{ges} -Konzentrationen bilanziert, eine differenziertere Auswertung hinsichtlich Fällung und Feststoffrückhalt wird in der Praxis üblicherweise nicht durchgeführt. Zur Auslegung bzw. Implementierung der Filterstufe in den Gesamtreinigungsprozess wird die P-Entnahmewirkung i.d.R. über den Feststoffrückhalt abgeschätzt.

Die komplexe Aufgabenstellung fordert eine grundlegende Klärung der Zielsetzungen und eine strukturierte Vorgehensweise sowie ggf. auch eine gestufte Vorgehensweise, um die Variantenvielfalt Schritt für Schritt einzugrenzen. Um die Annahmen zur Feststoff- und P-Elimination für die unterschiedlichen Filtertypen zu untermauern, wären Veröffentlichungen von Betriebserfahrungen großtechnischer Anlagen hilfreich.

5. Auswerten vorhandener Messdaten aus Projekten des KomS Baden-Württemberg

5.1 Auswahl von Kläranlagen

Dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg liegen aus der wissenschaftlichen Betreuung vieler Kläranlagen und Forschung umfangreiche Messdaten zur Spurenstoffelimination vor. In einigen Projekten wurden auch der Feststoffrückhalt und die P-Entnahmekleistung in der Filtrationsstufe untersucht. Zu folgenden Verfahren und Kläranlagen liegen umfangreiche Messdaten vor, die nachfolgend gezielt ausgewertet werden:

- Die Kläranlage des Eigenbetriebs Stadtentwässerung Mannheim setzt das Ulmer Verfahren zur Spurenstoffelimination ein, welches für einen Teilstrom von 90 % ausgelegt ist. Das Verfahren besteht aus Kontaktreaktor, Sedimentationsbecken und einem Zweischichtfilter aus Sand und Anthrazit. Mit dreizehn Kläranlagen ist dies das derzeit am häufigsten eingesetzte Verfahren in Baden-Württemberg. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen (seit 2010) mit diesem Verfahren und der hohen Datengrundlage, wurde die Kläranlage Mannheim zur Bewertung der Phosphorelimination in Kombination mit der Spurenstoffelimination herangezogen.
- Das Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen (HKW) hat zusammen mit dem KomS das Verfahren der „Direktdosierung von PAK vor einen Filter“ mittels einer halbtechnischen Versuchsanlage über einen Zeitraum von über 5 Jahren untersucht. In Baden-Württemberg gibt es noch keine Kläranlage, die dieses Verfahren implementiert hat. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen der Versuchsanlage des HKW Stuttgart-Mühlhausen herangezogen, um den Synergieeffekt zwischen P-Elimination und Spurenstoffelimination bei Anwendung der Direktdosierung von PAK vor einen Filter zu bewerten.
- Die Kläranlage Böblingen-Sindelfingen stellt einen Sonderfall dar. Diese Kläranlage errichtete 2007 einen Flockungsfilter zur Verringerung des Eintrags von partikulären Stoffen sowie von Phosphor. 2011 wurde die Kläranlage mit dem Ulmer Verfahren zur Spurenstoffelimination erweitert. Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen der Phosphorelimination mittels Flockungsfilter und der Phosphorelimination in Kombination mit dem Ulmer Verfahren.

Für das PAK-Verfahren der Simultandosierung (PAK-Dosierung ins Belebungsbecken) und Ozon-Verfahren liegen keine verwertbaren Messdaten vor. Gleiches gilt für GAK- Filter.

5.2 Beschreibung der ausgewählten Kläranlagen

5.2.1 Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen

Das Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen (HKW) der Städtentwässerung Stuttgart (SES) ist mit einer Ausbaugröße von 1,2 Millionen Einwohnerwerten und einer Einzugsgebietsfläche von 163 km² das größte Klärwerk im Land Baden-Württemberg und eine der größten Kläranlagen innerhalb Deutschlands.

Das Abwasser wird in einer mechanisch-biologische Reinigungsstufe nach dem einstufigen Belebungsverfahren gereinigt. Im Ablauf des biologischen Reinigung erfolgt eine simultane Phosphatfällung mittels Eisenchloridsulfat(FeClSO₄)-Zugabe. Die Dosierung wird anhand der PO₄-P-Konzentration geregelt. Nach der biologischen Reinigung wird das Abwasser von den Nachklärbecken zur Sandfilteranlage geleitet. Abschließend fließt das gefilterte Wasser durch die Lamellendüsen im Filterboden in einen Sammelraum und von dort aus in den Neckar.

Die Städtentwässerung Stuttgart (SES) hat sich zum Ziel gesetzt auf dem Hauptklärwerk (HKW) Mühlhausen in den kommenden Jahren eine Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination zu implementieren. In Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS BW) wurde mittels einer halbtechnischen Versuchsanlage die Spurenstoffentnahmeleistung des Verfahrens der „Direktdosierung von PAK vor einen Filter“ im Rahmen von Vorversuchen getestet. Für die Auswertung in dem vorliegenden Bericht wurden die aus diesen Experimenten erhaltenen Ergebnisse verwendet. Die für die ausgewerteten Versuche eingestellten Betriebsbedingungen werden im folgenden Kapitel beschrieben.

Die Versuchsanlage besteht aus einem Flockungsfilter, welchem ein Einmischbecken aus zwei in Reihe geschalteten Behältern vorgeschaltet ist. Der Flockungsfilter kann zur Simulation des Regenwetterfalls direkt aus dem Vorlagebehälter beschickt werden (sog. Bypass-Betrieb). In diesem Fall erfolgt keine Dosierung von Pulveraktivkohle und das Abwasser gelangt unter Zugabe von Fällmittel direkt in den Filter. Der Betrieb erfolgt volumenproportional zur Zulaufmenge des Hauptklärwerks. Die Anlagenkonfiguration ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

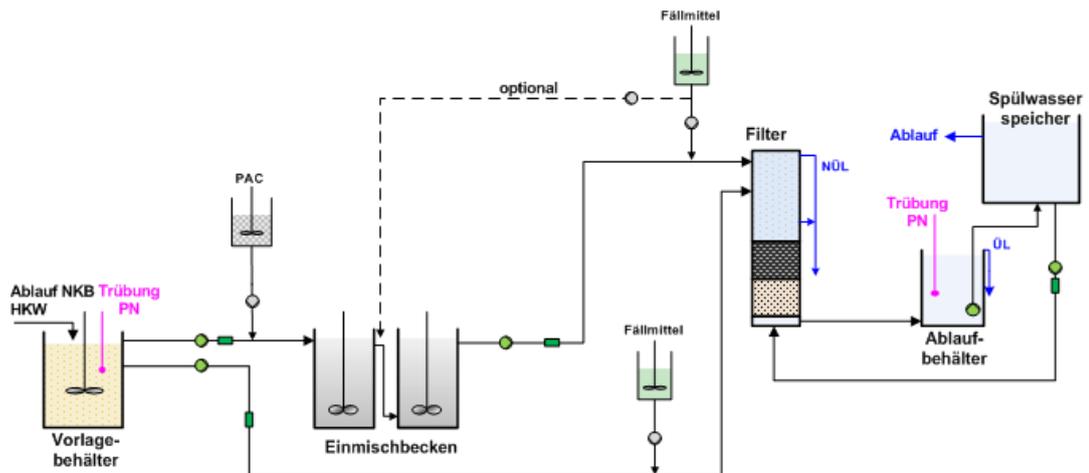


Abbildung 5.1 Anlagenkonfiguration der Versuchsanlage HKW Stuttgart-Mühlhausen

Der Aufbau der VersuchsfILTER entspricht den Randbedingungen der im HKW vorhandenen Filterkammern. Das Filterbett setzt sich aus einer 83 cm hohen Quarzsandschicht (Korndurchmesser 0,7 – 1,25 mm) sowie einer 60 cm hohen Anthrasitschicht (Korndurchmesser 1,4 – 2,5 mm) zusammen. Der Überstau hat eine Höhe von rund 1,80 m. Die Mittelachse des seitlich an die Filtersäule angebrachten Rohrstutzens ($\varnothing = 80$ mm), an welchem die Klappe zum Austrag des Schlammwassers montiert ist (= Spülklappe), befindet sich 1,90 m oberhalb des Filterbodens. Im Filter sind über die Höhe des Filterbettes verteilt insgesamt vier Probenahmestellen zur manuellen Probenahme angeordnet.

5.2.2 Kläranlage des Eigenbetriebs Stadtentwässerung Mannheim

Die Kläranlage des Eigenbetriebs Stadtentwässerung Mannheim (EBS) ist auf 725.000 EW ausgelegt. Täglich fließen ca. 87.000 m³ Abwasser durch eine mechanische und biologische-Behandlungsstufe. In der biologischen Reinigungsstufe wird mittels der Zugabe von Eisen (II)-Sulfat eine chemische Phosphatelimination durchgeführt.

Seit Juli 2016 ist eine adsorptive Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle (PAK) zur Elimination von Spurenstoffen in Betrieb. Diese ist als Teilstrombehandlung konzipiert. Die maximale Behandlungskapazität der Adsorptionsstufe von 2.000 L/s entspricht ca. 90 % der Jahresabwassermenge der Kläranlage. Bei größeren Abwassermengen, wird ein Teil des Abwassers nach der Nachklärung an der Adsorptionsstufe vorbei geleitet und direkt zum Filter geführt. Die Filtrationstufe ist für den Vollstrom ausgelegt.

Im Ablauf des Kontaktreaktors der Adsorptionsstufe wird Aluminiumhydroxidchloridsulfat zugegeben, um die Absetzeigenschaften der PAK-Flocken im Sedimentationsbecken zu verbessern. Im Ablauf der Adsorptionsstufe wird nochmals Aluminiumhydroxidchloridsulfat dosiert, damit der Feststoffrückhalt der restlichen PAK-Flocken im Filterbett sichergestellt ist. Sollten die einzuhaltenden Phosphor-Werte im Ablauf der Kläranlage überschritten werden, kann eine zusätzliche Nachfällung im Verteilerbauwerk des Filters mit Eisen(III)chloridsulfat durchgeführt werden. Abbildung 5.2 zeigt das Fließschema der Kläranlage Mannheim.

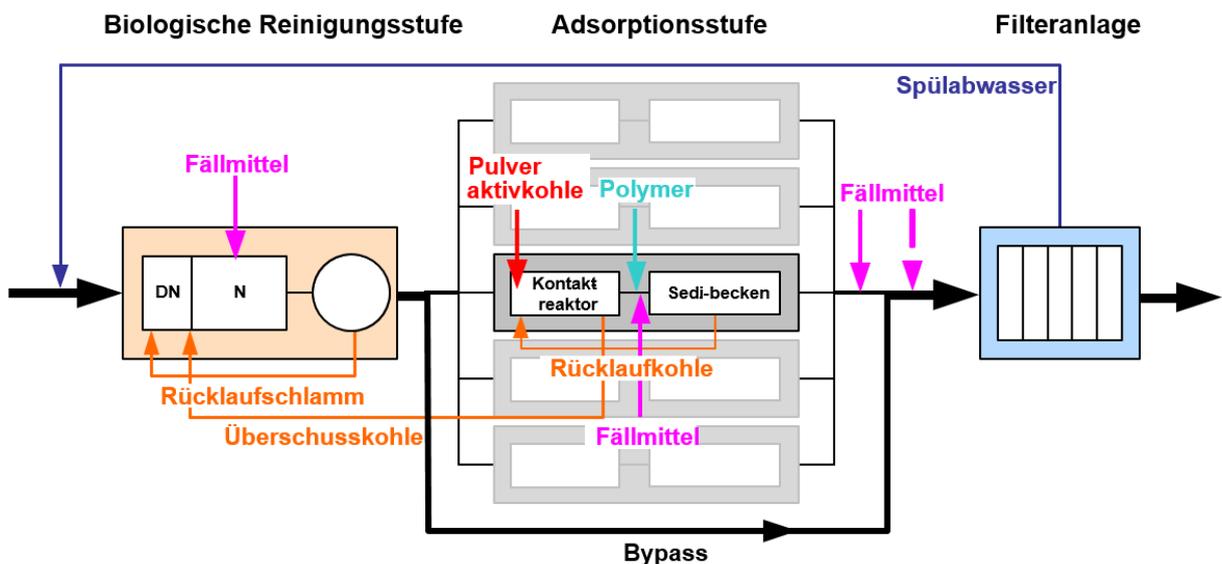


Abbildung 5.2 Vereinfachtes Fließschema der Kläranlage Mannheim

5.2.3 Kläranlage Böblingen-Sindelfingen

Die Kläranlage Böblingen-Sindelfingen hat eine Ausbaugröße von 250.000 EW. Diese leitet ihr gereinigtes Abwasser in die Schwippe. In abflussarmen Zeiten stellt der Kläranlagenablauf mehr als 80% des geführten Wassers.

Das Abwasser fließt durch eine mechanische-biologische Reinigungsstufe. Die biologische Reinigungsstufe umfasst eine Tropfkörperanlage mit nachgeschalteter Denitrifikation und einer Nachklärung, sowie einer Simultanfällung mit FeClSO_4 zur Phosphatelimination in den Zulauf der Nachklärbecken.

Der Ablauf der Nachklärung wird bis zu einem Zufluss von 1.000 L/s der Aktivkohleadsorptionsanlage zugeführt, die seit Ende Oktober 2011 mit Pulveraktivkohle in Betrieb ist. Bei einer darüber hinausgehenden Abwassermenge wird der Filter mit einem Teil des Abwassers über einen Bypass direkt beschickt.

Nur der Zufluss, der bei Regenwetter über 1.000 L/s hinausgeht, wird mit separaten Pumpen direkt zur Filtration gefördert. Trotz der Bypass Führung bei Regenwetterbedingungen werden mehr als 90 % der Jahreswassermenge in der der Aktivkohleadsorptionsanlage behandelt.

Im Sedimentationsbecken werden Flockungs (Polymer) - und Fällmittel (FeClSO_4) zur Verbesserung des Feststoffrückhalts zudosiert. Nach der Adsorptionsstufe fließt das Abwasser zum Flockungsfilter, der aus 16 Kammern mit einem mehrschichtigen Filterbettauflauf aus Anthrazit, Quarzfiltersand und Basalt besteht. In den Zulauf der Flockungsfiltration erfolgt zum besseren Feststoffrückhalt eine weitere Dosierung von FeClSO_4 .

Obwohl die P-Elimination hauptsächlich als Simultanfällung durch die Zugabe von FeClSO_4 in den Zulauf der Nachklärung erfolgt, bewirkt die Zugabe von FeClSO_4 in den Zulauf zum Flockungsfilter sowie in der Adsorptionsstufe eine weitestgehende Phosphorentnahme.

Abbildung 5.3 zeigt der Verfahrensprozess der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen.

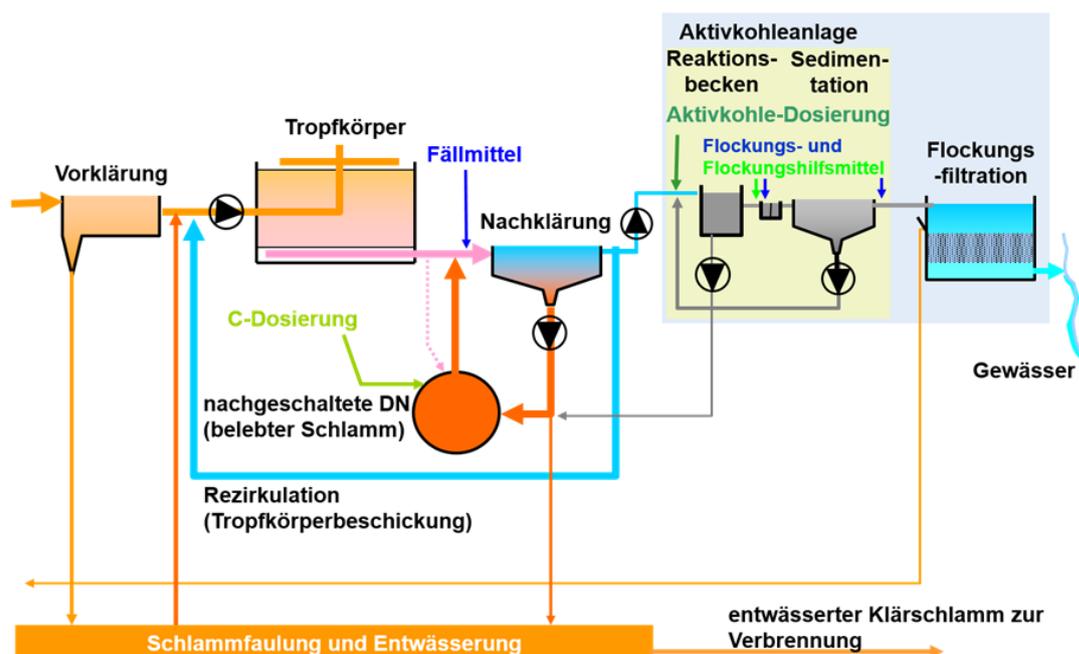


Abbildung 5.3 Verfahrensprozess Kläranlage Böblingen-Sindelfingen

5.3 Auswertungen

5.3.1 Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen

Beim Versuchsbetrieb wurden verschiedene PAK Produkte verwendet, eines davon war Carbopal AP und das andere Produkt Carbopal AP Supra von Donau Carbon. Weiterhin wurden unterschiedliche Mengen an PAK (10 mg/L und 20 mg/L) und Fällmittel (1,5 mg Fe^{III}/L, 2,0 mg Fe^{III}/L und 3,0 mg Fe^{III}/L) untersucht. Als Fällmittel wurde Eisenchloridsulfat verwendet. Die Dosierung des Fällmittels fand in die Zulaufleitung zum Filter statt. Tabelle 5.1 enthält eine Zusammenfassung der Laufzeit sowie der verwendeten PAK, des verwendeten Fällmittels und der Anzahl der erhaltenen Proben. Aufgrund von Betriebsstörungen in der Versuchsanlage gab es Tage, an denen keine Proben entnommen werden konnten.

Tabelle 5.1 Betriebsparameter der Versuchsbetriebs des HKW Stuttgart-Mühlhausen

Laufzeit	verwendete PAK	PAK Dosiermenge [mg/L]	Fällmittel Dosiermenge [mg Fe/L]	Anzahl der Probe
11.01.18-30.03.18	Carbopal AP	15	3	34
27.07.18-03.09.18	Carbopal AP	15	2	35
05.09.18-02.12.18	Carbopal AP	15	1,5	70
03.12.18-31.03.19	Carbopal AP Supra	15	1,5	64
01.04.19-28.07.19	Carbopal AP Supra	10	1,5	37
29.07.19-02.12.19	Carbopal AP	10	1,5	81

Abbildung 5.4 zeigt die PO₄-P-Werte im Ablauf der Versuchsanlage über die PO₄-P-Werte im Zulauf der Versuchsanlage.

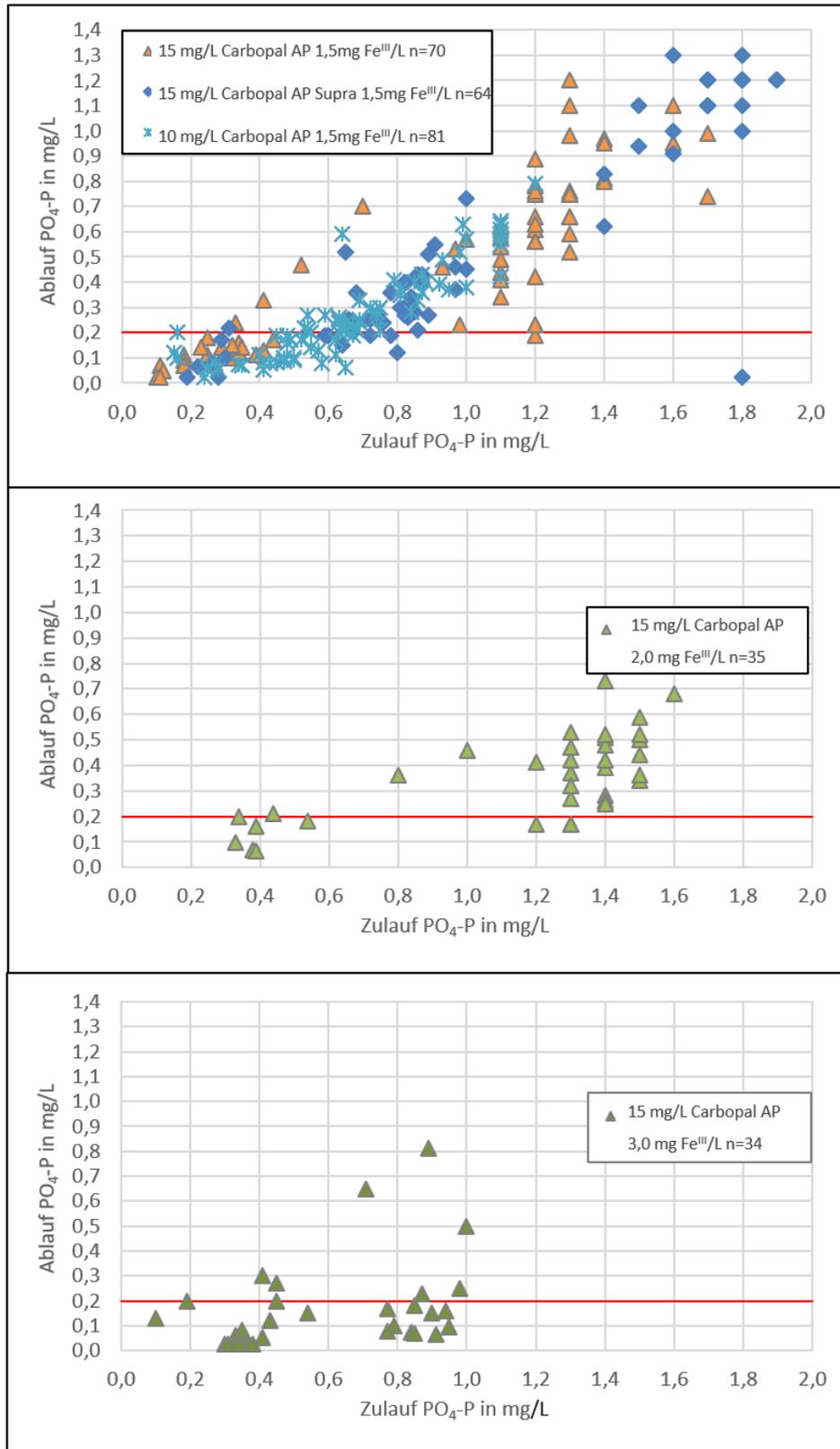


Abbildung 5.4 PO₄-P Werte im Zulauf und Ablauf der Versuchsanlage bei unterschiedlichen Fällmitteldosierungen

Bei einer Fällmitteldosierung von 1,5 mg Fe^{III}/L und 2,0 mg Fe^{III}/L wird eine Konzentration von 0,2 mg PO₄-P/L bis zu einer Zulaufkonzentration von 0,6 mg PO₄-P/L erreicht. Bei einer Erhöhung der Fällmitteldosierung auf 3,0 mg Fe^{III}/L können auch bei hohen Zulaufkonzentrationen von 0,8-1,0 mg PO₄-P/L im Ablauf der Versuchsanlage niedrigere PO₄-P-Werte erreicht werden.

Da für die Fällung des Phosphors hauptsächlich der Anteil des Orthophosphats relevant ist, ist in Abbildung 5.5 ein Zusammenhang zwischen der Elimination von PO₄-P und P_{ges} dargestellt.

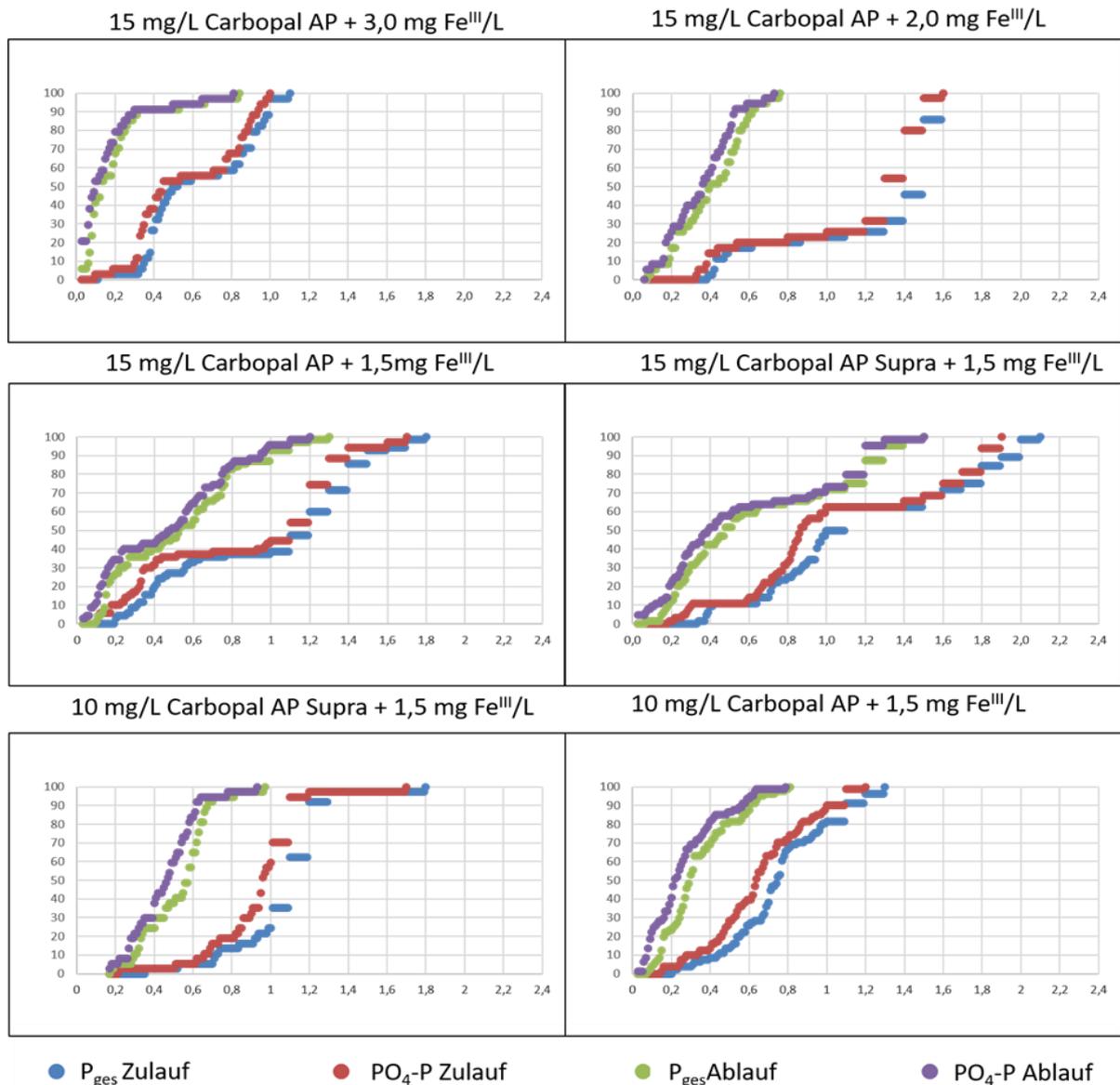


Abbildung 5.5 Summenhäufigkeit des Versuchsbetriebs auf dem HKW Stuttgart-Mühlhausen

Es ist auch zu beobachten, dass die P_{ges} -Werte eine ähnliche Entnahme wie die von $\text{PO}_4\text{-P}$ zeigen. Eine Fällmitteldosierung von $3,0 \text{ mg Fe}^{\text{III}}/\text{L}$ zeigt eine durchschnittliche Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage von $0,19 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ mit einer durchschnittlichen P_{ges} -Eliminationsleistung von $65,5 \%$. Bei eine Fällmitteldosierung von $2,0 \text{ mg Fe}^{\text{III}}/\text{L}$ beträgt die durchschnittliche Konzentration im Ablauf der Versuchsanlage $0,40 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ mit einer durchschnittlichen P_{ges} -Eliminationsleistung von $66,6 \%$. Bei eine Fällmitteldosierung von $1,5 \text{ mg Fe}^{\text{III}}/\text{L}$ liegt die durchschnittliche Konzentrationen im Ablauf der Versuchsanlage zwischen $0,34\text{-}0,52 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ und einer Eliminationsleistung zwischen $51\text{-}56 \%$ bei einer Dosierung von 10 mg/L PAK . Bei einer Dosierung von 15 mg/L PAK liegt die durchschnittliche Konzentrationen im Ablauf der Versuchsanlage zwischen $0,52\text{-}0,64 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ und zeigt eine P-Eliminationsleistung zwischen $47\text{-}49 \%$.

Der Grenzwert von $0,2 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ kann mit einer Fällmitteldosierung von $1,5 \text{ mg Fe}^{\text{III}}/\text{L}$ bis zu einer Zulaufkonzentration von $0,6 \text{ mg } P_{\text{ges}}/\text{L}$ eingehalten werden. Allerdings waren die Zulaufbedingungen sehr unterschiedlich (s. Verlauf der Zulaufkonzentrationen in Abbildung 5.4).

5.3.2 Kläranlage Mannheim

Für die Kläranlage Mannheim werden die Betriebsdaten der Jahre 2017, 2018 und 2019 analysiert. Da sich in den Jahren 2017 bis 2019 keine wesentlichen Änderungen im Betrieb ergeben haben, ist ein Vergleich des gesamten Jahres möglich.

Bei der biologischen Behandlung mit Eisen-II-Sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) findet eine Simultanfällung statt. Während des Sommers werden etwa 25 L/h mit einer Dichte von $1,20$ bis $1,25 \text{ g/cm}^3$ dosiert, im Winter wird die Dosierung auf etwa 80 bis 100 L/min erhöht. Die Menge des gegebenen Eisensalzes wird automatisch mit steigenden P-Werten bis zu einer maximalen Menge von 650 L/h eingestellt.

In der Adsorptionsstufe wird Aluminiumhydroxidchloridsulfat ($\text{Al}_2\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}_6\text{S}$) verwendet. Die Fällmitteldosierung mit $0,3 \text{ mg Al}^{\text{III}}/\text{L}$ erfolgt ins Sedimentationsbecken.

Abbildung 5.6 zeigt die Summenhäufigkeit der P-Konzentrationen für die Jahren 2017, 2018 und 2019.

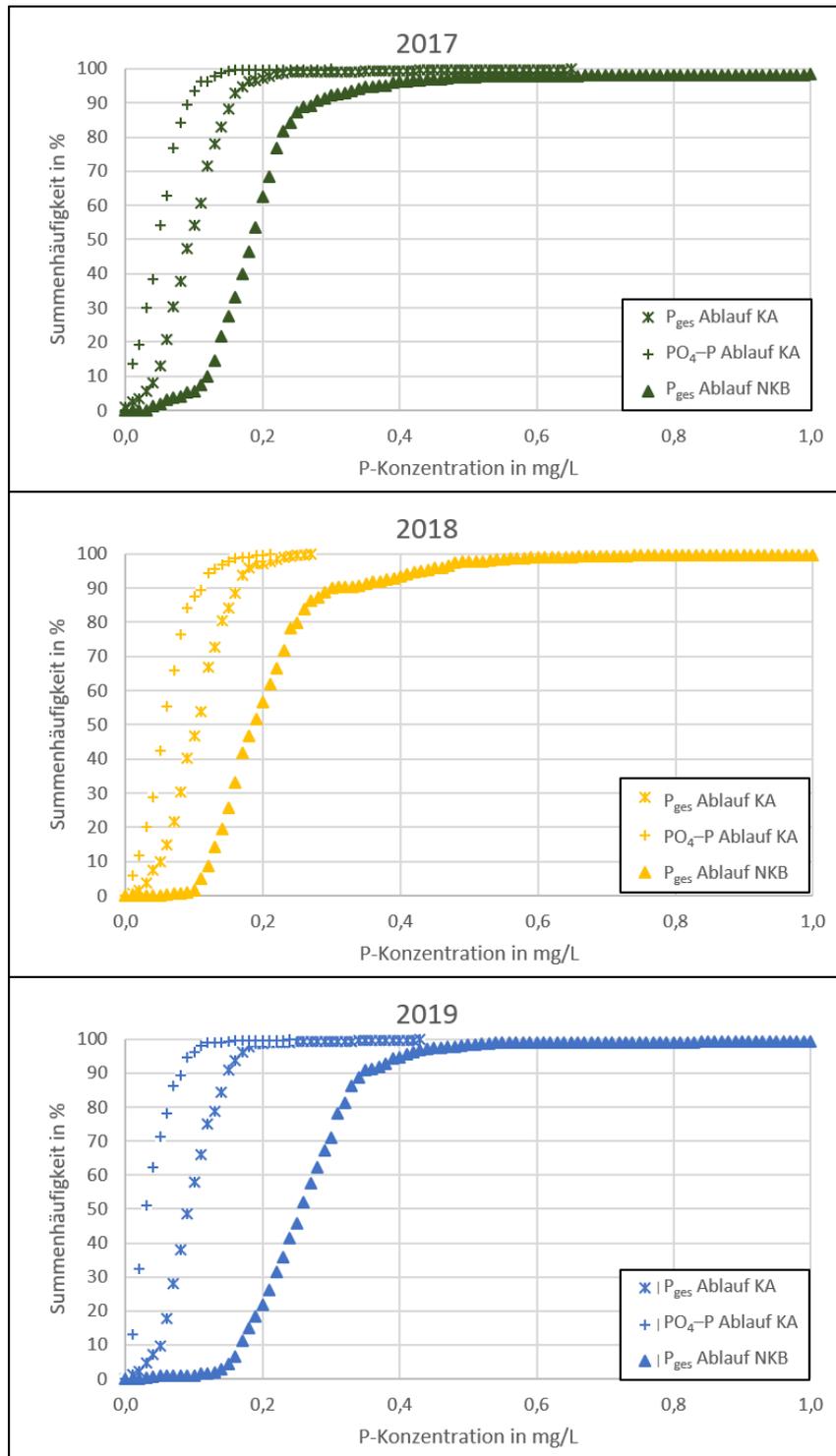


Abbildung 5.6 Summenhäufigkeit P-Konzentrationen

Es ist zu beobachten, dass im Jahr 2017 und 2018 liegt die durchschnittliche P_{ges} -Konzentration im Ablauf Nachklärung bei 0,21 mg/L. Im Jahr 2019 ist die P_{ges} -Konzentration im Ablauf Nachklärung höher mit einer durchschnittlichen P_{ges} -Konzentration von 0,27 mg/L. Jedoch wurde eine P-Elimination vorwiegend unter 0,2 mg/L im Ablauf der Kläranlage erreicht.

Abbildung 5.7 zeigt die Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe in Abhängigkeit der Konzentration im Ablauf der Nachklärung.

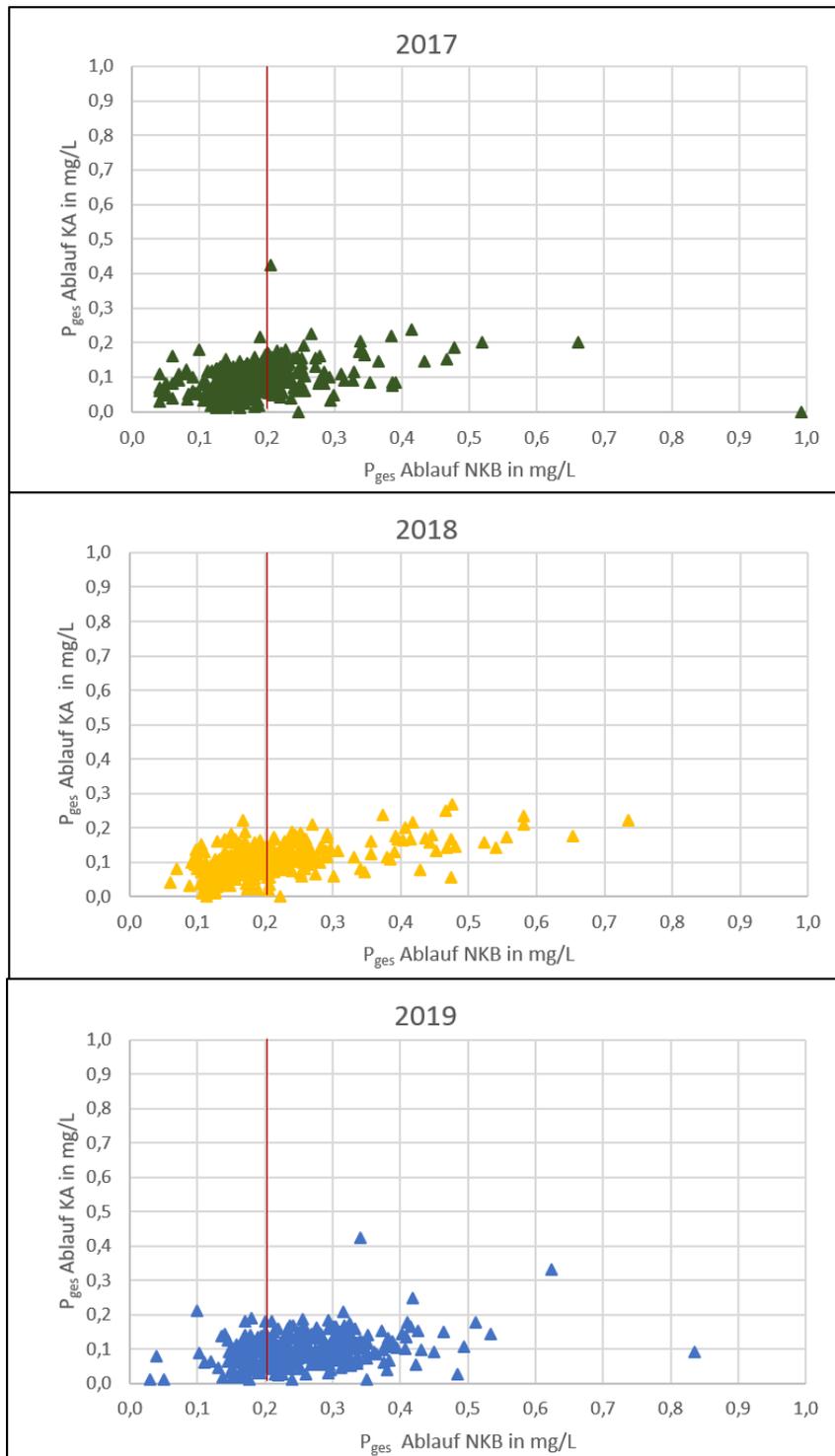


Abbildung 5.7 P_{ges} Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe in Abhängigkeit der Konzentration im Ablauf der Nachklärung

Es ist bemerkenswert, dass die P_{ges}-Werte im Ablauf der Nachklärung einen breiten Messbereich haben, der zwischen 0,1 und 0,8 mg/L liegt. Dennoch werden größtenteils die Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage unter 0,2 mg/L eingehalten.

Abbildung 5.8 zeigt die P_{ges} -Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung und im Ablauf der Kläranlage in Abhängigkeit der Zulaufmenge.

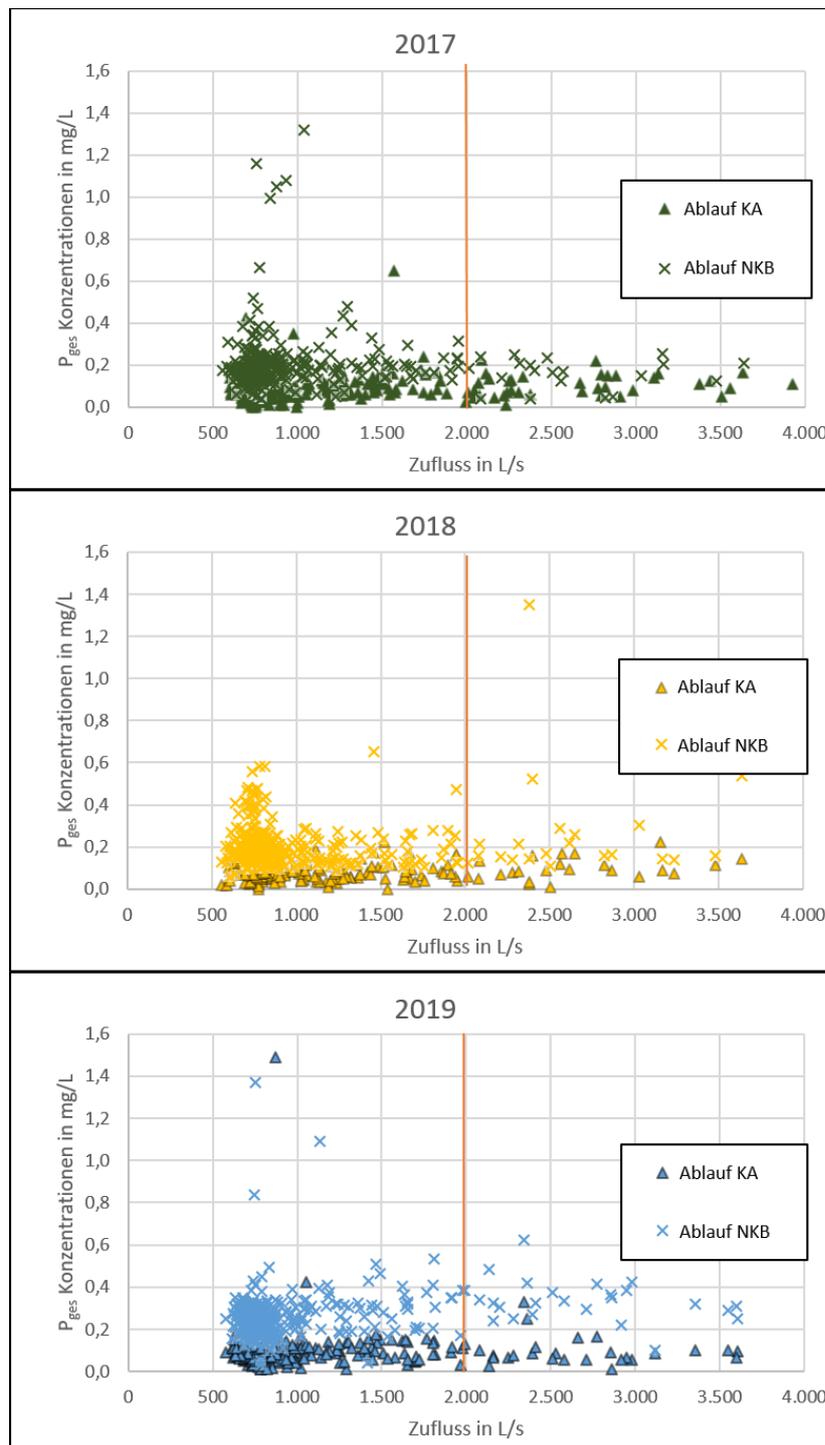


Abbildung 5.8 P_{ges} -Konzentrationen in Abhängigkeit des mittleren täglichen Zufluss

Es ist zu beobachten, dass trotz einer höheren hydraulischen Belastung aufgrund von Regenwetter, Ablaufwerte von weniger als 0,2 mg P_{ges} /L eingehalten werden.

5.3.3 Kläranlage Böblingen-Sindelfingen

Um den Beitrag der Adsorptionsstufe zur weitergehenden P-Elimination in der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen zu analysieren, werden die Jahre 2010, 2011, 2012, 2018 und 2019 berücksichtigt. Somit wird zusätzlich zu den Werten aus den letzten Jahren eine Ansicht der Werte vor dem Ausbau der Kläranlage erhalten.

Die P-Elimination erfolgt hauptsächlich als Simultanfällung in der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage durch Dosierung von FeClSO_4 in den Zulauf des Nachklärbeckens. Das zur Verbesserung der Sedimentationseigenschaften in der Aktivkohleadsorptionsanlage zugesetzte FeClSO_4 und die Dosierung von FeClSO_4 in die Beschickung zum Flockungsfilter (zur effektiveren Trennung der filtrierbaren Substanzen), führen jedoch auch zu einer sehr umfassenden Phosphorentfernung.

Nach dem Start der Adsorptionsstufe am 25. Oktober 2011 wurden die Dosiermenge und die Auslegungsspezifikation hinsichtlich Ladungsmenge, Bypass-Führung, Rücklaufschlammförderung und Feststoffgehalt im Reaktionstank angepasst. Daher sind die Werte in diesem Zeitraum bis Ende 2011 nicht konsistent.

Um ähnlich stabile Betriebsbedingungen zu vergleichen, wurden die Betriebsergebnisse aus den Zeiträumen von Januar bis April eines jeden Jahres verglichen. Das Fällmittel wird mit $4,0 \text{ mg Fe}^{III}/\text{L}$ ins Reaktionsbecken und mit $1,0 \text{ mg Fe}^{III}/\text{L}$ in den Zulauf zum Flockungsfilter zugegeben.

Abbildung 5.9 zeigt die kumulative Häufigkeit der CSB-Werte im Ablauf Flockungsfilter.

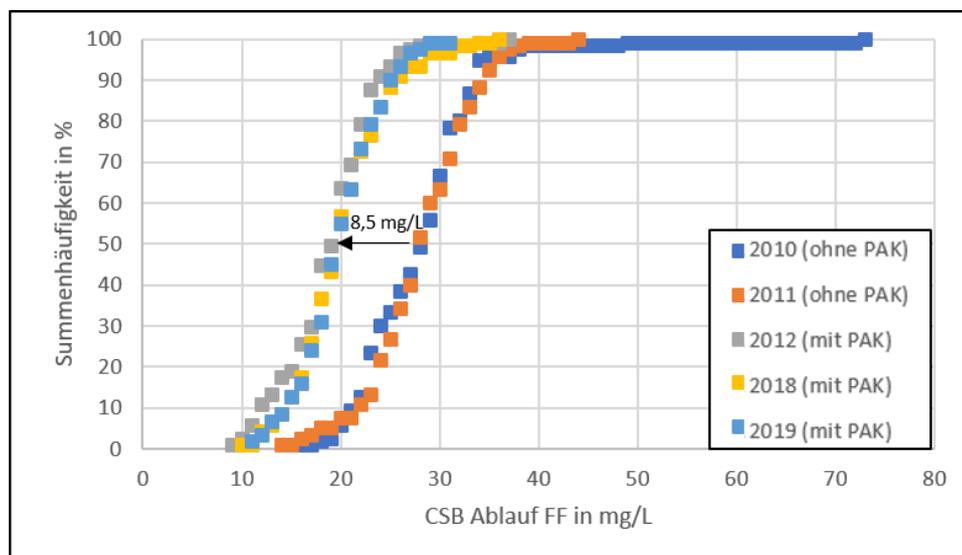


Abbildung 5.9 Summenhäufigkeit des CSB im Ablauf Flockungsfilter

Mit Inbetriebnahme der Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination mit PAK sinkt die CSB-Konzentration im Ablauf der Kläranlage um durchschnittlich $8,5 \text{ mg/L}$.

Abbildung 5.10 zeigt die Summenhäufigkeiten der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf des Flockungsfilters.

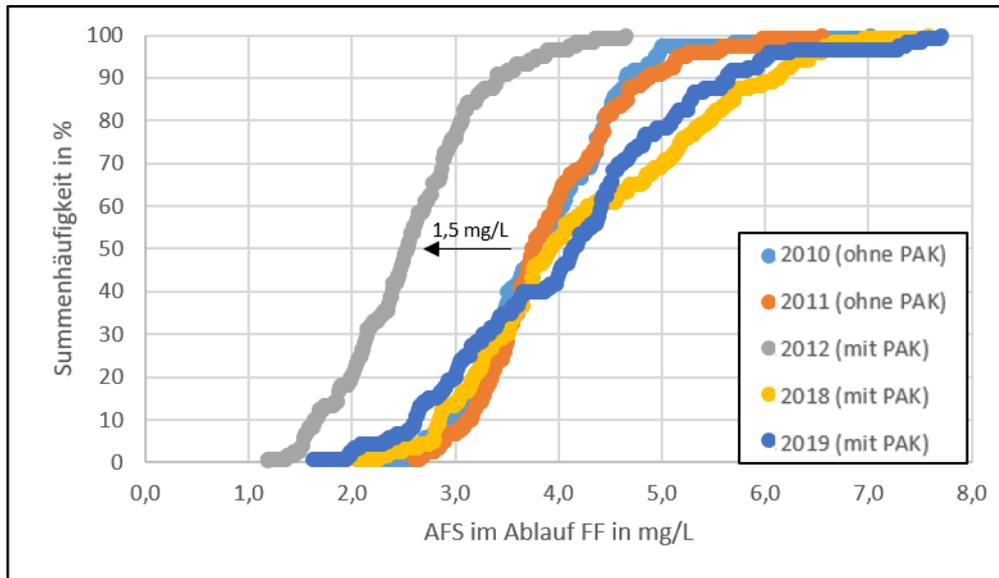


Abbildung 5.10 Summenhäufigkeiten der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf Flockungsfilter

Im Bezug auf die Filtrationsleistung verringert sich die Menge an filtrierbaren Substanzen im Ablauf Flockungsfilter in den ersten Betriebsmonaten der Adsorptionsanlage erheblich. Wie Abbildung 5.10 für 2012 zu erkennen ist, verringert sich die Menge an AFS im Ablauf Flockungsfilter im Vergleich zu den anderen Jahren um durchschnittlich 1,5 mg/L. Nach einigen Betriebsjahren (2018 und 2019) nimmt die Menge der AFS im Ablauf Flockungsfilter im Vergleich zu den Jahren vor dem Betrieb der Adsorptionsstufe (2011 und 2012) leicht zu. Dies lässt sich auch bei anderen Flockungsfiltern mit PAK-Dosierung beobachten und wurde im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht.

Abbildung 5.11 stellt die AFS-Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe in Abhängigkeit zu den AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung für die Jahre 2010 und 2011 (vor Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe) sowie für die Jahre 2012, 2018 und 2019 (nach Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe) dar.

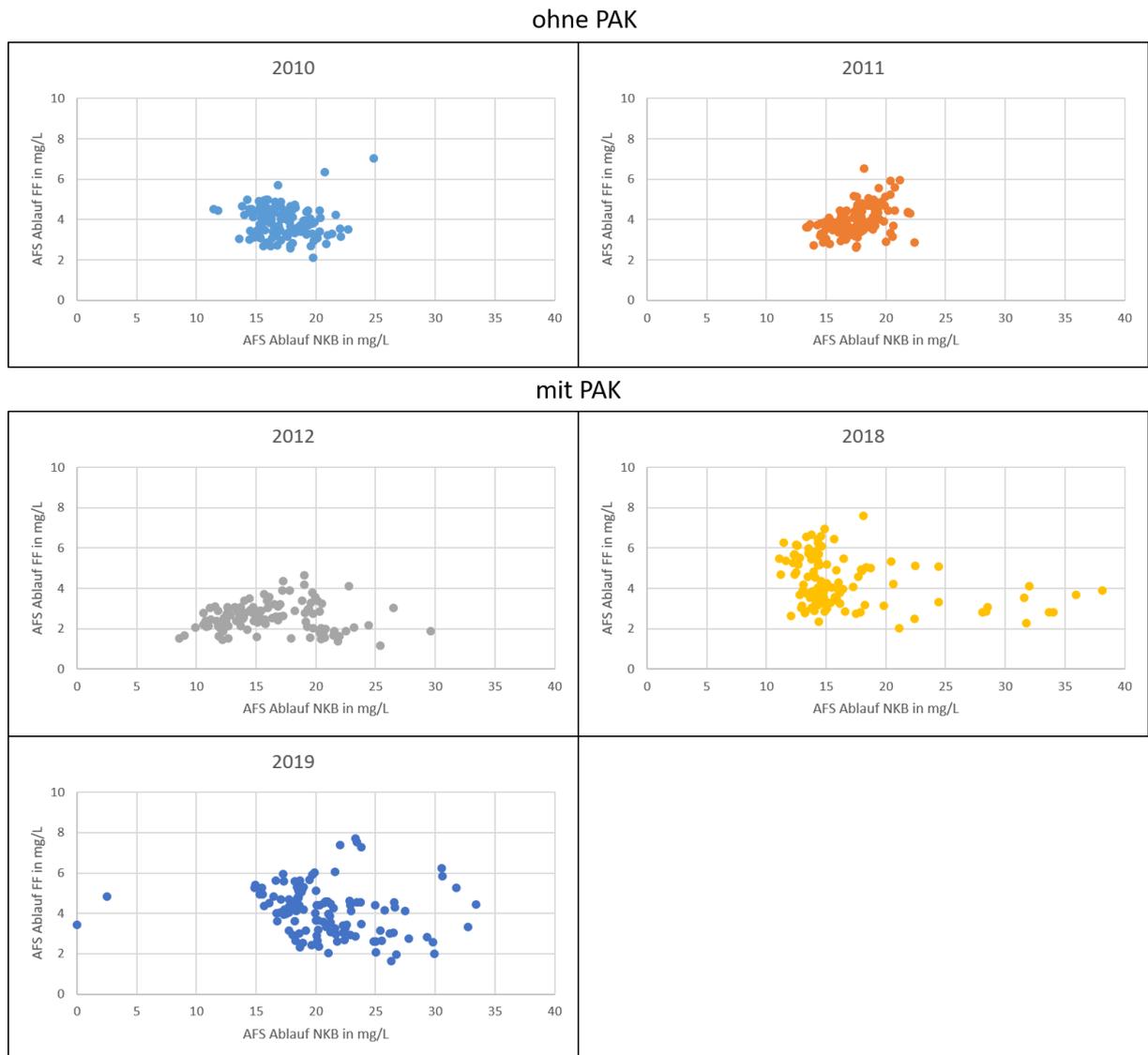


Abbildung 5.11 AFS-Konzentrationen im Ablauf der Filtrationsstufe vs. AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung (aus Trübungsmessungen hochgerechnet)

Abbildung 5.11 zeigt eine Verbesserung der Filtrationsleistung für das Jahr 2012. Für die Jahre 2018 und 2019 steigt jedoch die Menge an abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf der Nachklärung. Trotzdem gibt es keinen signifikanten Anstieg der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf des Nachklärung.

Abbildung 5.12 zeigt die Summenhäufigkeiten der P_{ges} -Konzentrationen im Ablauf Flockungsfilter für die Jahre 2010 und 2011 (vor Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe) sowie für die Jahre 2012, 2018 und 2019 (nach Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe).

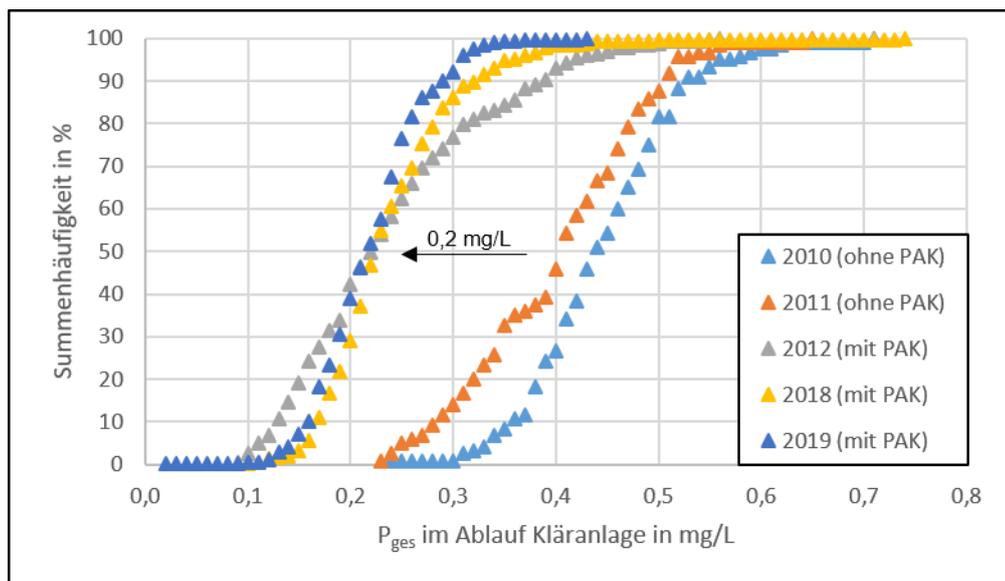


Abbildung 5.12 Summenhäufigkeiten der P_{ges} -Konzentrationen im Ablauf Flockungsfilter

Die P_{ges} -Konzentrationen vor der Ausbau im Ablauf der Kläranlage in die Jahre 2010 und 2011 mit einem Durschnitt jeweils von 0,44 mg/L bzw. 0,41 mg/L sind höher als nach dem Ausbau der Kläranlage. Es ist zu erkennen, dass nach der Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe die P_{ges} -Konzentrationen durchschnittlich um 0,2 mg/L sinken. Die durchschnittliche P_{ges} -Konzentration für die Jahre 2012, 2018 und 2019 beträgt 0,23 mg/L. Die Zugabe von $FeClSO_4$ in den Ablauf des Reaktionsbecken und in den Ablauf des Sedimentationsbecken führt zu einer weiteren Verringerung der Phosphorkonzentration.

Der CSB zeigt auch einen vergleichbaren Verlauf. Aufgrund des Byass-Managements gelangen vergleichsweise hohe CSB-Werte durch die vorherigen Reinigungsstufen des Klärprozesses direkt in die Filtration. Im Gegensatz zur Entnahme von Phosphorverbindungen kann diesem Effekt nicht entgegengewirkt werden, so dass erhöhte Ablaufswerte akzeptiert werden müssen, solange bis die Verdünnung aus dem Regenwetterzufluss in den Ablauf durchschlägt.

5.4 Zusammenfassende Diskussion der Messdatenauswertungen

Die drei betrachteten Kläranlagen eliminieren Spurenstoffe durch Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK). Die Filtrationsstufe wird für einen weitestgehenden PAK-Rückhalt benötigt. Die Messdaten bestätigen, dass der Feststoffrückhalt weitgehend unabhängig von der hydraulischen Belastung ist. Zur Verbesserung des Feststoffrückhalts werden Fäll- und Flockungsmittel vor der Filtration zugesetzt, womit auch eine Phosphatfällung erzielt wird.

Die Dosiermenge orientiert sich an der Flockenbildung und kann von Kläranlage zu Kläranlage variieren. Die Fällmittel werden in Abhängigkeit der Durchflussmenge zudosiert, sodass zwar eine Phosphatfällung erfolgt, deren Wirkungsgrad aber nicht gezielt bzw. begrenzt beeinflusst wird. Da der Spülschlamm aus der Filtrationsstufe über die Belebungsbecken der Schlammbehandlung zugeführt werden, können die als Hydroxide geflockten Fällmittel in der Belebungsstufe Phosphate fällen. Dies verbessert die Effizienz der Fällmitteldosierung.

Die Automatisierungskonzepte zur Fällmitteldosierung für die Simultanfällung und die Flockungfiltration sind aufeinander abzustimmen. Für die Mehrpunktfällung könnten auch unterschiedliche Fällmittel eingesetzt werden. Diese Fragestellungen sind auch auf Anlagen mit Filtrationsstufe, aber ohne Spurenstoffelimination übertragbar.

Bei einer der betrachteten Anlagen waren vereinzelte negative Entnahmeleistungen festzustellen, allerdings in einem sehr niedrigen Konzentrationsbereich. Dies wirkt sich kaum auf den Jahresmittelwert aus, könnte aber bei einem sehr niedrigen P-Überwachungswert relevant werden.

Die Anforderungen an die Phosphorelimination mit der Filtervariante sind sehr hoch. Zum einen zeigen die Messdaten der Kläranlage Mannheim, dass auch niedrigere P_{ges} -Ablaufkonzentrationen als 0,2 mg/L im Jahresmittel erzielt werden können. Voraussetzung hierfür erscheint die sehr gute P-Elimination in der Belebungsstufe zu sein. Die halbtechnischen Versuche auf dem HKW zeigen, dass die Ablaufwerte erreicht werden können, wenn die P-Elimination in der Belebungsstufe weitgehend und stabil verläuft sowie ausreichend Fäll- und Flockungsmittel zudosiert werden (Abbildung 5.5).

Um die Fragestellungen nach geeigneten, kostengünstigen Verfahrenskombinationen von Spurenstoffelimination und Filtertypen zu beantworten, sind Betriebsdaten von bestehenden, möglichst großtechnischen GAK-Filtern und PAK-Anlagen mit Tuchfiltration gezielt hinsichtlich AFS- und P-Entnahmewirkung zu untersuchen.

6. Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Die Filtrationsstufe ist ein wichtiger Bestandteil von Anlagen zur Spurenstoffelimination. Die Filter werden zur Abtrennung der feinpulverigen Aktivkohle benötigt (PAK-Verfahren), tragen als Festbettverfahren zur Adsorption (GAK-Verfahren) und auch zum Feststoffrückhalt bei oder werden zur biologischen Nachbehandlung zum Abbau von Oxidationsprodukten benötigt (biologisch aktive Einschicht-/Mehrschicht-Filter). Bei den GAK- und Einschicht-/Mehrschicht-Filtern wird eine Phosphorentnahme durch den Feststoffrückhalt erreicht. Bei den PAK-Verfahren muss zur Verbesserung der Flockenbildung und Feststoffabscheidung Fäll- und Flockungsmittel zugegeben werden, sodass bei den PAK-Verfahren zusätzlich eine Phosphatfällung wirkt.

Die in der Literaturrecherche erfassten Untersuchungen fokussieren sich auf das Kernthema „Spurenstoffelimination“. In einigen Studien wurden auch die P- und/oder AFS-Ablaufkonzentrationen gemessen und als mittlere Ablaufkonzentration genannt. Wechselwirkungen mit der Belebungsstufe bzw. der Simultanfällung und der Nachklärung werden nicht betrachtet.

Bei mehr als 2/3 der vom Land Baden-Württemberg geförderten Machbarkeitsstudien zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen aus den Jahren 2015 – 2020 wurde auf die P-Elimination eingegangen, wobei in den Jahren 2018 – 2020 die detaillierte Betrachtung der Synergieeffekte zwischen weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination an Bedeutung zugenommen hat. Folgende Erkenntnisse lassen sich festhalten:

- Wird die Anlage zur Spurenstoffelimination und die Filtrationsstufe für den Teilstrombetrieb ausgelegt, ist für den Nachweis zur Einhaltung der Überwachungsanforderungen eine Mischungsrechnung durchzuführen.
- Die Verfahren zur Spurenstoffelimination und weitestgehende P-Elimination sind nicht beliebig miteinander kombinierbar, sondern folgen zunächst den Anforderungen an den Feststoffrückhalt und somit der Partikelgrößenverteilung und der Feststoffbelastung. Um die hohen Anforderungen an die weitestgehende P-Elimination einhalten zu können, darf die Filtrationsstufe nicht als „end of pipe-Lösung“ gesehen werden, sondern ist in den gesamten verfahrenstechnischen, biologischen und chemischen Abwasserreinigungsprozess zu integrieren. Auch wenn zur Spurenstoffelimination bei den GAK-Filtern und den biologisch aktivierten Filtern keine Fällmitteldosierung erforderlich ist, sollte dies beim Einsatz zur weitestgehenden Phosphorelimination berücksichtigt werden.
- Um die hohen Anforderungen an die weitestgehende P-Elimination mittels einer Filtrationsstufe einzuhalten, muss auf eine stabile Simultanfällung und eine hohe AFS-Abtrennleistung in der Nachklärung geachtet werden. Dies gilt umso mehr für einen Teilstrombetrieb, der sich aus der Nutzung von Filtrationsstufen als Bestandteil einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ergeben könnte. Vor den Filtrationsstufen sollte - unabhängig vom Spurenstoffeliminationsverfahren - Fällmittel zudosiert werden können, um die P-Entnahme durch Phosphatfällung zu erhöhen.

Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

- Filtrationsanlagen werden für Filtergeschwindigkeiten und Feststoffbelastungen ausgelegt. Somit hängt die Auslegung der Filtrationsstufe von der Reinigungsaufgabe (AFS, PAK), der Abtrennleistung der Vorstufe (Nachklärung, Tuchfilter vor GAK, etc.) und dem Filtertyp selbst ab.
- Die geeignete Verfahrenskombinationen zur Spurenstoffelimination und weitestgehender Phosphorelimination ist unter Beachtung der lokalen Verhältnisse wie Abwasserzusammensetzung, verfügbare Flächen, Höhenlagen, Baugrund etc. ingenieurtechnisch zu untersuchen.

Zusammenfassend liegt bei den Machbarkeitsstudien der Schwerpunkt bei der Auswahl des Filtrationsverfahrens und der damit verbundenen Abhängigkeiten bezüglich der jeweiligen Verfahren zur Spurenstoffelimination. In der detaillierten Betrachtung spielen Platzbedarf, Höhenlagen sowie die Auslegung der Filterstufe auf Vollstrom eine wichtige Rolle.

Dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg liegen aus der wissenschaftlichen Betreuung vieler Kläranlagen und Forschung umfangreiche Messdaten zur Spurenstoffelimination vor. Zu einigen Projekten wurden auch der Feststoffrückhalt und die P-Entnahmemeistung in der Filtrationsstufe beprobt. Für das PAK-Verfahren der Simultandosierung (PAK-Dosierung ins Belebungsbecken) und Ozon-Verfahren liegen keine verwertbaren Messdaten vor. Gleiches gilt für GAK-Filter.

Von drei Kläranlagen liegen umfangreiche Betriebsdaten vor, um einen Synergieeffekt der Spurenstoff- und P-Elimination bei Kläranlagen mit unterschiedlichen Ausbaugrößen für dieses Verfahren betrachten zu können.

Die betrachteten Kläranlagen eliminieren Spurenstoffe durch Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK). Mit Raumfiltern wird PAK abgetrennt. Zur Verbesserung des Feststoffrückhalts werden Fäll- und Flockungsmittel vor der Filtration zugesetzt, womit auch eine Phosphatfällung erzielt wird. Die Auswertung der Messdaten zeigt:

- Die Kläranlagen erzielen durch die Zugabe von Fällmitteln in die PAK-Stufe niedrige P_{ges} -Ablaufkonzentrationen.
- Die Fällmittel werden in Abhängigkeit der Durchflussmenge zudosiert, sodass der Wirkungsgrad der Phosphatfällung nicht gezielt beeinflusst wird. Der Spülschlamm aus der Filtrationsstufe wird in die Belebungsbecken zurückgeführt, was die Effizienz der Fällmitteldosierung erheblich verbessert.
- Die Anforderungen an die Phosphorelimination mit der Filtervariante sind sehr hoch. Zum einen zeigen die Messdaten der Kläranlage Mannheim, dass auch niedrigere P_{ges} -Ablaufkonzentrationen als 0,2 mg/L im Jahresmittel erzielt werden können. Voraussetzung hierfür erscheint die sehr gute P-Elimination in der Belebungsstufe zu sein.

Die halbtechnischen Versuche auf dem HKW zeigen, dass die Ablaufwerte erreicht werden können, wenn die P-Elimination in der Belebungsstufe weitgehend und stabil verläuft sowie ausreichend Fäll- und Flockungsmittel zudosiert werden.

- Die AFS-Entnahmewirkung der Raumfilter ist weitgehend unabhängig von der hydraulischen Belastung.

Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Es bleiben noch viele Fragen offen, die auch auf Anlagen mit Filtrationsstufen ohne Spurenstoffelimination übertragbar sind:

- Abstimmen der Automatisierungskonzepte zur Fällmitteldosierung für die Simultanfällung und die Flockungsfiltration;
- Einsatz unterschiedlicher Fällmittel für die Mehrpunktfällung.

Um die Fragestellungen nach geeigneten, kostengünstigen Verfahrenskombinationen von Spurenstoffelimination und Filtertypen zu beantworten, sind Betriebsdaten von bestehenden, möglichst großtechnischen GAK-Filtern und PAK-Anlagen mit Tuchfiltration gezielt hinsichtlich AFS- und P-Entnahmewirkung zu untersuchen.

Aus weiteren Projekten des KomS sind Ergebnisse von halbtechnischen Versuchen mit GAK-Filtern verfügbar, zudem sind auch großtechnische Untersuchungen geplant. Hier sollte der Einfluss des Druckverlusts, der Rückspülzyklen sowie der Filtergeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Ergebnisse der halbtechnischen Versuche auf der Kläranlage Tuttlingen (Ultrafiltrationsanlage mit vorgeschalteter PAK-Dosierung) zeigen, dass durch die Flockungsmitteldosierung Phosphorkonzentrationen im Ablauf auf sehr geringe Werte (im Mittel 0,1 mg/L) verringert werden können.

Offen bleibt die Betrachtung des Synergieeffekts zwischen Spurenstoff und P-Elimination für das PAK-Verfahren der Simultandosierung (PAK-Dosierung ins Belebungsbecken), eine Adsorptionstufe mit Tuchfiltration und das Ozon-Verfahren, da es bisher nicht genügend Daten zu dieser Verfahrenskombination gibt. Es wird empfohlen, gezielte Untersuchungen zu diesen Verfahren durchzuführen.

Anhand der Literaturrecherche sowie der Datenauswertungen der Phase 1 werden die Messprogramme an die untersuchten Kläranlagen im Rahmen der Phase 2 angepasst, um Synergieeffekte besser beschreiben zu können. CSB-, AFS-, P_{ges} -, $\text{PO}_4\text{-P}$ -Eliminationsleistungen werden mitbetrachtet. Eine (zeitweise) Bilanzierung der N-Fractionen für die Filtrationsstufe der Kläranlage Friedrichshafen wird durchgeführt. Darüber hinaus wird der Einfluss der biologischen Wirkung bei Raum- sowie GAK Filtration betrachtet.

Für die Phase 2 werden folgende großtechnische Untersuchungen vorgeschlagen:

- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit PAK-Dosierung mit Tuchfiltration. Zu diesem Zweck werden folgende Kläranlagen vorgeschlagen:
 - Kläranlage Wendlingen, bestehend aus einer Belebungsstufe und einem separaten Adsorptionsverfahren.
 - Kläranlage Lahr, bestehend aus einem Tropfkörper und einem separaten Adsorptionsverfahren.
 - Kläranlage Leonberg. Seit September 2020 wird PAK in die Biologie dosiert.
- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit GAK Filter. Es wird empfohlen, die folgenden Kläranlagen zu berücksichtigen:
 - Kläranlage Mannheim. Der Fokus wird insbesondere auf die Betrachtung des Regenwetterfalls gelegt.

Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

- Kläranlage Emmingen-Liptingen, bestehend aus drei DynaSand-Filtern mit GAK.
- Untersuchungsprogramm auf Kläranlagen mit Ozonung. Folgenden Kläranlagen werden vorgeschlagen:
 - Kläranlage Eriskirch. Seit Januar 2020 ist die Ozonanlage im Betrieb.
 - Kläranlage Friedrichshafen. Diese weist im Vergleich zu anderen Kläranlagen höhere Stickstoffwerte auf. Eine Betrachtung des Bilanzen der Stickstoffverbindungen wird aus diesen Grund empfohlen.
- Untersuchungsprogramm auf der Kläranlage Kressbronn. Das Besondere an dieser Kläranlage ist, dass eine Umstellung der PAK-Dosierung auf Dosierung von GAK stattgefunden hat. Die Betrachtung der Automatisierungskonzepte und Fällmittelwahl wird gemacht.

Mit Hilfe der Untersuchungsprogrammen ist zu erwarten, dass die offenen Fragestellungen aus Phase 1 beantwortet werden, sowie dass Empfehlungen zur Implementierung neuer Verfahrensstufen und abgestimmte Betriebsweisen herausgearbeitet werden können.

Stuttgart, 02.03.2021



L. Acosta, M. Sc.
- Sachbearbeiterin -



Dr.-Ing. M. Launay
- Leiterin KomS BW-



Prof. Dr.-Ing. U. Zettl
- Hochschule Biberach -

Literaturverzeichnis

- [1] Rott, E.: Untersuchungen zur Elimination von Phosphor aus phosphonathaltigen Industrieabwässern (Dissertation). Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 233, ISBN 9978-3-8356-7349-6. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2016
- [2] DWA Arbeitsblatt DWA-A 202: Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, 2011
- [3] Cornel, Schaum, Fundneider: Filtration des Kläranlagenablaufs – Verfahrensschritte einer zukünftigen Abwasserbehandlung. Umsetzung des WRRL-Maßnahmenprogramms 2015-2021: Weitergehende Phosphorelimination an Hessischen Kläranlagen. 18. Mai 2016 Regierungspräsidium Darmstadt
- [4] UBA, Internationale Harmonisierung der Quantifizierung von Nährstoffeinträgen aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer Deutschlands, 2003
- [5] Imhoff, Imhoff, Jardin: Taschenbuch der Stadtentwässerung, DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 32. Auflage 2018
- [6] Baumann, Peter; Jedele, Klaus: Phosphorelimination Optimierung auf Kläranlagen Praxisleitfaden DWA. Praxisleitfaden für Betrieb von Kläranlagen, 2019
- [7] DWA (2011). Betrieb von Abwasseranlagen; Die Phosphorbilanz im kommunalen Abwasser. Leitfaden Nr. 2-13, Stand 2//2011. Online verfügbar unter [http://www.dwa.de/portale/lvbayern/lvbayern.nsf/C12572A70038506B/8E84B3C80DDF1002C1257849004EA95E/\\$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-13%20Phosphor.pdf](http://www.dwa.de/portale/lvbayern/lvbayern.nsf/C12572A70038506B/8E84B3C80DDF1002C1257849004EA95E/$FILE/Leitfaden%20DWA%20Bayern%202-13%20Phosphor.pdf) zuletzt abgerufen am 04.01.2021
- [8] Drenkova-Tuhtan, A.: Phosphorus Elimination and Recovery from Wastewater with Reusable Nano-composite Magnetic Particles. (Dissertation) Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 240, ISBN: 978-3-8356-7406-6. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2018
- [9] Voigt, A., Kleffmann, M. & Durth, A. (2013). Verbesserung der Phosphorelimination auf Kläranlagen vor dem Hintergrund steigender Anforderungen. 14. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium am 09. und 10.09.2013, Tagungsband "Aachener Schriften zur Stadtentwässerung", Band 17, 28/1-28/12
- [10] Metzger, Steffen Dr.; Keyzers, Christopher Dr.; Duschek, Kai: Synergieeffekte der Spurenstoffelimination im Kontext der weitergehenden Abwasserreinigung. Pforzheim, 10/15/2019.
- [11] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW: Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, 2. überarbeitete Auflage 2016
- [12] VSA: Pulveraktivkohle: Verfahren und Abtrennstufen. Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“, 2019. www.micropoll.ch
- [13] Telgmann, Ursula; Borowska, Ewa; Felmeden, Jörg; Frechen, Franz-Bernd: The locally resolved filtration process for removal of phosphorus and micropollutants with GAC. In Journal of Water Process Engineering 35, p. 101236. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101236, 2020

- [14] Fundneider, Thomas: Filtration und Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Aufbereitung von kommunalem Abwasser – Phosphor- und Spurenstoffentfernung –. IWAR, 259, Darmstadt, ISBN 978-3-940897-60-2, 2020
- [15] Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D.: Wastewater engineering: Treatment and reuse, 4-th ed. McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. McGraw-Hill, Boston, ISBN-13 : 978-0070418783, 2003
- [16] Metcalf & Eddy: Wastewater Engineering – Treatment and Resource Recovery. Verlag McGrawHill Higher Education, 5th edition 2013
- [17] Platz, Sebastian: Charakterisierung, Abtrennung und Nachweis von Pulveraktivkohle in der Abwasserreinigung. Dissertation an der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 228, 2015
- [18] Launay, Marie; Rößler, Anette; Rau, Walter; Metzger, Steffen: Spurenstoffelimination auf Kläranlagen in Baden Württemberg Belastungssituation und zusätzliche Reinigungseffekte. KA Nachbarschaft NO-SO, Wendlingen, 2018
- [19] ARA Thunersee: <https://www.arathunersee.ch/anlage/#kennzahlen>, zuletzt abgerufen am 28.07.2020
- [20] Wunderlin, Pascal; Meier, Aline; Grelot, Julie: Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA. VSA Plattform – Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen https://www.avrf.ch/public/upload/assets/29712/Aqua%26Gas%2011-2017_EMV%2C%20Stand%20der%20Technik.pdf, zuletzt abgerufen am 18.08.2020
- [21] Zöllig, H., Butz, H., Fischer, S., Messmer, H., Zuleeg, St., Eberhard, P. (2017). PAK-Stufe ARA Herisau: Erste grosstechnische Umsetzung einer PAK-Stufe in der Schweiz - Erfahrungen nach einem Betriebsjahr. Aqua & Gas, Nr. 1/17, S. 14-23.
- [22] Krucker, Bettina; Zawadski, Sophie; Acosta, Lilia; Launay, Marie: Direktdosierung von Pulveraktivkohle vor einen Filter auf dem Hauptklärwerk Mühlhausen, Stuttgart, 2020
- [23] Altmann, Johannes; Sperlich, Alexander; Jekel, Martin (2015): Integrating organic micropollutant removal into tertiary filtration. Combining PAC adsorption with advanced phosphorus removal. In Water research 84, pp. 58–65. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.023.
- [24] Alt, Klaus; Kuhlmann, Silke; Austermann-Haun, Ute; Meier, Jan Felix; Nahrstedt, Andreas: Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Detmold mittels der Kombination von Ozon mit nachgeschalteter Aktivkohlefiltration. Projektergebnisse im Rahmen des Zuwendungsbescheids A-xx/xx-HA der Bezirksregierung Detmold. Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH, 2017 https://www.dielinke-lippe.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/20170418_Abschlussbericht_Detmold-V10.pdf, zuletzt abgerufen am 23.03.2020
- [25] Altmann, Johannes; Rehfeld, Daniel; Träder, Kai; Sperlich, Alexander; Jekel, Martin: Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. In Water research 92, pp. 131–139. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.051, 2016
- [26] Gerrity, Daniel; Gamage, Sujanie; Holady, Janie C.; Mawhinney, Douglas B.; Quiñones, Oscar; Trenholm, Rebecca A.; Snyder, Shane A.: Pilot-scale evaluation of ozone and

- biological activated carbon for trace organic contaminant mitigation and disinfection. In *Water research* 45 (5), pp. 2155–2165. DOI: 10.1016/j.watres.2010.12.031, 2011
- [27] Ncube, Philani; Pidou, Marc; Stephenson, Tom; Jefferson, Bruce; Jarvis, Peter: The effect of high hydraulic loading rate on the removal efficiency of a quadruple media filter for tertiary wastewater treatment. In *Water research* 107, pp. 102–112. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.060, 2016
- [28] Miehe, U.; Stapf, M.; Schumann, P.; Völker, J.: Studie über Effekte und Nebeneffekte bei der Behandlung von kommunalem Abwasser mit Ozon. Abschlussbericht an die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2017
- [29] Zhang, Xiaolei; Chen, Jiaxin; Li, Ji: The removal of microplastics in the wastewater treatment process and their potential impact on anaerobic digestion due to pollutants association. In *Chemosphere* 251, p. 126360. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126360, 2020
- [30] Berg, U.; Donnert, D.; Ehbrecht, A.; Bumiller, W.; Kusche, I.; Weidler, P. G.; Nüesch, R.: “Active filtration” for the elimination and recovery of phosphorus from waste water. In *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 265 (1-3), pp. 141–148. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.10.135, 2005
- [31] Schnell, M.; Horst, T.; Quicker, P.: Thermische Verwertung von Klärschlamm – Überblick und Einordnung bestehender Verfahren. Neuruppin, 2018 https://www.vivis.de/wp-content/uploads/VvK/2018_VvK_131-164_Quicker.pdf
- [32] Schönberg, A.; Raupenstrauch, H.; Ponak, C.: Verfahren und Produkte der Phosphor-Rückgewinnung. Neuruppin, 2018 https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_679-692_Schoenberg.pdf
- [33] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Arbeitspapier: Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, 2018
- [34] VSA-Empfehlung: zu behandelnde Abwassermenge und Redundanz von Reinigungsstufen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen. Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“, 2015. www.micropoll.ch
- [35] Zettl, Ulrike (2020): Teilstrombehandlung bei P-Elimination - Bypasslösung bei der Abwasserfiltration. Online Expertenforum Phosphorelimination – Optimierung auf Kläranlagen. DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 22. Juli 2020
- [36] DWA Arbeitsblatt DWA-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung. DWA, Hennef 2019
- [37] DWA-Themen: Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen. DWA, Hennef 2015
- [38] Morck, Tobias; Lemberger, Hans: Tuchfilter: Planung, Ausführung und Bau anhand aktueller Beispiele. KomS Technologieforum am 6.10.2016 in Lahr
- [39] Nahrstedt, Andreas; Burbaum, Hubert; Mauer, Christian; Alt, Klaus; Sürder, Thomas und Fritzsche, Jürgen: Einsatz granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* - 2014 (61) Nr. 5