

Projektverbund



U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T



Spurenstoffelimination mit PAK im Aufstaubetrieb

Weiterentwicklung des „Ulmer Verfahrens“

- PAKAuf -

Abschlussbericht

gerichtet an das
Regierungspräsidium Stuttgart
Referat 54.3 - Industrie/Kommunen | Schwerpunkt Abwasser

AZV Unteres Sulmtal
Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW
Universität Kassel
Weber Ingenieure GmbH

Das Projekt wurde vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Rahmen der Projektförderung für wasserwirtschaftliche Maßnahmen gefördert



INHALT

- I Projektbericht Weber Ingenieure
- II Abschlussbericht Reallabore KomS
- III Abschlussbericht Simulation, Universität Kassel
- IV Ergebnisse Spurenstoffanalysen

21218-66273



UNIKASSEL
VERSITÄT

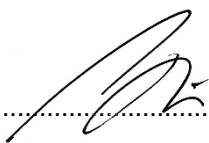


PAKAuf

Spurenstoffelimination mit PAK im Aufstaubetrieb Weiterentwicklung des Ulmer Verfahrens

Abschlussbericht 2022

Pforzheim, den 10.08.2022



ppa. Dipl. Ing. Mario Bitsch
WEBER-Ingenieure



i.A. Dr.-Ing. Steffen Metzger



i.A. Franziska Ehrhardt, M.Sc.
WEBER-Ingenieure

INHALT

1	Hintergrund und Aufgabenstellung	6
1.1	Veranlassung	6
1.2	SBR-Technologie	8
1.3	Aufgabenstellung	9
2	Vorgehensweise	10
2.1	Versuchskonzept	10
2.2	Reallabore	11
2.3	Halbtechnische SBR-Versuchsanlage	12
2.3.1	Aufbau	12
2.3.2	Betriebsweise	14
2.4	Simulation Reinigungsleistung	16
2.5	Angaben zur Analytik	16
2.5.1	Schlammanalytik	16
2.5.2	Abwassertechnischer Parameter	17
2.5.3	Spurenstoffanalytik	17
3	Reinigungsleistung	18
3.1	Zusammensetzung Reinigungsleistung	18
3.2	Surrogatparameter SAK_{254}	19
3.3	Durchlaufbetrieb	20
3.4	Versuche	24
3.4.1	Versuche mit PAK-Schlamm _{Sed.}	24
3.4.2	Abstellversuch	25
3.5	Simulation	27
3.6	Fazit	29
4	Absetzverhalten	30
4.1	Relevanz der Absetzphase für die Gesamtzyklusdauer	30
4.2	Beschreibung des Absetz- und Eindickverhalten	30
4.3	Möglichkeit der Ergebnisübertragung aus Laborversuchen	33
4.4	Absetzen des PAK _{Misch} -Schlamm	35
4.4.1	Sinkgeschwindigkeit	35
4.4.2	Einfluss TS-Gehalt	37
4.4.3	Einfluss ISV	38

4.5	Eindicken des PAK _{Misch} -Schlammes	39
4.5.1	Eindickphase.....	39
4.5.2	Gegebenheiten zum Zeitpunkt des Kompressionspunktes	41
4.5.3	Gegebenheiten bei der Endschlammspiegellage.....	44
4.6	Fazit	45
5	Dimensionierungshinweise	47
5.1	Hinweise	47
5.2	Begrifflichkeiten.....	47
5.3	Bemessungsgang	49
5.4	Zyklusdauer	49
5.5	Ermittlung der Volumina	50
5.6	Reaktorabmessungen	51
6	Resümee	52
	Literatur	55

ABBILDUNGEN

Abbildung 1-1:	Zyklusablauf des „Ulmer Verfahrens“ als SBR-Verfahren.....	8
Abbildung 2-1:	Vorgehensweise im Projekt PAKAuf	10
Abbildung 2-2:	Versuchsfläche auf der Kläranlage Neckarsulm, links Versuchsreaktor, rechts überdacht, Dosierstoffbevorratung	12
Abbildung 2-3:	Ablauf eines PAK-SBR-Zyklus während des Versuchszeitraums	13
Abbildung 2-4:	R+I-Schema der Versuchsanlage	14
Abbildung 2-5:	TS-Gehalt im PAK-SchlammMisch und Probenahmetage für die Überprüfung der Spurenstoffelimination im Versuchszeitraum.....	15
Abbildung 3-1:	Beispiel zur Elimination in der Adsorptionsstufe, der biologischen Stufe und der Gesamt-Kläranlage.....	18
Abbildung 3-2:	Elimination in der Kläranlage vor und nach Ausbau, am Beispiel von Diclofenac-Konzentrationen die einzelnen Eliminationsraten beziehen sich jeweils auf die Zulaufkonzentration zu einer jeden Stufe.....	19
Abbildung 3-3:	Beziehung zwischen der mittleren Elimination der 7 BW- Substanzen zur Reduktion des SAK254 im Austauschwasser bzw, im Zulauf zum SBR zwei Versuche ohne frische PAK	20
Abbildung 3-4:	SAK254-Messungen im Zu- und Ablauf der Versuchsanlage, SAK254- und Spurenstoffreduktion im Versuchszeitraum.....	21
Abbildung 3-5:	Prozentualer SAK254-Rückgang in der Versuchsanlage zum SAK254 im Zulauf der Versuchsanlage, Vergleich mit anderen Kläranlagen in Baden-Württemberg.....	22
Abbildung 3-6:	Vergleich der Eliminationsleistung der KomS_A-Liste mit der Elimination in sich bereits in Betrieb findenden Adsorptionsstufen [, modifiziert].....	23
Abbildung 3-7:	SAK254- und Spurenstoffreduktion in PAKSed.-Schlämmen, ohne frische PAK-Dosierung nach verschiedenen Rührzeiten Ausgewertete Spurenstoffe: Metoprolol, Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Benzotriazol, Tolytriazol	24
Abbildung 3-8:	SAK254-Reduktion Reinigungszyklen in der Versuchsanlage ohne frische PAK-Dosierung und nach der Wiedereinschaltung der PAK-Dosierung nach ca. 24 h.....	26
Abbildung 4-1:	Absetzkurve mit Phasen des Absetzvorgangs [5]	31
Abbildung 4-2:	Absetzkurven von Schlämmen mit unterschiedlichen Feststoffgehalten und gleichem ISV (ISV = 57 ml/g).....	32
Abbildung 4-3:	Absetzverhalten PAK-SchlammMisch, inkl. FM+FHM in den Kontaktreaktoren der Adsorptionsstufe in Pforzheim und Wendlingen	33

Abbildung 4-4:	Absetzverhalten des PAK-SchlammMisch im Standzylinder in verschiedenen Verdünnungsreihen.....	34
Abbildung 4-5:	Ähnlichkeiten in der Sinkgeschwindigkeit zwischen PAK-SchlammMisch und Belebtschlamm nach [5].....	36
Abbildung 4-6:	Absetzverhalten des PAK-SchlammMisch in den Kontaktreaktoren der Reallabore und der Versuchsanlage.....	37
Abbildung 4-7:	Sinkgeschwindigkeit im Standzylinder in Abhängigkeit vom TS-Gehalt des PAK-SchlammMisch.....	37
Abbildung 4-8:	Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Schlammindex [ml/g] für Schlämme mit einem TS-GehaltMisch +/- 3 g/l aufgenommen in Standzylindern	38
Abbildung 4-9:	Absetzverhalten (a) und Eindickvermögen (b) eines Schlammes in Abhängigkeit dessen Ausgangsfeststoffgehalt.....	40
Abbildung 4-10:	TS-Gehalt PAK-SchlammSed zum Zeitpunkt des Kompressionspunkts abhängig vom Ausgangs-TS-Gehalt im PAK-SchlammMisch.....	41
Abbildung 4-11:	Volumen der Klarphase zum Zeitpunkt des Kompressionspunkts abhängig vom Ausgangs-TS-Gehalt im PAK-SchlammMisch.....	42
Abbildung 4-12:	Einfluss des Feststoffgehaltes auf die Zeitdauer bis zum Erreichen des K-Punktes und auf das zu diesem Zeitpunkt eingenommene Volumen des Schlammes Untersuchungen im Standzylinder	43
Abbildung 4-13:	Einfluss des Schlammvolumenindexes auf den TS-Gehalt im Absetzvolumen zum Zeitpunkt des K-Punktes Untersuchungen im Standzylinder	44
Abbildung 4-14:	Gegenüberstellung der erreichten Klarphasen zu Beginn der Eindickphase und nach 30 min Absetzzeit Untersuchungen im Standzylinder,	44
Abbildung 4-15:	TS-Gehalt des PAK-SchlammSed nach Beendigung des 30-minütigen Absetzvorganges für die SV-Bestimmung in Abhängigkeit des TS-Gehalts im PAK-SchlammMisch mit Angabe des Schlammindexes	45

TABELLEN

Tabelle 1:	Wesentliche Betriebseinstellungen des Versuchsreaktors.....	15
Tabelle 2:	Angaben zu den verwendeten Messzylindern	17
Tabelle 3:	Gegenüberstellung der TS-Gehalte, Sinkgeschwindigkeiten und Kompressionspunkte in den Kontaktreaktoren bzw. Standzylindern der Reallabore Pforzheim und Wendlingen; Angabe K-Punkt: Zeitdauer zum Erreichen des K-Punktes ausgehend von $t=0$ in Minuten und Angabe des eingenommenen Absatzvolumens	34
Tabelle 4:	verwendete Abkürzungen und Begrifflichkeiten.....	48

1 Hintergrund und Aufgabenstellung

1.1 Veranlassung

Das Land Baden-Württemberg ist bestrebt, den Eintrag von Spurenstoffen in die aquatische Umwelt zu verringern. Hierzu sind Maßnahmen auf verschiedenen Ebenen notwendig. Prioritär verfolgt Baden-Württemberg ein quellenbezogenes Vorgehen. Des Weiteren sieht das Spurenstoffkonzept des Landes vor, aus Vorsorgegründen den Ausbau von kommunalen Kläranlagen, um ein Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination voranzubringen. Anders als in der Schweiz gibt es jedoch hierzulande noch keine Gesetzesgrundlage, aus der sich die Notwendigkeit einer solchen Maßnahme auf Kläranlagen ableiten lässt. Baden-Württemberg setzt daher auf ein konsensorientiertes Vorgehen und unterstützt den Ausbau der Kläranlagen anhand von im Arbeitspapier „Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg“ festgelegten Priorisierungskriterien mit einer finanziellen Förderung.

Ende des Jahres 2020 waren in Baden-Württemberg 17 Kläranlagen mit einem Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination in Betrieb. Für weitere 22 Anlagen wurde seinerzeit die Planung oder der Bau eines Spurenstoffeliminationsverfahrens vorangetrieben [1]. Als technisch realisierbare Verfahren für die Spurenstoffelimination werden derzeit von der Fachwelt die Ozonung, granulierten Aktivkohlefilter und Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK) angesehen.

Eines der ersten auf Kläranlagen in Baden-Württemberg implementierten Verfahren zur Spurenstoffelimination war das sogenannte „Ulmer Verfahren“, bestehend aus einem Kontaktreaktor und einem Sedimentationsbecken, sowie einem nachgeschalteten Filter. Dieses Verfahren wird (Stand Ende 2020) auf 13 der 17 mit einem Spurenstoffeliminationsverfahren ausgestatteten Kläranlagen eingesetzt. Mittlerweile werden auch andere Verfahren zur Spurenstoffelimination gebaut, jedoch hat das „Ulmer Verfahren“, welches seinerzeit mit Fördergeldern des Landes Baden-Württemberg auf dem Ulmer Klärwerk entwickelt wurde, den Weg für die Einführung der Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg geebnet. Es ist ein robustes Verfahren, welches im Gegensatz zu reinen Filterverfahren auch bei erhöhten abfiltrierbaren Stoffen (AFS) im Ablauf der Nachklärung sicher und stabil betrieben werden kann. Feststoffe im Ablauf der Nachklärung schlagen hierbei durch die zwischengeschaltete Adsorptionsstufe, bestehend aus Kontaktreaktor und Sedimentationsbecken, nicht direkt auf den Filter durch, wodurch ein stabiler Filterbetrieb gewährleistet wird. Aus der Rezirkulation des PAK-Schlammes im System resultiert eine hohe PAK-Verfügbarkeit. Das Verfahren zeigt sich daher in punkto Spurenstoffelimination unempfindlich gegenüber Unregelmäßigkeiten oder gar Ausfällen der PAK-Dosierung. Im Hinblick auf die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und den im Jahr 2019 herausgegebenen P-Erlass des Umweltministeriums ist beim „Ulmer Verfahren“ die Möglichkeit der weitergehenden Phosphor-

elimination besonders reizvoll: Durch den verfahrensbedingten Einsatz von Fällmittel zur Abtrennung der PAK können sehr niedrige P-Ablaufwerte im Bereich von 0,1 bis 0,2 mg/L erzielt werden. Auswertungen haben ergeben, dass zum Erreichen dieser vergleichsweise niedrigen P_{ges} -Ablaufwerte nicht mehr Fällmittel notwendig ist, als vor dem Ausbau der Kläranlagen dosiert wurde [2]. Die höhere Effizienz der Fällung ist auf die Mehrpunktfällung, welche mit dem „Ulmer Verfahren“ zur Anwendung kommt, zurückzuführen. Die Umsetzung des „Ulmer Verfahrens“ auf einer Kläranlage ist jedoch, sofern keine vorhandenen Becken oder Bauwerke genutzt werden können, mit einem vergleichsweise hohen Flächenbedarf und baulichen Aufwand verbunden. Zudem gestaltet sich die notwendige PAK-Dosiertechnik für eine volumenproportionale Dosierung des Adsorbens relativ aufwendig und wartungsintensiv. Dies resultiert zum einen aus der Einbindung einer Feinwaage in das Dosiersystem, zum anderen wird dies aus der Forderung nach einer großen „Spannweite“ an die Dosierung der PAK bedingt (geringe PAK-Mengen bei wenig Zufluss bis hin zu kurzfristig großen PAK-Mengen bei Maximalzufluss zur Adsorptionsstufe). Das „Ulmer Verfahren“ könnte für Betreiber deutlich attraktiver sein, wenn es gelingt den Flächenbedarf sowie den baulichen Aufwand zu reduzieren und die Dosiertechnik robuster zu gestalten.

Bislang verwendete Bemessungsansätze für das „Ulmer Verfahren“ stammen aus den Untersuchungen während der Verfahrensentwicklung in Ulm. Im Rahmen dieser Untersuchungen lag der Schlammvolumenindex (ISV), der die Absetz- und Eindickeigenschaften von (Belebt-)Schlamm charakterisiert, beim PAK-Schlamm im Bereich um 100 mL/g. Dies entspricht bereits guten Absetzeigenschaften. Kläranlagenbetreiber, die das „Ulmer Verfahren“ implementiert haben, berichten allerdings, dass sich der PAK-Schlamm im Kläranlagenalltag deutlich besser absetzen lässt, als in den damaligen Ulmer Untersuchungen beobachtet worden war. Des Weiteren ist zwischenzeitlich bekannt, dass die Absetz- und Eindickeigenschaften des PAK-Schlammes, anders als beim im Jahresverlauf veränderlichen Belebtschlamm, über den Zeitraum eines Jahres betrachtet relativ konstant sind und zudem durch die Zugabe von Hilfsstoffen wie Fällmittel und Polymer gezielt beeinflusst werden können.

Auf Basis dieser Beobachtungen kristallisiert sich die Möglichkeit heraus, das „Ulmer Verfahren“ als SBR (= *engl.* Sequencing Batch Reactor) auszubilden. Baulicherseits werden hierbei gegenüber einer Ausbildung im Durchlaufbetrieb folgende Vorteile gesehen:

- Reaktions- und Absetzraum in einem Becken, somit weniger Bauvolumen nötig.
- Da der sedimentierte Schlamm im Reaktionsbecken verbleibt, bedarf es keinem Pumpwerk für die Rückführung der „Rücklaufkohle“.
- Die Dosiertechnik kann einfacher (und damit kostengünstig) ausgebildet werden, da das zu behandelnde Volumen immer das gleiche ist und die Betriebsmittel dem zu

behandelnden Volumen zeitlich losgelöst von der Befülldauer des Reaktors zugegeben werden können.

1.2 SBR-Technologie

In der biologischen Abwasserreinigung ist die SBR-Technologie etabliert. Für die Anwendung zur Spurenstoffelimination gelten jedoch andere Gesetzmäßigkeiten und dominierende Faktoren als bei der Anwendung für die biologische Abwasserreinigung.

Das SBR-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass für unterschiedliche Vorgänge des Gesamt(reinigungs-)prozesses nicht verschiedene Becken im Durchlaufbetrieb verwendet werden, sondern die Vorgänge nacheinander im selben Reaktor stattfinden. Die Vorgänge bzw. Prozessphasen sind also nicht räumlich, sondern zeitlich voneinander getrennt. Verfahrenstechnische Variationen finden durch eine Veränderung der Dauer oder Reihenfolge der Prozessphasen statt. Abbildung 1-1 zeigt die Prozessphasen des „Ulmer Verfahrens“ ausgebildet als SBR.

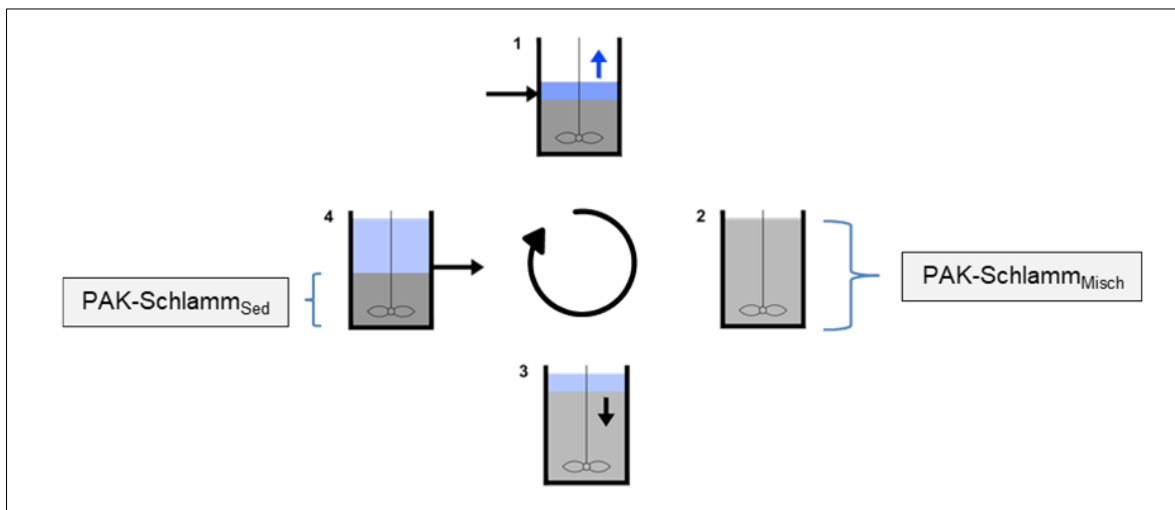


Abbildung 1-1: Zyklusablauf des „Ulmer Verfahrens“ als SBR-Verfahren

Für die Bemessung des Reaktors ist die pro Zyklus zu behandelnde Abwassermenge, die notwendige Kontaktzeit für eine ausreichende Spurenstoffelimination als auch die Zeit zum Generieren von absetzfähigen Flocken, und das für die Endschlammspiegellage benötigte Reaktorvolumen entscheidend.

Während beim SBR-Belebschlammverfahren die Zykluslänge maßgeblich von der Dauer der biologischen Reinigungsphase bestimmt wird, ist nach jetzigem Stand der Kenntnisse davon auszugehen, dass beim SBR-PAK-Verfahren die Sedimentationsphase die Zyklusdauer bestimmt. Je besser das Absetz- und Eindickverhalten des PAK-Schlammes ist,

desto weniger Zeit bedarf es für den Abzug des gereinigten Abwassers und die Zyklusdauer verkürzt sich.

Die Endschlammspiegellage ist abhängig von den Eindickeigenschaften des PAK-Schlammes. Offen ist, inwieweit die Kubatur des Reaktors ebenfalls einen Einfluss auf die Endschlammspiegellage hat.

1.3 Aufgabenstellung

Für die Dimensionierung und den Betrieb des PAK-SBR-Verfahrens ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Kontaktzeit bedarf es zur Sicherstellung einer ausreichenden Spurenstoffelimination?
- Wie viel Zeit wird für eine ausreichende Flockenbildung aufgrund der Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmittel benötigt?
- Welche Zeitdauer ist für das Absetzen des PAK-Schlammes und den Abzug des gereinigten Abwassers vorzusehen?
- Wie wirkt sich das Verhältnis zwischen Fällmittel und PAK auf das Absetz- und Eindickverhalten des PAK-Schlammes aus? Gibt es ein optimales Verhältnis?
- Welchen Einfluss hat die Zugabe von frischer PAK auf das Reinigungsergebnis
- Zu welchem Zeitpunkt des Zyklus sollte die PAK optimalerweise zugegeben werden?
- Einfluss der Kubatur des Reaktors auf das Absetz- und Eindickverhalten des PAK-Schlammes?

Im Rahmen des Vorhabens sollen die Möglichkeiten der Reinigungsleistung untersucht und, sofern diese sich als vielversprechend erweisen, Bemessungsansätze erarbeitet werden, die zur Dimensionierung des „Ulmer-Verfahrens“ als PAK-SBR-Technologie verwendet werden können.

2 Vorgehensweise

2.1 Versuchskonzept

Für die Erkenntnisgenerierung wurden sowohl Untersuchungen in Reallaboren durchgeführt als auch eine halbtechnische Versuchsanlage auf der Kläranlage Neckarsulm des AZV Unteres Sulmtal betrieben. Abbildung 2-1 zeigt das Vorgehen im Projekt PAKAuf.

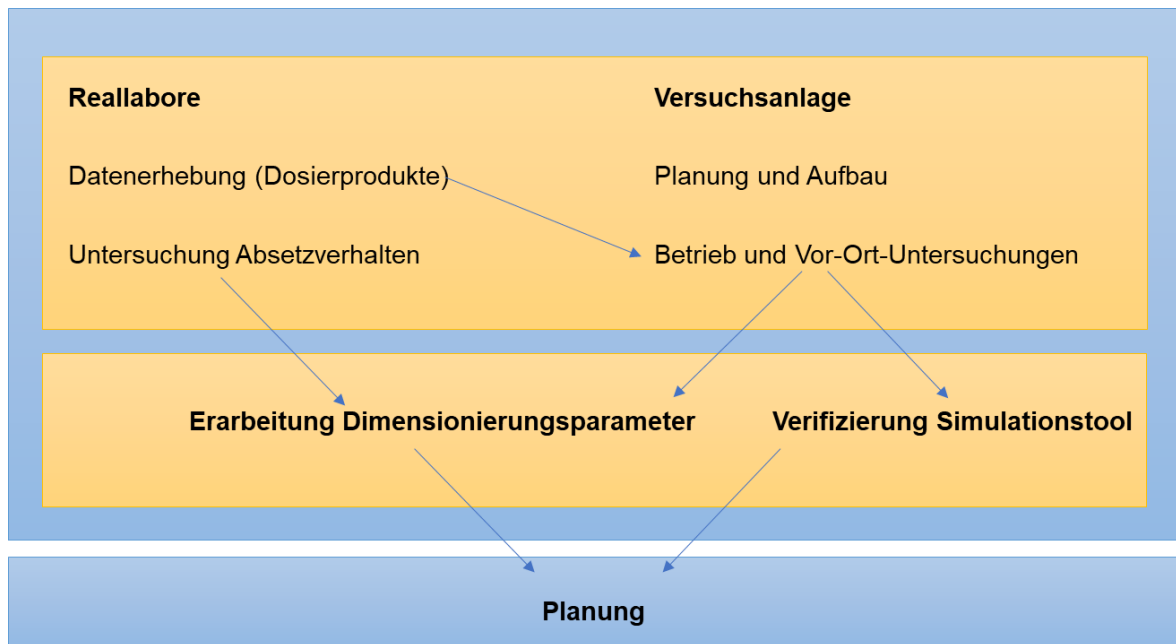


Abbildung 2-1: Vorgehensweise im Projekt PAKAuf

Der Aufgabenschwerpunkt der Reallabore bestand darin, auf baden-württembergischen Kläranlagen Daten zu erheben und Untersuchungen zum Absetzverhalten der PAK-Schlämme des „Ulmer Verfahrens“ durchzuführen. Hierbei wurden die Produktbezeichnungen der bislang in der Praxis eingesetzten Aktivkohleprodukte sowie deren physikalischen Kenndaten in Erfahrung gebracht als auch die relevanten Angaben der bislang beim „Ulmer Verfahren“ im Einsatz befindlichen Fäll- und Flockungsmitteln erhoben. Die gewonnenen Daten sollen der Unterstützung bei der Wahl von in der Praxis getesteten und damit geeigneten Betriebsmitteln für die Versuchsanlage dienen. Für das Arbeitspaket „Reallabore“ wurden auf ausgewählten Kläranlagen mit einem „Ulmer Verfahren“, vor Ort Versuche zum Absetz- und Eindickverhalten des lokalen PAK-Schlammes durchgeführt.

Die Versuchsanlage auf der Kläranlage Neckarsulm wurde in enger Absprache mit der Weber-Ingenieure GmbH vorrangig von einem Werkstudenten des AZV betrieben. Neben der eigentlichen Überwachung des Betriebs der Anlage wurden von ihm regelmäßig Proben gezogen und im betriebseigenen Labor der Kläranlage analysiert. Im Rahmen dieser

Tätigkeit wurde von ihm zugleich eine Abschlussarbeit an der Hochschule Heilbronn mit dem Titel „Entwickeln eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer SBR-Anlage zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen mit Pulveraktivkohle“ verfasst. Grundlage für seine Überlegungen als auch die weiterführenden Ausarbeitungen im vorliegenden Bericht bilden die Ergebnisse aus Untersuchungen zum Absetzverhalten des PAK-Schlammes an der Versuchsanlage als auch zum Absetzverhalten in den Reallaboren.

Für die Erkenntnisgenerierung zur erforderlichen Kontaktzeit wurden sowohl Untersuchungen an der Versuchsanlage angestellt und ergänzende Untersuchungen im Labor durchgeführt. Die Zeit für die Untersuchungen an der Versuchsanlage war jedoch zum einen durch die verspätete Anlieferung der Versuchsanlage, bedingt durch die Corona-Pandemie, zum anderen durch die Witterungsverhältnisse aufgrund der Aufstellung der Versuchsanlage im Freien limitiert. Um weitere Erkenntnisse zur erforderlichen Kontaktzeit zu erlangen, wurde daher aufbauend auf dem im Vorhaben „MachS“ generierten Simulationstool für das „Ulmer Verfahren“ versucht jenes in die „PAK-SBR-Technologie“ zu überführen, um damit weitere Fragestellungen zur Optimierung der erforderlichen Kontaktzeit beantworten zu können. Die Untersuchungen zur erforderlichen Kontaktzeit an der Versuchsanlage als auch die ergänzenden Laboruntersuchungen wurden von einer Studentin der Universität Karlsruhe (KIT), betreut durch die Weber-Ingenieure GmbH, vorgenommen. Die Untersuchungen bildeten zugleich Grundlage für ihre Masterthesis am KIT mit dem Titel „Einfluss des angereicherten Pulveraktivkohleschlammes auf die Reinigungsleistung beim Verfahren Pulveraktivkohle im Aufstaubetrieb“.

2.2 Reallabore

Auf folgenden Kläranlagen wurde das Absetzverhalten des PAK-Schlammes im Kontaktreaktor des „Ulmer Verfahrens“ untersucht:

- Mannheim
- Pforzheim
- Wendlingen
- Öhringen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in einem separaten Bericht dokumentiert, der diesem Bericht beiliegt.

2.3 Halbtechnische SBR-Versuchsanlage

2.3.1 Aufbau

Das zentrale Element der Versuchsanlage bildet der Versuchsreaktor mit einem Durchmesser von 2 m. In Abbildung 2-2 ist das Versuchsareal und der Versuchsreaktor auf der Kläranlage Neckarsulm zu sehen. Der Versuchsreaktor ist mit einem Hyperboloid-Rührwerk ausgestattet und wird auf einer Höhe von 4,06 m mit einer Beschickungspumpe befüllt. Auf der gegenüberliegenden Seite befinden sich fünf Motorabsperklappen, die unterste Klappe befindet sich auf einer Höhe von 1,2 m, darüber sind 4 weitere Klappen im Abstand von jeweils 0,55 m angeordnet. Unterhalb der Motorabsperklappen sind eine Druckmessdose, für die Registrierung des Füllstandes, und ein Temperaturmessung angebracht. Letztere ist dafür gedacht, um ein Verformen des Reaktors bei zu großen Temperaturen zu verhindern. Am Reaktor ist außerdem auf einer Höhe von 0,5 m über dem Boden ein Schieber angebracht, über den der überschüssige PAK-Schlamm_{Sed} abgezogen werden kann. Auf dem Versuchsgelände sind außerdem Behälter zur Fällmittel- und Polymerbevorratung, die PAK-Vorlage und ein IBC für den Überschussschlammabzug sowie diverse Pumpen zur Hilfsstoffdosierung als auch ein Probenehmer, der den Ablauf des Reaktors beprobt, aufgestellt.



Abbildung 2-2: Versuchsfläche auf der Kläranlage Neckarsulm, links Versuchsreaktor, rechts überdacht, Dosierstoffbevorratung

Die einzelnen Zyklusphasen sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Während der ersten Zyklusphase, der Befüll- und Dosierphase, wird der Reaktor mit ca. 8,8 m³ Ablaufwasser der

Nachklärung in Neckarsulm beschickt. Nach etwa der Hälfte der Befüllzeit wird die komplette für diesen Zyklus notwendige PAK als PAK-Suspension direkt zugegeben, wenig später das Fällmittel. Nach Abschluss der Befüllung wird für kurze Zeit ausschließlich gerührt. Anschließend wird das Polymer zudosiert. In Phase zwei, wenn alle Dosierstoffe und das zu behandelte Abwasser sich bereits im Reaktor befinden, findet eine Rühr- und Reaktionszeit statt. Diese erstreckte sich im Versuchszeitraum nur über eine Zeitdauer von wenigen Minuten. In Phase drei findet die Dissipation des PAK-Schlamm_{Misch} statt und der PAK-Schlamm beginnt zu sedimentieren. In der vierten Phase, in der die Sedimentation des PAK-Schlammes weiterhin von statten geht, werden nach und nach, beginnend bei der obersten Motorabsperrrklappe, zeitlich nacheinander immer weitere Klappen geöffnet, um das weitestgehend von Feststoffen befreite Abwasser abzuziehen. Der Reaktor wird bis auf das Totraumvolumen entleert. Daran schließt sich eine kurze Wartezeit an (Phase 5) bevor der Zyklus wieder von neuem startet.

Es sei angemerkt, dass die Dosiertechnik im Versuchsbetrieb anders ausgebildet ist als in einer späteren großtechnischen Realisierung. Jedoch ist für die PAK-Dosiertechnik aufgrund der Anforderung einer chargenweisen Zugabe zu erwarten, dass der technische Aufbau des PAK-Dosiersystems einfacher ausgebildet werden kann als bei einer kontinuierlichen mengenproportionalen Zugabe der PAK. Daraus lässt sich wiederum ein geringerer Betreuungsaufwand und Störanfälligkeit für die PAK-Dosiertechnik ableiten. Des Weiteren ergeben sich daraus monetäre Vorteile.

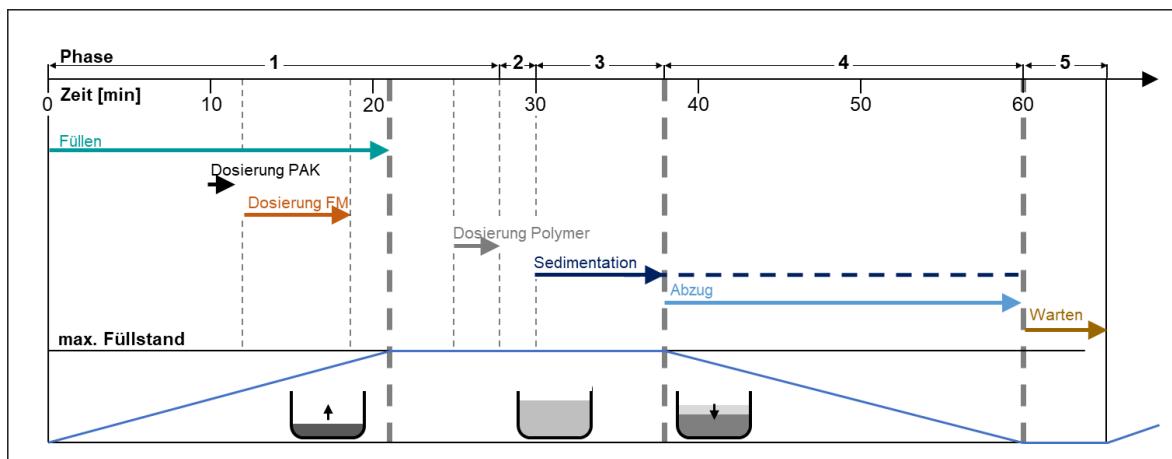


Abbildung 2-3: Ablauf eines PAK-SBR-Zyklus während des Versuchszeitraums

In Abbildung 2-4 ist das R+I-Schema der Versuchsanlage abgebildet.

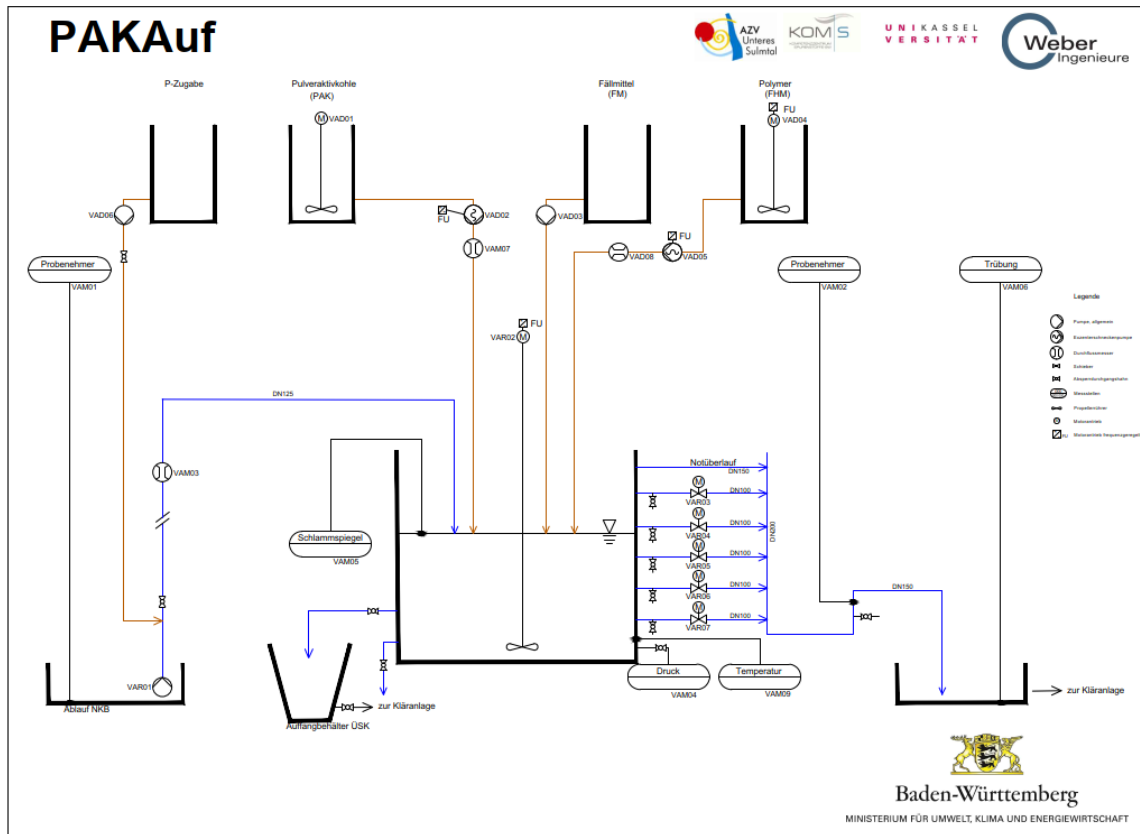


Abbildung 2-4: R+I-Schema der Versuchsanlage

2.3.2 Betriebsweise

In Abbildung 2-5 ist der TS-Gehalt des PAK-Schlamm_{Misch} über den Versuchszeitraum dargestellt. Ende Oktober wurde ein PAK-Verlust über den Klarwasserabzug des Reaktors festgestellt, dadurch sank der TS-Gehalt des PAK-Schlamm_{Misch} innerhalb weniger Tage auf nahezu null.

In derselben Abbildung sind in Rot die Tage kenntlich gemacht, an denen eine Probenahme zur Überprüfung der Spurenstoffelimination stattgefunden hat.

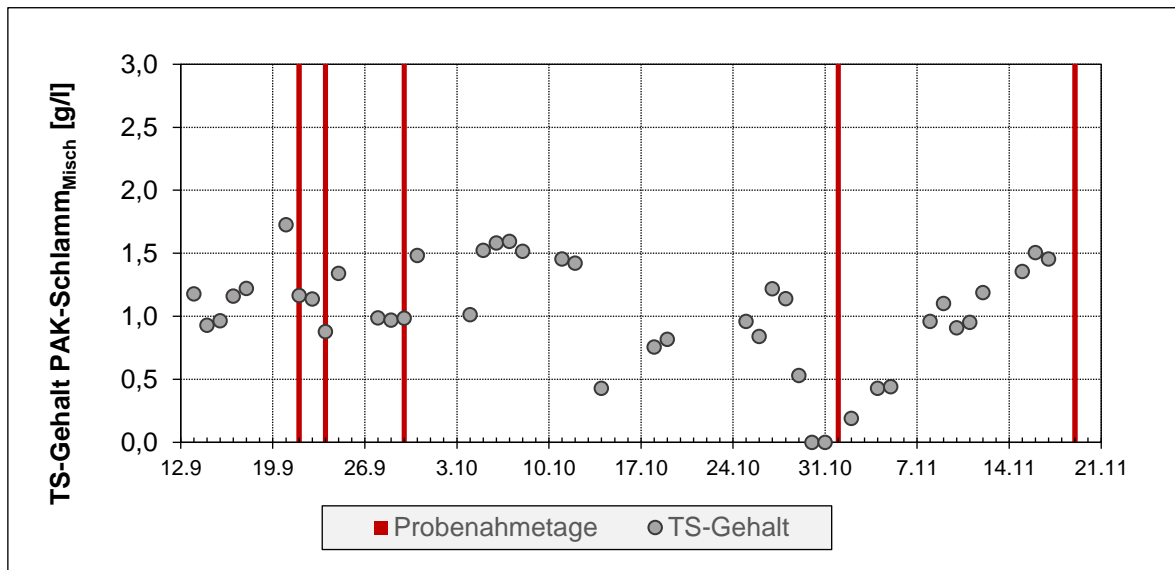


Abbildung 2-5: TS-Gehalt im PAK-Schlamm_{Misch} und Probenahmetage für die Überprüfung der Spurenstoffelimination im Versuchszeitraum

Als Reaktion auf den PAK-Verlust Ende Oktober wurden die Betriebseinstellungen des Versuchsreaktors geändert. Die wesentlichen Unterschiede in den Einstellungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Durch die Verlängerung der Absetz-, Dosier- und Reaktionszeiten verlängerte sich die Gesamt-Zyklusdauer von 65 auf 75 min.

Tabelle 1: Wesentliche Betriebseinstellungen des Versuchsreaktors

Parameter	Einheit	08.09.2021	29.10.2021
Befülldauer	min	20,88	20,88
PAK-Dosierung - Startzeitpunkt	min	12	12
PAK-Dosierung	mg/l	10	10
FM-Dosierung - Startzeitpunkt	min	13	13
FM-Dosierung	mg Fe ³⁺ /l	1,2	2,2
Polymer-Dosierung - Startzeitpunkt	min	25	25
Polymer-Dosierung	mg WS/l	0,13	0,32
Reaktions-/Rührzeit	min	2	2,5
Absetzzeit	min	10	12
Gesamt-Zyklusdauer	min	65	75
mittlere Kontaktzeit PAK	min	17,6	18,6

Der Umfang der Spurenstoffelimination im Versuchsreaktor wird neben der Dosiermenge an PAK, vom TS-Gehalt des PAK-Schlamm_{Misch} und der Kontaktzeit des zu reinigenden Abwassers mit der PAK beeinflusst. Im Falle der Behandlung des Abwassers im SBR ist es so, dass für die einzelnen „Abwassertropfen“ eines Batches unterschiedliche Kontaktzeiten gegeben sind. Im Nachfolgenden wird exemplarisch die Berechnung der mittleren Kontaktzeit für die Betriebseinstellungen der ersten Versuchsphase mit den Einstellungen vom 08.09.2021 aufgezeigt:

Ein Abwassertropfen, der zu Beginn der Befüllzeit in den Reaktor gelangt wird über die komplette Dauer von Phase 1 und 2 mit dem PAK-Schlamm in Kontakt gebracht, dessen Kontaktzeit beträgt somit 28 min. Wohingegen der letzte Abwassertropfen, der dem Reaktor zugeführt wird, nur über die Dauer der ersten Rührphase, die Dauer der Polymer-Dosierung und die Reaktionszeit, also die zweite Rührphase, Kontakt mit dem PAK-Schlamm hat (vgl. Abbildung 2-3). Diese Zeitdauer liegt in der Summe bei 7,1 min. Daraus resultiert in der ersten Versuchsphase eine mittlere Kontaktzeit des Abwassers mit der PAK von 17,6 min.

Aufgrund der kurzen Versuchszeit von Mitte September bis Ende November konnte, anders als zunächst geplant lediglich ein PAK-Produkt im Durchlaufbetrieb getestet werden. Über den Produkteinsatz und die Reinigungsleistung verschiedener PAK-Produkte im PAK-SBR kann deshalb keine Aussage getroffen werden.

2.4 Simulation Reinigungsleistung

Die Simulation erfolgt mit dem Programm SIMBA. Das Grundlagen zur Simulation des Ulmer Verfahrens wurden im Rahmen des Vorhabens *MachS*¹, das seinerzeit vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft gefördert wurde, erarbeitet.

Die Ergebnisse zur Simulation sind ausführlich in einem separaten Bericht dokumentiert, der diesem Bericht beiliegt.

2.5 Angaben zur Analytik

2.5.1 Schlammanalytik

Die Bestimmung der Schlammparameter

- Schlammvolumen (SV)
- Trockensubstanz (TS)

¹ *MachS* = Auswertung von Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination und Erstellung von Planungs-
werkzeugen

- Schlamminde (ISV)

erfolgte gemäß der in [3] beschriebenen Vorgehensweise.

Für Untersuchungen zur Sinkgeschwindigkeit als auch zum Eindickverhalten des Schlammes wurden neben den klassischen Standzylindern mit 1 L-Füllvolumen weitere, größere Standzylinder verwendet. Die Standzylinder lassen sich wie folgt beschreiben:

Tabelle 2: Angaben zu den verwendeten Messzylindern

	Füllvolumen	H/D*	Material
Zylinder 1	1 Liter	5,95	Kunststoff
Zylinder 2	1 Liter	5,44	Glas
Zylinder 2	6 Liter	2,53	Kunststoff

*H = Höhe, D = Durchmesser

2.5.2 Abwassertechnischer Parameter

Zur Betreuung der halbtechnischen Versuchsanlage wurden 24 h-Mischproben mittels Probennehmer im Zu- und Ablauf des Versuchsreaktors gezogen. Im Labor der Kläranlage Neckarsulm und im Labor des KIT, am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft wurde aus diesen Proben der CSB und der SAK_{254} bestimmt. Beide Parameter wurden aus der membranfiltrierten (Trenngrenze Filterpapier = $0,45 \mu m$) Probe bestimmt.

Beim CSB handelt es sich um einen klassischen Abwasserparameter. Dieser wurde mit CSB-Küvettentests der Fa. Hach, Messbereich 5-60 mg/l und anschließender photometrischer Bestimmung gemessen.

Der SAK_{254} ist ein Maß für den Gehalt von großteils aromatischen Verbindungen und Huminstoffen. Die SAK_{254} -Bestimmung erfolgt mittels Photometrie bei einer Wellenlänge von 254 nm. Die SAK_{254} -Messungen auf der Kläranlage erfolgten unter Nutzung einer 50 mm Quarzglasküvette, am KIT wurden die Messungen unter Verwendung einer 10 mm Quarzglasküvette durchgeführt.

2.5.3 Spurenstoffanalytik

Die Spurenstoffanalytik erfolgte beim Betriebs- und Forschungslabor der Landeswasserversorgung in Langenau. Die Analyse erfolgte jeweils aus dem Filtrat der Proben. Die Proben wurden hierzu mittels Membranfiltration (Trenngrenze Filterpapier = $0,45 \mu m$) aufbereitet.

3 Reinigungsleistung

3.1 Zusammensetzung Reinigungsleistung

In Baden-Württemberg gilt, dass für eine ausreichende Spurenstoffelimination über den Gesamtprozess der Kläranlage für die in den „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination“ des KomS genannte Stoffliste von 80 % gegeben sein muss. Bei Nachrüstung einer Kläranlage mit einer adsorptiven Reinigungsstufe ist dieser Nachweis mittels der Analysenergebnisse von den Proben, die im Zu- und Ablauf der Kläranlage gezogen werden. Letztere wird bei sogenannten PAK-Anlagen meist mit dem Probenehmer im Ablauf der Filteranlage gezogen.

In diesem Bilanzraum setzt sich die Spurenstoffelimination aus der Entnahme in der biologischen Stufe und der Entnahme aus dem adsorptiven Reinigungsprozess zusammen. Bei der untersuchten Anwendung des „Ulmer Verfahrens“ wird die PAK zunächst in der Reinigungsstufe nach der biologischen Stufe eingesetzt. Von dort gelangt die PAK bzw. der PAK-Schlamm zur besseren Ausnutzung in die biologische Stufe. D.h. die adsorptive Entnahme unterteilt sich daher in die zusätzliche Entnahme in der biologischen Stufe und in die Entnahme im nachgeschalteten SBR_{PAK}-Reaktor (vgl. Abbildung 3-1).

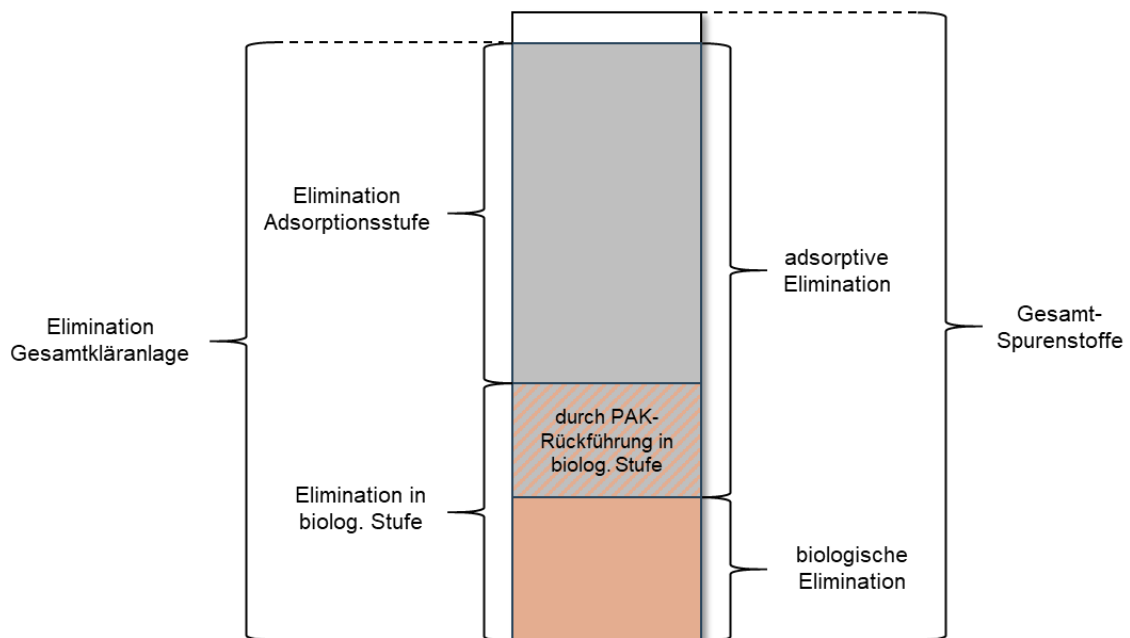


Abbildung 3-1: Beispiel zur Elimination in der Adsorptionsstufe, der biologischen Stufe und der Gesamt-Kläranlage

Die Machbarkeitsstudie [4] in Neckarsulm hat ergeben, dass in der biologischen Stufe eine Spurenstoffelimination von ca. 27 % gegeben ist. Um die Forderung einer 80 %igen Eliminationsleistung zu erfüllen, müssen demnach weitere 53 %-Punkte an Spurenstoffen entfernt werden. Im Nachfolgenden ist die Betrachtung der Elimination am Beispiel von Konzentrationsangaben von Diclofenac dargelegt, siehe Abbildung 3-2.

Bezogen auf den Ablauf der Nachklärung muss demnach eine zusätzliche Reinigungsleistung von 73 % erzielt werden, um eine Elimination von 80 % über die gesamte Kläranlage zu erreichen. Das bedeutet, wenn mit der nachgeschalteten Adsorptionsstufe, dem SBR_{PAK}-Reaktor bezogen auf dessen Zulauf eine Elimination von 70 % erzielt wird, so bedarf es durch die rückgeführte PAK in die Biologie einer weiteren Elimination von 9 % bezogen auf den heutigen Ablauf des Nachklärbeckens, um die Forderung einer 80 %-igen Spurenstoffelimination über die Gesamtkläranlage einzuhalten.

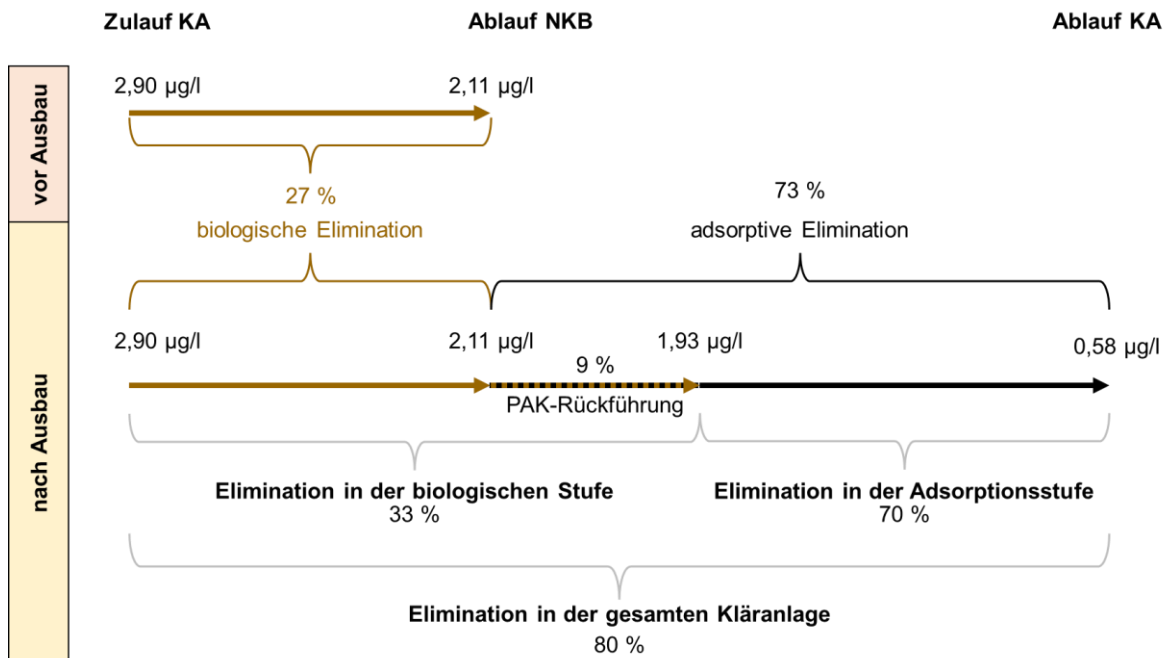


Abbildung 3-2: Elimination in der Kläranlage vor und nach Ausbau, am Beispiel von Diclofenac-Konzentrationen | die einzelnen Eliminationsraten beziehen sich jeweils auf die Zulaufkonzentration zu einer jeden Stufe

3.2 Surrogatparameter SAK₂₅₄

Wie sich bereits in anderen Untersuchungen zur Entnahme von Spurenstoffen mit PAK gezeigt hat, erlaubt die prozentuale SAK₂₅₄-Reduktion des adsorptiven Reinigungsprozesses Rückschlüsse auf die Spurenstoffelimination.

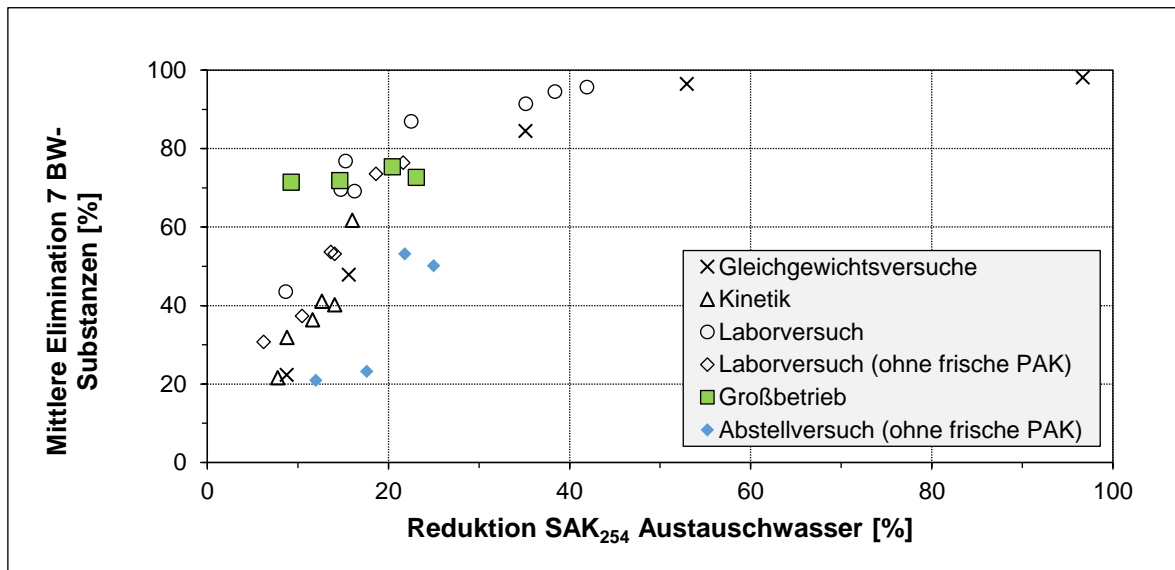


Abbildung 3-3: Beziehung zwischen der mittleren Elimination der 7 BW-Substanzen zur Reduktion des SAK₂₅₄ im Austauschwasser bzw. im Zulauf zum SBR | zwei Versuche ohne frische PAK

In Abbildung 3-3 sind die Ergebnisse aller im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Spurenstoffuntersuchungen bzgl. des angeführten Zusammenhangs aufgezeigt. Grundsätzlich zeigt sich, dass bei den Untersuchungen in Neckarsulm mit zunehmender prozentualer SAK₂₅₄-Reduktion eine höhere Spurenstoffelimination einhergeht. Wie in der Legende gekennzeichnet wurden beim sogenannten „Abstellversuch“ und bei einer Reihe der Laborversuche die dargestellten Ergebnisse ohne die Zugabe von frischer PAK erzielt. Möglicherweise ist dies der Grund für die etwas schlechteren Resultate gegenüber den anderen Untersuchungsreihen. Für den Durchlaufbetrieb mit frischer PAK-Dosierung kann davon ausgegangen werden, dass mit einer SAK₂₅₄-Reduktion von etwa 20 % eine Spurenstoffelimination von rund 70 % im SBR-Reaktor gegeben ist.

3.3 Durchlaufbetrieb

Während des gesamten Versuchszeitraums wurde der SAK₂₅₄ im Labor der Kläranlage Neckarsulm aus mengenproportionalen 24 h-Mischproben bestimmt. Der SAK₂₅₄ im Zulauf zum Versuchsreaktor lag in der Regel zwischen 13 1/m und 17 1/m, während er im Ablauf zwischen 8 1/m und 15 1/m lag. Die SAK₂₅₄-Reduktion durch die Versuchsanlage lag zwischen 2,5 und 35 %. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Zusätzlich kann dieser Abbildung auch die mittlere Spurenstoffelimination über die 7 BW-Substanzen entnommen werden.

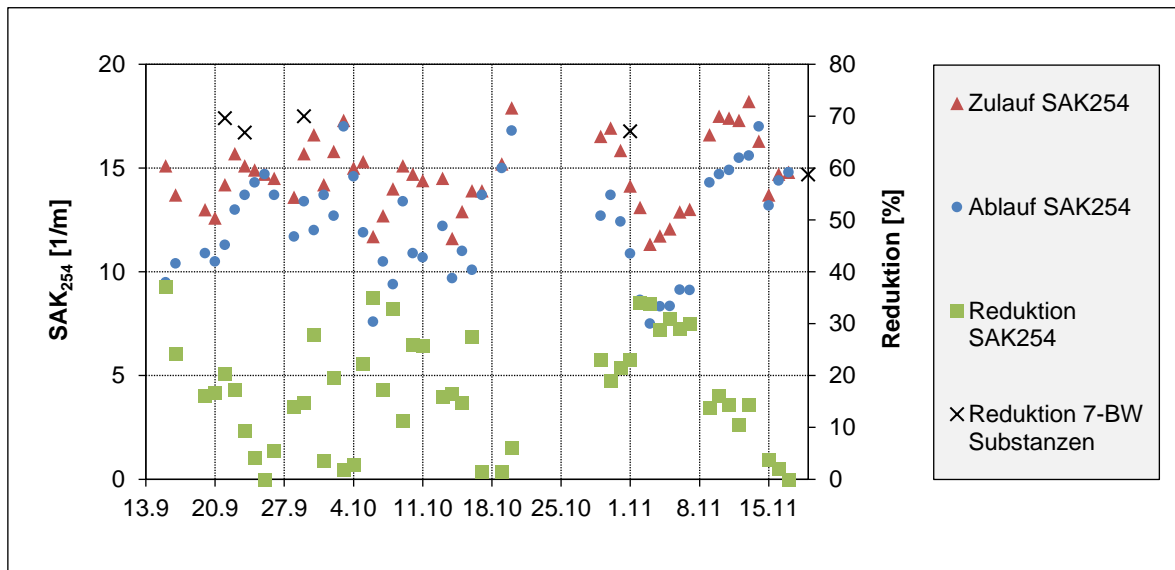


Abbildung 3-4: SAK₂₅₄-Messungen im Zu- und Ablauf der Versuchsanlage, SAK₂₅₄- und Spurenstoffreduktion im Versuchszeitraum

Unter Einbezug der Ergebnisse von Abbildung 3-3 wird damit deutlich, dass an 40 % der Versuchstage eine Spurenstoffelimination von rund 70 % und mehr vorgeherrscht haben muss, da für diese Tagen eine SAK₂₅₄-Reduktion von mehr als 20 % vorliegt. Auffällig ist, dass diese Resultate typischerweise an Tagen mit einem niedrigeren SAK₂₅₄ erzielt wurden. In Abbildung 3-5 ist die SAK₂₅₄-Reduktion eines jeden Tages zum jeweiligen SAK₂₅₄ im Zulauf des „Adsorptionsreaktors“ aufgetragen. In heller Farbe sind Ergebnisse von den Kläranlagen, die als Reallabore dienen, dargestellt. Dosierte wurde auf den Vergleichskläranlagen jeweils 10 mg/l PAK und weniger. Wie auch auf den Kläranlagen, die als Reallabore herangezogen wurden, ist für das Abwasser der Kläranlage Neckarsulm ein Zusammenhang zwischen dem Eingangs-SAK₂₅₄ und der prozentualen SAK₂₅₄-Reduktion zu erkennen. Jedoch zeigt die nachstehende Abbildung, dass die Entnahme durchaus geringer war als bei den KA-Standorten, bei denen bereits seit mehreren Jahren ein Ulmer-Verfahren in Betrieb ist.

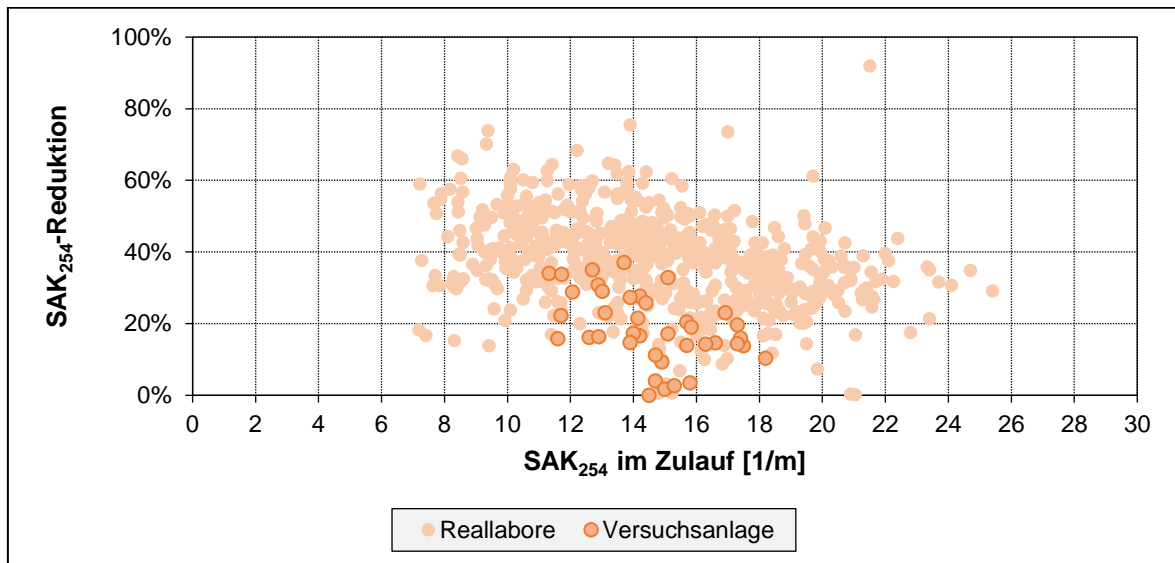


Abbildung 3-5: Prozentualer SAK₂₅₄-Rückgang in der Versuchsanlage zum SAK₂₅₄ im Zulauf der Versuchsanlage, Vergleich mit anderen Kläranlagen in Baden-Württemberg

Betrachtet man die Spurenstoffelimination in der Versuchsanlage in Neckarsulm im Vergleich zur der auf anderen Kläranlagen in Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 3-6), die schon seit längerer Zeit mit einer Adsorptionsstufe ausgerüstet sind, bestätigt sich die Aussage aus der Abbildung 3-5. Wie auch auf anderen Kläranlagen lassen sich die einzelnen Spurenstoffe unterschiedlich gut eliminieren. Spurenstoffe, die auf anderen Kläranlagen in vergleichsweise geringem Umfang eliminiert werden, wurden im Versuchsbetrieb in Neckarsulm ähnlich schlecht eliminiert. Spurenstoffe, die als gut bis sehr gut adsorptiv entfernbar gelten und auf anderen Kläranlagen mit PAK meist zu 70 % und mehr eliminiert werden, wurden in der Versuchsanlage deutlich schlechter entfernt.

Gründe für eine geringere Reinigungsleistung können sowohl beim TS-Gehalt als auch an der Kontaktzeit liegen. In der Versuchsanlage wurde versucht im Versuchszeitraum einen TS-Gehalt zwischen 1,0 und 1,5 g/l (vgl. Abbildung 2-5) einzustellen, um ein möglichst schnelles Absetzen des PAK-Schlammes zu ermöglichen. In den Vergleichskläranlagen in Baden-Württemberg wurden in den vergangenen beiden Jahren in der Regel TS-Gehalte von mehr als 3 g/l gefahren (vgl. Zwischenbericht Reallabore, Kapitel 2.2).

Ein weiterer Grund für die geringere Spurenstoffelimination in der Versuchsanlage in Neckarsulm könnte die vergleichsweise kürzere Kontaktzeit der PAK mit dem frischen Abwasser sein. In der Versuchsanlage waren durchweg Kontaktzeiten zwischen 21 und 24 min gegeben (siehe Tabelle 1). Die Adsorptionsstufen bzw. die Kontaktreaktoren der Vergleichskläranlagen sind jeweils auf eine Mindestaufenthaltszeit des Abwassers von 30 min bei $Q_{\text{Spur,max}}$ dimensioniert. Da die Vergleichsprobenahmen alle bei Trockenwetterbedingungen durchgeführt wurden, war an jenen Tagen eine deutlich längere Kontaktzeit als 30 min gegeben.

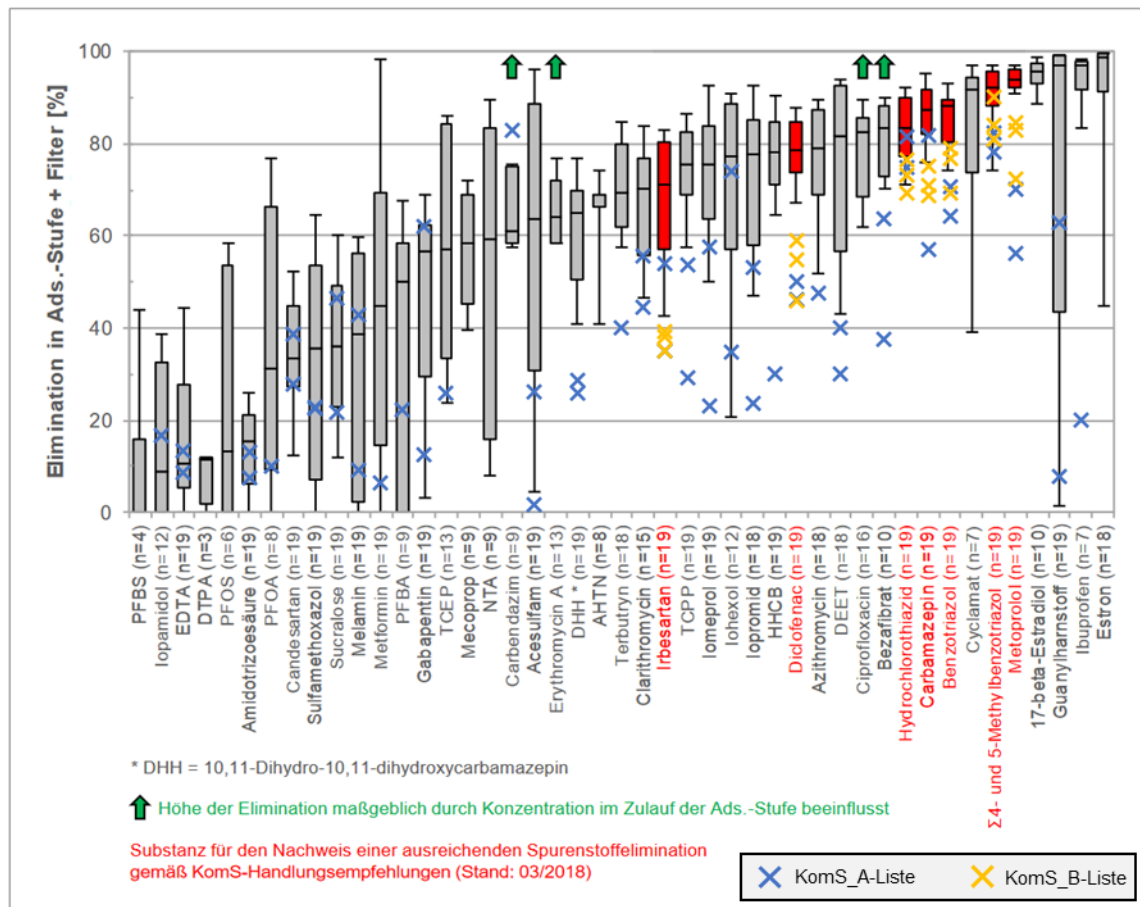


Abbildung 3-6: Vergleich der Eliminationsleistung der KomS_A-Liste mit der Elimination in sich bereits in Betrieb findenden Adsorptionsstufen [5, modifiziert]

Relevant im späteren Betrieb einer Adsorptionsstufe zur Spurenstoffelimination wird die Elimination über die Gesamtkläranlage sein, die bei 80 % liegen muss. Wie in Kapitel 3.1 bereits dargelegt setzt sich diese Gesamteliminationsleistung aus der Entnahme in der biologischen Stufe und der nachgeschalteten adsorptiven Stufe zusammen. Aufgrund der Rückführung von Überschussschle in die biologische Stufe führt dies dort zu einem Anstieg der Spurenstoffentnahme. Da gemäß den Untersuchungsergebnissen mittels der PAK im SBR-Betrieb eine etwas geringere Eliminationsleistung in der adsorptiven Stufe erzielt wird, es davon auszugehen, dass die Überschussschle auch eine geringere Beladung aufweist, als beim Ulmer Verfahren im Durchlaufbetrieb. Folglich stehen noch mehr freie Adsorptionsplätze zur Verfügung, woraus sich eine höhere adsorptive Eliminationsleistung in der biologischen Stufe begründet. Demnach ist davon auszugehen, dass bei einem DOC von bis zu 10 mg/l im Ablauf der Nachklärung nach rein biologischer Behandlung des Abwassers 10 mg/l PAK genügen werden, um die Anforderungen an eine gezielte Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg einzuhalten.

3.4 Versuche

Begleitend zum Durchlaufbetrieb wurden Versuche im Labor und mit dem Versuchsreaktor durchgeführt, um die Reinigungsleistung des PAK-Schlamm_{Sed.} besser einschätzen zu können.

3.4.1 Versuche mit PAK-Schlamm_{Sed.}

Die Versuche mit PAK-Schlamm_{Sed.} wurden in 500 ml Glasbehältern mit Schraubverschluss durchgeführt und bei 135 rpm in Kreisbewegungen geschüttelt. An vier verschiedenen Tagen wurden PAK-Schlamm_{Sed.} aus dem Reaktor und Abwasser der Nachklärbecken entnommen und bis zur Versuchsdurchführung, maximal 5 Tage im Kühlschrank aufbewahrt. An den Versuchstagen wurden PAK-Schlamm_{Sed.} und Ablauf NKB in zuvor definierten Verhältnissen gemischt. Für die Probe mit TS = 2,0 g/l wurden beispielsweise 350 ml Ablauf NKB mit 150 ml PAK-Schlamm_{Sed.} (TS-Gehalt = 6,7 g/l) gemischt. Anschließend wurde die Probe für 5 bis 60 min geschüttelt. Nachdem sich der PAK-Schlamm_{Sed.} abgesetzt hat (max. 3 min Wartezeit) wurde die Klarwasserphase dekantiert und bei 0,45 µm membranfiltriert, sodass der SAK₂₅₄ nur der gelösten Phase bestimmt wurde. In Abbildung 3-7 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zu sehen.

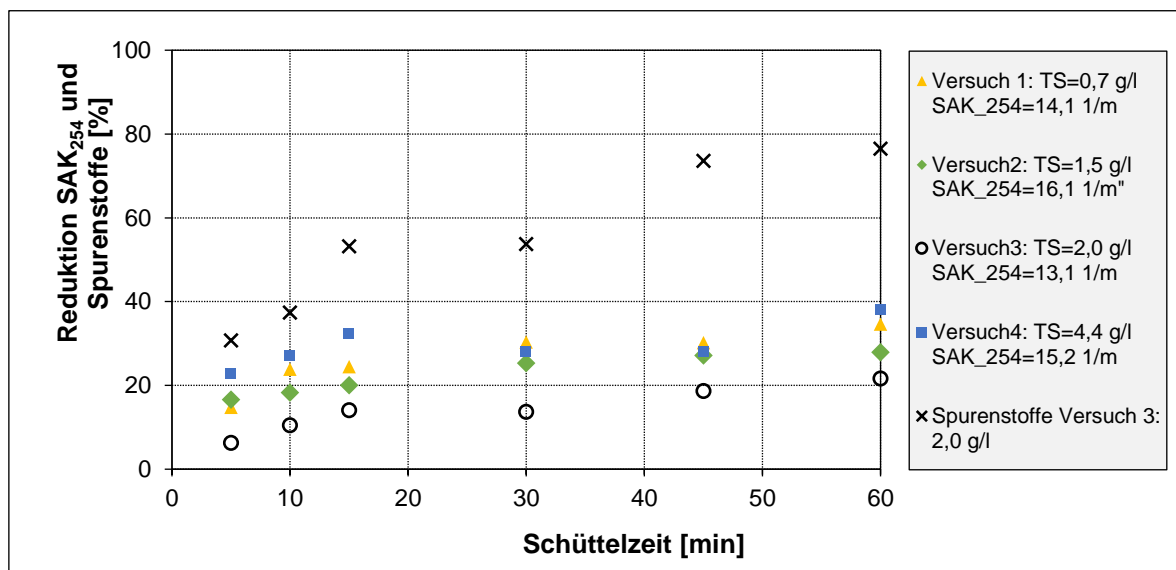


Abbildung 3-7: SAK₂₅₄- und Spurenstoffreduktion in PAK_{Sed.}-Schlämmen, ohne frische PAK-Dosierung nach verschiedenen Rührzeiten | Ausgewertete Spurenstoffe: Metoprolol, Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Benzotriazol, Tolytriazol

Die höchste SAK₂₅₄-Reduktion ist im Versuch Nr. 4 mit einem TS-Gehalt von 4,4 g/l nach einer Schütteldauer von 60 min festzustellen. Bei gleicher Schütteldauer zeigt der Versuch Nr. 3 die geringste Reduktion aller vier Versuchsansätze, obgleich dieser Versuchsansatz einen höheren Feststoffgehalt aufweist als die Ansätze von Versuch Nr. 1 und Nr. 2.

Während die SAK_{254} -Reduktion aller Proben in den ersten 15 min scheinbar linear ansteigt, liegen die SAK_{254} -Messergebnisse der 30 und 45-min-Probe bei Versuch 1 etwas unterhalb der linearen Erwartung und die Ergebnisse von Versuch 4 deutlich unter den Erwartungen. Nach 60 min Schüttelzeit sind die Versuchsreihen wieder wie in den ersten Versuchsminuten übereinander angeordnet. Gründe für dieses Verhalten sind nicht bekannt.

Von den Proben des Versuchsansatzes Nr. 3 wurden zusätzlich die Spurenstoffkonzentrationen bestimmt. Die daraus resultierende Spurenstoffelimination folgt dem Verhalten der SAK_{254} -Reduktion von Versuchsansatz Nr. 3: Die Reduktion von Spurenstoffen und SAK_{254} liegt bei der 30 min unter der Reduktion bei 20 min.

In Kapitel 3.1 wurde bereits erläutert, dass eine Elimination von 70 % in der Adsorptionsstufe ausreichend ist, um eine Elimination von 80 % über die gesamte Kläranlage zu erreichen. Die Ergebnisse aus Abbildung 3-7 zeigen, dass bei einem TS-Gehalt von 2,0 g/l und einer Schüttelzeit von 45 min eine Elimination der Spurenstoffe um 71 % durch reinen PAK-Schlamm_{Sed.} gegeben ist. Die Ergebnisse passen gut in das typische SAK_{254} -Reduktion/Spurenstoffelimination-Verhältnis für die Kläranlage Neckarsulm, wie sie in Abbildung 3-3 dargestellt ist. Um in kürzerer Zeit ein ähnlich hohe Spurenstoffelimination zu erzielen ist zusätzlich die Zugabe von frischer PAK notwendig.

Abbildung 3-7 zeigt keinen direkten Zusammenhang zwischen der SAK_{254} -Reduktion und dem eingestellten TS-Gehalts. Das könnte daran liegen, dass lediglich die Proben des Versuchsansatzes Nr. 1 und Nr. 3 in einem Verhältnis von PAK-Schlamm_{Sed.}:Austauschwasser - 30:70 gemischt wurden. Dieses Verhältnis entspricht in etwa den Volumenverhältnissen, die im Versuchsreaktor vorherrschten. Bei den Proben des Versuchsansatzes Nr. 4 lag beispielsweise ein Verhältnis von 50:50 vor. Das heißt weniger Austauschwasser und darin enthaltene Spurenstoffe trafen auf mehr Aktivkohlepartikel, entsprechend besser ist die SAK_{254} -Reduktion. Um zu verifizieren, ob es einen Zusammenhang zwischen TS-Gehalt im PAK-Schlamm_{Misch} und der SAK_{254} -Reduktion gibt, müssten weitere Versuche durchgeführt werden, mit unterschiedlichen TS-Gehalten bei konstantem Mischungsverhältnis von PAK-Schlamm_{Sed} zum Austauschwasser.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bereits nach 15 Minuten Kontaktzeit mindestens die Hälfte der Eliminationsleistung gegeben ist, die sich nach einer Schüttelzeit von 60 Minuten einstellt.

3.4.2 Abstellversuch

Für den Abstellversuch am Versuchsreaktor in Neckarsulm wurde am 19./20.10. und am 17./18.11, also vor und nach der Verlängerung der Zykluszeit, jeweils für 24 h die PAK-Dosierung ausgestellt, die Eisendosierung reduziert und der Reaktor weiter betrieben. Die Dosiermenge an Eisen wurde minimiert, einerseits um trotzdem ausreichend Flocken für

einen guten Absetzvorgang zu erhalten und andererseits, um nicht zu viel Eisen im Vergleich zur vorhandenen PAK-Menge zuzugeben. Die Betriebserfahrung aus den Reallaboren zeigte, dass sich bei zu hohem FM/PAK-Verhältnis das Absetzverhalten des PAK-Schlammes verschlechtert.

Zur Überwachung des Abstellversuchs wurde zunächst ein regulärer SBR-Zyklus beprobt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-8 dargelegt. Nach dem Ausstellen der PAK-Dosierung und Reduktion der Eisen-Dosierung wurde jeweils während die ersten fünf Zyklen sowohl im Zulauf zum Reaktor als auch im Ablauf des Reaktors eine Stichprobe gezogen. Nach ca. 24 h nach Abstellen der PAK-Dosierung wurde die Beprobung des Reaktorbetriebs wieder aufgenommen. Hierbei wurde zunächst der Zyklus beprobt, bevor die PAK-Dosierung wieder in Betrieb genommen wurde. Für die anschließenden zwei bzw. drei Zyklen wurde die Beprobung fortgesetzt. Die Proben wurden auf ihren SAK_{254} -Wert hin untersucht, von den Proben einer Versuchsreihe wurde auch von einzelnen Zyklen (0; 1; 23; I) die Spurenstoffe der KomS-Liste B analysiert. In Abbildung 3-8 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Die in blau dargestellte Versuchsreihe mit einer Zyklusdauer von 65 min hat am 19./20.10. stattgefunden, die rote Versuchsreihe mit einer Zyklusdauer von 75 min am 17./18.11.

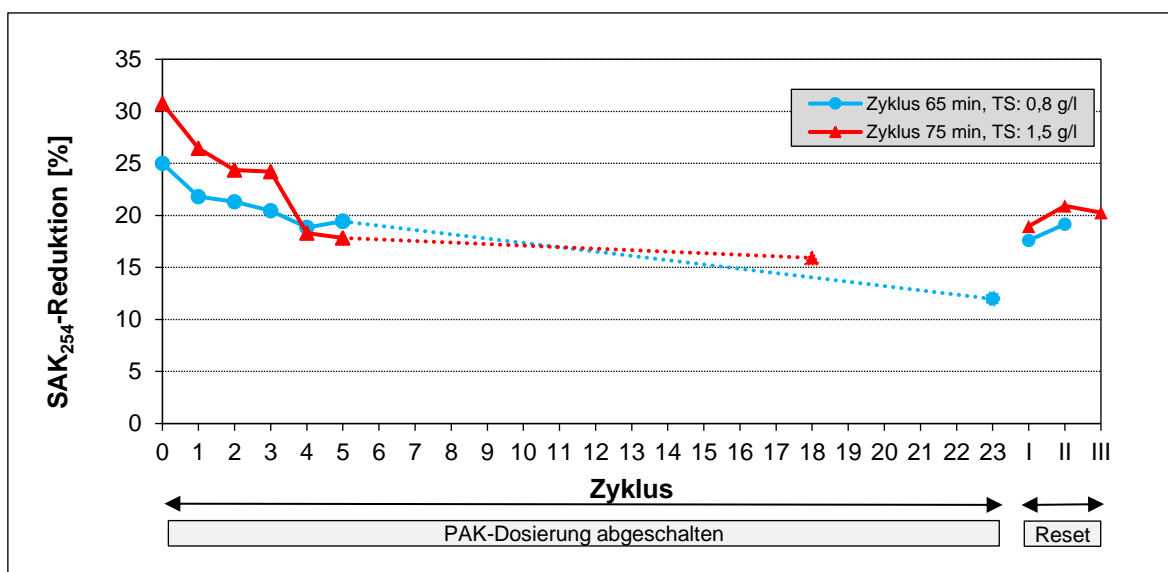


Abbildung 3-8: SAK_{254} -Reduktion Reinigungszyklen in der Versuchsanlage ohne frische PAK-Dosierung und nach der Wiedereinschaltung der PAK-Dosierung nach ca. 24 h.

Aus Abbildung 3-8 wird zum einen deutlich, dass die frische PAK einen signifikanten Anteil an der Reinigungsleistung hat: In beiden Versuchsläufen ist zwischen den SAK_{254} -Reduktionen des Zyklus 0 und des Zyklus 1 ein absolut ähnlicher Rückgang der Reinigungsleistung gegeben. Ebenso ist mit Wiedereinbetriebnahme der PAK-Dosierung in beiden Versuchsläufen (Zyklus 18 → I bzw. Zyklus 23 → I) ein Anstieg der prozentualen SAK_{254} -Reduktion

festzustellen. Zum anderen zeigt sich, dass nach Abschalten der PAK-Dosierung in beiden Versuchsläufen ein stetiger Rückgang der Reinigungsleistung zu beobachten ist. So vermindert sich die SAK_{254} -Reduktion, jeweils ausgehend vom Zyklus 1 bis hin zum letzten Zyklus ohne PAK-Dosierung, in beiden Versuchsläufen um 10 %-Punkte. Nach 24 h Laufzeit ist beim Versuch mit einer Zyklusdauer von 75 min, also nach 18 Zyklen noch eine SAK_{254} -Reduktion von 16 % gegeben, währenddessen beim Versuch mit einer Zyklusdauer von 65 min, also nach 23 Zyklen noch eine SAK_{254} -Reduktion von rund 12 % vorhanden ist. Nach dem Wiederanstellen der PAK-Dosierung nach 24 h ist bei beiden Zyklen eine ähnliche SAK_{254} -Reduktion bzw. Steigerung dieser Reduktion auf den nächsten Zyklus zu beobachten.

Verlängert man gedanklich die SAK_{254} -Reduktionen der Zyklen des 75-min-Zyklus-Versuchstags, so scheint es, dass sich die mögliche SAK_{254} -Elimination mit der Zeit angleicht und die unterschiedliche Zykluszeit, der TS-Gehalt und die anfänglich mögliche SAK_{254} -Reduktion keinen Einfluss mehr auf die SAK_{254} -Reduktion haben.

Bei der Wiederinbetriebnahme der PAK steigt die SAK_{254} -Reduktion während der Zyklen I-III nur sehr langsam an. Die Reinigungsleistung des Zyklus 0 wird in diesen Zyklen nicht erreicht. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass der vorhandene PAK-Schlamm zu diesem Zeitpunkt nur noch über wenige Adsorptionsplätze verfügt und nahezu nur noch die frisch dosierte PAK wirkt.

Aufgrund des verkürzten Untersuchungszeitraums sind vor allem bei diesem Versuch einige Fragestellungen, die den PAK-Schlamm_{Sed} betreffen und damit auch die Reinigungsleistung, unbeantwortet geblieben. Mittels der Simulation wird diesen Fragen nachgegangen.

3.5 Simulation

Der Aufbau des PAK-SBR-Modells und dessen Grenzen, das Vorgehen zur Modellvalidierung als auch die mit der Simulation erzielten Ergebnisse sind in einem separaten Bericht der Universität Kassel dokumentiert, der diesem Bericht beiliegt.

Mit der Simulation wurde ausgehend von der Elimination von Benzotriazol mit PAK folgenden Fragestellungen nachgegangen:

1. Einfluss der Anreicherung der PAK

Angelehnt an die Versuche aus Kapitel 3.4.1, wurde geprüft, welchen Einfluss der TS_{Misch} -Gehalt im Kontaktreaktor bei gleichbleibender Füllzeit und variabler Kontaktzeit auf die Spurenstoffelimination hat. Hierbei wurden TS_{Misch} -Gehalte an PAK von 10 mg/l, 100 mg/l und 600 mg/l eingestellt. Es zeigt sich, dass durch die Anreicherung der PAK der Eliminations-

umfang, welcher sich bei Einsatz von 10 mg/l PAK ohne Aufkonzentrierung des Adsorbens nach mehreren Stunden Rührdauer einstellt, nicht gesteigert werden kann. Jedoch erlaubt die Anreicherung der PAK es, die Reaktionsdauer deutlich zu verkürzen, um nahezu eine gleiche Reinigungswirkung zu erzielen, wie sie sich nach mehreren Stunden Rührdauer einstellt. Durch die Simulation kann gezeigt werden, dass die Anreicherung der PAK einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität einer gleichbleibenden Reinigungswirkung hat.

2. Relevanz der Kontaktzeit

Ausgehend von der etwas geringeren Spurenstoffentnahme im Versuchsbetrieb als in anderen sich bereits in Betrieb befindlichen „Ulmer Verfahren“ stellt sich die Frage nach der Relevanz der Kontaktzeit, die sich im Falle des PAK-SBR aus Befüllzeit und Rührzeit zusammensetzt. Hierzu wurden zwei verschiedene Füllzeiten sowie 5 verschiedene Rührzeiten im Bereich < 1 h betrachtet. Die Simulationsläufe wurden mit einem TS_{Misch} -Gehalt von 600 mg/l PAK durchgeführt. Unabhängig von den gewählten Befüllzeit ist bei einer Fülldauer von mindestens 10 Minuten durch Verlängerung der Kontaktzeit um eine Rührzeit von 40 Minuten eine Steigerung der Spurenstoffelimination um etwa 5 %-Punkte festzustellen.

Die minimale Kontaktzeit in den Simulationsläufen beträgt 10 Minuten, im Maximum wurde eine Kontaktzeit von 60 Minuten eingestellt. Für die Eliminationsleistung ist zwischen diesen beiden Fällen eine Differenz von knapp 10 %-Punkten auszumachen.

Die Dauer der Rührzeit ist demnach bei ausreichend hoher Anreicherung der PAK im Reaktor für die Eliminationsleistung von untergeordneter Bedeutung.

3. Ausfall der PAK-Dosierung

Ausgehend vom durchgeführten Abstellversuch wurde mittels der Simulation zum einen betrachtet, wie lange es dauert, bis ausgehend von einer PAK-Dosierung von 10 mg/l und einem TS_{Misch} -Gehalt von 600 mg/l PAK keine Entnahmewirkung mehr durch die PAK gegeben ist. Nach ca. vier Tagen ist bei dem gewählten Versuchsbetrieb keine adsorptive Wirkung der PAK mehr festzustellen.

Zum anderen wurde untersucht, welche Auswirkungen ein Ausfall der PAK-Dosierung von einem Tag hat und wie lange es nach Wiederinbetriebnahme braucht, um wieder das Ausgangsniveau der Eliminationsleistung zu erreichen. Für den ersten Teil des Szenarios ist ein Rückgang, ähnlich wie er sich im Abstellversuch gezeigt hat, festzustellen. Nach Inbetriebnahme der PAK-Dosierung dauert es rund drei Tage bis wieder das Niveau eines ungestörten Betriebs erreicht ist. Es sei jedoch angemerkt, dass bereits direkt nach Wiederinbetriebnahme sich eine Verbesserung in der Eliminationsleistung zeigt.

Insgesamt verdeutlichen die Betrachtungen mittels Simulation die Relevanz der Aufkonzentrierung der PAK für das Erlangen einer gleichbleibend hohen prozentualen Eliminationsleistung insbesondere bei kurzen Kontaktzeiten.

3.6 Fazit

Die Spurenstoffelimination im Versuchsreaktor lag an den Probenahmetagen immer bei ca. 70 % Elimination. In Kapitel 3.1 wurde gezeigt, dass das ausreichend sein kann, um in der Gesamtkläranlage eine Eliminationsleistung von 80 % zu erzielen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse zur SAK₂₅₄-Reduktion ist davon auszugehen, dass an etwa 60 % der Untersuchungstage eine geringe Spurenstoffelimination als 70 % in der Versuchsanlage gegeben war. Inwieweit diese im Vergleich zu anderen Kläranlagen mit einem Ulmer Verfahren geringere Eliminationsleistung auf den vergleichsweise geringen TS-Gehalt im Reaktor zurückzuführen oder in erster Linie ein Resultat der geringeren Kontaktzeit ist, soll mit Hilfe der Simulation beantwortet werden. Die Ergebnisse hierfür stehen noch aus. In jedem Fall kann die Reinigungsleistung durch die Dosiermenge an PAK angepasst werden.

Die parallel zum Versuchsbetrieb durchgeführten Laborversuche mit PAK-Schlamm_{Sed.} machen deutlich, dass der PAK-Schlamm noch über freie Adsorptionsplätze verfügt und einen signifikanten Anteil an der Reinigungsleistung im Reaktor hat, wenngleich auch die SAK₂₅₄-Reduktion niedriger ist als bei der gleichen Menge an frischer PAK.

Offen ist zu welchem Zeitpunkt innerhalb eines Zyklus die frische PAK zu dosieren ist, um einen bestmöglichen Nutzen der PAK hinsichtlich der Reinigung als auch deren Beladung zu erzielen.

4 Absetzverhalten

4.1 Relevanz der Absetzphase für die Gesamtzyklusdauer

Bei einem SBR-Prozess zur biologischen Behandlung von Abwasser sollte die Gesamtdauer der nicht-reaktiven Phase (Beruhigungsphase, Absetzphase, Abzugsphase) gemäß [6] weniger als ein Drittel der Gesamtzyklusdauer betragen. D. h. bei der biologischen Behandlung von Abwasser im SBR wird die Gesamtzyklusdauer maßgeblich von der Befüll-, Misch- und eigentliche Behandlungsphase geprägt. Die Gesamtdauer eines Zyklus beträgt in der Regel meist mehrere Stunden.

Anders beim Prozess der Spurenstoffelimination im SBR mittels PAK: Vom „Ulmer Verfahren“ im Durchlaufbetrieb ist bekannt, dass durch die Anreicherung der PAK innerhalb der Verfahrensstufe der Kontaktreaktor deutlich kleiner dimensioniert werden kann, als es im Labor für die Einstellung der Gleichgewichtsbeladung bedarf. Gemäß DWA-M 285-2 sollte das Volumen des Kontaktreaktors für den Bemessungszufluss auf eine Aufenthaltszeit von 30 Minuten dimensioniert werden. Legt man jene Dauer als Mindestkontaktzeit für die mittlere Kontaktzeit im SBR beim Bemessungszufluss zugrunde und setzt für die anschließende Absetz- und Abzugsphase einer Dauer von 1 Stunde fest, so wird deutlich, dass die Phase des Absetzens zeitlich einen signifikanteren Anteil an der Gesamtzyklusdauer hat als beim SBR-Prozess zur biologischen Behandlung von Abwasser. Aus dem Verhältnis der beiden Zeitdauern wird zudem deutlich, dass die Dauer der Absetz- und Abzugsphase zugleich entscheidend für das Volumen des „PAK-SBRs“ ist.

4.2 Beschreibung des Absetz- und Eindickverhalten

Abbildung 4-1 zeigt ausgehend vom Zeitpunkt der vollaufmischten Phase (= Absetzvolumen = 100 %) die Veränderung des Volumens, das die Schlammflocken während eines Absetzvorganges einnehmen. Wenngleich es sich bei dieser Kurve um eine idealisierte Absetzkurve handelt, so besitzt deren Verlauf Gültigkeit sowohl für Absetzvorgänge im Labormaßstab, d. h. für Untersuchungen mittels Standzylinder, als auch für das Absetzen in Becken.

Basis für die Auslegung eines SBR bilden Kennwerte, die sich aus Absetzkurven von PAK-Schlammern generieren lassen. Dabei gilt es die Abhängigkeiten der verschiedenen Schlammparameter untereinander zu beachten.

Eine Absetzkurve lässt sich gemäß [7] in vier verschiedene Phasen unterteilen. Der Absetzvorgang beginnt mit einer sogenannten Flockungsphase. Diese setzt ein, sobald das Rührwerk abgestellt ist. Die Phase dient der Energiedissipation. Im Anschluss daran beginnen die Schlammflocken zu sedimentieren. Die Absetzkurve zeigt hierbei eine lineare

Reduktion der Schlamm Spiegelhöhe mit fortschreitender Zeit. Diese Phase wird nach [7] als Zone des gleichmäßigen Absetzens oder auch als behinderter Absetzvorgang bezeichnet. Für die nachfolgenden Ausführungen wird diese Phase als Absetzphase tituliert. Diese unterscheidet sich von der vierten Phase, der sogenannten Eindickphase, maßgeblich in der Sinkgeschwindigkeit des Schlammes. In der Eindickphase kann auch nicht mehr von einem Absinken des Schlammes gesprochen werden. Vielmehr handelt es sich hierbei um eine Komprimierung der Schlammmasse. Beide Phasen haben jedoch gemeinsam, dass bei jeder Phase ein nahezu linearer Verlauf zur Reduzierung des Absetzvolumens vorherrscht. Die beiden Phasen werden über die sogenannte Übergangsphase miteinander verbunden. Merkmal dieser Übergangsphase bildet der Kompressionspunkt (KP), im Folgenden auch als „K-Punkt“ bezeichnet. Dieser Punkt markiert somit den Beginn des Eindickvorgangs. Im Bereich des K-Punkts weist die Schlammphase einen Feststoffgehalt auf, bei dem ein gleichmäßiges Absinken der Flocken nicht mehr möglich ist. Das Vorgehen zur Bestimmung dieses Punktes ist in [8] beschrieben. Die Ermittlung der K-Punkte von den einzelnen Absetzuntersuchungen des Vorhabens PAKAuf erfolgte im Rahmen der Arbeit von Beißwenger [8]. Das Ende des Eindickvorgangs ist erreicht, wenn keine nennenswerte Änderung der Schlamm Spiegelhöhe bzw. des Absetzvolumens mehr zu beobachten ist. Bei der Bestimmung des Vergleichsschlammvolumens mittels Standzylinder ist die Absetzzeit auf 30 min normiert. Die Schlammhöhe bzw. das Absetzvolumen zu diesem Zeitpunkt wird im Folgenden als Endspiegellage bezeichnet.

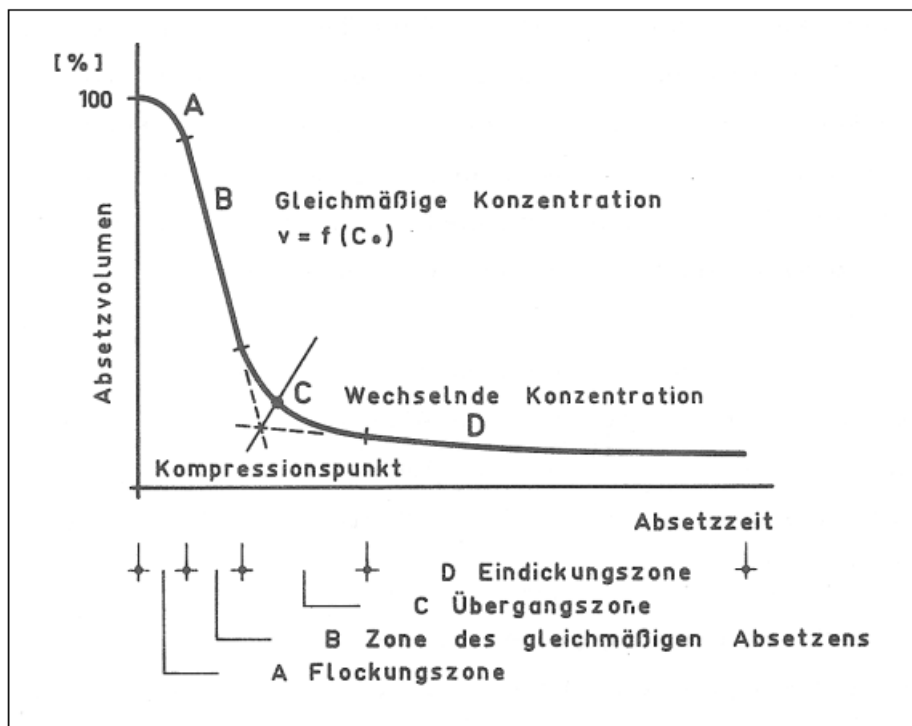


Abbildung 4-1: Absetzkurve mit Phasen des Absetzvorgangs [6]

Die Absetzfähigkeit eines Schlammes wird an dessen Schlamminde (ISV) festgemacht. Der ISV gibt das Volumen an, das 1 g Trockensubstanz nach 30 Minuten Absetzzeit einnimmt. Ausgehend von den Absetzkurven in Abbildung 4-2 wird deutlich, dass jedoch jenes Maß keine Rückschlüsse auf die Sinkgeschwindigkeit eines Schlammes während der Absetzphase erlaubt. Die Sinkgeschwindigkeit ist jedoch bedeutsam für die Dauer der Absetzphase und damit für die Gesamtdauer eines Zyklus.

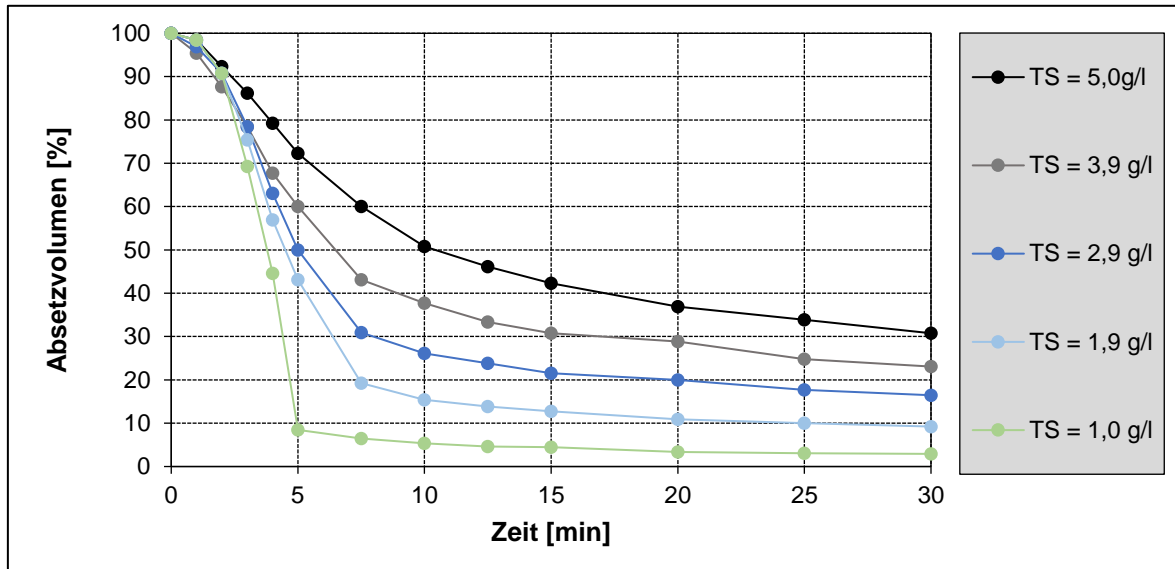


Abbildung 4-2: Absetzkurven von Schlämmen mit unterschiedlichen Feststoffgehalten und gleichem ISV (ISV = 57 ml/g)

Des Weiteren geht aus der Abbildung 4-2 hervor, dass mit zunehmendem TS-Gehalt im Reaktor der Übergang vom Absetzen zum Eindicken schleicher von statten geht und die Übergangsphase eine zunehmend größere Zeitdauer in Anspruch nimmt. Der K-Punkt, welcher in den nachfolgenden Auswertungen immer wieder als Maß für die Beschreibung der Absetzkurve mit angeführt wird, ist zudem deutlich weniger ausgeprägt.

Hinweise zu den nachfolgenden Auswertungen:

- Angaben zu ISV-Werten basieren immer auf dem Schlammvolumen nach einer Absetzdauer von 30 Minuten
- Anders als bei der Angabe des ISV ist das Erreichen des Kompressionspunktes nicht an eine definierte Zeitvorgabe gekoppelt.
- Die zu verschiedenen Zeitpunkten angegebenen TS-Gehalte im betrachteten Schlammvolumen berechnen sich jeweils aus der Feststoffmasse im jeweiligen Behälter, dividiert durch das Volumen, das die Schlammflocken zum angegebenen

Zeitpunkt eingenommen haben. Bei Angaben zu TS-Gehalten während der Absetz- und Eindickphase handelt es sich damit jeweils nur um einen Wert, der im Durchschnitt im jeweiligen Absetzvolumen vorherrscht.

- Das Kürzel „Misch“ beschreibt bei den Absetzkurven die Verhältnisse zum Zeitpunkt $t = 0$. Zu diesem Zeitpunkt ist der Schlamm vollständig durchmischt, d. h. er nimmt das gesamte Füllvolumen eines Gefäßes oder Beckens ein.

4.3 Möglichkeit der Ergebnisübertragung aus Laborversuchen

In den Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 ist das Absetzverhalten im Reallabor als auch in den parallel durchgeführten Standzylinderversuchen im Labor dargelegt. Zusätzlich sind relevanten Werte der Schlämme als auch deren Absetzverhalten in der Tabelle 3 aufgeführt.

Beide Schlämme weisen einen ISV von etwa 45 ml/g auf und sind damit in ihrer Absetzeigenschaft als vergleichbar einzustufen. Zugleich ist bei einem derartigen ISV das Absetzverhalten als „sehr gut“ einzustufen. Der wesentliche Unterschied zwischen den Schlämmen besteht im TS-Gehalt. Dieser ist im Falle von Pforzheim etwa 1,6-fach so hoch wie in Wendlingen.

Die Abbildung 4-3 macht deutlich, dass sich für die Schlämme, trotz gleichem ISV-Wert und nahezu gleicher Wasserspiegellage im volldurchmischten Zustand, eine unterschiedliche Absetzkurve ergibt.

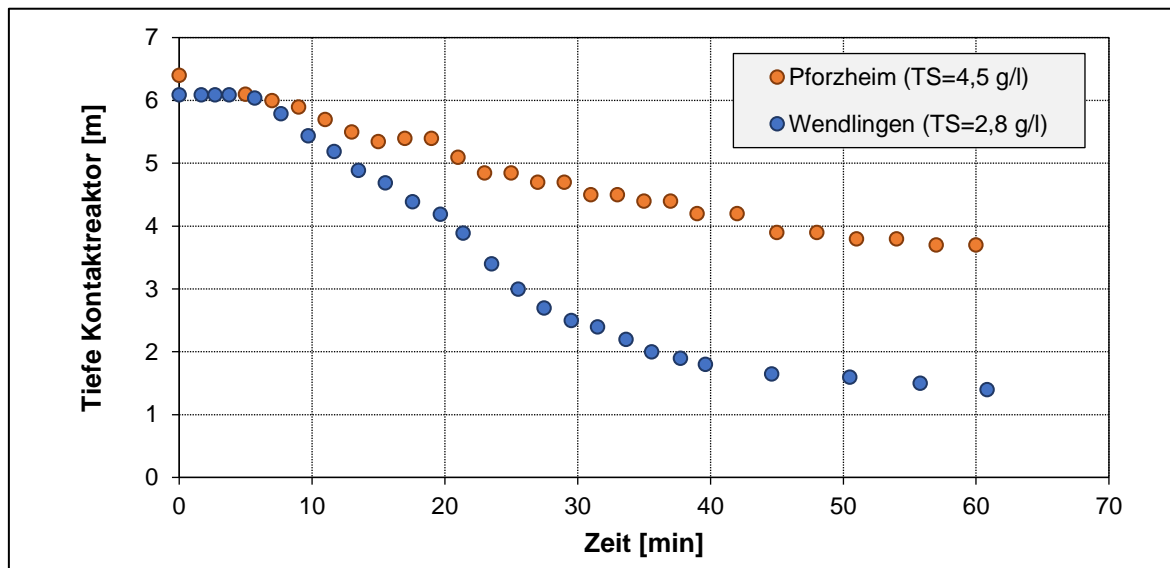


Abbildung 4-3: Absetzverhalten PAK-Schlamm_{Misch}, inkl. FM+FHM in den Kontaktreaktoren der Adsorptionsstufe in Pforzheim und Wendlingen

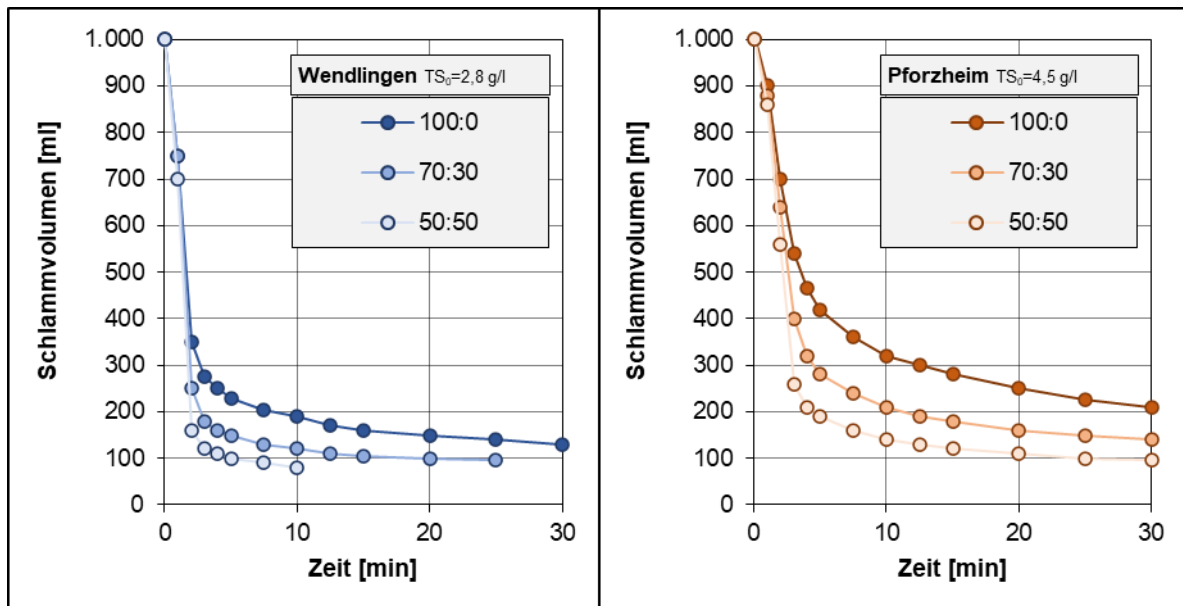


Abbildung 4-4: Absetzverhalten des PAK-Schlamm_{Misch} im Standzylinder in verschiedenen Verdünnungsreihen

Tabelle 3: Gegenüberstellung der TS-Gehalte, Sinkgeschwindigkeiten und Kompressionspunkte in den Kontaktreaktoren bzw. Standzylindern der Reallabore Pforzheim und Wendlingen; Angabe K-Punkt: Zeitdauer zum Erreichen des K-Punktes ausgehend von t=0 in Minuten und Angabe des eingenommenen Absetzvolumens

		Wendlingen			Pforzheim		
		TS	v _s	K-Punkt	TS	v _s t	K-Punkt
Einheit		[g/l]	[m/h]	[min/ml]	[g/l]	[m/h]	[min/ml]
Reallabor		2,8	9,1	-	4,5	3,7	-
Standzylinder	100:0	2,8	8,6	3,0/275	4,5	3,1	7,5/360
	70:30	2,0	10,7	3,0/230	3,2	5,1	4,0/320
	50:50	1,4	11,6	2,5/115	2,3	6,4	3,5/225

Aus der Abbildung 4-4 ist zu entnehmen, dass sich bei beiden Schlämmen nach einer Absetzdauer von 30 Minuten im unverdünnten Ansatz (100:0) ein Schlammvolumen von weniger als 250 ml/l einstellt. Demzufolge bedarf es zur „korrekten“ Bestimmung des Schlammvolumens keiner Verdünnung. Allerdings machen die Angaben in Tabelle 3 deutlich, dass damit bei beiden Schlämmen die Sinkgeschwindigkeit aus dem Reallabor mit Hilfe der Untersuchungen im Standzylinder nicht genau abgebildet werden können. In beiden Fällen resultiert aus den Standzylinderuntersuchungen eine etwas geringere Sinkgeschwindigkeit als im Reallabor. Eine Verdünnung der Ansätze im Standzylinder hat zur

Folge, dass die Sinkgeschwindigkeiten des Schlammes in den Reallaboren überschätzt werden. Vergleicht man das Erreichen des K-Punktes der unterschiedlichen Ansätze miteinander, so wird deutlich, dass die Änderung zum Erreichen des K-Punktes im Falle des Schlammes von Pforzheim eine andere ist als jene im Falle des Schlammes von Wendlingen. Während in Pforzheim beim Ansatz von 50:50 der K-Punkt in weniger als der Hälfte der Zeit als beim Ansatz 100:0 erreicht wird, ist im Falle des Schlammes von Wendlingen nahezu keine Änderung bis zum Erreichen des K-Punktes gegenüber dem Ansatz 100:0 auszumachen. Grund hierfür ist möglicherweise in den unterschiedlichen Ausgangs-TS-Gehalten zu sehen.

Die Gegenüberstellung des Absetzverhaltens im Labor, mit dem in realen Reaktoren macht deutlich, dass die Erkenntnisse aus den Standzylinderuntersuchungen zur Absetzphase nur als tendenzielle bzw. qualitative Aussagen zu werten sind. Für die Eindickphase gilt, dass mittels der Bestimmung des Vergleichsschlammvolumens der in der Endspiegellage jeweils erreichbare TS-Gehalt ermittelt werden kann. Denn gemäß dem DWA-M 210 wird hierüber, unter Kenntnis des ISV-Wertes, die relative Endschlammspiegelhöhe errechnet. Eine Aussage darüber, welche Zeitdauer es bedarf, um diesen TS-Gehalt in einem realen Reaktor zu erzielen, ist anhand der Standzylinderuntersuchungen nur bedingt möglich. Dies machen die Ergebnisse aus Pforzheim und Wendlingen deutlich: Während sich der Schlamm aus Pforzheim im Standzylinder nach 30 Minuten auf einen TS-Gehalt von rund 21 g/l eingedickt hat, kann im Reallabor nach 60 Minuten nur eine mittlere Eindickung von etwa 6,3 g/l festgestellt werden. In Wendlingen liegt im Reallabor nach 1 Stunde Absetzzeit eine Eindickung auf ca. 7,9 g/l vor, währenddessen im Standzylinderuntersuchung bereits nach 30 Minuten eine Eindickung auf mehr als 21 g/l zu beobachten ist.

4.4 Absetzen des PAK_{Misch} -Schlammes

4.4.1 Sinkgeschwindigkeit

Im DWA-Arbeitsbericht „Absetzvorgänge und Klarwasserabzug im SBR“ (DWA, 2005) sind verschiedene Ansätze, resultierend aus unterschiedlichen Arbeiten für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit aus dem Schlammvolumen ($VSV = TS_{\text{Misch}} \times ISV$) dargelegt. In der Abbildung 4-5 sind diese in Form von Kurven aufgezeigt. Die Messwerte aus Kläranlagen bestätigen die Lage dieser Kurven.

Zusätzlich sind in der Abbildung 4-5 die im Rahmen der Untersuchungen von PAKAuf erlangten Sinkgeschwindigkeiten unterschiedlicher Schlämme in Form von farbigen Punkten eingetragen. Diese wurden allesamt in Standzylinderuntersuchungen aufgenommen. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die PAK-Schlämme durchaus vergleichbare Sinkgeschwindigkeiten aufweisen wie belebte Schlämme. Allen Daten ist gemeinsam, dass mit Verringerung des Schlammvolumens eine höhere Sinkgeschwindigkeit einhergeht. Demzufolge ist die

Sinkgeschwindigkeit umso größer, je geringer der TS-Gehalt im Reaktor ist. Diese Aussage wird durch die Abbildung 4-2 bestätigt. Voraussetzung für ein „geordnetes Absetzen“ mit einem ausgeprägten Schlammspiegel ist allerdings ein ausreichender Flockenverbund.

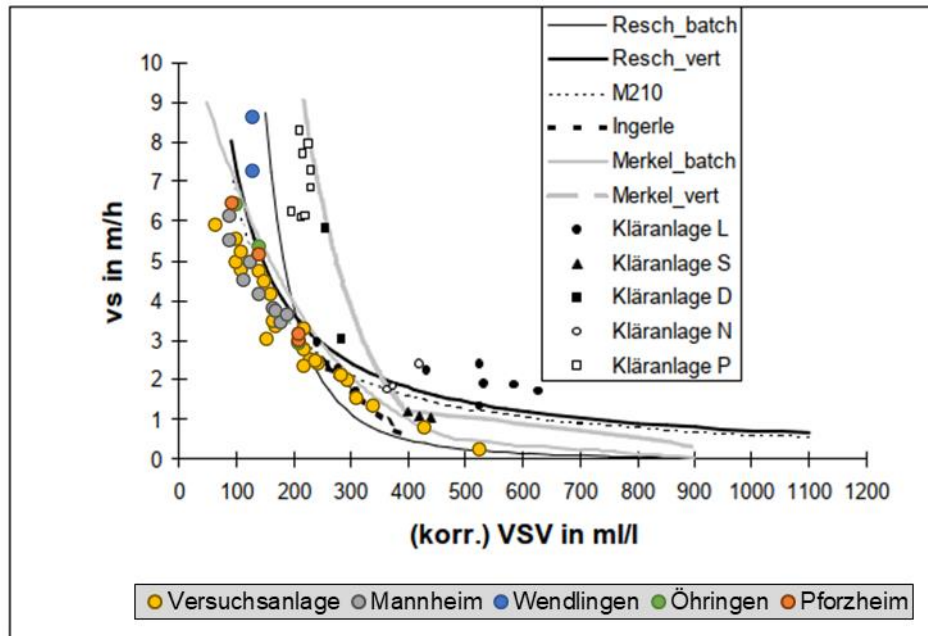


Abbildung 4-5: Ähnlichkeiten in der Sinkgeschwindigkeit zwischen PAK-Schlamm_{Misch} und Belebtschlamm nach [6]

Die Absetzkurven aus realen Reaktoren einschließlich die des Versuchsreaktors in Abbildung 4-6 machen deutlich, dass die Trennschicht zwischen Klarphase und Schlammvolumen bis zum Erreichen des K-Punktes relativ gleichförmig absinkt. Zugleich wird deutlich, dass sich die Sinkgeschwindigkeiten um mehr als den Faktor 2 unterscheiden. Die Schlämme in Wendlingen und im Versuchsreaktor sinken mehr als doppelt so schnell, wie jene in Öhringen oder Pforzheim. Obgleich alle Schlämme entsprechend den ISV-Werten als „gut absetzbar“ einzustufen sind. Als wesentlicher Unterschied zwischen den Schlämmen ist der TS-Gehalt auszumachen. Dieser ist im Falle von Öhringen doppelt so hoch wie in Wendlingen.

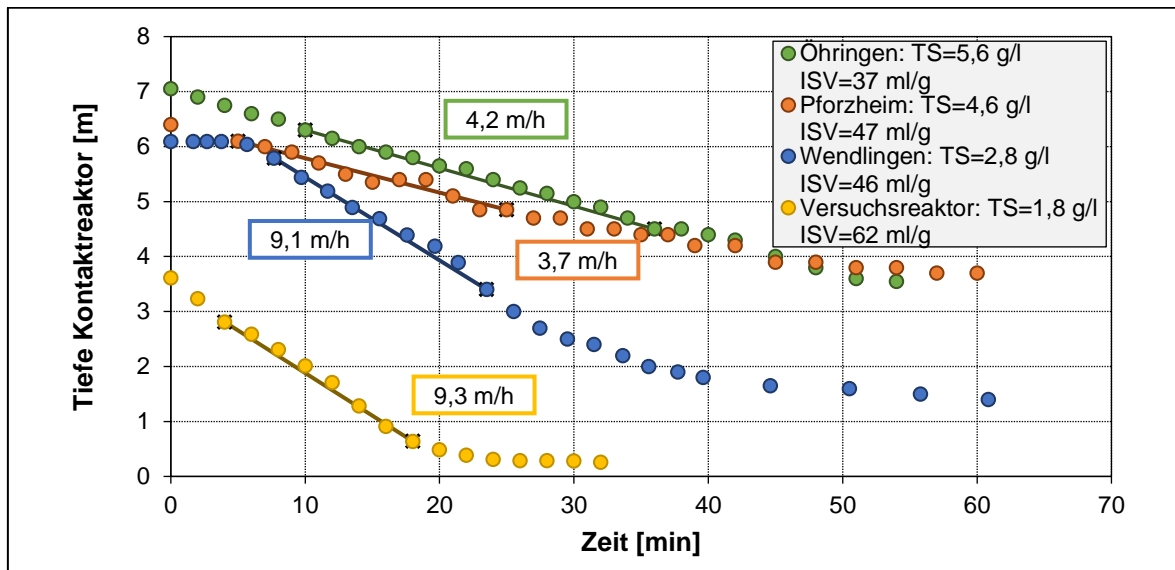


Abbildung 4-6: Absetzverhalten des PAK-Schlamm_{Misch} in den Kontaktreaktoren der Reallabore und der Versuchsanlage

4.4.2 Einfluss TS-Gehalt

Die Abbildung 4-7 belegt deutlich die Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit ausgehend vom TS-Gehalt während der volldurchmischten Phase des Reaktors. So ist mit zunehmendem TS-Gehalt_{Misch} eine geringe Sinkgeschwindigkeit auszumachen.

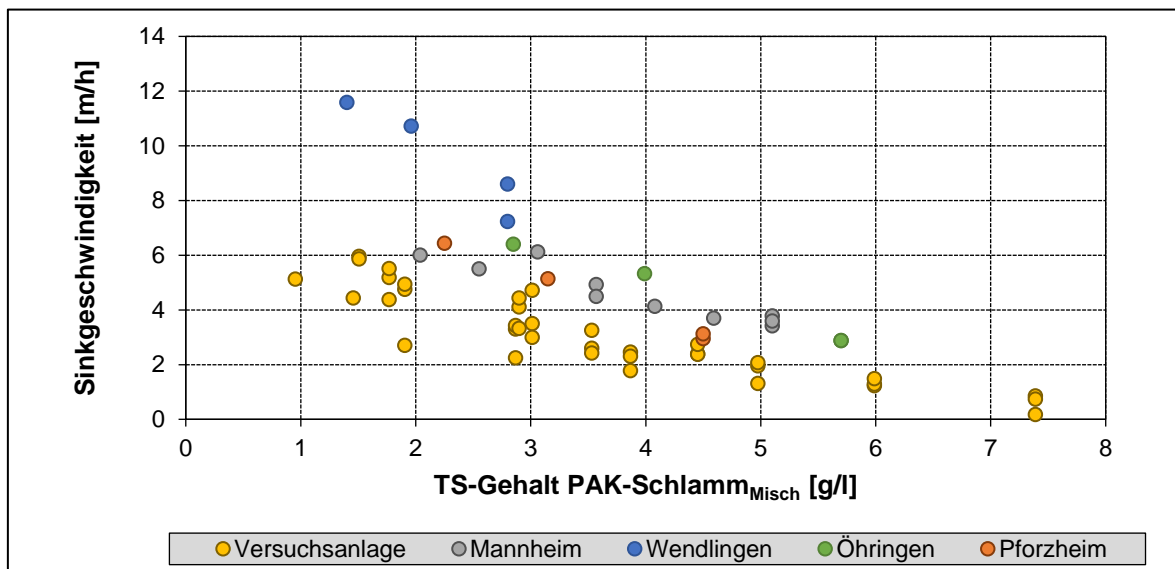


Abbildung 4-7: Sinkgeschwindigkeit im Standzylinder in Abhängigkeit vom TS-Gehalt des PAK-Schlamm_{Misch}

Die Ergebnisse aus den Reallaboren wurden mittels jeweils einer Probenahme gewonnen. D.h. allen Punkten eines Reallabors liegt der gleiche ISV zugrunde.

Die Sinkgeschwindigkeiten des Schlammes der Versuchsanlage hingegen stammen aus Absetzversuchen, deren Proben an unterschiedlichen Tagen der Versuchsanlage entnommen wurden. Demzufolge begründen sich die Resultate der Versuchsanlage auf unterschiedlichen ISV-Werten.

4.4.3 Einfluss ISV

Um die Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit vom ISV aufzuzeigen, sind in Abbildung 4-8 die Sinkgeschwindigkeiten von Schlämmen mit einem TS-Gehalt_{Misch} von rund 3 g/l in Abhängigkeit des ISV-Wertes aufgetragen. Hieraus wird deutlich, dass mit zunehmendem ISV-Wert eine geringere Sinkgeschwindigkeit beobachtet werden kann.

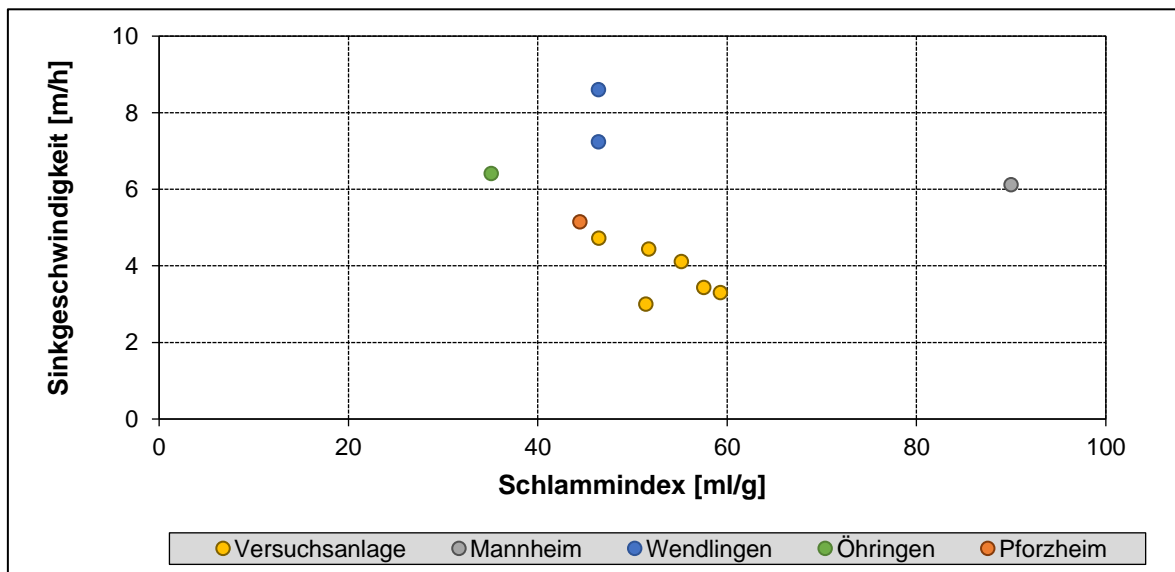


Abbildung 4-8: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Schlammindex [ml/g] für Schlämme mit einem TS-Gehalt_{Misch} +/- 3 g/l | aufgenommen in Standzylindern

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann allerdings keine Aussage darüber gemacht werden, inwieweit eine ISV-Änderung von + 20 ml/g in einem realen Reaktor ebenfalls eine Abnahme der Sinkgeschwindigkeit von etwa 2 m/h zur Folge hat.

4.5 Eindicken des PAK_{Misch}-Schlammes

4.5.1 Eindickphase

Im Standzylinderversuch endet das Eindicken immer 30 Minuten nach Versuchsstart. Der Beginn der Eindickphase bildet der Zeitpunkt des Einsetzens des K-Punktes. Da das Einsetzen des K-Punktes nicht an einen definieren Zeitpunkt gebunden ist, resultiert daraus, dass die Zeitdauer zum Eindicken im Standzylinderversuch unterschiedlich lange sein kann.

Die Abbildung 4-9 zeigt das Verhalten eines Schlammes beim Absetzen im Standzylinder- versuche bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen. Hierzu wurde unter Verwendung einer Schlammprobe unterschiedliche Verdünnungsreihen angesetzt. Anhand der Grafik a) in Abbildung 4-9 wird deutlich, dass mit zunehmendem TS-Gehalt der Übergang vom Prozess des Absetzens hin zum Eindicken zunehmend schleicher verläuft. Der Zeitpunkt zum Einsetzen des K-Punktes wird damit auch weniger im Diagramm ersichtlich. Jedoch wird deutlich, dass im Standzylinderversuch per Definition über die o.g. Zeitpunkte mit zunehmendem TS-Gehalt eine kürzere Dauer zum Eindicken des Schlammes gegeben ist und nicht in jedem Fall nach 30 Minuten die Endschlammspiegellage erreicht wird. Dies gilt insbesondere für höhere TS-Gehalte, wie Voruntersuchungen zur Arbeit von *Beißwenger* gezeigt haben.

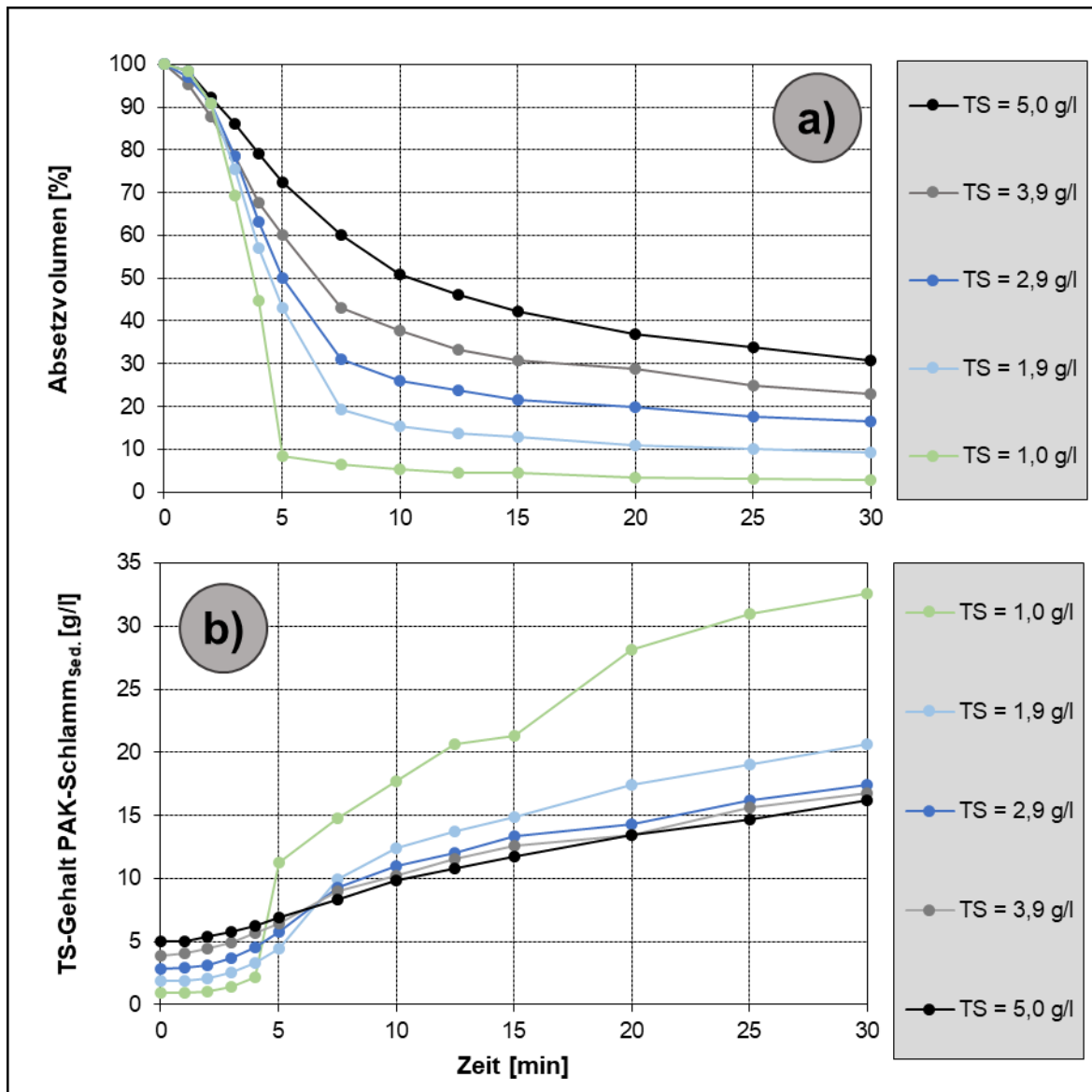


Abbildung 4-9: Absetzverhalten (a) und Eindickvermögen (b) eines Schlammes in Abhängigkeit dessen Ausgangsfeststoffgehalt

Anhand der Grafik b) in Abbildung 4-9 wird deutlich, dass Schlämme mit einem niedrigeren TS-Gehalt in gleicher Zeitdauer deutlich besser eindicken können als Schlämme mit einer hohen Feststoffkonzentration. So weist der Schlamm mit einer Ausgangskonzentration von 5 g/l erst nach 25 Minuten den gleichen TS-Gehalt im eingedickten Volumen auf, wie der Schlamm mit einer Feststoffkonzentration von 1,9 g/l nach einer Absetzdauer von 15 Minuten. Und das, obwohl sich das Schlammvolumen des Schlammes mit 5 g/l nur um 65 % reduzieren muss, wohingegen das Schlammvolumen zur Erlangung des gleichen TS-Gehaltes in der abgesetzten Schlammphase des Schlammes mit einer Ausgangskonzentration von 1,9 g/l um 87% verringert werden muss. Auffallend ist zudem, dass es für diese

Eindickung nur 60 % der Zeitdauer bedarf, als zur Erreichung des gleichen TS-Gehaltes bei der Probe mit einem Ausgangsfeststoffgehalt von 5 g/l.

4.5.2 Gegebenheiten zum Zeitpunkt des Kompressionspunktes

Aus Abbildung 4-10 geht hervor, dass tendenziell mit einem höheren Ausgangsfeststoffgehalt auch ein höherer TS-Gehalt zum Zeitpunkt des Erreichens des K-Punktes im Absetzvolumen vorliegt. Typischerweise setzt das Komprimieren des PAK-Schlammes bei TS-Gehalten von 8 g/l, bei Schlämmen mit einem höheren Ausgangsfeststoffgehalt als 4,5 g/l durchaus auch erst bei rund 10 g/l an.

Allerdings hat dieser höhere Ausgangs-TS-Gehalt zugleich auch zum Resultat, dass entsprechend der Abbildung 4-11 eine geringere Klarphase über der abgesetzten Schlammschicht vorherrscht.

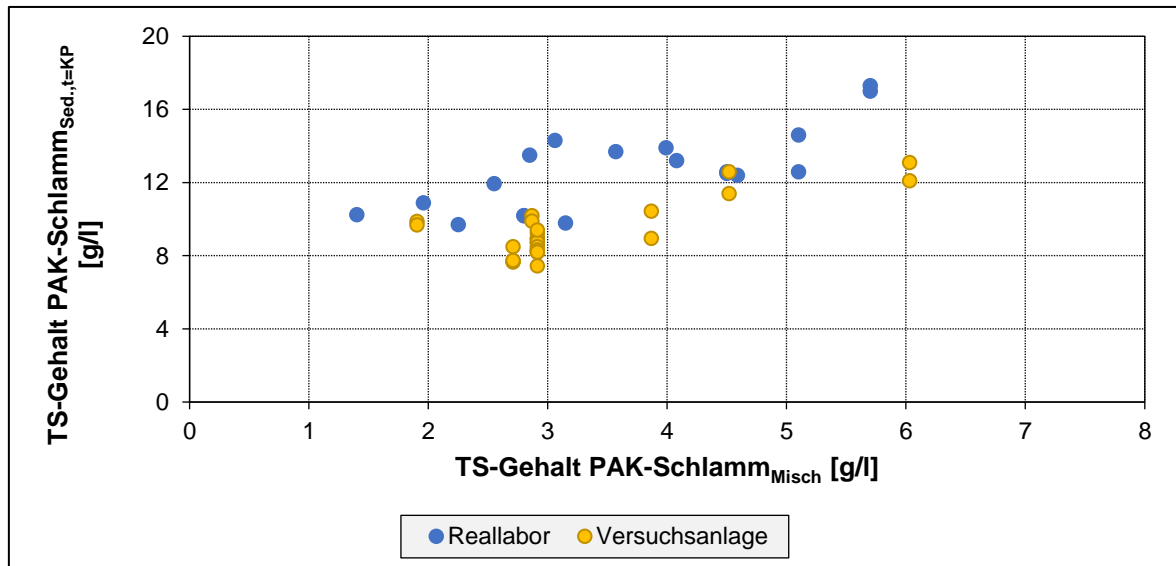


Abbildung 4-10: TS-Gehalt PAK-Schlamm_{Sed} zum Zeitpunkt des Kompressionspunktes abhängig vom Ausgangs-TS-Gehalt im PAK-Schlamm_{Misch}

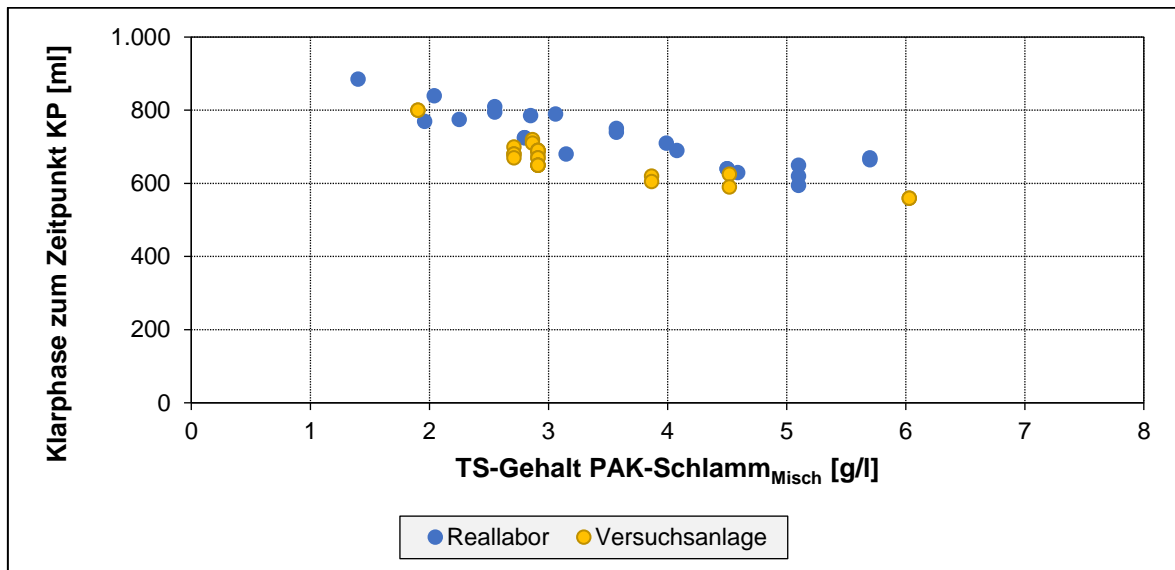


Abbildung 4-11: Volumen der Klarphase zum Zeitpunkt des Kompressionspunkts abhängig vom Ausgangs-TS-Gehalt im PAK-Schlamm_{Misch}

In Abbildung 4-12 ist im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Abbildung noch zusätzlich die zeitliche Komponente zum Erreichen des K-Punktes mitberücksichtigt. Daraus geht zum einen hervor, dass der Zeitpunkt des Eindickens bei Schlämmen mit einem niedrigeren TS-Gehalts meist schneller erreicht wird als bei Schlämmen mit höherer Feststoffkonzentration. Zum anderen wird nochmals deutlich, dass Schlämme mit einem höheren Feststoffgehalt zum Zeitpunkt des K-Punktes ein größeres Absetzvolumen einnehmen und damit eine geringere Klarphase im Behältnis gegeben ist als bei Schlämmen mit niedrigerem TS-Gehalt. So wird bei den Schlämmen mit durchschnittlich 2 g/l bereits nach etwa 4 Minuten ein Überstand von 80 % erreicht, während bei den Schlämmen mit etwa 4 bis 6 g/l zum Zeitpunkt des Komprimierens der Überstand etwa 55 bis 65 % des Behältervolumens ausmacht.

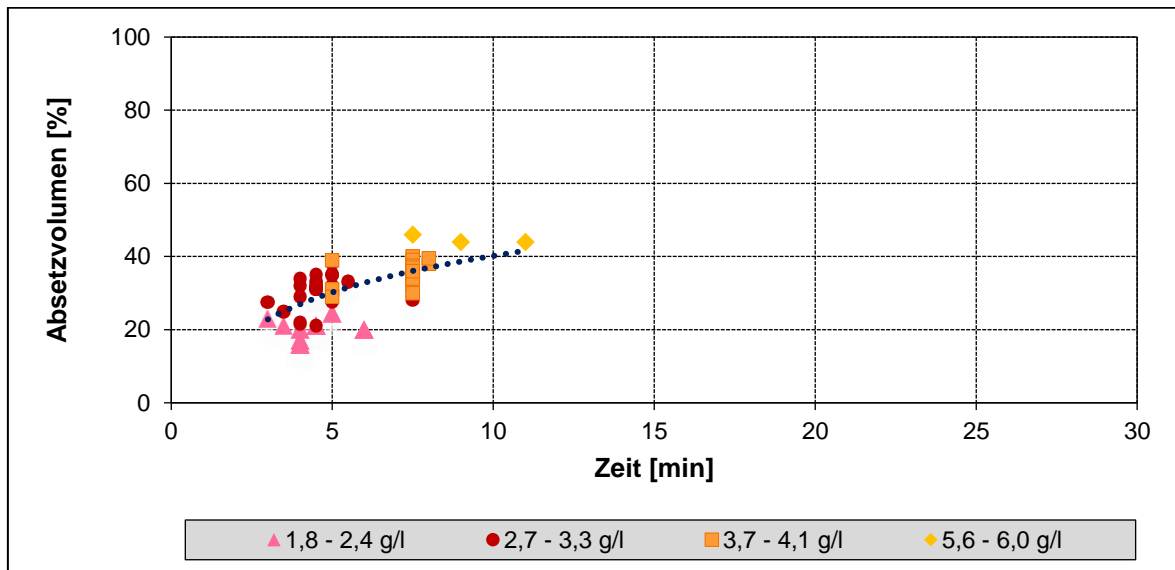


Abbildung 4-12: Einfluss des Feststoffgehaltes auf die Zeitdauer bis zum Erreichen des K-Punktes und auf das zu diesem Zeitpunkt eingenommene Volumen des Schlammes | Untersuchungen im Standzylinder

Aus Abbildung 4-13 geht hervor, dass der zum Zeitpunkt des K-Punktes im Absetzvolumen erzielbare Feststoffgehalt signifikant von den Schlammeigenschaften, ausgedrückt anhand des ISV-Wertes, geprägt ist. So ist mit zunehmendem ISV-Wert ein geringerer TS-Gehalt im Absetzvolumen gegeben. Dies hat bei gleichem Ausgangs-TS-Gehalt zur Folge, dass Schlämme mit höherem ISV-Wert zum Zeitpunkt des K-Punktes ein größeres Absetzvolumen einnehmen und damit eine geringere Klarphase gegeben ist.

Des Weiteren macht die Abbildung 4-13 deutlich, dass die Kenntnis über den ISV-Wert durchaus Rückschlüsse auf den TS-Gehalt zum Zeitpunkt des K-Punktes erlaubt. So kann bei einem ISV von 60 ml/g davon ausgegangen werden, dass die Eindickphase mit Erreichen eines TS-Gehaltes im Absetzvolumen von etwa 8 g/l einsetzt und damit der Schlamm nur noch unwesentlich absinkt.

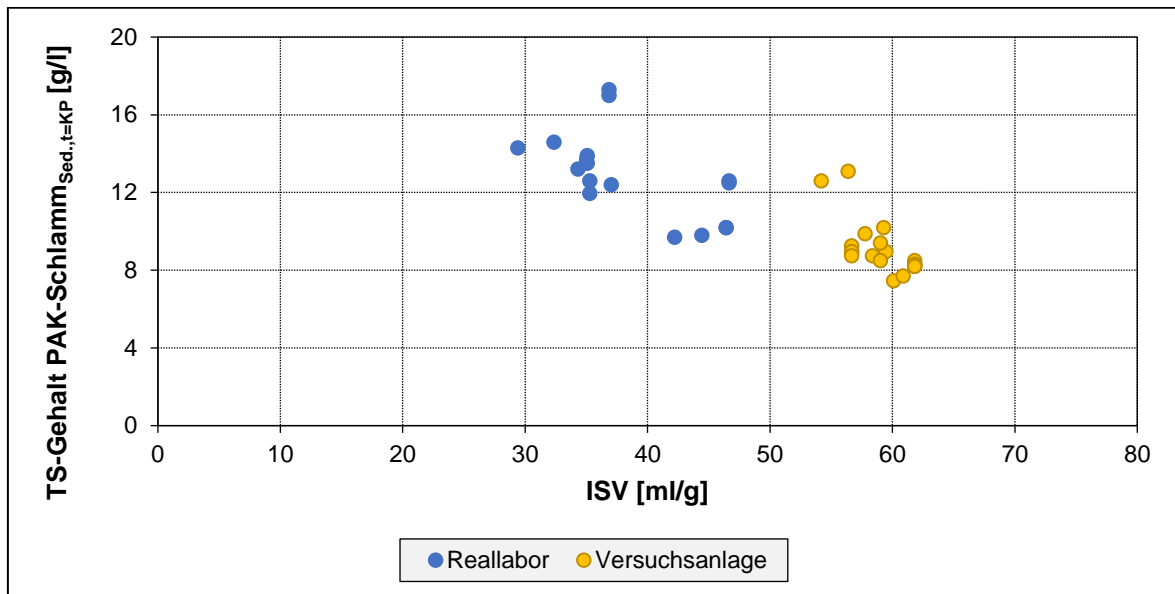


Abbildung 4-13: Einfluss des Schlammvolumenindex auf den TS-Gehalt im Absatzvolumen zum Zeitpunkt des K-Punktes | Untersuchungen im Standzylinder

4.5.3 Gegebenheiten bei der Endschlammspiegellage

Aus Abbildung 4-14 geht zum einen hervor, dass in der Endschlammspiegellage mindestens rund 70 % des Füllvolumens als Klarphase vorliegt. Zum anderen kann daraus entnommen werden, dass zu Beginn der Eindickphase (Zeitpunkt KP) etwa 20 % weniger Klarphase vorherrscht als nach Erreichen der Endschlammspiegellage.

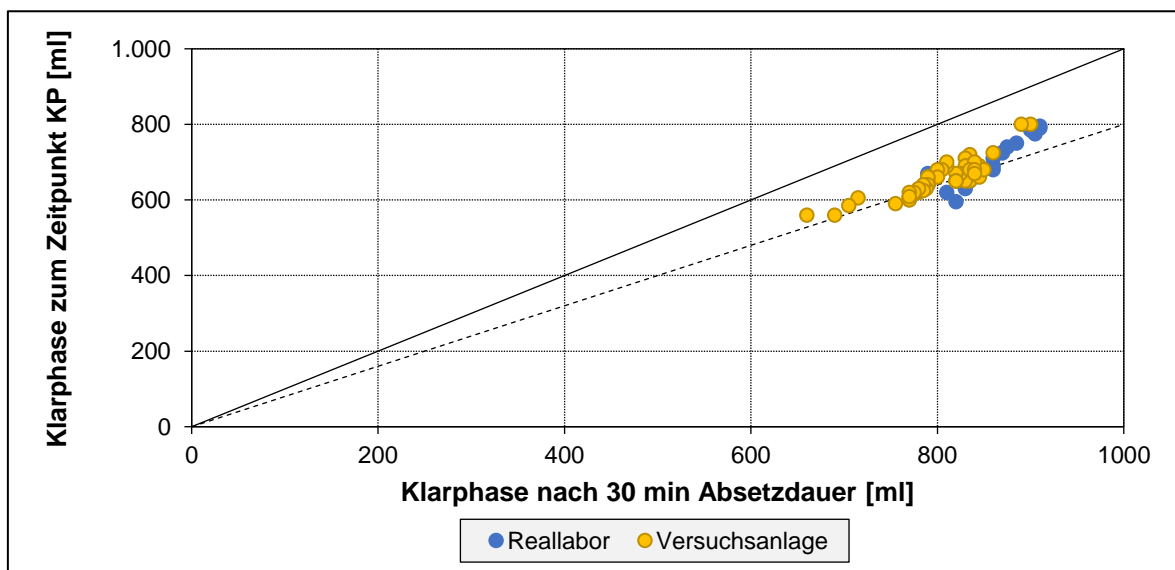


Abbildung 4-14: Gegenüberstellung der erreichten Klarphasen zu Beginn der Eindickphase und nach 30 min Absetzzeit | Untersuchungen im Standzylinder,

Aus der Abbildung 4-15 wird zum einen deutlich, dass Schlämme, die einen geringen ISV-Wert aufweisen in gleicher Zeit deutlich stärker eindicken können als Schlämme mit einem höheren ISV-Wert. Zum anderen geht aus der Abbildung hervor, dass der im eingedickten Zustand erreichbare TS-Gehalt unabhängig ist von der Feststoffkonzentration der gerührten Phase. So lassen sich Schlämme mit einer Ausgangskonzentration von 2 g/l ebenso wie Schlämme mit einer Ausgangskonzentration von 6 g/l innerhalb von 30 Minuten im Standzylinder auf rund 20 g/l eindicken. Der Unterschied besteht darin, dass das Schlammvolumen im Falle des Schlammes mit 2 g/l um 90 % reduziert wird, wohingegen sich das Schlammvolumen bei einer Ausgangskonzentration von 6 g/l um 70 % verringert.

Entsprechend den Ergebnissen ist abhängig vom ISV-Wert davon auszugehen, dass PAK-Schlämme statisch auf 20 bis 30 g/l eingedickt werden können.

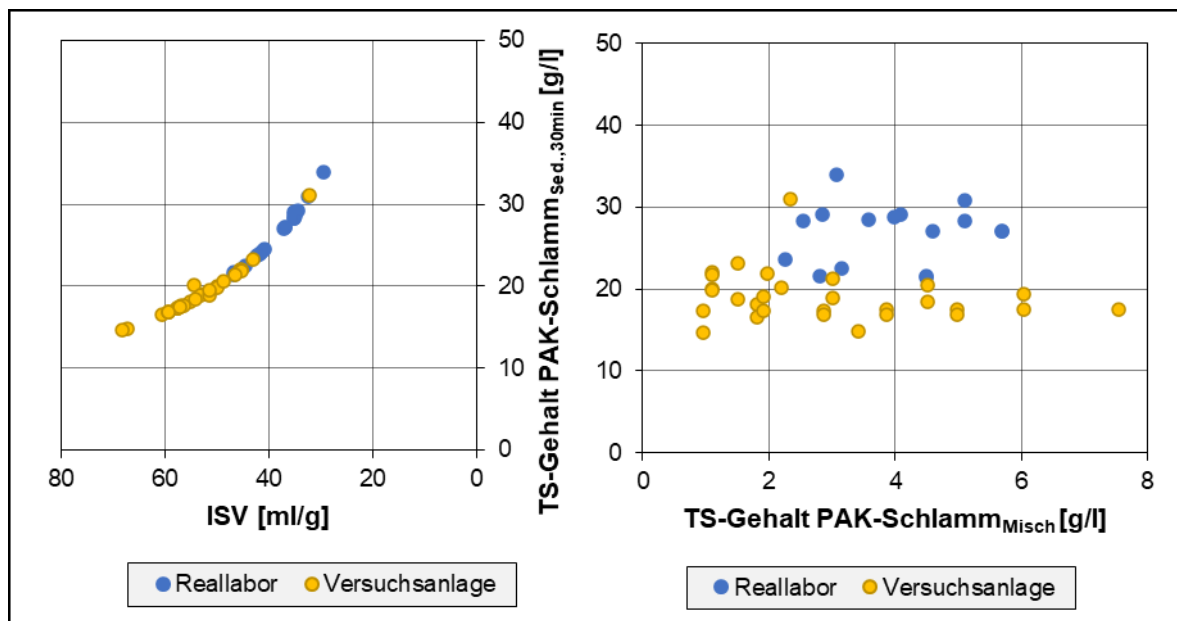


Abbildung 4-15: TS-Gehalt des PAK-Schlamm_{sed} nach Beendigung des 30-minütigen Absetzvorganges für die SV-Bestimmung in Abhängigkeit des TS-Gehalts im PAK-Schlamm_{Misch} mit Angabe des Schlammindexes

4.6 Fazit

Das Absetzen im Versuchsreaktor als auch die Untersuchungen im Reallabor in Wendlingen machen deutlich, dass es möglich ist, den PAK-Schlamm in vergleichsweise kurzer Zeit abzusetzen.

Entsprechend der vorliegenden Ergebnisse sollte für ein schnelles Absinken des PAK-Schlammes der TS-Gehalt im Reaktor während der Rührphase maximal etwa 3 g/l

betragen. Ein ISV von ≤ 60 ml/g gilt als weitere Voraussetzung für das Erreichen einer vergleichsweise hohen Sinkgeschwindigkeit.

Bei ISV-Werten von 50 bis 60 ml/g ist davon auszugehen, dass der PAK-Schlamm im Reaktor durchaus auf Konzentrationen von 16 bis 20 g/l eingedickt werden kann. Niedrigere ISV-Werte lassen noch eine höhere Eindickung zu.

Der Beginn des Eindickens wird durch den Kompressionspunkt markiert. Zum Zeitpunkt des Kompressionspunktes ist davon auszugehen, dass das Absetzvolumen rund 20 % mehr Volumen einnimmt als nach Erreichen der Endschlammspiegellage.

Anhand der Standzylinder-Versuche können keine Rückschlüsse auf den Zeitpunkt zum Erreichen des Kompressionspunktes gezogen werden. Jedoch zeigt sich, dass PAK-Schlämme hinsichtlich ihrer Sinkgeschwindigkeit mit belebten Schlämmen vergleichbar sind. So ist die Sinkgeschwindigkeit umso größer, je kleiner das Vergleichsschlammvolumen ist. Prinzipiell ist mit niedrigerem TS-Gehalt eine höhere Sinkgeschwindigkeit zu beobachten. In reellen Reaktoren (s. Versuchsreaktor oder Kontaktreaktor Wendlingen) lassen sich durchaus Sinkgeschwindigkeiten von 9 m/h erzielen.

Wenngleich niedrigere TS-Gehalte (während der Rührphase) das Absetzen des PAK-Schlammes begünstigen, so gilt es entsprechend den Beobachtungen von *Beißwenger* in seinen Standzylinderuntersuchungen zu berücksichtigen, dass mit geringer werdendem TS-Gehalt zunehmend mehr Partikel in der Klarphase vorzufinden sind. Dies spiegelt sich wiederum in einem Trübungsanstieg der Klarphase wider [8]. Als Grund für dieses Phänomen ist der durch die Schlammschicht bedingte Flockenfiltereffekt anzuführen, der mit geringer werdendem TS-Gehalt abnimmt.

5 Dimensionierungshinweise

5.1 Hinweise

Für die Umsetzung eines Verfahrens im Aufstaubetrieb bedarf es in der Regel mehrerer Aufstaubecken und ggf. eines vorgeschalteten Vorlagebehälters. Inwieweit bei Ausbildung eines Spurenstoffverfahrens im Teilstrombetrieb für die Prozessgestaltung ein sogenannter Vorspeicher notwendig ist, gilt es im Einzelfall zu erörtern. Ebenfalls gilt es zu prüfen, inwieweit im Nachgang an die Aufstaubecken ein Ausgleichsbecken von Nöten ist, um eine gleichmäßigere Beschickung der sich anschließenden Verfahrenseinheit zu ermöglichen.

Im Folgenden werden, ausgehend von den erlangten Ergebnissen, nur die Überlegungen zur Dimensionierung eines einzelnen Aufstaubeckens zum Einsatz von PAK für die Spurenstoffelimination beschrieben. Die Festlegung über die Anzahl der notwendigen Aufstaubecken ist von mehreren Faktoren abhängig und daher individuell zu bewerten: Neben der Zyklusdauer ist hierbei von Relevanz, inwieweit die Anlage mit einem Vorspeicher ausgestattet werden soll. Zudem gilt es bei der Betrachtung zur Anzahl der notwendigen Aufstaubecken auch die Erfordernis an die Verfügbarkeit der Reinigungsstufe mit einzubeziehen. In jedem Fall ist diese Entscheidung vor Auslegung der Aufstaubecken anzustellen.

Der PAK-Schlamm scheint sich ähnlich wie belebter Schlamm zu verhalten, so dass für die Beschreibung des Absetzverhalten grundsätzlich auf die im DWA-M 210 ^[9]angeführten Formeln zurückgegriffen werden kann. Es ist jedoch im Einzelfall zu bewerten, inwiefern alle dort angeführten und für die Planung eines PAK-SBR relevanten Bemessungshinweise Gültigkeit haben. Hintergrund hierfür ist, dass beim PAK-SBR, je nach zugrunde liegenden Überlegungen, für die Auslegung durchaus ein Volumenaustauschverhältnis f_A von mehr als 0,5 gegeben ist. Andernfalls lässt sich keine wesentliche Volumenreduzierung gegenüber dem „Ulmer Verfahren“, ausgebildet im Durchlaufbetrieb, erzielen. Für SBR-Anlagen zur biologischen Behandlung von Abwasser ist $f_A \geq 0,5$ allerdings nicht üblich. Vielmehr wird im DWA-M 210 empfohlen derart hohe Austauschverhältnisse zu vermeiden.

5.2 Begrifflichkeiten

Für die Beschreibung der einzelnen, zu bemessenden Größen werden folgende Begrifflichkeiten in Anlehnung an das DWA-M 210 („Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb (SBR)“) verwendet:

Tabelle 4: verwendete Abkürzungen und Begrifflichkeiten

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung	Formel
A_R	m	Reaktorgrundfläche	
f_A	-	Volumenaustauschverhältnis	$= \Delta V / V_R$
H_{KP}	m	absolute Höhe des Schlammspiegels zum Zeitpunkt KP	
H_{KW}	m	Klarwasserhöhe	
H_S	m	Höhe des Schlammspiegels	
$Q_{Spur,max}$	l/s	maximal zu behandelnder Volumenstrom im PAK-SBR	
Q_{Zu}	l/s	Zulaufvolumen je Zyklus	
t_{Ab}	min	Dauer der Klarwasserabzugsphase	
t_{Flock}	min	Dauer der Beruhigungs- und Flockungsphase	
$t_{Füll}$	min	Dauer der Füllphase	
t_k	min	Kontaktzeit	
t_{Misch}	min	Dauer der Reaktionszeit	
TS_{Misch}	g/l	TS-Gehalt im PAK-Schlamm _{Misch}	
$TS_{t=KP}$	g/l	TS-Gehalt im PAK-Schlamm _{sed} zum Zeitpunkt KP	
t_{Still}	min	Dauer der Stillstandsphase	
t_z	min	Zyklusdauer	
ΔV	m ³	Zulaufvolumen, das pro Zyklus in ein Aufstaubecken eingeleitet wird	
$V_{Abs,t=KP}$		Abgesetztes Volumen zum Zeitpunkt KP	
V_{Klar}		Klarwasservolumen, ergibt sich aus Klarwasserhöhe	
ΔV_{max}	m ³	Maximales Zulaufvolumen, das pro Zyklus in ein Aufstaubecken eingeleitet wird	
V_{min}	m ³	Volumen im Aufstaubecken nach Abschluss des Klarwasserabzuges; "Schlamm Speichervolumen"	
V_R	m ³	Maximales Füllvolumen eines Aufstaubeckens	$= \Delta V_{max} + V_{min}$

5.3 Bemessungsgang

Für die Auslegung des Reaktors wird in Anlehnung an das DWA-M 210 folgende Vorgehensweise empfohlen:

1. Festlegung der Anzahl von Aufstaubecken und Entscheidung über einen möglichen Vorseicher
2. Festlegung der Zyklusdauer
3. Ermittlung der Volumina
4. Festlegung der Behälterabmessungen

Da das Reaktordesign eng mit der Zyklusdauer verknüpft ist, gilt es nach dessen Festlegung nochmals den Nachweis über die Einhaltung der Zyklusdauer als auch des Gesamtprozesses für die PAK-SBR-Anlage, bestehend aus mehreren Becken, zu führen.

5.4 Zyklusdauer

Die Festlegung der Zyklusdauer t_Z basiert auf den wesentlichen Einzelschritten des Verfahrens:

$$t_Z = t_{\text{Füll}} + t_{\text{Misch}} + t_{\text{Flock}} + t_{\text{Ab}} + t_{\text{Still}} \quad [\text{min}]$$

Die Beschickung des Reaktors erfolgt in der Zeitdauer $t_{\text{Füll}}$. Während dieser Phase wird der Behälterinhalt bereits gerührt. Inwieweit auf diese Phase eine zusätzliche Zeitdauer t_{Misch} zur Durchmischung des Reaktors zu erfolgen hat, ist einerseits von der Sicherstellung einer ausreichenden Kontaktzeit, andererseits von der Festlegung der Zeitpunkte zur Zugabe der Hilfsmittel PAK, Fällmittel und Polymer abhängig. Für die Kontaktzeit t_K wird empfohlen, dass dies unabhängig des gewählten TS-Gehaltes mindestens 15 Minuten betragen sollte. Diese Empfehlung ist auf die mittlere Kontaktzeit zu beziehen, die sich wie folgt berechnet:

$$t_K = 0,5 \cdot t_{\text{Füll}} + t_{\text{Misch}} \quad [\text{min}]$$

Nach Beendigung der Durchmischung schließt sich die Flockungszeit t_{Flock} an. Diese Zeitdauer dient dazu, dass der Reaktorinhalt zur Ruhe kommt und der Schlamm Spiegel zu sinken beginnt.

In der sich anschließenden Phase t_{Ab} erfolgt der Klarwasserabzug. Während des Klarwasserabzugs sinkt der Schlamm Spiegel ungehindert weiter ab. Um zu Beginn von t_{Ab} ein Einsaugen von bereits abgesetztem Schlamm aus dem Schlamm Bett in die Klarwasserphase zu verhindern, ist eine ausreichende Flockungszeit t_{Flock} zu wählen. Gemäß DWA-M 210 sollte hierfür eine Dauer von 10 Minuten gewählt werden. Im Versuchsbetrieb war diese

Dauer mit 12 Minuten angesetzt. Die Zeitdauer von t_{Ab} ist abhängig vom Absetzverhalten des Schlammes.

Unter Umständen ist am Ende des Zyklus noch eine Stillstandsphase t_{Still} zu berücksichtigen.

5.5 Ermittlung der Volumina

Das Volumen eines Reaktors V_R setzt sich aus zwei Volumenanteilen zusammen:

$$V_R = V_{min} + \Delta V \quad [m^3]$$

Das Volumen V_{min} dient dazu, die gesamte Schlammmasse des Reaktors im abgesetzten Zustand zwischenzuspeichern. ΔV stellt das Zulaufvolumen dar, das während eines Zyklus in das Aufstaubecken eingeleitet wird.

Für die Bestimmung der Volumina ist zunächst der TS-Gehalt bei Vollfüllung des Reaktors im volldurchmischten Zustand festzulegen (TS_{Misch}). Des Weiteren gilt es den ISV-Wert zu definieren, der für die Bemessung angesetzt wird.

Hinsichtlich des TS-Gehaltes gilt es zu berücksichtigen, dass sich niedrigere Feststoffgehalte positiv auf die Absetzdauer und das notwendige Schlamm Speichervolumen V_{min} auswirken. Nach bisherigen Erkenntnissen sollte der TS_{Misch} für ein schnelles Absetzen eine Konzentration von 3 g/l nicht überschreiten. Um keinen zu hohen Anteil an Feinpartikel im Klarwasser zu haben, sollte gemäß den Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb der TS_{Misch} jedoch mindestens 1 g/l betragen. Entsprechend den Resultaten der Simulation lässt sich mit einem höheren TS_{Misch} -Gehalt eine Verkürzung der Kontaktzeit bzw. die notwendige Dauer der Reaktionsphase für die Erlangung einer gleichmäßigen stabilen prozentualen Reinigungsleistung kompensieren

Der ISV von PAK-Schlämmen ist nach gegenwärtigen Betriebserfahrungen nicht signifikant von einem jahreszeitlichen Gang geprägt. Vielmehr ist aus dem Betrieb der Kläranlagen mit einem „Ulmer Verfahren“ bekannt, dass der ISV gezielt durch das Fällmittel zu PAK-Verhältnis beeinflusst werden kann [10,11]. Des Weiteren besteht die Option durch die Zugabe Menge an Polymer, Einfluss auf das Absetzverhalten zu nehmen. Entsprechend der Erhebungen zu den Betriebserfahrungen mit einem „Ulmer Verfahren“ des KomS kann für PAK-Schlämme ein ISV im Bereich von 33 bis 110 ml/g angenommen werden.

Das Volumen von ΔV definiert sich daraus, wieviel Zulaufvolumen während eines Zyklus im Reaktor behandelt werden soll:

$$\Delta V = t_{Füll} \cdot Q_{Zu} \quad [m^3]$$

Der maximale Lastfall ist über $Q_{Spur,max}$ definiert. Hierbei gilt: $\Delta V = \Delta V_{max}$.

Im Volumen V_{\min} muss die abgesetzte Schlammmasse zwischengespeichert werden. Um eine schnelle Zykluszeit zu ermöglichen, gilt es zu überlegen, inwieweit dieses Volumen so zu bemessen ist, dass bereits das Absetzvolumen zum Zeitpunkt des K-Punktes darin Platz findet. Zusätzlich ist über dem Absetzvolumen eine ausreichend hohe Klarwasserhöhe mit vorzusehen, um ein Einsaugen des Schlammes aus dem Schlammbett in den Ablauf zu verhindern. Diese ist mit mindestens 0,40 m anzusetzen. Ausgehend von der Ausbildung der Schlammabzuges und dem absoluten abgezogenen Volumenstrom ist ggf. noch eine größere Klarwasserhöhe vorzusehen.

Sofern mit Erreichen des K-Punktes das gesamte Absetzvolumen im Schlammspeicherraum Platz finden soll, so errechnet sich das Schlammpeichervolumen folgendermaßen:

$$V_{\min} = V_{\text{Abs},t=\text{KP}} + V_{\text{Klar}} \quad [\text{m}^3]$$

Es gilt, dass in $V_{\text{Abs},t=\text{KP}}$ die gesamte Schlammmasse des Reaktors Platz findet:

$$V_{\text{Abs},t=\text{KP}} = \frac{V_R \cdot TS_{\text{Misch}}}{TS_{t=\text{KP}}} \quad [\text{m}^3]$$

5.6 Reaktorabmessungen

Die Reaktorabmessungen sind über die Grundfläche A_R und die maximale Füllhöhe H_R bestimmt. Es gilt:

$$V_R = A_R \cdot H_R \quad [\text{m}^3]$$

Ausgehend vom Verhältnis $V_{\text{Abs},t=\text{KP}}$ zu V_R errechnet sich daraus die Schlamm Spiegelhöhe H_{KP} , die zum Zeitpunkt des K-Punktes vorherrscht.

$$H_{\text{KP}} = \frac{V_{\text{Abst},t=\text{KP}}}{V_R} \cdot H_R \quad [\text{m}]$$

Im Folgenden ist nun der Nachweis zu erbringen, inwieweit die vorgesehene Zeitdauer für die Phase des Klarwasserabzuges genügt, um den PAK-Schlamm über die Höhendifferenz von $H_{w,0} - H_{\text{KP}}$ zu sedimentieren. $H_{w,0}$ stellt hierbei die absolute Schlamm Spiegelhöhe zum Absetzbeginn dar. Mögliche Formeln zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs zum Absinken der Schlamm Spiegelhöhe sind im DWA-M 210 dargelegt.

Bei festen Zyklendauern und variablen Füllstand wird empfohlen die Nachweisführung für ein ausreichendes Absetzen neben dem Lastfall $Q_{\text{Spur,max}}$ für weitere relevante Zuflüsse vorzunehmen. Hintergrund hierfür ist, dass bei geringerer Füllhöhe ein höherer TS-Gehalt vorliegt und damit auch andere Absetzgeschwindigkeiten verbunden sind.

6 Resümee

Der Versuchsbetrieb auf der Kläranlage Neckarsulm hat gezeigt, dass die gezielte Spurenstoffelimination mit PAK im Chargenbetrieb möglich ist. So ist unter Ansatz der im Versuchsbetrieb gewählten mittleren Kontaktzeit von ca. 18 Minuten für den maximal in der Kläranlage zu behandelndem Teilstrom davon auszugehen, dass für die Reinigung des Abwassers in der Kläranlage Neckarsulm eine Dosiermenge von 10 mg/l des im Versuchsbetrieb eingesetzten PAK-Produktes genügen wird, um den Reinigungsumfang zu erzielen, der für eine gezielte Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg definiert ist. Diese Einschätzung basiert darauf, dass die in der SBR-Anlage anfallende „Überschussschle“ in die biologische Reinigungsstufe der Kläranlage Neckarsulm zurückgeführt wird. Die zusätzliche Wirkung der „Überschussschle“ konnte im Versuchsbetrieb nicht getestet werden. Jedoch liegen zahlreiche Untersuchungen hierzu vor, die zeigen, dass trotz der Teilbeladung der PAK, dadurch eine weitere adsorptive Reinigung in der biologischen Stufe gegeben ist [2].

Der Versuchsbetrieb erfolgte in einem 4 m hohen Aufstaubecken, mit einem Füllvolumen von 12,6 m³, wobei ca. 70 % dieses Volumens als Austauschvolumen genutzt wurden. Das Becken wurde pro Zyklus mit einem konstanten Volumenstrom von 25 m³/h beschickt. Die Zyklusdauer hat zwischen 65 und 75 Minuten variiert. Ein Absetzen des Aktivkohleschlammes war bei Ausbildung von ausreichend Flocken im Versuchsreaktor binnen weniger als 30 Minuten sicher gegeben. Ausgehend von einer Zyklusdauer von 70 Minuten/Reaktor, drei dem Versuchsreaktor baugleichen Becken und einer maximalen Befülldauer von 23,3 Minuten pro Reaktor wäre somit eine Abwassermenge von rund 22,6 m³/h kontinuierlich behandelbar. Die SBR-Anlage hätte demnach ein Gesamtvolumen von $3 \cdot 12,6 \text{ m}^3 = 38 \text{ m}^3$. Ausgehend von den bisherigen Empfehlungen zur Dimensionierung eines „Ulmer Verfahrens“ im Durchlaufbetrieb [12] wäre für die Behandlung dieses Abwasserstroms ein Kontaktreaktor mit einem Volumen von 11,3 m³ und ein Sedimentationsbecken mit einem Volumen von 45,2 m³ notwendig. In Summe ergibt sich daraus ein Gesamtvolumen von 56,5 m³. Aus dem Vergleich der beiden Gesamtvolumina wird deutlich, dass bei Ausbildung des „Ulmer Verfahrens“ im Aufstaubetrieb eine Einsparung an notwendigen Bauwerksvolumen gegeben ist. Inwieweit bei größeren zu behandelnden Volumenströmen ebenfalls eine Volumeneinsparung im Bereich von 30 % erzielt werden kann, hängt entscheidend von der Dauer der Absetz- und Abzugsphase ab. Die Absetzdauer ist wiederum abhängig davon, über welche Höhendifferenz der Schlamm in sich zusammensinken muss. Im Versuchsreaktor hat sich eine Klarphase bezogen auf die Gesamtfüllhöhe von 4 m von 2,8 m ausgebildet. Wird hier eine größere Höhe gewählt, so resultiert hieraus eine längere Dauer für die Absetzphase, wodurch sich die Bauwerksgröße für die Gesamt-SBR-Anlage aufgrund einer längeren Zyklusdauer vergrößert. Ebenso entscheidend für ein schnelles Absetzverhalten ist neben einem geringen ISV-Wert ($\leq 60 \text{ ml/g}$) der TS-Gehalt im Reaktor während des Mischens bei Vollfüllung des Reaktors. Dieser sollte nicht über 3 g/l liegen.

Bei der Festlegung des TS-Gehaltes gilt es entsprechend den Ergebnissen der Simulation zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Feststoffgehalt, d.h. mit höherer Anreicherung der PAK in der Anlage, eine geringere Kontaktdauer notwendig ist und damit wiederum die Gesamtzyklusdauer reduziert werden kann. Des Weiteren machen die Ergebnisse deutlich, dass mit einem höheren TS-Gehalt eine stabilere prozentuale Spurenstoffentnahme sichergestellt werden kann.

Mittels der Simulation konnten indes noch weitere Fragestellungen geklärt werden, die im Rahmen der zur Verfügung stehenden Versuchszeit oder aufgrund von eingeschränkten baulichen Möglichkeiten nicht untersucht werden konnten. Ausgehend von diesen Ergebnissen, insbesondere die Betrachtungen von sogenannten „Grenzzuständen“, lässt sich festhalten, dass mit dem Betrieb eines PAK-SBRs eine stabile Reinigungsleistung erzielt werden kann und ausreichend Möglichkeiten gegeben sind, um im Falle von „äußeren Störgrößen“, wie einem Anstieg der gelösten Restorganik oder auch einem erhöhten Eintrag von Feststoffen aus der Nachklärung, auf den Prozess Einfluss nehmen zu können.

Die Simulation hat sich im Rahmen des Untersuchungsvorhabens als hilfreiches Werkzeug zur Betrachtung verschiedener Betriebsszenarien erwiesen. Eine grundlegende Notwendigkeit für den Einsatz dieses Werkzeuges im Rahmen von Planungen von PAK-SBR-Anlagen wird nicht gesehen. Jedoch wird empfohlen, aufgrund der bislang nicht existenten Betriebserfahrungen zum PAK-SBR aus der großtechnischen Anwendung, insbesondere bei ersten Planungen von diesem Verfahren, die Simulation einzusetzen. Dies ermöglicht es beispielsweise verschiedene Betriebsvarianten zu betrachten um darauf basierend verschiedene Zykluspläne, abhängig von betrieblichen Randgrößen, wie Zuflusswassermenge, entwickeln zu können. Des Weiteren wird es als zielführend angesehen, insbesondere bei größeren Abweichungen zur Kontaktzeit wie in den durchgeführten Untersuchungen, den Nachweis für eine ausreichende Reinigungsleistung mittels Simulation zu führen.

Als Grundlage für die Simulation sind Rührversuche mit PAK durchzuführen. Diese Untersuchungen erlauben es zugleich, die Eignung verschiedener PAK-Produkte zu betrachten. Wenngleich bei diesen Untersuchungen primär der Fokus auf der Reinigungsleistung sowohl in Abhängigkeit der Zeit als auch nach Einstellung des Gleichgewichtes liegt, so besteht darüber hinaus die Möglichkeit, eine erste vergleichende qualitative Einschätzung zum Absetzverhalten der PAK-Produkte zu geben. Voraussetzung hierfür ist, dass mindestens zwei PAK-Produkte in einer Versuchsserie untersucht werden. Mit Hilfe dieser Batchversuche kann somit die Eignung, insbesondere von neuen PAK-Produkten, wie PAK aus nachwachsenden Rohstoffen, überprüft werden.

Für die Abtrennung der PAK mittels Sedimentation bedarf es des Einsatzes von Fällmittel als auch Polymer. Wenngleich bei einer optimierten Zugabe dieser Betriebsmittel gemäß den Erfahrungen von Kläranlagen mit einem „Ulmer Verfahren“ die PAK nahezu vollständig sedimentiert werden kann, so ist nach gegenwärtigem Wissensstand einem PAK-SBR in

jedem Fall eine Filteranlage nachzuschalten. Damit wird sichergestellt, dass z.B. in der Einfahrphase bis zur Abstimmung der Betriebsmittelzugaben aufeinander, im Fall eines Wechsels des PAK-Produktes, Wechsel eines anderen Betriebsmittel aber auch bei einer Störung von einer Betriebsmittelzugabe, die PAK in jedem Fall sicher zurückgehalten werden kann.

In Hinblick auf die Realisierung einer SBR-Anlage mit PAK wird empfohlen, die o.g. Aussagen zu einem möglichst schnellen Absinken des PAK-Schlammes in weiteren Reallaboren zu verifizieren. Insbesondere um weitere Erkenntnisse zur Absetzdauer zu sammeln, damit die im Rahmen einer Planung angesetzte Dauer von einem Zyklus auch sicher eingehalten werden kann. Bei den Versuchen sollte darauf geachtet werden, dass im Kontaktreaktor ein TS-Gehalt von maximal 3,0 g/l vorherrscht.

Hinsichtlich der Realisierung ist aufgrund des Chargenbetriebs zu erwarten, dass insbesondere die Dosieranlagen in ihrem technischen Aufbau einfacher ausgebildet werden können als beim klassischen „Ulmer Verfahren“. Entsprechend den Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb ist die Ausbildung einer PAK-SBR-Anlage mit einem höheren EMSR-Aufwand verbunden, insbesondere hinsichtlich der programmtechnischen Ausstattung für die Abstimmung des Betriebs der einzelnen Reaktoren untereinander als auch einer gleichmäßigen Beaufschlagung der nachgeschalteten Filtration. Eine Auslegung des Verfahrens für einen Teilstrom verringert jedoch die Anzahl der zu berücksichtigenden Betriebszustände und damit den Aufwand für die Programmausbildung.

Festzuhalten ist, dass mit dem Untersuchungsvorhaben PAKAuf gezeigt werden konnte, dass mit einem PAK-SBR-Betrieb die in Baden-Württemberg erforderliche Reinigungsleistung an die Spurenstoffelimination erzielt werden kann, Hinweise erarbeitet werden konnten, die es erlauben das Verfahren auszulegen und mit der Erweiterung des bisherigen Simulationstools von PAK-Verfahren um den SBR-Betrieb ein Werkzeug vorhanden ist, um im Rahmen der Planung einer PAK-SBR-Anlage verschiedene Betriebszustände betrachten zu können, was wiederum die Grundlage für einen optimierten Betrieb bildet.

Zusammenfassend lässt sich die Umsetzung als auch der Betrieb des Verfahrens als machbar und aussichtsreich bewerten.

Literatur

- [1] Launay, M. (2020): Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg – Strategie des Landes. Sonderausgabe wwt Modernisierungsreport 2020/21 "Krisenmanagement und Zukunftsgestaltung", November 2020.
- [2] Metzger, S.; Rößler, A. (2017): Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle auf Kläranlagen in Baden-Württemberg. Tagungsband der 30. Karlsruher Flockungstage, Schriftenreihe SWW (Bd. 151), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe.
- [3] Cybulski, B.; Schwentner, G. (2017): Handbuch zur Betriebsanalytik auf Kläranlagen. Hirthammer Verlag GmbH
- [4] Weber-Ingenieure, 2021: Machbarkeitsstudie für den Ausbau einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Neckarsulm
- [5] Rößler, A.; Launay, M. (2019): Durchführung von Vergleichsmessungen zur Spurenstoffelimination beim Ausbau von Kläranlagen um eine 4. Reinigungsstufe. Abschlussbericht zum UM-Vorhaben-Nr. 367/2014
- [6] DWA (2005): Absetzvorgänge und Klarwasserabzug im SBR – Arbeitsbericht des Fachausschusses KA-5 „Absetzverfahren“, Mai 2005
- [7] Pflanz, P. (1966): Über das Absetzen des belebten Schlammes in horizontal durchströmten Nachklärbecken. Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft, TH Hannover, Heft 25
- [8] Beißwenger, N. (2022): Entwickeln eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer SBR-anlage zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen mit Pulveraktivkohle. Bachelorarbeit an der Hochschule Heilbronn.
- [9] DWA (2009): Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb (SBR). Merkblatt DWA-M 210
- [10] Weber-Ingenieure, 2021: Persönliche Erfahrungen im Zuge der Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe des Klärwerks Pforzheim
- [11] Metzger, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser, München, Oldenbourg Industrieverlag
- [12] DWA (2021): Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung. Merkblatt DWA-M 285-2