

SelektAra

Selektiver Überschussschlammabzug aus Belebungsbecken kommunaler
Abwasserreinigungsanlagen



Impressum

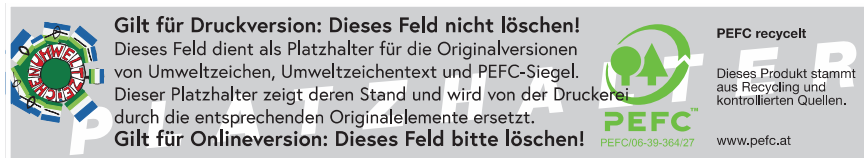
Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1010 Wien

Autorinnen und Autoren: Dipl.-Ing. Sebastian Böhler,
Ass.Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Norbert Kreuzinger,
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jörg Krampe

Gesamtumsetzung:

Fotonachweis: Dipl.-Ing. Sebastian Böhler



Wien, 2023. Stand: 26. September 2023

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft und der Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Inhalt

1 Einleitung	5
1.1 Projektziele	6
1.2 Berichtszeitraum und Inhalt des Endberichtes.....	7
2 Stand der Technik und Forschung	8
2.1 Parameter zur Beurteilung des Absetzverhaltens	8
2.1.1 Schlammindex (ISV)	8
2.1.2 Sinkgeschwindigkeit/ Absetzvorgang von Belebtschlamm	8
2.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Absetzeigenschaften	9
2.3 Trennverfahren zur selektiven Biomasseabtrennung	10
2.4 Biologische Phosphatentfernung.....	11
2.5 Schlammeindickung.....	12
2.6 Energetische Optimierung.....	13
3 Material und Methoden	16
3.1 Versuchsphasen	16
3.2 Beschreibung der untersuchten Anlagen	17
3.2.1 Pilotanlage	17
3.2.2 Großtechnische Anlage A.....	22
3.2.3 Großtechnische Anlage B.....	24
3.3 Untersuchte Parameter	25
3.3.1 Chemische Abwasserparameter	25
3.3.2 Parameter zur Bestimmung des Absetzverhaltens	26
3.3.3 Partikelgrößenverteilung	27
3.3.4 Mikroskopische Untersuchungen	27
3.3.5 Schlammeindickung.....	27
3.3.6 DNA Sequenzierung	28
3.3.7 Organische Spurenstoffe	28
3.3.8 Energetische Optimierung.....	29
3.3.9 Probenahmen	29
3.4 Berechnungsgrundlagen.....	30
3.4.1 Trockensubstanzgehalt im Bodenschlamm	30
3.4.2 Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken.....	31
4 Ergebnisse	31
4.1 Pilotanlage	34
4.1.1 Betriebliche Rahmenbedingungen	34
4.1.2 ÜSS Menge und Schlammalter	37

4.1.3	Vergleich der Systeme zum Überschussschlammabzug.....	38
4.1.4	Absetzverhalten	40
4.1.5	Partikelgrößenverteilung	50
4.1.6	Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken	51
4.1.7	Schlammeindickung	55
4.1.8	DNA Sequenzierung	58
4.1.9	Spurenstoff-Entfernung	59
4.2	Großtechnische Anlage A.....	60
4.2.1	Betriebliche Rahmenbedingungen	60
4.2.2	Absetzverhalten	64
4.2.3	Partikelgrößenverteilung	72
4.2.4	Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken	73
4.2.5	Schlammeindickung	75
4.2.6	Energetische Optimierung	78
4.3	Großtechnische Anlage B.....	81
4.3.1	Betriebliche Rahmenbedingungen	81
4.3.2	Absetzverhalten	86
4.3.3	Partikelgrößenverteilung	99
4.3.4	Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken	100
4.3.5	Schlammeindickung	102
4.3.6	Energetische Optimierung	105
5	Diskussion	108
6	Zusammenfassung.....	111
	Tabellenverzeichnis.....	113
	Abbildungsverzeichnis.....	115
	Literaturverzeichnis	118
	Abkürzungen.....	121

1 Einleitung

Die Konzentration des belebten Schlammes sowie dessen mikrobiologische Zusammensetzung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Reinigungskapazität von bestehenden Kläranlagen und sind von zentraler Bedeutung für die Dimensionierung neu zu errichtender Kläranlagen (DWA 2016). Die maximal erreichbare Schlammkonzentration wird im Wesentlichen durch die Absetzeigenschaften des Schlammes bestimmt, welche mittels Schlammindex (ISV) messtechnisch charakterisiert werden. Das Schlammalter ist ein weiterer wichtiger Parameter, der über das Vorhandensein von abbaurelevanten Mikroorganismen die Reinigungskapazität beeinflusst und üblicher Weise durch den Überschussschlammabzug aus der voll durchmischten Rücklaufschlammleitung gesteuert wird, wodurch ein Zusammenhang zwischen Absetzeigenschaften, erreichbarer Trockensubstanz und erreichbarem Schlammalter besteht. Durch den Absetzvorgang im Nachklärbecken ist bei der Überschussschlammmentnahme aus der Rücklaufschlammleitung keine Selektion des belebten Schlammes anhand seiner Absetzeigenschaften möglich, sodass die Absetzeigenschaften einen limitierenden Faktor für das erreichbare Schlammalter darstellen kann.

Um diese Limitierung zu umgehen, wurden im Rahmen des Projektes SelektAra alternative Schlammabzugsvarianten aus dem kontinuierlich durchflossenen Belebungsbecken untersucht. Aufgrund der turbulenten Bedingungen in Belebungsbecken wird wegen unterschiedlicher Absetzeigenschaften einzelner Schlammpartikel, davon ausgegangen, dass in den oberen Wasserschichten tendenziell Schlammflocken mit niedrigerer Dichte und geringerer Sinkgeschwindigkeit vorhanden sind. Durch die kontinuierliche Entfernung dieser schlechter absetzbaren Schlammfraktionen soll eine Anreicherung von Biomasse mit guten Absetzeigenschaften erreicht werden, was in weiterer Folge die Realisierung eines höheren Feststoffgehaltes im Belebungsbecken ermöglicht. Der geringere Trockensubstanzgehalt (TS) im so erhaltenen Überschussschlamm (ÜSS) führt zwar zu einer Vergrößerung des abgezogenen Volumenstroms, gleichzeitig ist dadurch aber ein Verbleib kompakterer, gut absetzbarer Schlammanteile möglich. Dadurch können zusätzliche Kapazitäten geschaffen werden ohne die Investitions- oder Betriebskosten wesentlich zu steigern. Zudem kann dadurch eine höhere Sicherheit gegen Schlammabtrieb aus dem Nachklärbecken bei Starkregenereignissen erreicht werden.

1.1 Projektziele

Das Ziel des Forschungsprojektes SelektAra ist die Erarbeitung einer Betriebsstrategie bei deren Anwendung eine Verbesserung der Absetzeigenschaften des belebten Schlammes durch selektiven Überschussschlammabzug aus dem Belebungsbecken erfolgt. Zu diesem Zweck wurden auf einer Pilotkläranlage der TU Wien sowie auf zwei großtechnischen Kläranlagen in Österreich Vorrichtungen zum selektiven Überschussschlammabzug installiert, in Betrieb genommen und über die Projektdauer untersucht. Zur Beurteilung der Absetzeigenschaften des belebten Schlammes wurden folgende Parameter herangezogen:

- Schlammindex (ISV)
- Sinkgeschwindigkeit (v_s)
- Schlammvolumenverhältnis (SV_5/SV_{30} und SV_{10}/SV_{30})

Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Partikelgrößenverteilung sowie eine mikroskopische Untersuchung der Schlammflocken.

Anhand der untersuchten Parameter erfolgte eine Abschätzung der zusätzlichen generierten Reinigungskapazität der biologischen Stufen. Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Maßnahmen wurden die untersuchten Parameter vor Inbetriebnahme des selektiven Überschussschlammabzugs (Referenzzeitraum) mit den Daten während des selektiven Überschussschlammabzugs (Versuchszeitraum) verglichen. Durch die Selektion des ÜSS sollte der ISV langfristig und dauerhaft gesenkt werden. Zusätzlich wurden im Rahmen des Projektes als weitere untergeordnete Ziele die Anpassung des Schlammalters an die Belastungssituation bzw. die Temperatur und eine damit verbundene Reduktion der Belüftungsenergie und Steigerung der Gasausbeute sowie eine gezielte Anreicherung von Phosphat akkumulierenden Organismen (PAO) verfolgt.

Ein Überschussschlammabzug aus dem Belebungsbecken hat zudem den Vorteil, dass der TS-Gehalt des belebten Schlammes und des ÜSS nahezu gleich sind und somit das Schlammalter des belebten Schlammes einfacher und genauer bestimmt werden kann. Dies erlaubt eine optimale Anpassung des erforderlichen Schlammalters an die Belastungssituation der Kläranlagen. Dadurch kann einerseits der Gehalt der Biomasse im System optimiert und die benötigte Belüftungsenergie reduziert werden. Bei einem kürzeren Schlammalter ist wiederum der Anteil der organischen Verbindungen im ÜSS, die noch nicht veratmet wurden, höher, was in einer erhöhten Biogasproduktion resultiert. In

Laborversuchen haben Mennerich et al. (2001) nachgewiesen, dass die Gasausbeute im Faulturm bei höherem Schlammalter tendenziell abnimmt. Um das energetische Optimierungspotential ganzheitlich für den Anlagenbetrieb mit selektivem Überschussschlammabzug bestimmen zu können, wurden zusätzlich der Polymerbedarf für die Eindickung des Schlammes der zwei großtechnischen Anlagen näher betrachtet.

Zudem wurde im Projekt untersucht, ob der selektive Überschussschlammabzug zur gezielten Anreicherung von Phosphat akkumulierenden Organismen (PAO) beitragen kann und somit eine Möglichkeit zur Optimierung der biologischen Phosphatentfernung bei kontinuierlich durchflossenen biologischen Anlagen darstellt.

1.2 Berichtszeitraum und Inhalt des Endberichtes

Der Berichtszeitraum des Endberichtes erstreckt sich vom Projektbeginn am 1. September 2020 bis zum Projektende am 30. Juni 2023.

Der Endbericht dient der Darstellung der Tätigkeiten und Ergebnisse im Forschungsprojekt SelektAra. Darin werden der Versuchsaufbau und der Versuchsbetrieb sowie die Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsprojektes beschrieben.

Der Endbericht gliedert sich in die Einleitung und die Projektziele in Kapitel 1. In Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Forschung zusammengefasst. In Kapitel 3 werden die Anlagen, an denen Versuche durchgeführt wurden und die angewandten Methoden näher beschrieben. In Kapitel 3.4.2.1 erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse des Forschungsprojektes. Kapitel 5 enthält eine Diskussion der Ergebnisse sowie die Ermittlung zusätzlich generierter Kapazitäten. In Kapitel 6 erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Parameter zur Beurteilung des Absetzverhaltens

2.1.1 Schlammindex (ISV)

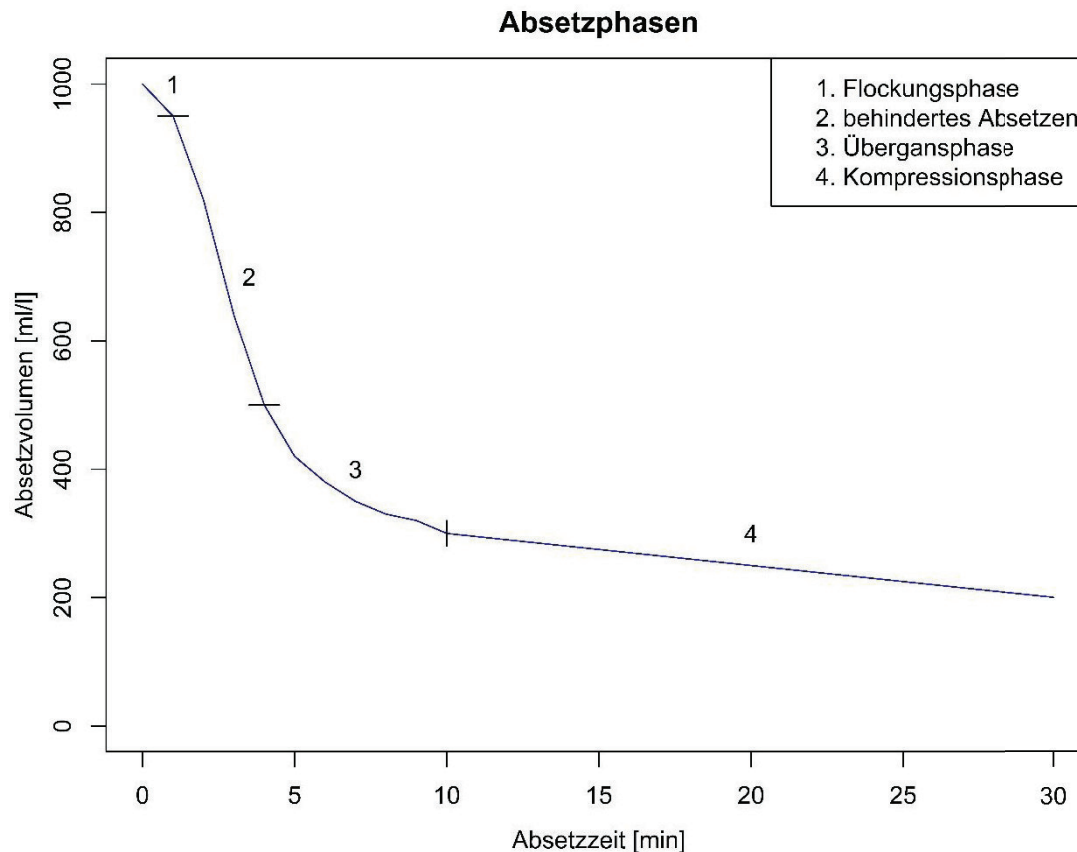
Der ISV ist definiert als das Volumen in Milliliter, das ein Gramm Schlamm nach 30 Minuten Absetzzeit einnimmt. Die Verwendung des ISV zur Beurteilung der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf die Absetzeigenschaften von belebtem Schlamm ist weit verbreitet. Da zur Berechnung des ISV nur ein Punkt der Absetzkurve verwendet wird, stellt er jedoch keine genaue Charakterisierung der Absetzeigenschaften dar. Der ISV misst keine einzelne physikalische Eigenschaft des Schlammes, sondern repräsentiert den kombinierten Einfluss mehrerer physikalischer Eigenschaften. Da der ISV Änderungen der Schlammeigenschaften nur sehr ungenau darstellt, ist seine Verwendung auf die Bestimmung von Änderungen im Betrieb einer Anlage beschränkt. Schlämme verschiedener Anlagen können damit nicht oder nur unter Einschränkungen verglichen werden (Dick & Vesilind 1969). Aufgrund der langjährigen Verwendung des ISV und der deshalb vorhandenen Erfahrungswerte ist er für die Beurteilung der Änderung der Absetzeigenschaften in dieser Arbeit dennoch gut geeignet.

2.1.2 Sinkgeschwindigkeit/ Absetzvorgang von Belebtschlamm

Laut Fitch (1979) kann der Absetzvorgang von belebtem Schlamm in vier Phasen unterteilt werden. In Phase 1 findet ein unbehindert diskretes Absetzen nicht flockiger Partikel statt. Phase 2 umfasst flockige Partikel, welche ungehindert absetzen. In den Phasen 1 und 2 wird die Sinkgeschwindigkeit durch die individuelle Sinkgeschwindigkeit der Partikel bestimmt. Merkel (1971) fasst die Vorgänge in Phase 1 und 2 als Flockungsphase zusammen. In Phase 3 kommt es zu einer Kollision der Einzelpartikel, wodurch die Sinkgeschwindigkeit nicht mehr von den einzelnen Partikeln bestimmt wird, sondern von der Absetzgeschwindigkeit des zusammengelagerten Schlammes. Da Partikel mit hoher Sinkgeschwindigkeit von Partikeln mit niedriger Absetzgeschwindigkeit aufgehalten werden, wird hierbei von einem behinderten Absetzen gesprochen. Alle Schlammpartikel setzen dabei mit der gleichen Absetzgeschwindigkeit ab. In der Kompressionsphase (Phase 4) wird auf die bereits abgesetzten Partikel durch die darüberliegenden Schlammschichten Druck ausgeübt und somit Wasser aus dieser Kompressionszone

verdrängt. Es kommt dadurch zu einer Eindickung des Schlammes. Abbildung 1 zeigt die von Merkel (1971) beschriebenen Phasen während des Absetzens in einem ein Liter Messzylinder.

Abbildung 1 Der Absetzvorgang in einem 1 l Messzylinder (adaptiert nach Merkel 1971)



2.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Absetzeigenschaften

Mehrere Parameter, die zur Bildung von belebtem Schlamm mit beständig guten Absetz- und Eindickeigenschaften beitragen, wurden von Daigger et al. (2018) beschrieben. Dazu zählen die Bereitstellung eines Substratgradienten über die Länge des Bioreaktors, kein oder nur geringe Konzentrationen von gelöstem Sauerstoff im Bereich des Zulaufs, ein Selektor im Zulaufbereich - wobei anoxisch oder anaerobe Selektoren häufiger sind - sowie eine „plug-flow“ Strömung nach dem Zulaufbereich. Zur Dimensionierung der Selektoren wird das Konzept der kinetischen und metabolischen Selektion angewandt. In granulären Schlammssystemen werden zusätzliche selektive Drücke wie eine beschränkte

Absetzzeit angewendet, die dazu führen soll, weniger dichten Schlamm aus dem System abzuziehen. In der Arbeit von Daigger et al. (2018), die drei Anlagen mit hervorragend absetzenden Schlämmen miteinander vergleicht, wird als Gemeinsamkeit der Anlagen zusätzlich eine moderat lange Feststoffverweilzeit sowie in einem gewissen Rahmen das Länge zu Breite Verhältnis der Becken erwähnt. Der Einfluss der Abwassereigenschaften auf die Absetzeigenschaften der Schlämme der drei Anlagen wurde nicht diskutiert.

2.3 Trennverfahren zur selektiven Biomasseabtrennung

Eine Möglichkeit zur selektiven Biomasseabtrennung beruht auf dem Einsatz von Hydrozyklonen und wird zur selektiven Trennung nach der Schlammstruktur angewendet. Durch den gezielten Austrag langsam sedimentierbarer Biomasse soll beim S::Select-Verfahren Schlamm angereichert werden, welcher ausgesprochen gute Absetzeigenschaften aufweist und eine Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung ermöglicht. Ursprünglich wurde das Verfahren zur Bekämpfung von Blähschlamm und zur Senkung des ISV entwickelt. Es wurden mindestens zehn Anlagen mit dem S::Select-Verfahren erweitert (Sepúlveda-Mardones et al. 2019). Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass trotz intensiver mechanischer Vorreinigung der Eintrag größerer Abwasserinhaltsstoffe in die Belebung nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann und somit eine hohe Tendenz zur Verstopfung der Hydrozyklone besteht. Welling (2015) untersuchte den Einfluss von Hydrozyklonen auf die Absetzeigenschaften und die biologische Phosphatentfernung an einer kommunalen Kläranlage. Die lediglich geringfügig erhöhte biologische Phosphatentfernung wurde mit der Kürze des Untersuchungszeitraums erklärt.

Roche et al. (2021) setzten auf der kommunalen Kläranlage Dijon ebenfalls Hydrozyklone zur Anreicherung verdichteter Biomasse und Bildung von Granular-Flocken Hybriden ein, um den Schlammindex zu senken und zu stabilisieren. Dazu wurden Hydrozyklone in der Rücklaufschlammleitung verbaut und der Überlauf als Überschussschlamm abgezogen. Dabei wurde eine langfristige Verringerung des ISV von >200 ml/g auf < 50 ml/g erreicht und der jährlich beobachtete Anstieg des ISV effektiv verhindert. Zusätzlich konnte auch die Ablaufqualität bei hohen Durchflüssen verbessert werden.

Neben Hydrozyklonen werden auch Siebe im Bereich der Abwasserreinigung eingesetzt, um Schlammabtrieb zu vermeiden oder spezielle Schlammstrukturen im System anzureichern. Als Beispiel kann der Einsatz von Trommelsieben auf der Kläranlage des

AWV Achenal-Inntal-Zillertal in Strass im Zillertal genannt werden, wobei hier der Rückhalt und die Anreicherung von Anammox-Bakterien erfolgt. Um eine Selektion des Schlammes über ein Sieb vornehmen zu können, muss bereits ein deutlicher Größenunterschied der avisierten Schlammstrukturen vorliegen. Die Trennschärfe kann dabei lediglich über die Anpassung der Maschenweite des Siebs variiert werden (Korrespondenz Kläranlage des AWV Achenal-Inntal-Zillertal).

Eine weitere Möglichkeit, die auf der Trennung des Schlammes nach Dichte oder Sinkgeschwindigkeit beruht, ist die hydraulische Selektion. Maltos et al. (2020) untersuchten den selektiven Überschussschlammabzug in einer Sequenz Batch Reaktor-Anlage (SBR-Anlage) durch Dekantierung mittels getauchter Abzugsrohre mit einer definierten Pumpleistung. Damit erreichten sie eine Verbesserung des ISV des Schlammes von 280 ml/g auf unter 50 ml/g.

In den vergangenen Jahren wurden zunehmend Anlagen gebaut, welche auf dem Einsatz von aerob granuliertem Schlamm basieren. Dieses Verfahren hat sich vor allem für SBR-Anlagen bewährt. Großtechnische Anlagen, die aerob granulierten Schlamm verwenden, werden meist mit dem Nereda-Verfahren betrieben, bei dem die gezielte Entnahme von flockigem Schlamm aus der oberen Schicht des abgesetzten Schlammбетtes erfolgt (Jahn et al. 2017).

Ansätze der selektiven Schlammentnahme aus kontinuierlich durchflossenen Belebungsanlagen ist bisher jedoch begrenzt. Strategien zur selektiven Entnahme von ÜSS aus dem Belebungsbecken, wie sie auch von Jahn et al. (2017) untersucht wurden, könnten auch wesentlich zur Weiterentwicklung der aeroben Granulierung in kontinuierlich durchflossenen Anlagen beitragen. Die im Rahmen des Projektes SelektAra untersuchten Verfahren zum selektiven Abzug der Biomasse aus kontinuierlich durchflossenen Belebungsbecken sind einfach zu implementieren und ihre Umsetzung bedarf nur geringer Investitionskosten.

2.4 Biologische Phosphatentfernung

Das im Abwasser vorhandene Phosphat wird im Zuge der biologischen Reinigung teilweise von den in Kläranlagen vorhandenen Organismen zum Biomasseaufbau verwendet und so aus der wässrigen Phase entfernt. Weiters finden auch eine Adsorption an den Belebtschlammflocken sowie Fällungsmechanismen statt, die den Phosphatgehalt des

Abwassers verringern (Hosang & Bischof, 1998). Auf den meisten großtechnischen Kläranlage in Österreich werden zur Verringerung des Phosphatgehalts im Abwasser zusätzlich Eisen- oder Aluminiumsalze als Fällmittel dosiert.

Phosphat akkumulierende Organismen (PAO) können bei einem wiederholten Wechsel von anaeroben und aeroben Verhältnissen mehr Phosphat aufnehmen als für den Biomasseaufbau benötigt wird und Polyphosphate als Energiespeicher nutzen. Dadurch kann eine ausreichende Phosphatentfernung ohne den Einsatz von Fällmitteln erreicht werden. Unter anaeroben Bedingungen wird gespeichertes Polyphosphat als Energiequelle für die Bildung von ATP verwendet und dabei rückgelöst. Das ATP wird weiters für die Aufnahme von leicht abbaubaren organischen Substanzen wie Fettsäuren und die anschließende Bildung von Polyhydroxyalkanoate (PHA) durch die Umwandlung von Glycogen genutzt. Unter aeroben oder anoxischen Bedingungen wird das PHA als Substrat genutzt. Zusätzlich zum Aufbau von Biomasse wird in diesen Phasen auch der Polyphosphat- und Glycogenspeicher der Organismen wieder aufgefüllt, was zu der sogenannten „Luxusaufnahme“ von Phosphat führt (van Loosdrecht et al. 1997) - es wird deutlich mehr Phosphat aufgenommen, als physiologisch notwendig. Das in der Biomasse gespeicherte Phosphat wird mit dem Schlamm bei der Überschussschlammmentnahme aus dem System entfernt.

Laut Bassin et al. (2012) fördert der Wechsel zwischen anaerober und aerober Phase ebenfalls das Wachstum von Glykogen akkumulierenden Organismen (GAO) welche mit PAO in Konkurrenz um vorhandenes organisches Substrat stehen, jedoch keine erhöhte biologische Phosphatentfernung bewirken. Untersuchungen von Bassin et al. (2012) und Winkler et al. (2011) haben gezeigt, dass GAO hältiger Schlamm auf Grund seiner geringeren Dichte im Vergleich zu PAO hältigem Schlamm durch selektive Überschussschlammabzug aus SBR-Anlagen gezielt entfernt werden kann. Dies wirkt sich positiv auf das PAO/GAO Verhältnis aus und kann die biologische Phosphatentfernung fördern. Somit sollte eine Anreicherung von PAO durch selektiven Überschussschlammabzug möglich sein.

2.5 Schlammeindickung

Untersuchungen von Mikkelsen et al. (2001) zur Schlammmentwässerung haben gezeigt, dass das optimale Polymer zu TS Verhältnis bei steigendem TS-Gehalt ebenfalls ansteigt. Dies hängt mit der höheren Trübung auf Grund des stärkeren Flockenabriebes durch

Scherkräfte bei höheren TS-Konzentrationen zusammen. Im Forschungsprojekt SelektAra wurde deshalb untersucht, ob ein ähnlicher Effekt bei der Eindickung von Überschussschlamm zu beobachten ist. Dies würde sich positiv auf die zur Eindickung benötigte Polymermenge und damit auf die Kosten des gesamten Prozesses auswirken.

2.6 Energetische Optimierung

In biologischen Stufen ist zur Sicherstellung der Nitrifikationsleistung ein minimales Schlammalter einzuhalten. Die Bestimmung des Bemessungsschlammalters einer Anlage erfolgt in Abhängigkeit der Bemessungstemperatur, für Anlagen mit Nitrifikation und Denitrifikation laut DWA (2016) nach Formel 1.

Formel 1 Bemessungsschlammalter für Anlagen mit Nitrifikation und Denitrifikation DWA (2016)

$$t_{TS,Bem} = PF * 3,4 * 1,103^{(15-T)} * \frac{1}{1 - (V_D/V_{BB})}$$

- $t_{TS,Bem}$ Bemessungsschlammalter [d]
- PF Prozessfaktor
- T Temperatur [°C]
- V_D Denitrifikationsvolumen [m³]
- V_{BB} Belebungsbeckenvolumen [m³]

Der Prozessfaktor ist dabei von der Ausbaugröße der Anlagen abhängig. Der Wert V_D/V_{BB} beschreibt das Verhältnis des Volumens von unbelüfteten Zonen zum Volumen des gesamten Belebungsbeckens.

Im Betrieb wird das Schlammalter über den ÜSS-Abzug geregelt und errechnet sich nach Formel 2.

Formel 2 Betriebsschlammalter DWA (2016)

$$t_{TS} = \frac{TS_{BB} * V_{BB}}{TS_{ÜSS} * Q_{ÜSS}}$$

- t_{TS} Betriebsschlammalter [d]
- TS_{BB} Trockensubstanz Belebungsbecken [g/l]
- V_{BB} Belebungsbeckenvolumen [m³]
- $TS_{ÜSS}$ Trockensubstanz Überschussschlamm [g/l]
- $Q_{ÜSS}$ Überschussschlammmenge [m³/d]

Die genaue Ermittlung der abgezogenen Schlammmenge gestaltet sich im Betrieb schwierig da der TS-Gehalt, des üblicherweise über die Rücklaufschlammleitung entnommenen ÜSS, nicht genau bekannt ist. Dies liegt an hydraulischen Veränderungen während des ÜSS-Abzuges. In der Praxis erfolgt der Betrieb der Anlagen deshalb meist über den TS-Gehalt im Belebungsbecken. Dieser wird üblicherweise konstant gehalten. Dadurch kommt es bei höheren Temperaturen als die Bemessungstemperatur bzw. bei geringen Belastungen häufig zu Überkapazitäten in der Belebung und in der Folge zu einer aeroben Teilstabilisierung.

Durch den selektiven ÜSS-Abzug aus dem Belebungsbecken kann das Schlammalter, wie in Formel 3 verdeutlicht, ohne Kenntnis der TS-Werte anhand der abgezogenen ÜSS-Menge berechnet werden.

Formel 3 Betriebsschlammalter bei $TS_{BB} = TS_{ÜSS}$ DWA (2016)

bei $TS_{BB} = TS_{ÜSS}$
$$t_{TS} = \frac{V_{BB}}{Q_{ÜSS}}$$

- t_{TS} Betriebsschlammalter [d]
- TS_{BB} Trockensubstanz Belebungsbecken [g/l]
- $TS_{ÜSS}$ Trockensubstanz Überschussschlamm [g/l]
- V_{BB} Belebungsbeckenvolumen [m³]
- $Q_{ÜSS}$ Überschussschlammmenge [m³/d]

Durch die genaue Kenntnis des Schlammalters wird ein Betrieb der Anlagen nach dem Schlammalter ermöglicht. Dadurch kann das Belebungsbecken in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastung mit einem geringeren TS-Gehalt bzw. Schlammalter betrieben werden. Durch die geringere Schlammmenge im System kann in weiterer Folge Belüftungsenergie eingespart werden.

Der abgezogene ÜSS wird in weiteren Behandlungsschritten aerob oder anaerob stabilisiert. Bei der anaeroben Stabilisierung im Faulbehälter ist die Gasproduktion abhängig von dem Anteil der noch nicht veratmeten organischen Verbindungen im ÜSS. In Laborversuchen haben Mennerich et al. (2001) nachgewiesen, dass die Gasproduktion im Faulturm mit steigendem Schlammalter abnimmt. Ein unnötig hohes Schlammalter im Belebungsbecken reduziert damit die Gasausbeute im Faulturm wodurch weniger Energie aus den Abwasserinhaltsstoffen zurückgewonnen werden kann.

3 Material und Methoden

Der Einfluss des selektiven Überschussschlammabzuges aus kontinuierlich durchflossenen Belebungsanlagen wurde an der Pilotanlage der TU Wien sowie auf zwei großtechnischen Anlagen in Österreich untersucht. Der Versuchsbetrieb sowie die technische Ausführung der Anlagen und der Überschussschlammabzugssysteme werden nachfolgend beschrieben. Zudem sind weitere detailliertere Angaben zu den durchgeführten Probenahmen, den chemischen und biologischen Analysen sowie der Auswertung der erhaltenen Daten gegeben.

3.1 Versuchsphasen

Der in diesem Bericht betrachtete Versuchsbetrieb unterteilte sich in zwei Versuchsphasen.

- Phase A: stellt den Referenzzeitraum dar, in dem die Anlagen in herkömmlicher Weise betrieben wurden und Daten über den Ist-Zustand erhoben wurden.
- Phase B: stellt den Versuchszeitraum dar, in dem der Schlammabzug selektiv erfolgte. Die Versuchsphase A wurde für die Pilotanlage und die großtechnische Anlage A in die Versuchsphasen A1 und A2 unterteilt. Bei der großtechnischen Anlage A inkludierte A1 die Daten der Vorjahre. Versuchsphase A2 ist der Referenzzeitraum nach Beendigung der Versuchsphase B. Die Versuchsphase B wurde für die Pilotanlage weiter in die Versuchsphasen B1 bis B4 unterteilt. In diesen Versuchsphasen wurden unterschiedliche Abzugsphasen und Systeme zum Überschussschlammabzug untersucht. Die Versuchsphasen B1 und B4 wurden weiter in die Versuchsphasen B1.1 und B1.2 sowie in die Versuchsphasen B4.1 und B4.2 unterteilt, um den ÜSS-Abzug mittels Steigrohres (B1) und die Auswirkung eines reduzierten Schlammalters auf die Entfernung von organischen Spurenstoffen (B4) zu untersuchen.

Bei den beiden großtechnischen Anlagen wurden zu Vergleichszwecken auch Betriebsdaten vorangegangener Jahre betrachtet.

Nachfolgend sind die Zeiträume der Versuchsphasen A und B der verschiedenen Anlagen in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1 Untersuchungszeiträume

Phasen Pilotanlage	Zeitraum Pilotanlage	Phasen Großtechnische Anlagen	Zeitraum Anlage A	Zeitraum Anlage B
A1	28.02.2021 - 22.03.2021	A1	01.01.2018 - 25.04.2021	01.01.2018 - 02.01.2023
B1.1	23.03.2021 - 22.07.2021	B	26.04.2021 - 24.04.2022	03.02.2023 - 20.04.2023
B2	23.07.2021 - 16.02.2022			
B3	17.02.2022 - 27.06.2022			
B4.1	28.06.2022 – 28.11.2022			
B4.2	29.11.2022 – 18.12.2022			
A2	19.12.2022 - 26.03.2023	A2	25.04.2022 - 25.04.2023	-
B1.2	27.03.2023 - 30.05.2023			

3.2 Beschreibung der untersuchten Anlagen

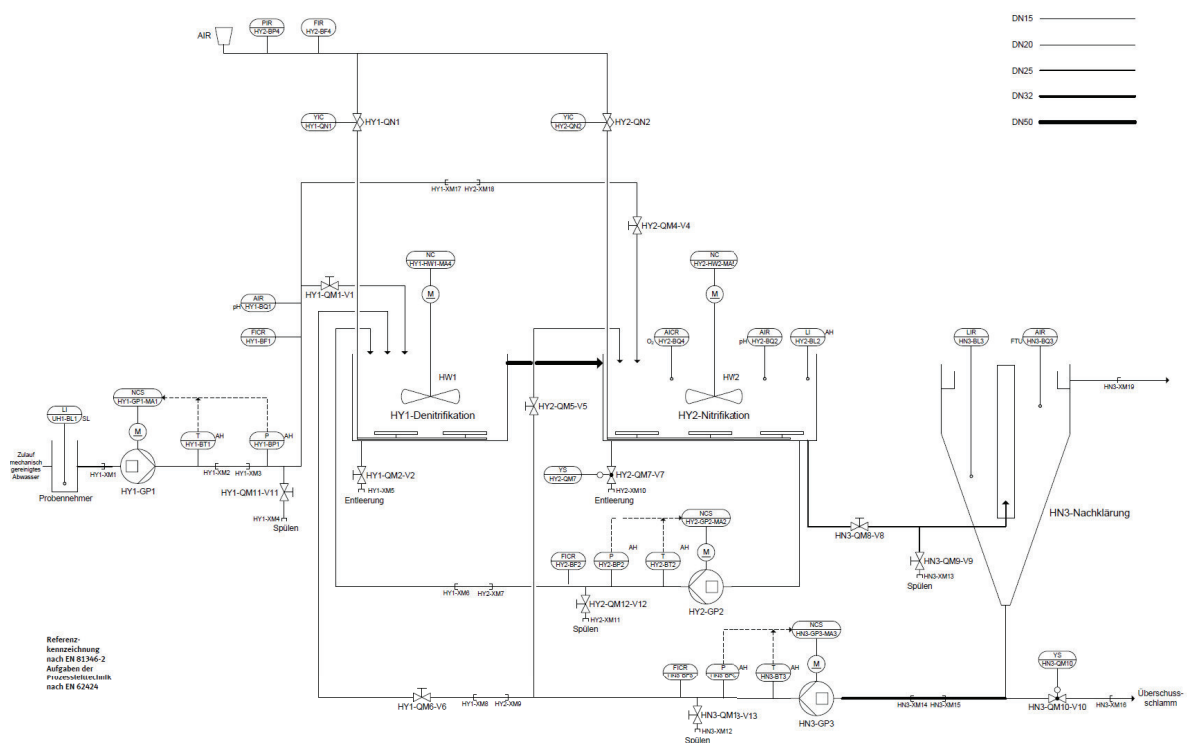
3.2.1 Pilotanlage

Die Pilotkläranlage der TU Wien hat eine Ausbaupazität von 1,7 EW und wird mit kommunalem Abwasser aus einem kommunalen Sammelkanal der Stadt Wien beschickt. Die Entnahme des Abwassers aus dem Kanal erfolgt mittels eines stationären Probenehmers der Fa. Maxx (SP5 S1, Deutschland). Vor der Entnahmestelle ist ein Filterrohr mit 8 mm Bohrungen zur Entfernung von groben Schmutzstoffen angeordnet. Das Abwasser wird in einem 50 Liter Tank zwischengespeichert, in dem grobe partikuläre Stoffe durch Sedimentation abgeschieden werden. Von dort wird das mechanisch vorgereinigte Abwasser mittels Excenterschneckenpumpe der Fa. Netzsch (Deutschland) in die biologische Stufe befördert. Diese besteht aus einem vorgeschalteten Denitrifikationsbecken mit anaerobem Selektor und einem Gesamtvolumen von rund 0,085 m³, einem Nitrifikationsbecken mit einem Volumen von rund 0,12 m³ und einem Nachklärbecken mit einem Volumen von rund 0,166 m³. Das Denitrifikations- und das Nitrifikationsbecken sind mit Rührwerken der Fa. SEW-Eurodrive (Deutschland) ausgestattet, die für die nötige Durchmischung der Becken sorgen. Der anaerobe Selektor in der vorgeschalteten Denitrifikation fungiert gleichzeitig als Becken für die biologische

Phosphatentfernung und wird mittels Impulsbelüftung und Rührwerken umgewälzt. Er hat ein Volumen von rund 0,018 m³. Die Belüftung des Nitrifikationsbeckens erfolgt mit einem Membran-Tellerbelüfter der Fa. Supratec (OXYFLEX MT235, Deutschland) mit einem Durchmesser von 235 mm. Die Belüftung erfolgt intermittierend mit einer 40-minütigen Belüftungsphase und einer anschließenden unbelüfteten Phase von ebenfalls 40 Minuten um einen höheren anoxischen Anteil zu erreichen und damit eine bessere Stickstoffentfernung zu erzielen. Der Zulauf zur Anlage wird über den Tag konstant gehalten und beträgt im Mittel 15 l/h. Der Ablauf aus dem Nachklärbecken erfolgt über eine Zahnschwelle und wird wieder in das Kanalnetz der Stadt Wien eingeleitet.

Die Inbetriebnahme der Pilotanlage für dieses Projekt erfolgte im November 2020 mit rund 100 Liter belebtem Schlamm aus einer nahegelegenen kommunalen Kläranlage. In Abbildung 2 sind ein Fließbild sowie ein Foto der Pilotanlage dargestellt.

Abbildung 2 Fließbild der Pilotanlage (Fa. Adiro 2015, oben) und Foto der Pilotanlage (unten)





Zur Betriebsüberwachung und zur Prozessregelung sind mehrere Sonden in der Pilotanlage verbaut. Im Zulauf zur biologischen Stufe sind eine elektrische Leitfähigkeitssonde (Momosens CLS82D) sowie eine pH-Sonde (Orbisint CPS11D) der Firma Endress + Hauser (Schweiz) vorhanden. In dem Nitrifikationsbecken der biologischen Stufe ist ebenfalls eine pH-Sonde gleicher Bauart, eine Trübungssonde (Turbimax CUS51D) sowie eine Sauerstoffsonde (Oxymax COS61D) der Firma Endress + Hauser verbaut. Das Nachklärbecken verfügt über eine Pegelsonde (Prosonic T) von Endress + Hauser. Die pH-Sonden, die Sauerstoffsonde und die Trübungssonde verfügen zusätzlich über Temperaturfühler. Die Messgenauigkeit der Sonden wird wöchentlich durch Vergleichsmessungen mit Handsonden überprüft.

Der Abzug des ÜSS erfolgte sowohl in Versuchsphase A als auch in Versuchsphase B direkt aus dem Nitrifikationsbecken. In Versuchsphase A wurde der ÜSS durch Entnahme einer voll durchmischten Probe, die über die gesamte Tiefe des Belebungsbeckens entnommen wurde, realisiert. In Versuchsphase B wurde der selektive Überschussschlammabzug über zwei mögliche Systeme untersucht. In Versuchsphase B1.1 und B1.2 erfolgte der Überschussschlammabzug über ein Steigrohr mit definierter Aufstiegsgeschwindigkeit (Abbildung 3 oben). In Versuchsphase B2 bis B4 erfolgte die Entnahme des ÜSS über eine

getauchte Rinne mit Zahnschwelle aus den oberen Wasserschichten (Abbildung 3 unten;Tabelle 2). In beiden Fällen erfolgte der Abzug mittels einer Schlauchquetschpumpe (ISMATEC ecoline, Schweiz). Der ÜSS wurde in einem Tank zwischengespeichert und durch die Analyse einer Tagesmischprobe charakterisiert. In den Versuchsphasen B1 bis B4 wurde kontinuierlich zwischen 3-5 h/d ÜSS abgezogen.

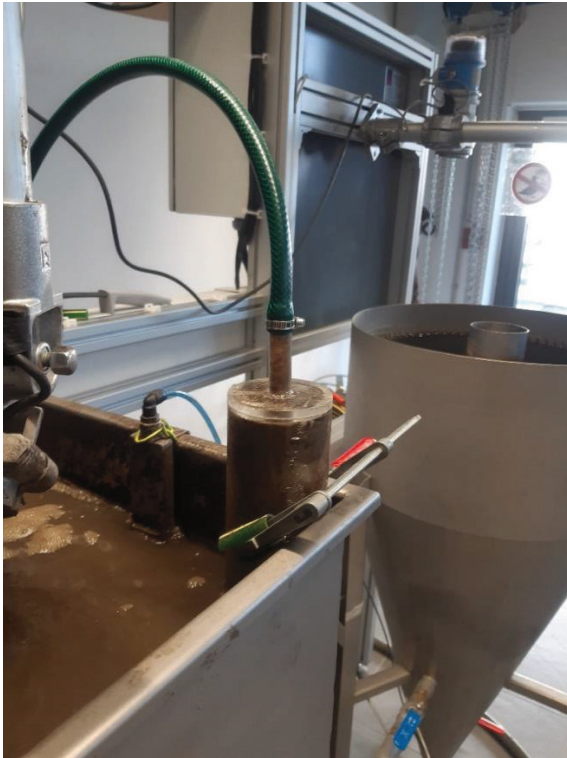
Zeitgleich mit dem Einbau der Rinne für den Überschussschlammabzug wurde auch der Zufluss in das Nachklärbecken umgestellt. Während vor dem Einbau der Rinne der Zufluss ins Nachklärbecken über einen Bodenauslass des Nitrifikationsbeckens erfolgte, wurde in Versuchsphase B2 ein Teil der Rinne zur Weiterleitung des Schlammes in das Nachklärbecken genutzt außerdem erfolgten gegen Ende der Versuchsphase B2 Umbauarbeiten am anaeroben Selektor. In Versuchsphase B3 wurde der Ablauf ins Nachklärbecken umgestellt und erfolgte wieder über den Bodenablass des Nitrifikationsbeckens. In Versuchsphase B4 erfolgte eine Umstellung des ÜSS-Abzuges auf ein automatisiertes System. Des Weiteren erfolgte der ÜSS-Abzug in Versuchsphase B4 ausschließlich in der unbelüfteten Phase um die Selektionsleistung zu erhöhen. Die Versuchsaufbauten in den unterschiedlichen Versuchsphasen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Versuchsaufbauten in den unterschiedlichen Versuchsphasen der Pilotanlage

Phasen	Versuchsaufbau
A1	ÜSS Entnahme über die gesamte Tiefe des Belebungsbeckens
B1.1	ÜSS Entnahme mittels Steigrohres; Aufstiegs- < mittlere Absetzgeschwindigkeit
B2	ÜSS Entnahme über getauchte Rinne aus oberer Wasserschicht; Zufluss ins NKB über getauchte Rinne
B3	ÜSS Entnahme über getauchte Rinne aus oberer Wasserschicht; Zufluss ins NKB über Bodenablass
B4.1	ÜSS Entnahme über getauchte Rinne aus oberer Wasserschicht in unbelüfteter Phase; hohes Schlammalter
B4.2	ÜSS Entnahme über getauchte Rinne aus oberer Wasserschicht in unbelüfteter Phase; niedriges Schlammalter
A2	ÜSS Entnahme über die gesamte Tiefe des Belebungsbeckens
B1.2	ÜSS Entnahme mittels Steigrohres; Aufstiegs- > mittlere Absetzgeschwindigkeit

Um den optimalen Zeitpunkt für die Überschussschlamm-entnahme aus der Rinne zu bestimmen, wurden Messungen des Trockensubstanzgehaltes (TS), des organischen Trockensubstanzgehaltes (oTS) und der Sinkgeschwindigkeit (v_s) durchgeführt. Dabei wurden die Entnahme während der belüfteten Phase, die Entnahme zehn Minuten nach Ende der belüfteten Phase und die Entnahme 30 Minuten vor der belüfteten Phase einer durchgehenden Entnahme des ÜSS gegenübergestellt. In Abbildung 3 sind die getauchte Rinne sowie das Steigrohr dargestellt.

Abbildung 3 Steigrohr zur Überschussschlammmentnahme (oben) und Rinne mit Zahnschwelle zum Überschussschlammabzug (unten)



3.2.2 Großtechnische Anlage A

Die großtechnische Anlage A besteht aus einer mechanischen Reinigungsstufe mit Rechen und Sandfang sowie einer biologischen Stufe und hat eine Ausbaupazität von

54.000 EW. Die biologische Stufe besteht aus zwei parallelen Umlaufbecken mit simultaner Denitrifikation und einem Volumen von jeweils 3250 m³ sowie zwei Nachklärbecken mit jeweils 4110 m³ Fassungsvermögen. Die Belüftung der Belebungsbecken erfolgt durch Oberflächenbelüfter. Der Rücklaufschlamm der beiden Umlaufbecken wird zusammen über eine Rohrleitung in den Zulauf der Belebungsbecken rückgeführt. Bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des selektiven Überschussschlammabzuges erfolgte die Entnahme des ÜSS aus dieser Rücklaufschlammleitung. Die weitergehende Behandlung des ÜSS erfolgt auf einer nahegelegenen Kläranlage.

Während der Versuchsphase A erfolgte der Überschussschlammabzug der großtechnischen Anlage A aus der voll durchmischten Rücklaufschlammleitung. Der selektive Überschussschlammabzug in Versuchsphase B wurde über zwei geschlitzte Tauchrohre, die rund 10 cm unter der Trockenwetterwasseroberfläche in einem der beiden Belebungsbecken installiert wurden, realisiert. Die beiden Tauchrohre münden in einen versenkten Betonschacht aus dem der ÜSS mittels einer Tauchpumpe entnommen wird. Die geschlitzten Tauchrohre sind in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4 Geschlitzte Tauchrohre zur Überschussschlammmentnahme auf der großtechnische Anlage A



Aufgrund von technischen Gebrechen der Pumpen, die für die Entleerung des Betonschachtes verwendet wurden, musste in mehreren Zeiträumen zwischen August und Oktober 2021 eine Hälfte des ÜSS wie bisher aus der Rücklaufschlammleitung entnommen werden. Die restliche Menge wurde durch die geschlitzten Rohre abgezogen.

3.2.3 Großtechnische Anlage B

Die großtechnische Anlage B verfügt über eine mechanische Reinigungsstufe mit Rechen, Sandfang und Vorklärung. Die biologische Stufe besteht aus zwei Becken für die biologische Phosphatentfernung mit einem Volumen von jeweils 1137 m³ sowie zwei Umlaufbecken mit simultaner Denitrifikation und jeweils 6958 m³. Nach den Belebungsbecken sind zwei runde Nachklärbecken mit einem Durchmesser von jeweils 35 m angeordnet. Die Anlage hat eine Ausbaupkapazität von 75.000 EW. Die Belüftung der Becken erfolgt mittels Druckbelüftung. Der Rücklaufschlamm beider Becken wird

gemeinsam gesammelt und in die biologische Stufe rückgeführt. Der ÜSS wird aus der voll durchmischten Rücklaufschlammleitung entnommen. Der anfallende ÜSS wird auf der Anlage anaerob behandelt.

In KW 5 2023 erfolgte die Umstellung auf den selektiven ÜSS-Abzug. Ab diesem Zeitpunkt erfolgte der ÜSS-Abzug über ein geschlitztes Tauchrohr, das vor dem Ablauf ins Nachklärbecken in einem der beiden Belebungsbecken platziert wurde. In Versuchsphase A erfolgte der ÜSS-Abzug, wie auf der großtechnischen Anlage A, aus der voll durchmischten Rücklaufschlammleitung.

Die Inbetriebnahme des selektiven ÜSS-Abzuges auf der großtechnischen Anlage B sollte eigentlich schon im Frühjahr 2022 erfolgen. Auf Grund von Betriebsproblemen, Engpässen bei der Lieferung von Bauteilen und Verzögerungen bei notwendigen Gebrechensbehebungen verzögerte sich die Inbetriebnahme jedoch bis KW 5 2023.

3.3 Untersuchte Parameter

3.3.1 Chemische Abwasserparameter

Die verwendeten Methoden zur analytischen Bestimmung der chemischen Abwasserparameter sind in Tabelle 3 angeführt. Sämtliche Abwasser- und Schlammproben der Pilotanlage wurden im Labor des Instituts für Wassergüte und Ressourcenmanagement der TU Wien analysiert.

Tabelle 3 Chemische Abwasserparameter

Analytische Bestimmung	Bezeichnung	DIN Vorschrift
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	DIN 38409-43 und DIN ISO 15705
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff	DIN EN ISO 11732
NO _x -N	Nitrat-Stickstoff + Nitrit-Stickstoff	DIN EN ISO 13395
NO ₂ -N	Nitrit-Stickstoff	DIN EN ISO 13395
PO ₄ -P	Ortho-Phosphat	DIN EN ISO 6878
TP	Gesamt-Phosphor	DIN EN ISO 6878
TN _b	Gesamt-Stickstoff	DIN EN ISO 11905-1
TS	Trockensubstanz	DIN 38409-1
oTS	Organische Trockensubstanz	DIN EN 12879C

3.3.2 Parameter zur Bestimmung des Absetzverhaltens

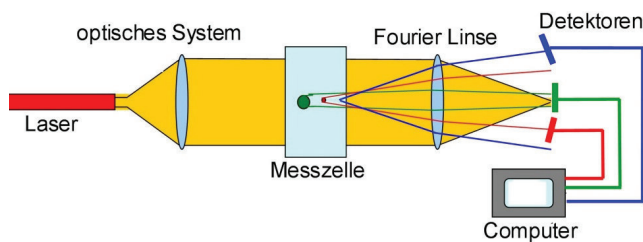
Das Absetzverhalten der unterschiedlichen Schlämme wurde anhand der Sinkgeschwindigkeit (v_s), des Schlammindex (ISV) und des Verhältnisses zwischen den Schlammvolumen nach 5 (SV₅) und 30 Minuten (SV₃₀) sowie nach 10 (SV₁₀) und 30 Minuten (SV₃₀) bewertet. Das Schlammvolumenverhältnis zeigt den Anteil des Endabsetzvolumens, das nach 5 bzw. 10 Minuten erreicht werden kann. Die Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit sowie des Schlammvolumens erfolgte in einem 35 cm hohen Standzylinder mit einem Durchmesser von 6 cm mit verdünnter Probe. Zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit wurden die Schlamm Spiegel in ml in den ersten zehn Minuten der Messung, während der Phase des behinderten Absetzens, herangezogen. Der Schlammindex wurde aus dem verdünnten Schlammindex berechnet.

Für die Beurteilung des Absetzverhaltens wurden bei der Auswertung die Daten am Anfang jeder Versuchsphase, die im Bereich von drei mittleren Schlammaltern der jeweiligen Versuchsphasen lagen, entfernt, um der Anpassung des Schlammes an die veränderten Bedingungen Rechnung zu tragen. In Versuchsphase A1 und B4.2 der Pilotanlage wurden nur die Daten die innerhalb eines Schlammalters lagen entfernt, da in Phase A1 keine Veränderung der Betriebsbedingungen stattfand und aufgrund der kurzen Dauer von Versuchsphase B4.2.

3.3.3 Partikelgrößenverteilung

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte mit einem Laser-Beugungsmessgerät (Mastersizer 2000) der Fa. Malvern (Vereinigtes Königreich). Die Messung der Partikelgrößenverteilung beruht auf dem Prinzip der Laserdiffraktometrie. Ein Laserdiffraktometer besteht aus einer Lichtquelle (Laser), einem Linsensystem, welches den Laserstrahl aufweitet um die gesamte Probe beleuchten zu können, der Messzelle mit der Probe, einer Fourierlinse sowie einem Detektorsystem. Die in Wasser dispergierte Probe wird in der Messzelle beleuchtet und die Beugungsmuster mittels Fourierlinse auf das Detektorsystem gebündelt. Mit Hilfe einer Software erfolgt aus den Beugungsmustern bzw. aus den entstandenen Interferenzmustern die Berechnung der Partikelgröße. Die so gewonnenen Messergebnisse werden als Verteilungskurve angegeben (Keck 2009). Die verwendeten Größenklassen werden standardmäßig vom Messgerät vorgeschlagen. Der schematische Aufbau eines Laserdiffraktometers ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5 Schematischer Aufbau eines Laserdiffraktometers (Keck 2009)



3.3.4 Mikroskopische Untersuchungen

Die mikroskopischen Untersuchungen des Schlammes wurden mit einem Mikroskop der Firma Leica (Leica DMi8, Deutschland) mit Objektiven mit 10-, 20- und 40-facher Vergrößerung mit Phasenkontrast und Interferenzkontrast durchgeführt.

3.3.5 Schlammeindickung

Zur Bestimmung des Polymerbedarfs bei der Eindickung wurden Laborversuche mit Schlämmen aller drei Anlagen durchgeführt. Dabei wurde der erreichbare TS-Gehalt durch 30 Minuten statische Eindickung in einem Standzylinder, die Trübung des Überstandes sowie die Filtergeschwindigkeit der Schlämme bei Unterdruck bei unterschiedlichen

Polymermengen ermittelt. Untersucht wurden dabei selektiv abgezogener ÜSS mit einem geringen TS-Gehalt sowie Referenz-ÜSS mit einem höheren TS-Gehalt. Der höhere TS-Gehalt des Referenz-ÜSS wurde durch Entnahme aus der Rücklaufschlammleitung der Anlagen oder durch zwei stündiges Statisches Eindicken mit anschließendem Verwerfen des Überstandes erzielt. Die Polymere und Ausgangsdosierungen der Polymere wurden anhand der derzeit auf den Anlagen verwendeten Dosierungen und Polymeren gewählt. Da die Eindickung des ÜSS der großtechnischen Anlage A nicht direkt auf der Anlage passiert wurde die Dosierungen und das Polymer der Anlage verwendet, die die Eindickung übernimmt.

Es ist zu erwähnen, dass auf der großtechnischen Anlage B im Betrieb zusätzlich zum ÜSS auch Primärschlamm eingedickt wird. Gegenstand der Untersuchungen zum Eindickverhalten war jedoch nur der ÜSS.

3.3.6 DNA Sequenzierung

Die DNA Amplikonsequenzierung wurde über den gesamten Projektzeitraum an fünf Proben durchgeführt, um Veränderungen in der Bakteriengemeinschaft und Veränderungen des PAO/ GAO Verhältnisses der Schlämme bestimmen zu können. Es wurden Proben aus den Versuchsphasen A1, B1.1, B2, B3 und B4 untersucht. Nach der DNA-Extraktion der Proben wurde die V3-V4 Region des bakteriellen 16sRNA Gens mittels Illumina MiSeq sequenziert und die Sequenzdaten anschließend bioinformatisch analysiert. Die Veränderung des PAO/ GAO Verhältnisses wurde ausschließlich an der Pilotanlage der TU Wien untersucht.

Die Amplikon-Sequenzvarianten (ASVs) wurden mit dem DADA2 R-Paket abgeleitet und die Zuordnung der Bakterien mit der SILVA Datenbank SSU Ref. NR. 99 Release 138.1 durchgeführt.

3.3.7 Organische Spurenstoffe

Die Extraktion der Spurenstoffe erfolgte durch eine Online Festphasenextraktion (Online SPE) mit einer Phenomenex Strata X Online-Extraktionskartusche (20 x 2,0 mm; 25 µm). Für die HPLC-Trennung (Hochleistungsflüssigkeitschromatography) wurde eine Phenomenex Luna C-18 (150 x 3,0 mm; 5 µm) und eine Phenomenex C18-Security-Schutzkartuschen (40 x 3,0 mm) verwendet. Die Messung erfolgte mit einem Triple-Quadrupol-Linearfallen-Ionenfallen-Tandem-Massenspektrometer Q Trap 6500 (Applied

Biosystems, USA). Die Spurenstoffkonzentration wurde durch eine externe Kalibration mit verschiedenen Konzentrationen von Multikomponentenstandards bestimmt.

Es wurden die Konzentrationen von Iopromid, Amidotrizesäure, Carbamezepin, Diazepam, Bezafibrat sowie Sulfamethoxazol im Zu- und Ablauf der Pilotanlage gemessen. Die Messung der organischen Spurenstoffe im Ablauf erfolgte aus Stichproben. Im Zulauf erfolgte die Probenahme aus dem Vorlagebehälter und entsprach damit fünf Stunden Mischproben.

3.3.8 Energetische Optimierung

Zur Abschätzung des Potentials zur energetischen Optimierung wurden das Schlammalter, der TS-Gehalt und der oTS-Gehalt der untersuchten großtechnischen Anlagen für die Bemessungstemperatur und für eine sinusförmige Annäherung der Temperaturganglinie eines Jahres nach DWA (2016) ermittelt. Da die Einhaltung der Grenzwerte der Stickstoffelimination laut DWA (2016) bei einer Temperatur von 12°C gefordert ist, wurde die Minimaltemperatur der Temperaturganglinie auf 12°C festgelegt. Anschließend wurde der Sauerstoffbedarf und die produzierte Gasmenge bei Betrieb mit dem konstantem Schlammalter der Bemessungstemperatur ($t_{TS,BEM}$) sowie bei Betrieb mit nach der Temperatur optimiertem Schlammalter ($t_{TS,OPT}$) bestimmt und daraus die Jährliche Energieeinsparung für die Belüftung und die zusätzliche Energieproduktion auf Grund der erhöhten Gasausbeute errechnet.

3.3.9 Probenahmen

Im Folgenden werden das Untersuchungsprogramm sowie die Frequenz und der Umfang der Beprobungen für die untersuchten Anlagen beschrieben.

3.3.9.1 Pilotanlage

Die Beprobung der Pilotanlage zur Bestimmung der chemischen Abwasserparameter erfolgte in Versuchsphase A1 täglich. In den Versuchsphasen A2 und B erfolgte die Beprobung zweimal pro Woche. Die Sinkgeschwindigkeit, das Schlammvolumen und der Trockensubstanzgehalt aller relevanten Schlammströme wurden in allen Versuchsphasen mehrmals wöchentlich bestimmt. Die Analyse der Partikelgrößenverteilung und die mikroskopischen Untersuchungen der Schlämme erfolgten in Versuchsphase A1 zweimal im Monat und in den Versuchsphasen A2 und B rund einmal im Monat. Die

Untersuchungen zum Eindickverhalten fanden über einen Zeitraum von rund drei Monaten in Batch Versuchen statt. Die Untersuchungen zur Spurenstoffentfernung fanden zwischen dem 10.11.2022 und dem 14.12.2022 statt. Die Probenentnahme erfolgte aus den drei Becken der biologischen Stufe sowie aus dem Zulauf vor und nach dem Sedimentationstank.

3.3.9.2 Großtechnische Anlage A

Die Bestimmung der chemischen Abwasserparameter, des Schlammvolumens nach 30 Minuten und des Trockensubstanzgehaltes der großtechnischen Anlage A erfolgte bis auf wenige Ausnahmen täglich im Zuge der Betriebsüberwachung. Zusätzlich fanden in Versuchsphase A zweimal pro Monat und in Versuchsphase B einmal pro Monat Messungen der Sinkgeschwindigkeit, des Schlammvolumens und des TS-Gehaltes am Institut der TU Wien statt. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und des Eindickverhaltens sowie die mikroskopischen Untersuchungen der Schlämme wurden in Versuchsphase A ebenfalls zweimal und in Versuchsphase B einmal im Monat durchgeführt.

3.3.9.3 Großtechnische Anlage B

Die Bestimmung der chemischen Abwasserparameter der großtechnischen Anlage B erfolgte im Schnitt dreimal pro Woche im Zuge der Betriebsüberwachung. Das Schlammvolumen nach 30 Minuten und der Trockensubstanzgehalt wurden, bis auf wenige Ausnahmen, täglich auf der Anlage bestimmt. Zusätzlich fanden am Anfang der Versuchsphase A sowie in Versuchsphase B einmal pro Monat Messungen der Sinkgeschwindigkeit, des Schlammvolumens und des TS-Gehaltes sowie die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und die mikroskopischen Untersuchungen der Schlämme am Institut der TU Wien statt. Gegen Ende der Versuchsphase A fanden die Untersuchungen rund alle zwei Monate statt.

3.4 Berechnungsgrundlagen

3.4.1 Trockensubstanzgehalt im Bodenschlamm

Die Ermittlung der erreichbaren Trockensubstanz im Bodenschlamm erfolgte nach DWA (2016) mit folgender Formel.

Formel 4 TS-Gehalt im Bodenschlamm DWA (2016)

$$TS_{BS} = \frac{1000}{ISV \times \sqrt[3]{t_E}} [kg/m^3]$$

- TS_{BS} Trockensubstanz im Bodenschlamm [g/l]
- t_E Eindickzeit [h]

3.4.2 Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken

Die erreichbare Trockensubstanz im Zulauf zum Nachklärbecken wurde laut DWA (2016) mit nachfolgender Formel berechnet. Der TS-Gehalt des Rücklaufschlammes wurde mit 70% des TS-Gehaltes des Bodenschlammes angenommen.

Formel 5 TS-Gehalt im Zulauf zum Nachklärbecken aus dem Rücklaufschlammverhältnis DWA (2016)

$$TS_{BB} = \frac{RV \times TS_{RS}}{1 + RV} [kg/m^3]$$

- TS_{BB} Trockensubstanz im Zulauf zum Nachklärbecken [g/l]
- TS_{RS} Trockensubstanz im Rücklaufschlamm [g/l]
- RV Rücklaufverhältnis

3.4.2.1 Zulauffrachten

Zur Berechnung der Frachten wurden die Zulaufkonzentrationen an Tagen an denen keine Probenahme stattfand linear interpoliert. Die Zulaufmenge betrug, mit Ausnahme der Tage an denen es zu Betriebsproblemen mit der Zulaufpumpe kam, konstant 15 l/h.

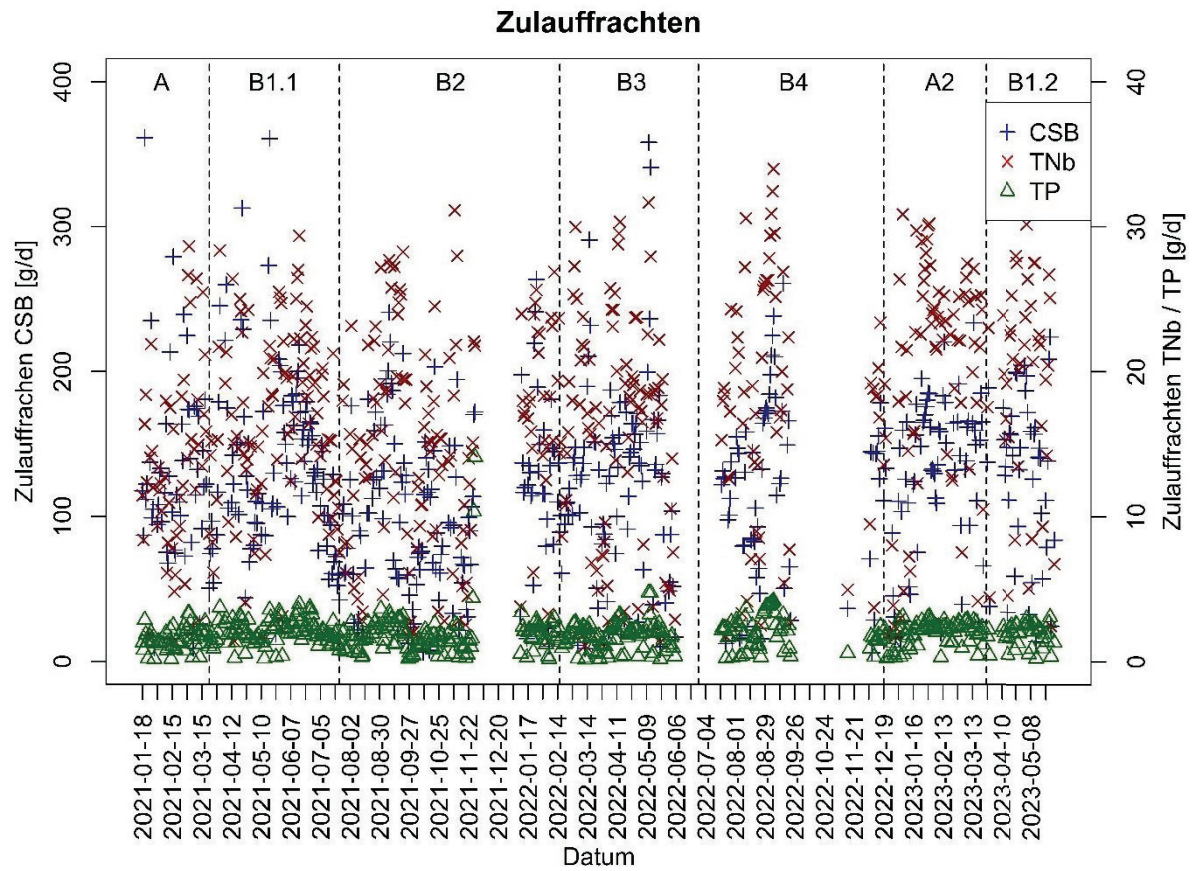
In Tabelle 4 sind die mittleren CSB, TN_b und TP Zulauffrachten der jeweiligen Versuchsphase samt Standardabweichung in g/d aufgelistet.

Tabelle 4 Mittlere Zulauffrachten samt Standardabweichung der Pilotanlage in g/d.

Parameter	CSB [g/d]		TN _b [g/d]		TP [g/d]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	102,3	+/- 77,7	10,7	+/- 7,9	1,3	+/- 0,9
Versuchsphase B1.1	112,2	+/- 75,6	13,9	+/- 8,4	1,8	+/- 1,1
Versuchsphase B2	87,6	+/- 64,8	12,6	+/- 8,7	1,6	+/- 1,6
Versuchsphase B3	103,1	+/- 75,15	13,3	+/- 9,3	1,5	+/- 1,1
Versuchsphase B4 gesamt	95,0	+/- 72,7	13,7	+/- 10,5	1,7	+/- 1,3
Versuchsphase B4.1	97,6	+/- 73,1	14,4	+/- 10,8	1,8	+/- 1,4
Versuchsphase B4.2	81,8	+/- 71,8	10,7	+/- 9,4	1,0	+/- 0,9
Versuchsphase A2	99,7	+/- 70,2	15,1	+/- 10,8	1,6	+/- 1,1
Versuchsphase B1.2	102,3	+/- 73,1	14,5	+/- 10,3	1,5	+/- 1,0

In Abbildung 6 sind die Zulauffrachten im Versuchszeitraum dargestellt. Der Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen ist durch die vertikalen Linien gekennzeichnet.

Abbildung 6 Zulauffrachten der Pilotanlage



Die Lücken in der Darstellung der Frachten in den Versuchsphasen B2, B3 und B4 sind auf Problemen bei der Datenaufzeichnung zurückzuführen.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen auf den ausgewählten Kläranlagen präsentiert. Messwerte, die weiter als die doppelte Standardabweichung vom Mittelwert der jeweiligen Messungen abweichen, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

4.1 Pilotanlage

4.1.1 Betriebliche Rahmenbedingungen

4.1.1.1 Reinigungsleistung

Im Laufe des Projektes wurde zusätzlich zu dem Absetzverhalten der Schlämme auch die Reinigungsleistung der Anlagen überwacht. In Tabelle 5 sind die mittleren Entfernungsgrade in den verschiedenen Versuchsphasen sowie die Standardabweichung in Prozent angegeben.

Tabelle 5: Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der Pilotanlage in Prozent

Parameter	CSB [%]		TN _b [%]		TP [%]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	95,7	+/- 1,3	83,5	+/- 8,0	70,0	+/- 14,3
Versuchsphase B1	94,7	+/- 1,6	83,0	+/- 6,8	71,3	+/- 18,4
Versuchsphase B2	93,4	+/- 6,0	84,2	+/- 13,6	79,0	+/- 15,8
Versuchsphase B3	95,1	+/- 1,3	90,0	+/- 5,3	87,4	+/- 9,1
Versuchsphase B4 gesamt	94,3	+/- 2,7	89,2	+/- 6,5	85,2	+/- 17,0
Versuchsphase B4.1	94,3	+/- 2,9	89,4	+/- 6,7	84,8	+/- 17,9
Versuchsphase B4.2	94,5	+/- 1,0	86,0	+/- 2,9	88,4	+/- 4,4
Versuchsphase A2	95,1	+/- 1,8	91,0	+/- 4,7	89,5	+/- 4,8
Versuchsphase B1.2	95,3	+/- 1,2	88,0	+/- 7,0	83,5	+/- 15,8

Die verbesserte Entfernungsrates von gesamt Stickstoff und gesamt Phosphor ab Versuchsphase B3 ist vermutlich auf eine verbesserte Wirkung des anaeroben Selektors durch den Umbau der Rührvorrichtung zurückzuführen. Der Umbau führte zu einem verbesserten biologischen Phosphatabbau und zu einer Verminderung des Sauerstoffeintrags in die Denitrifikationsstufe. Dies zeigt sich auch an den verringerten NO₃-N Konzentrationen im Ablauf ab Versuchsphase B3. Der leichte Rückgang der Gesamtstickstoff Entfernungsrates in Versuchsphase B4.2 ist auf das geringe aerobe Schlammalter von rund 3,6 Tagen zurückzuführen.

4.1.1.2 Temperatur/ pH-Wert

Die Temperatur in der biologischen Stufe ist maßgeblich für die Wachstumsrate der Bakterien und beeinflusst zusätzlich das Schlammalter der Biomasse und somit die Entferungsleistung insbesondere für Stickstoffverbindungen. Die Wachstumsrate μ von Nitrosomonas beträgt bei 20 °C 1 d⁻¹ (Gujer 2007). Die Temperatur im betrachteten Zeitraum lag im Nitrifikationsbecken der biologischen Stufe zwischen 18,9°C und 24,2°C. In diesem Temperaturbereich kann die Anlage mit einem relativ geringen aeroben Schlammalter betrieben werden.

Der pH-Wert im Nitrifikationsbecken während des Untersuchungszeitraumes lag zwischen 8,10 und 6,60 und damit im für die Nitrifikation optimalen Bereich von 6,5 - 8,5. In Tabelle 6 sind die mittleren Temperaturen und pH-Werte der einzelnen Versuchsphasen zusammengefasst.

Tabelle 6 Mittlere Temperaturen und pH-Werte der Pilotanlage

Parameter	Temperatur [°C]		pH-Wert	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	22,2	+/- 0,5	7,41	+/- 0,10
Versuchsphase B1.1	23,5	+/- 0,4	7,35	+/- 0,10
Versuchsphase B2	22,2	+/- 1,1	7,36	+/- 0,19
Versuchsphase B3	21,3	+/- 0,6	7,44	+/- 0,17
Versuchsphase B4 gesamt	22,0	+/- 0,8	7,52	+/- 0,11
Versuchsphase B4.1	22,3	+/- 0,4	7,52	+/- 0,11
Versuchsphase B4.2	20,4	+/- 0,5	7,50	+/- 0,13
Versuchsphase A2	19,9	+/- 0,5	7,51	+/- 0,16
Versuchsphase B1.2	19,0	+/- 0,4	7,52	+/- 0,49

4.1.1.3 Belastung

In Tabelle 7 sind die mittlere Raumbelastung in kg CSB/(m³ d) und die mittlere Schlammbelastung in kg CSB/(kgTS d) der verschiedenen Versuchsphasen samt Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 7 Mittlere Raum- und Schlammbelastungen der Pilotanlage

Parameter	Raumbelastung [kg CSB / (m ³ d)]		Schlammbelastung [kg CSB / (kg TS d)]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	0,50	+/- 0,38	0,26	+/- 0,15
Versuchsphase B1.1	0,55	+/- 0,37	0,31	+/- 0,20
Versuchsphase B2	0,43	+/- 0,32	0,21	+/- 0,11
Versuchsphase B3	0,50	+/- 0,37	0,22	+/- 0,11
Versuchsphase B4 gesamt	0,46	+/- 0,35	0,25	+/- 0,14
Versuchsphase B4.1	0,48	+/- 0,36	0,25	+/- 0,15
Versuchsphase B4.2	0,40	+/- 0,35	0,25	+/- 0,13
Versuchsphase A2	0,80	+/- 1,82	0,39	+/- 0,73
Versuchsphase B1.2	0,50	+/- 0,36	0,30	+/- 0,11

4.1.2 ÜSS Menge und Schlammalter

In Tabelle 8 sind die abgezogene ÜSS Menge in l/d sowie das gesamte und das aerobe Schlammalter in Tagen in den unterschiedlichen Versuchsphasen aufgelistet.

Tabelle 8 Mittlere ÜSS Menge, mittleres gesamtes und mittleres aerobes Schlammalter der Pilotanlage

Parameter	Q _{ÜSS} [L/d]		Gesamtes Schlammalter [d]		Aerobes Schlammalter [d]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	10,9	+/- 6,9	19,6	+/- 1,3	5,7	+/- 0,4
Versuchsphase B1.1	15,0	+/- 10,8	19,5	+/- 5,1	5,7	+/- 1,5
Versuchsphase B2	13,7	+/- 10,4	15,8	+/- 2,2	4,6	+/- 0,6
Versuchsphase B3	12,2	+/- 9,4	16,7	+/- 2,5	4,9	+/- 0,7
Versuchsphase B4 gesamt	11,5	+/- 11,3	17,7	+/- 3,3	5,2	+/- 1,0
Versuchsphase B4.1	11,2	+/- 10,9	18,0	+/- 2,8	5,3	+/- 0,8
Versuchsphase B4.2	13,5	+/- 13,9	12,2	+/- 2,7	3,6	+/- 0,8
Versuchsphase A2	9,0	+/-9,2	30,2	+/- 13,9	8,8	+/- 4,1
Versuchsphase B1.2	13,6	+/- 13,6	18,5	+/- 4,6	5,4	+/- 1,4

4.1.3 Vergleich der Systeme zum Überschussschlammabzug

Während beim ÜSS Abzug mittels Steigrohres die Aufstiegs geschwindigkeit im Steigrohr und somit die Stärke der Selektionswirkung durch die Pumpenleistung gesteuert wurde, war beim ÜSS-Abzug mittels Rinne die Schaffung einer beruhigten Zone notwendig um bei dem Abzug aus der obersten Wasserschicht eine Selektionswirkung zu erzielen. Die Aufstiegs geschwindigkeit errechnet sich aus der Durchgangsfläche des Steigrohres und dem gepumpten Volumenstrom.

4.1.3.1 Steigrohr

In Versuchsphase B1.1 lag die Aufstiegs geschwindigkeit im Steigrohr etwas unter der mittleren Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und betrug zwischen 1,0 m/h und 2,78 m/h. In Versuchsphase B1.2 lag die Aufstiegs geschwindigkeit über der mittleren Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und betrug, mit Ausnahme der ersten Woche der Versuchsphase, im Mittel 3,24 m/h.

4.1.3.2 Rinne

Die Schaffung einer beruhigten Zone erfolgte in den Versuchsphasen B2 und B3 durch eine, der Rinne vorgelagerte Tauchwand. In Versuchsphase B4 erfolgte die Schaffung einer beruhigten Zone durch den ÜSS-Abzug in der unbelüfteten Phase.

Um die optimale Phase für die Überschussschlammmentnahme mittels Rinne zu bestimmen, wurden vom 23.7.2021 bis zum 6.8.2021 Überschussschlammmentnahmen in unterschiedlichen Belüftungsphasen an der Pilotanlage untersucht. Die Ergebnisse wurden bei der technischen Umsetzung des ÜSS-Abzuges auf der großtechnischen Anlage B im Weiteren mitberücksichtigt.

Nachfolgend sind die unterschiedlichen Belüftungsphasen P1 - P3 näher erläutert.

- P1 Überschussschlammmentnahme während der belüfteten Phase
- P2 Überschussschlammmentnahme 0 - 10 Minuten nach der belüfteten Phase
- P3 Überschussschlammmentnahme 10 - 40 Minuten nach der belüfteten Phase

In Tabelle 9 sind die TS-Gehalte des Schlammes aus dem Belebungsbecken zu unterschiedlichen Belüftungszeitpunkten, der TS-Gehalt des ÜSS bei Entnahme während der jeweiligen Belüftungsphase sowie der TS-Gehalt der gesamten Mischprobe des ÜSS in g/l aufgelistet.

Tabelle 9 Mittlere TS-Gehalte des belebten Schlammes und des ÜSS zu verschiedenen Belüftungszeitpunkten bei Entnahme des ÜSS aus der Pilotanlage mittels Rinne

Parameter	TS _{BB} [g/l]		TS _{ÜSS} [g/l]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
P1	2,58	+/- 0,43	2,56	+/- 0,41
P2	2,65	+/- 0,46	2,48	+/- 0,30
P3	2,59	+/- 0,52	2,54	+/- 0,35
Gesamte Mischprobe	2,83	+/- 0,54	2,52	+/- 0,37

Die Differenz der TS-Gehalte zwischen belebten Schlamm und ÜSS deutet in den Belüftungsphasen P2 und P3 auf eine etwas stärkere Selektionswirkung hin. Dies ist auf Absetzvorgänge im Belebungsbecken zurückzuführen. Die hohe Differenz der TS-Gehalte

in der Mischprobe ist vermutlich auf Schwankungen des TS-Gehaltes im Belebungsbecken während der Entnahme des ÜSS zurückzuführen und daher nicht repräsentativ.

Während der ÜSS-Abzug in Versuchsphase B3 unabhängig von der Belüftungsphase erfolgte, wurde in Versuchsphase B4 der ÜSS nur in der unbelüfteten Phase abgezogen.

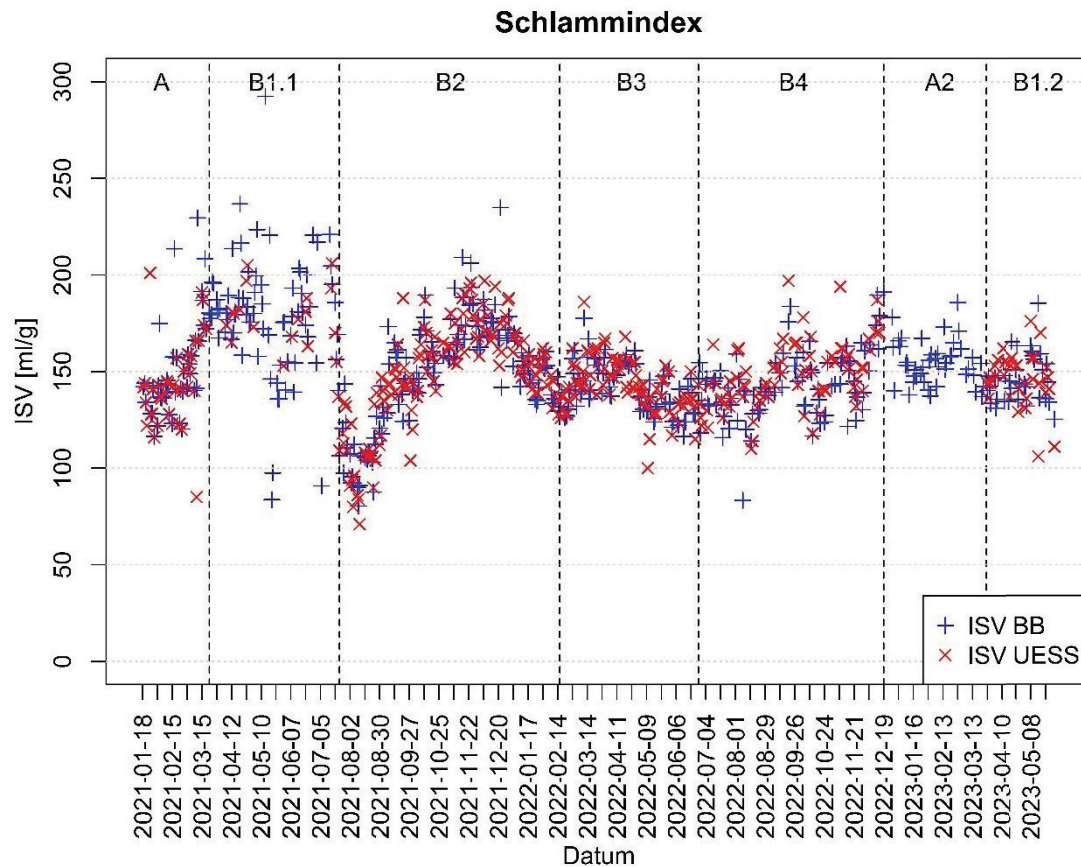
4.1.4 Absetzverhalten

Da die Überschussschlammmentnahme in den Versuchsphasen A unselektiert direkt aus dem Belebungsbecken zeitgleich mit der Probenahme erfolgte, sind die Werte für Schlammvolumen, TS-Gehalt und Sinkgeschwindigkeit in dieser Versuchsphase für belebten Schlamm und ÜSS gleich.

4.1.4.1 Schlammindex

In Abbildung 7 ist der Schlammindex des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage über den gesamten Betrachtungszeitraum dargestellt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen. Aufgrund des hohen Anteils an organischer Trockensubstanz von rund 81% im Belebtschlamm der Pilotanlage sind die Richtwerte für den Schlammindex aus dem DWA Regelblatt (2016) nicht direkt anwendbar.

Abbildung 7 ISV des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage



Der starke Abfall des ISV Mitte Mai 2021 am Anfang der Versuchsphase B2 hing mit einer Änderung des oTS zu TS Verhältnisses zusammen. Der Grund für die Änderung waren vermutlich Umbauarbeiten an der Pilotanlage, durch die es zu einem Eintrag von anorganischem Material in die Anlage kam. Da der selektive ÜSS-Abzug ebenfalls das oTS zu TS Verhältnis in Richtung anorganischer Bestandteile verschieben würde, kann ein Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges mittels Steigrohres aus Versuchsphase B1.1 nicht ausgeschlossen werden. Um einen möglichen Einfluss des Abzuges mittels Steigrohres zu verifizieren wurde Ende März 2023 eine zweite Versuchsreihe B1.2 mit selektivem ÜSS-Abzug mittels Steigrohres gestartet. Der zweite Abfall des ISV des belebten Schlammes in Versuchsphase B2 Ende November 2021, trotz des Anstiegs des organischen Anteils der Trockensubstanz auf das Niveau vor den Umbauarbeiten, hängt vermutlich mit der Umstellung des Betriebs des anaeroben Selektors zusammen. Der Anstieg des ISV im April 2022 in Versuchsphase B3 ist nicht gänzlich geklärt. Der Auslöser könnte eine kurzzeitige Änderung der Belüftungsintervalle in dieser Phase gewesen sein. Der kurzfristige Anstieg des ISV des belebten Schlammes Mitte September 2022 in Versuchsphase B4 ist vermutlich auf Probleme mit der Rücklaufschlammpumpe und daraus resultierende

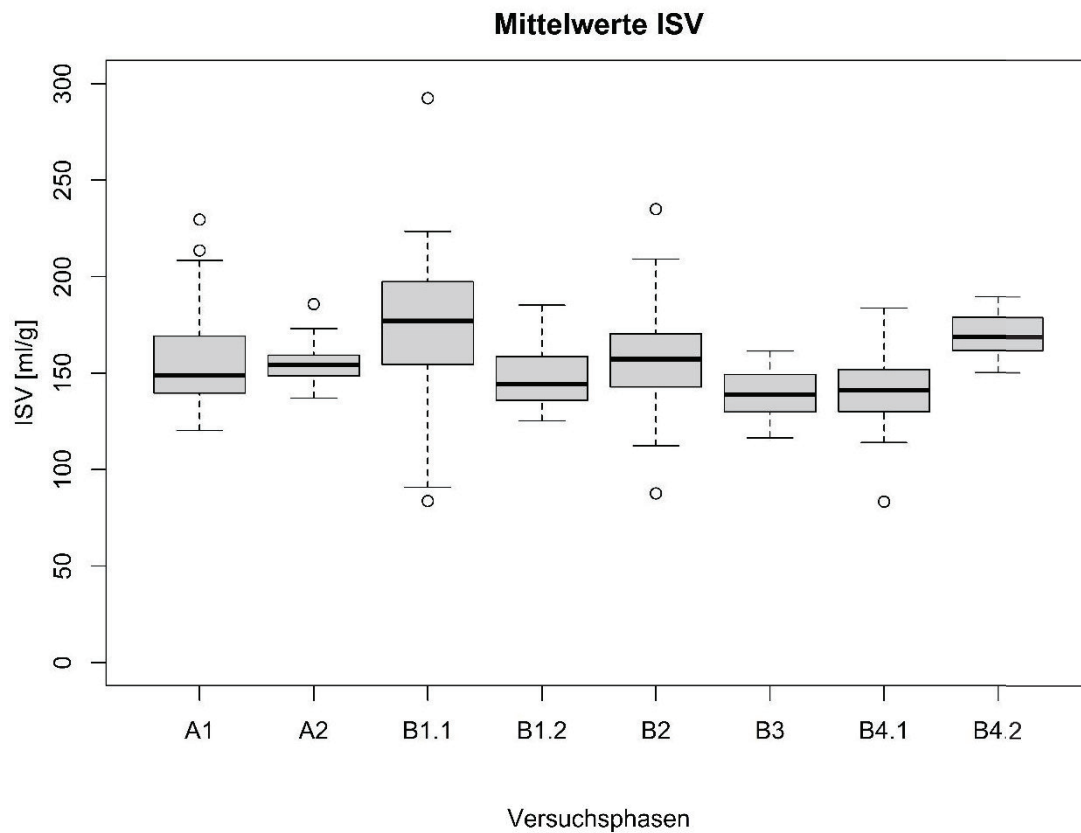
teilweise anaerobe Verhältnisse im Nachklärbecken in diesem Zeitraum zurückzuführen. Der Anstieg des ISV am Ende der Versuchsphase B4 ist auf das geringe Schlammalter zurückzuführen. Der Abfall des ISV am Anfang der Versuchsphase A2 hängt mit der Steigerung des Schlammalters auf Grund von Problemen beim ÜSS Abzug zusammen (Bisogni & Larence 1971). In Tabelle 10 ist der mittlere ISV des belebten Schlammes und des ÜSS in ml/g in den unterschiedlichen Versuchsphasen samt Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 10 Mittlerer ISV des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in ml/g

Parameter	ISV BB [ml/g]		ISV ÜSS [ml/g]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	156	+/- 26,5	156	+/- 26,5
Versuchsphase B1.1	188	+/- 98,5	185	+/- 15,0
Versuchsphase B2	157	+/- 21,9	156	+/- 20,2
Versuchsphase B3	140	+/- 11,8	142	+/- 13,3
Versuchsphase B4 gesamt	144	+/- 18,1	150	+/- 17,2
Versuchsphase B4.1	141	+/- 16,4	148	+/- 16,4
Versuchsphase B4.2	170	+/- 14,0	172	+/- 8,9
Versuchsphase A2	156	+/- 11,7	156	+/- 11,7
Versuchsphase B1.2	149	+/- 14,6	143	+/- 17,5

In Abbildung 8 ist der mittlere Schlammindex des belebten Schlammes der Pilotanlage in den einzelnen Versuchsphasen als Boxplot dargestellt.

Abbildung 8 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der Pilotanlage in den einzelnen Versuchsphasen in ml/g



Aufgrund des starken Einflusses der Betriebsbedingungen auf den ISV lag der Fokus in der weiteren Auswertung auf dem Zeitraum ab Versuchsphase B3, nach der Umstellung des anaeroben Selektors.

Zum Vergleich der Versuchsphasen wurde eine einfaktorische Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Als Signifikantsschwelle wurde für alle ANOVAs $p = 0,05$ gewählt. Die ANOVA ergab eine signifikante Änderung der Mittelwerte zwischen der Referenzphase A2 und den Versuchsphasen B3 und B4.1 ($p = 0,00017$; $p = 0,00044$). Zwischen der Versuchsphase B4.2 und der Referenzphase A2 sowie zwischen den Versuchsphasen B3 und B4.1 gab es keine signifikante Änderung der Mittelwerte ($p = 0,132$; $p = 0,985$). Auch zwischen der Versuchsphase B1.2 und der Referenzphase A2 gab es keine signifikante Veränderung des mittleren ISV ($p = 0,52$). Dies deutet auf eine Verbesserung der Absetzeigenschaften durch den selektiven ÜSS Abzug in den Versuchsphasen B3 und B4.1 hin. Die Verschlechterung des Absetzverhaltens in Versuchsphase B4.2 ist wie bereits erwähnt auf das sehr niedrige Schlammalter in dieser Phase zurückzuführen. In der

Versuchsphase B1.2 kam es zwar zu einer Verbesserung des mittleren ISV im Vergleich zur Referenzphase A2, diese war jedoch nicht signifikant.

Längerfristig ließ sich in der Pilotanlage, ab Versuchsphase B3, durch den selektiven ÜSS-Abzug eine Verbesserung des ISV zwischen 5% und 10% im Vergleich zur Versuchsphase A2 erreichen. Die Berechnung des TS-Gehaltes im Belebungsbecken laut DWA (2016) (Formel 4 und Formel 5), ergab bei einer Verweilzeit im Nachklärbecken von zwei Stunden, einem TS-Gehalt im Rücklaufschlamm von 70% des TS-Gehaltes im Bodenschlamm des Nachklärbeckens (DWA 2016) und einem Rücklaufverhältnis von $RV = 2$, durch den verbesserten ISV, eine maximale mögliche Steigerung des TS-Gehaltes im Belebungsbecken und damit eine Kapazitätssteigerung der Anlage von etwa 11%. Die im Vergleich zu Roche et al. (2021) geringere Verbesserung des ISV ist vermutlich einerseits auf den geringeren Selektionsdruck der ÜSS-Abzugsmethoden (Roche et al. 2021 - Hydrozyklone) und andererseits auf die stabilen Betriebsbedingungen der Pilotanlage ohne jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen. Weiters muss angemerkt werden, dass der ISV ab der Versuchsphase B3 in einem, für den hohen Anteil an organischer Trockensubstanz, niedrigen Bereich lag und somit das Verbesserungspotenzial, auf Grund des guten Ausgangs-ISV geringer war als bei Anlagen mit einem hohen ISV.

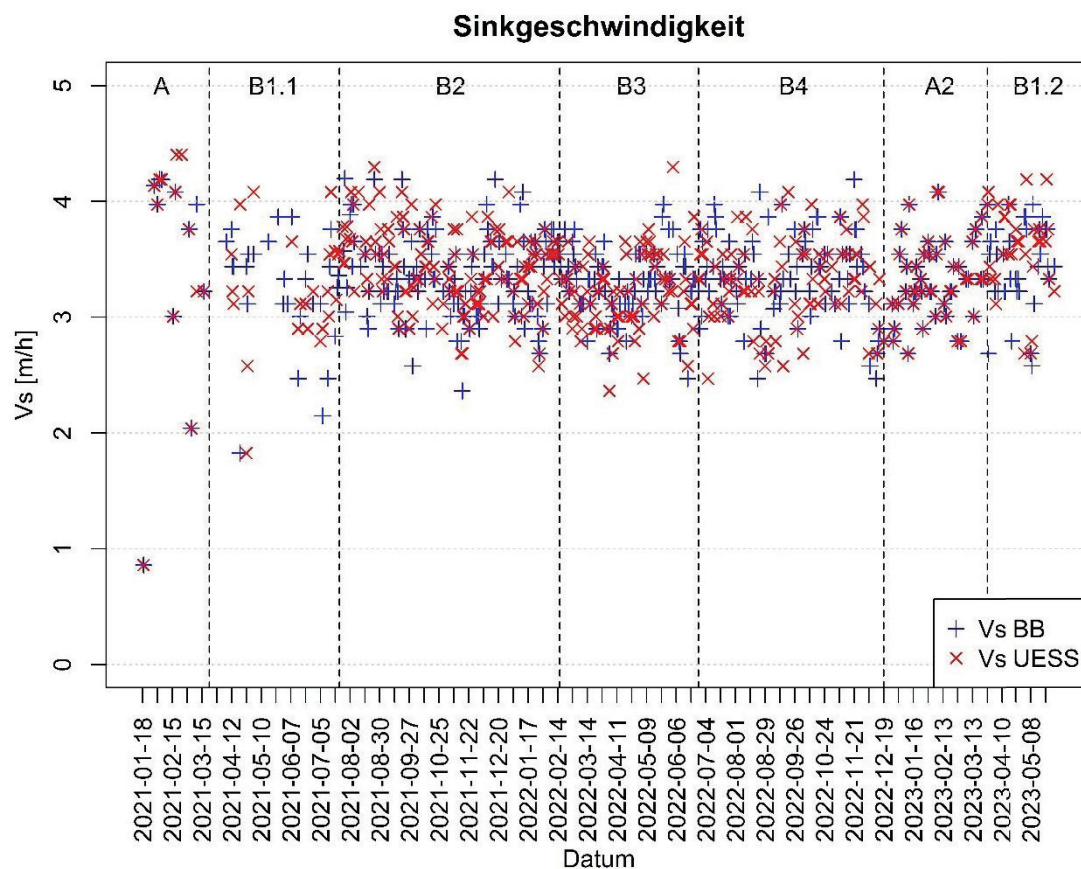
Ein selektiver ÜSS-Abzug über die Rinne erwies sich im Vergleich zum Abzug mittels Steigrohres als effizienter zur Senkung des ISV. Sowohl beim ÜSS-Abzug in allen Belüftungsphasen mit vorgelagerter Tauchwand (B3) als auch beim ÜSS-Abzug in der unbelüfteten Phase (B4.1) ließ sich im Vergleich zum ÜSS-Abzug mittels Steigrohres (B1.2) ein niedrigerer mittlerer ISV erreichen. Die Gründe hierfür sind unklar, da der Selektionsdruck bei einem ÜSS-Abzug im Steigrohr mit einer mittleren Aufstiegs geschwindigkeit die im Bereich der mittleren Sinkgeschwindigkeit liegt, höher sein sollte. Bei einem ÜSS-Abzug mittels Steigrohres zeigte sich eine Verbesserung des ISV erst ab einer Aufstiegs geschwindigkeit im Steigrohr die annähernd der mittleren Sinkgeschwindigkeit entsprach.

Durch einen diskontinuierlichen ÜSS-Abzug mittels Rinne in unterschiedlichen Belüftungsphasen (B4.1) ließ sich im Vergleich mit dem kontinuierlichen ÜSS-Abzug mittels Rinne (B3) keine signifikante Verbesserung des ISV erreichen, obwohl sich bei den Untersuchungen zum Vergleich der Abzugssysteme eine stärkere Selektionswirkung beim ÜSS-Abzug in der unbelüfteten Phase abgezeichnet hat.

4.1.4.2 Sinkgeschwindigkeit

In Abbildung 9 sind die Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes und des ÜSS über den betrachteten Zeitraum dargestellt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 9 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in m/h



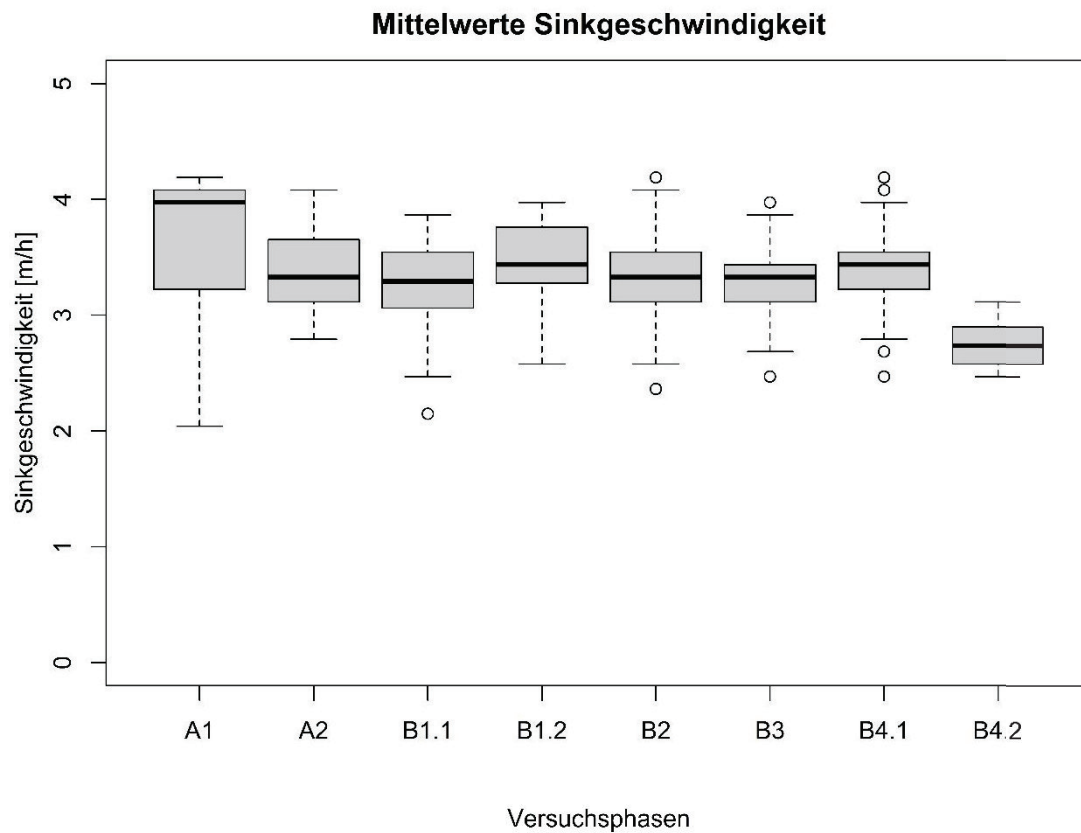
Der Anstieg der Sinkgeschwindigkeit am Beginn der Versuchsphase B2 fand zeitgleich mit dem Abfall des ISV statt und ist auf die Änderung des σ_{TS} zu TS Verhältnisses zurückzuführen. Der Abfall der Sinkgeschwindigkeit in Versuchsphase B3 ist, wie der Anstieg des ISV in diesem Zeitraum, möglicherweise auf die kurzzeitige Änderung der Belüftungsintervalle zurückzuführen. Der Abfall der Sinkgeschwindigkeit gegen Ende der Versuchsphase B4 ist vermutlich auf das niedrige Schlammalter in dieser Phase zurückzuführen. In Tabelle 11 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes und des ÜSS in den verschiedenen Versuchsphasen inklusive Standardabweichung in m/h aufgelistet.

Tabelle 11 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in m/h

Parameter	vs BB [m/h]		vs ÜSS [m/h]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	3,60	+/- 0,72	3,60	+/- 0,72
Versuchsphase B1.1	3,22	+/- 0,47	3,20	+/-0,74
Versuchsphase B2	3,34	+/- 0,35	3,41	+/-0,34
Versuchsphase B3	3,26	+/- 0,29	3,22	+/- 0,36
Versuchsphase B4 gesamt	3,33	+/- 0,39	3,30	+/- 0,37
Versuchsphase B4.1	3,39	+/- 0,35	3,33	+/- 0,36
Versuchsphase B4.2	2,76	+/-0,23	3,03	+/- 0,32
Versuchsphase A2	3,38	+/- 0,37	3,38	+/- 0,37
Versuchsphase B1.2	3,47	+/- 0,39	3,51	+/- 0,44

In Abbildung 10 ist die mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der Pilotanlage in den einzelnen Versuchsphasen als Boxplot dargestellt.

Abbildung 10 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der Pilotanlage in m/h

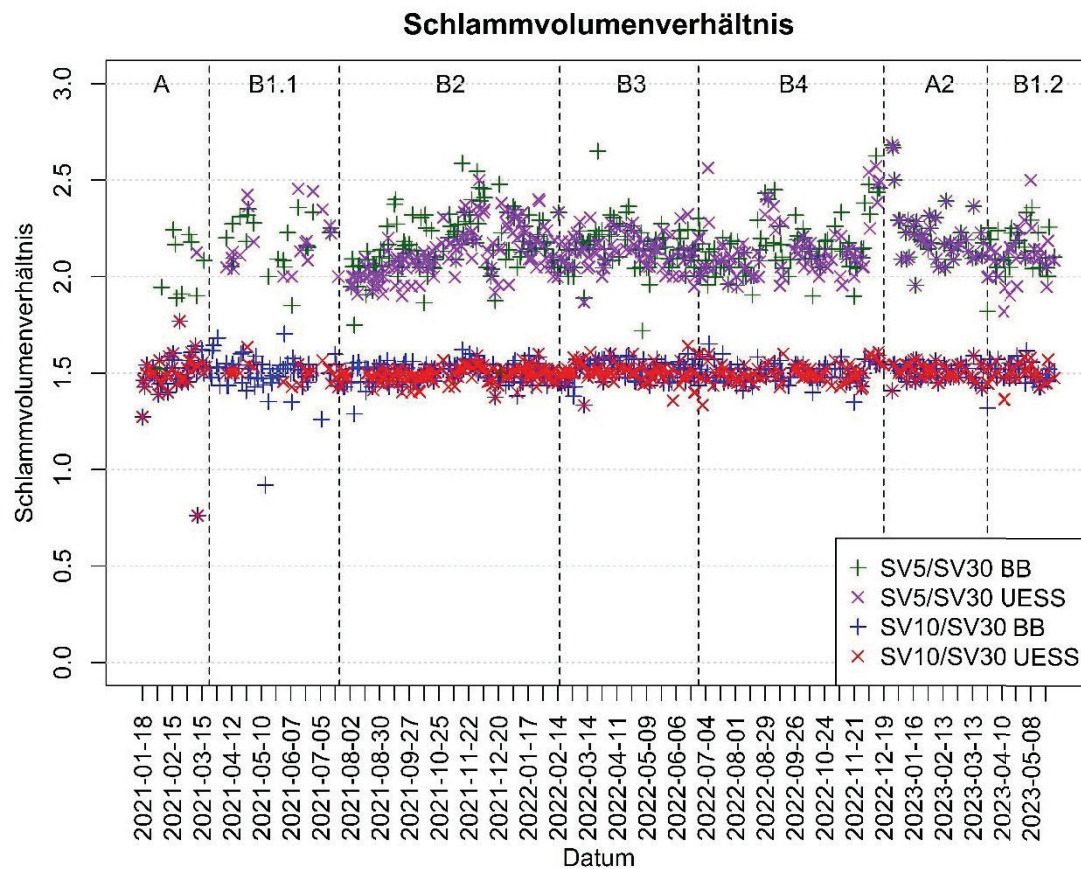


Wie schon beim ISV wurde eine ANOVA ab Versuchsphase B3 durchgeführt um mögliche Änderungen der mittleren Absetzgeschwindigkeit in den Versuchsphasen zu beurteilen. Mit Ausnahme der Versuchsphase B4.2, in der es, auf Grund des niedrigen Schlammalters, zu einer signifikanten Reduktion der mittleren Absetzgeschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Phasen kam ($p = 0,00007 - 0,0022$), gab es trotz der Verbesserung des ISV keine signifikante Änderung der mittleren Sinkgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Versuchsphasen. Ein Vergleich mit ermittelten Vesilind-Parametern (Dick & Vesilind 1969) zeigte jedoch eine höhere Sinkgeschwindigkeit als vom Modell vorhergesagt.

4.1.4.3 Schlammvolumenverhältnis

In Abbildung 11 ist das Verhältnis der Schlammvolumen SV_5/SV_{30} und SV_{10}/SV_{30} des belebten Schlammes und des ÜSS über den gesamten Betrachtungszeitraum dargestellt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 11 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage



Die Anstiege des SV_5/SV_{30} Verhältnisses korrespondieren mit den Anstiegen des ISV in den gleichen Zeiträumen. Bei dem SV_{10}/SV_{30} Verhältnisses sind kaum korrespondierende Anstiege zu erkennen. In Tabelle 12 sind die Schlammvolumenverhältnisse des belebten Schlammes und des ÜSS samt der Standardabweichung in den unterschiedlichen Versuchsphasen aufgelistet.

Tabelle 12 Mittlere Schlammvolumenverhältnisse und Standardabweichung des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage

Parameter	SV ₅ /SV ₃₀				SV ₁₀ /SV ₃₀			
	BB		ÜSS		BB		ÜSS	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	2,01	+/- 0,22	2,01	+/- 0,22	1,50	+/- 0,15	1,50	+/- 0,15
Versuchsphase B1.1	2,18	+/- 0,15	2,18	+/- 0,14	1,49	+/- 0,11	1,53	+/- 0,05
Versuchsphase B2	2,18	+/- 0,15	2,14	+/- 0,13	1,51	+/- 0,04	1,49	+/- 0,04
Versuchsphase B3	2,16	+/- 0,12	2,13	+/- 0,08	1,52	+/- 0,05	1,50	+/- 0,05
Versuchsphase B4	2,16	+/- 0,15	2,14	+/- 0,15	1,50	+/- 0,05	1,50	+/- 0,05
Versuchsphase B4.1	2,13	+/- 0,12	2,11	+/- 0,11	1,49	+/- 0,05	1,49	+/- 0,04
Versuchsphase B4.2	2,46	+/- 0,10	2,45	+/- 0,12	1,56	+/- 0,02	1,58	+/- 0,02
Versuchsphase A2	2,08	+/- 0,44	2,08	+/- 0,44	1,50	+/- 0,04	1,50	+/- 0,04
Versuchsphase B1.2	2,15	+/- 0,11	2,14	+/- 0,13	1,50	+/- 0,05	1,51	+/- 0,05

Die mittleren SV₅/SV₃₀ Verhältnisse des belebten Schlammes in den unterschiedlichen Versuchsphasen ab Versuchsphase B3 unterscheiden sich mit Ausnahme von Versuchsphase B4.2, in der das Verhältnis ansteigt, nicht signifikant voneinander. Die mittleren SV₁₀/SV₃₀ Verhältnisse des belebten Schlammes in den unterschiedlichen Versuchsphasen ab Versuchsphase B3 zeigen bei der ANOVA zwischen B3 und B4.1 ($p = 0,020$) sowie zwischen B4.2 und A2 sowie B4.1 ($p = 0,029$; $p = 0,004$) eine signifikante Änderung.

Anhand der mittleren Schlammvolumenverhältnisse lässt sich mit Ausnahme der Versuchsphase B4.2 auf Grund der geringen Schwankungen keine Aussage bezüglich eines Effekts des selektiven ÜSS-Abzuges auf das Absetzverhalten treffen. Während Anstiege des ISV im SV₅/SV₃₀ Verhältnis erkennbar waren, war beim SV₁₀/SV₃₀ Verhältnis kaum eine Änderung festzustellen. Diese Beobachtung deckt sich mit den nicht signifikanten Änderungen der Sinkgeschwindigkeiten.

4.1.5 Partikelgrößenverteilung

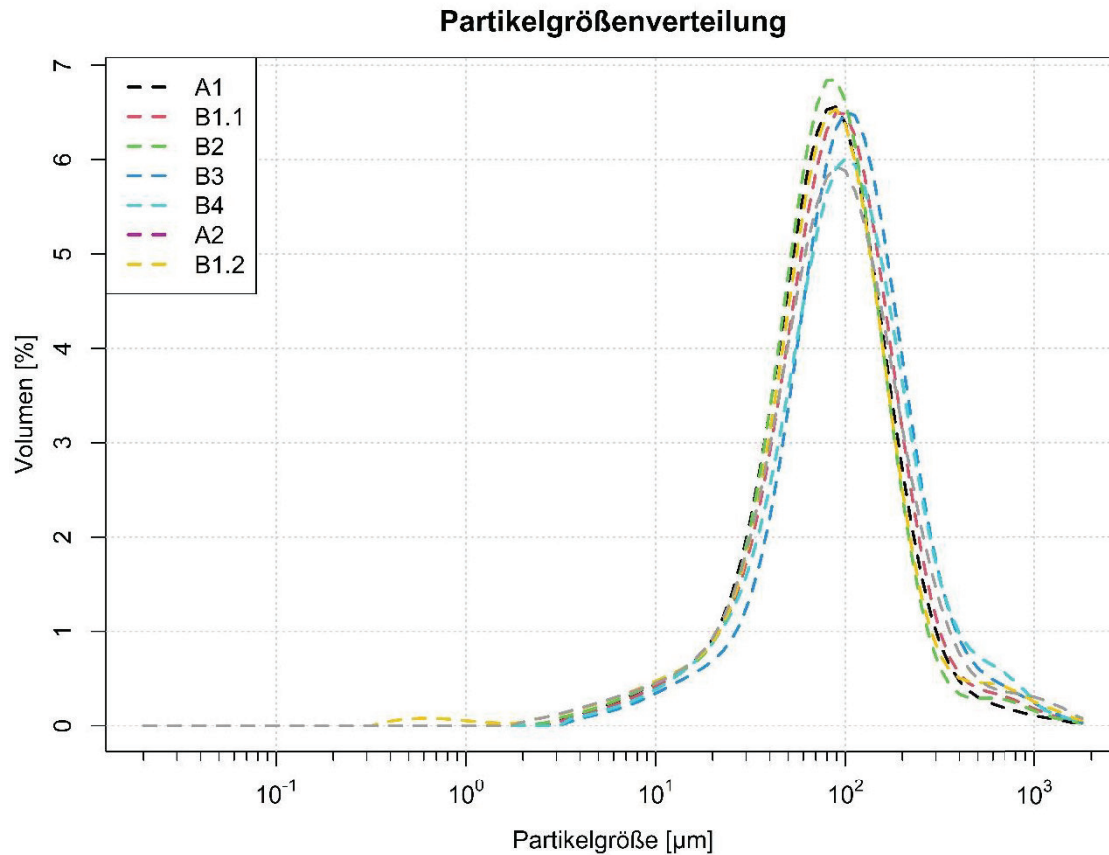
In Tabelle 13 sind die 50% und 90% Quantile der mittleren Partikelgrößenklassen der unterschiedlichen Versuchsphasen sowie die Größenklassen mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln dargestellt.

Tabelle 13 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der Pilotanlage

Parameter	50% Quantil [μm]	90% Quantil [μm]	Maximum [μm]
	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
Versuchsphase A1	79,62 - 89,34	200 - 224,40	89,34 - 100,24
Versuchsphase B1.1	89,34 - 100,24	224,40 - 251,79	89,34 - 100,24
Versuchsphase B2	79,62 - 89,34	200 - 224,40	89,34 - 100,24
Versuchsphase B3	100,24 - 112,47	251,79 - 282,51	100,24 - 112,47
Versuchsphase B4	100,24 - 112,47	282,51 - 316,98	100,24 - 112,47
Versuchsphase A2	79,62 - 89,34	200 - 224,40	89,34 - 100,24
Versuchsphase B1.2	89,34 - 100,24	251,79 - 282,51	89,34 - 100,24

In Abbildung 12 sind die mittleren Partikelgrößenverteilungen der unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 12 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der Pilotanlage in den unterschiedlichen Versuchsphasen



Die Größenklassen in der das 50% und 90% Quantil der Partikelgrößenverteilung lag ist, mit Ausnahme von Versuchsphase B2, in den Referenzphasen um mindestens eine Größenklasse geringer als in den Phasen mit selektivem ÜSS-Abzug. Die Partikelgrößenverteilung zeigt ab der Versuchsphase B3 (in der die Umwälzung des anaeroben Selektors auf Rührwerke umgestellt wurde) bei selektivem ÜSS-Abzug eine eindeutige Verschiebung der Verteilungskurve hin zu größeren Partikeln. Die Steigerung betraf sowohl das 50% Quantil als auch das 90% Quantil und die Klasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln. Damit ist durch den selektiven ÜSS-Abzug trotz der starken Scherkräfte in kontinuierlich durchflossenen Anlagen eine signifikante Steigerung der Partikelgröße und damit eine Verbesserung der Absetzeigenschaften möglich.

4.1.6 Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken

In Abbildung 13 bis Abbildung 20 sind mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage aus den unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 13 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase A1

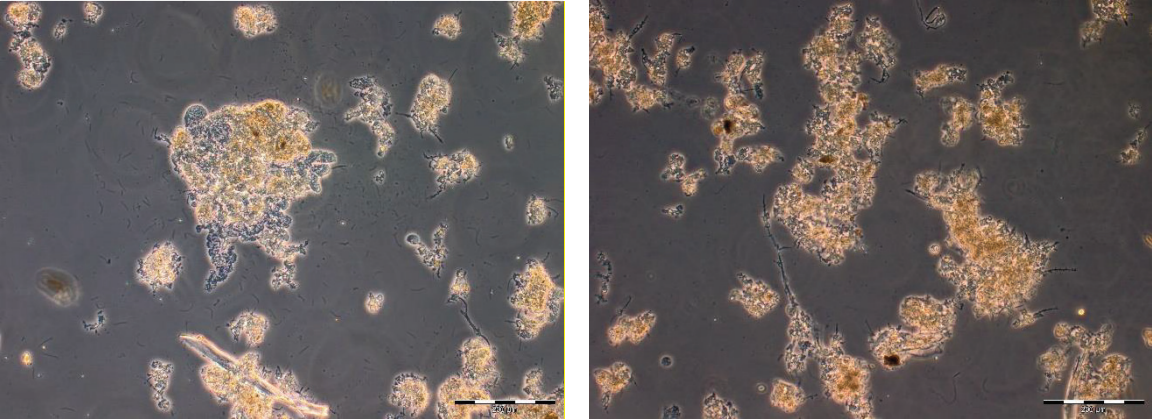


Abbildung 14 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B1.1

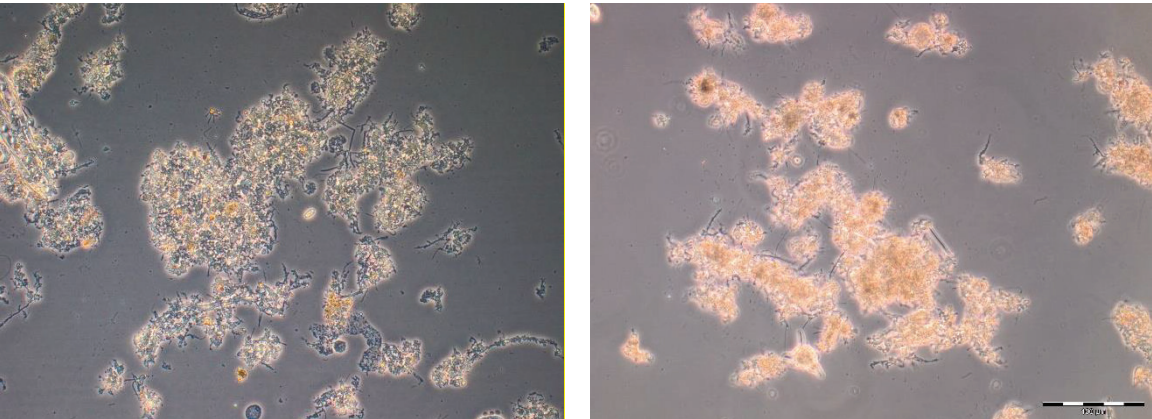


Abbildung 15 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B2

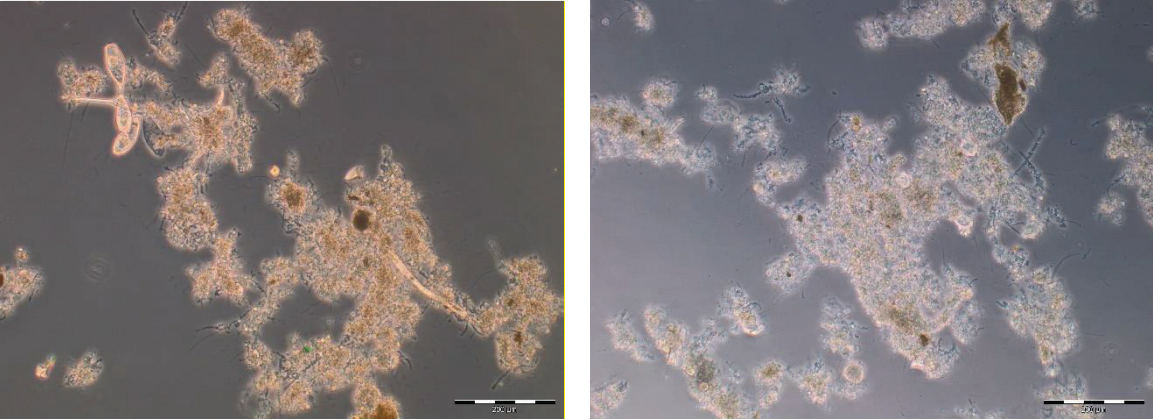


Abbildung 16 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B3

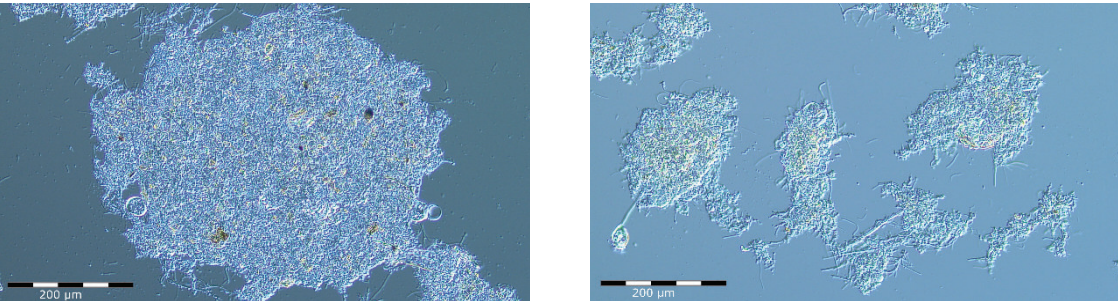


Abbildung 17 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B4.1

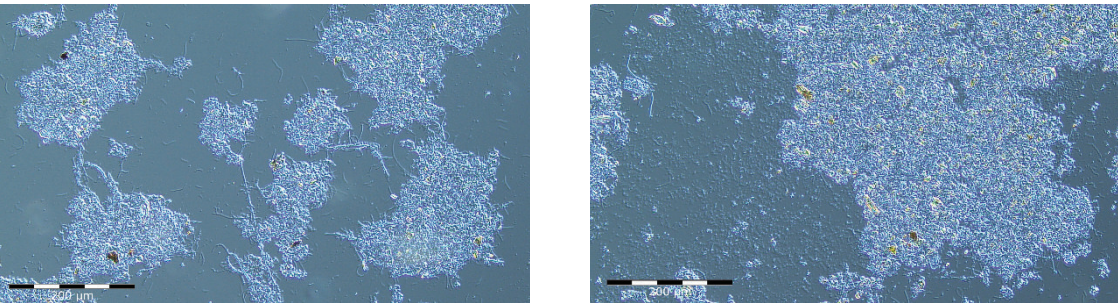


Abbildung 18 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B4.2

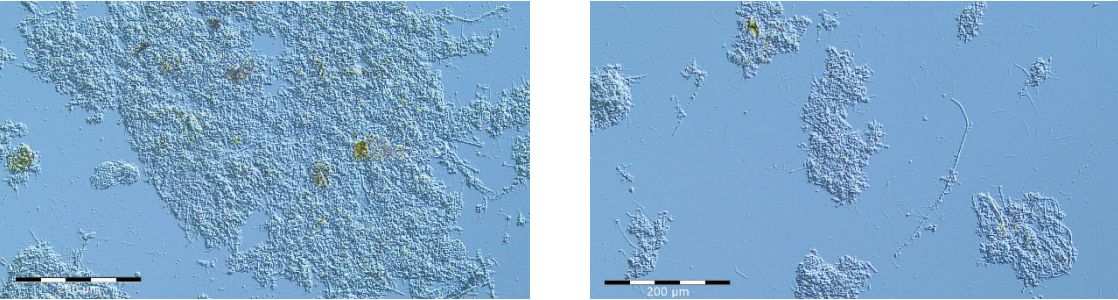


Abbildung 19 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase A2

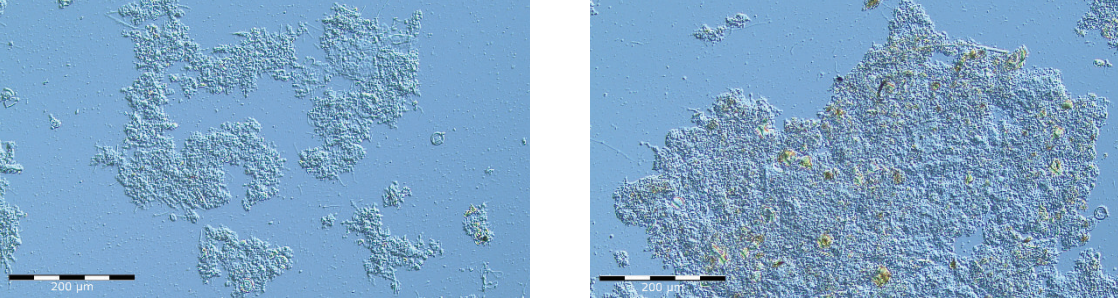
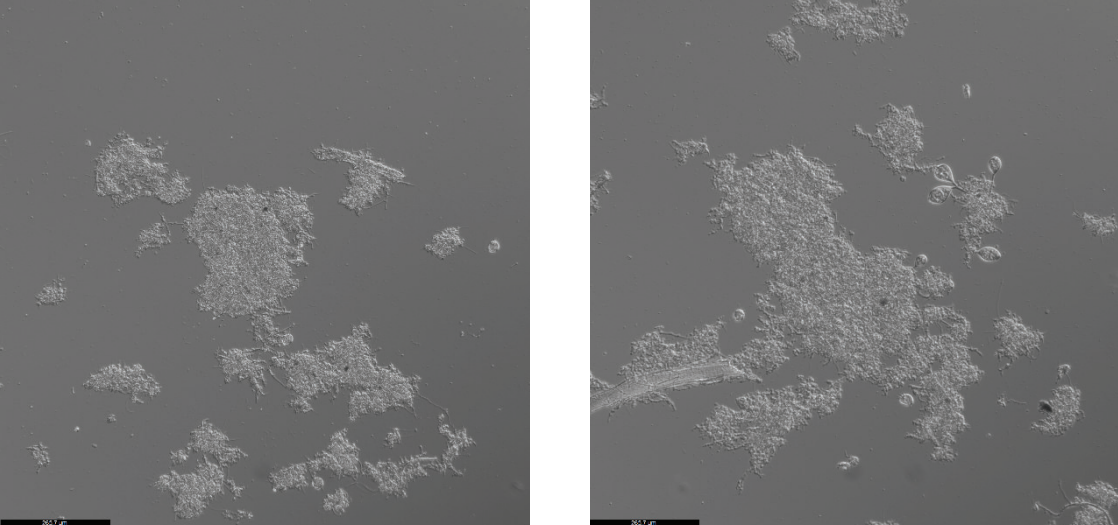


Abbildung 20 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B1.2



Ab Versuchsphase B3 zeigte sich bei selektivem ÜSS-Abzug eine Tendenz zu kompakteren und größeren Flocken als in den Referenzphasen. Die hohe Anzahl der freien Bakterien in Bild zwei in Versuchsphase B4.1 ist auf die anaeroben Verhältnisse im Nachklärbecken durch Probleme mit der Rücklaufschlammpumpe zurückzuführen. In Versuchsphase A2 bleiben zwar auch größere Flocken erhalten, die Flocken sind aber weniger kompakt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Partikelgrößenanalyse in denen tendenziell größere Partikel in den Versuchsphasen mit selektivem ÜSS-Abzug zu beobachten waren. In Versuchsphase B1.2 scheint die Anzahl der Flocken über 200 µm bei der mikroskopischen Beurteilung etwas zurück zu gehen. Im Vergleich mit Versuchsphase A2 werden die Flocken aber wieder kompakter. Der Rückgang der Flockengröße war bei der Partikelgrößenverteilung nicht zu beobachten.

Die Häufigkeit der Fadenbildenden Organismen war über den gesamten Versuchszeitraum gering und vorhandene Fadenbakterien waren in die Flocken integriert. In Bezug auf die Fädigkeitsstufe war keine Änderung zwischen den Versuchsphasen festzustellen.

Das vermehrte Auftreten von Zoogloea in Versuchsphase B1.1 und B2 das, laut früheren Untersuchungen ein Anzeichen einer beginnenden Granulierung des Schlammes sein kann (Jahn et al. 2017), konnte in späteren Versuchsphasen nicht mehr beobachtet werden. Vermutlich sind die Zulaufbedingungen für eine verstärkte Granulierung des Schlammes, wie sie unter anderem bei Roche et al. (2021) zu beobachten war, nicht geeignet.

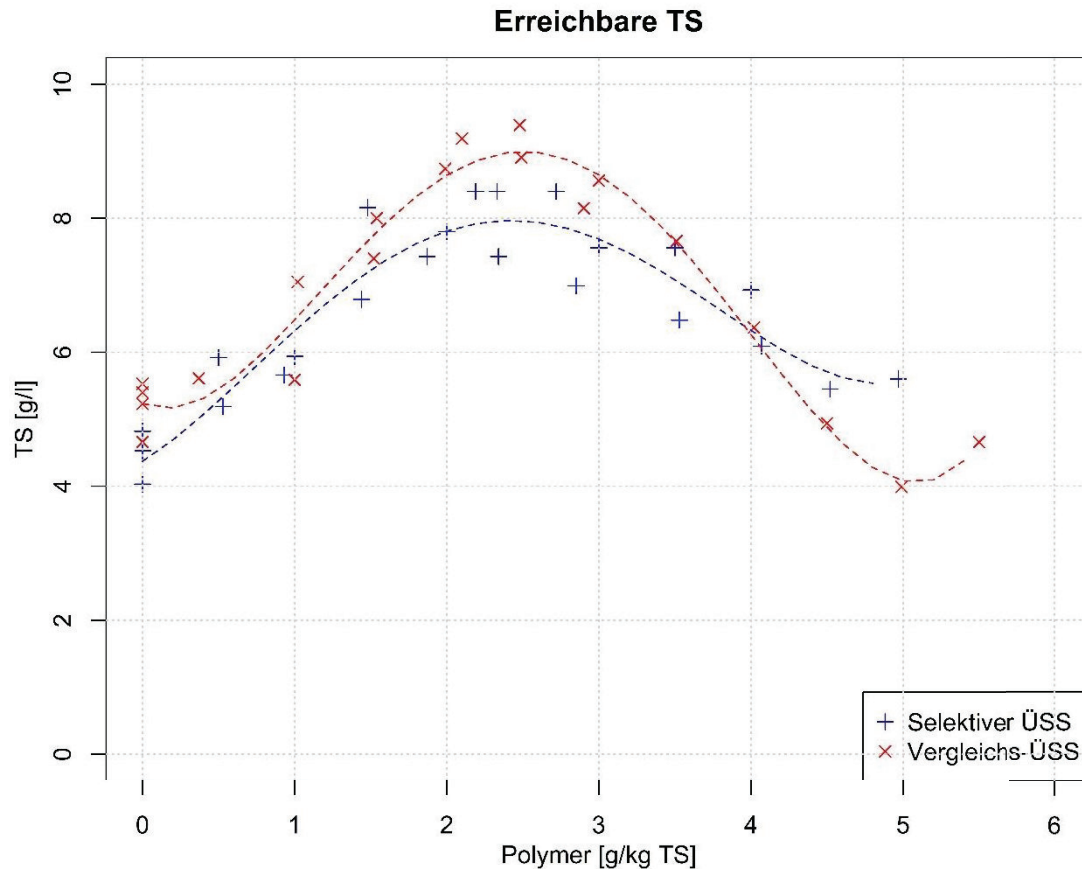
4.1.7 Schlammeindickung

Zur Ermittlung der optimalen Polymermenge für die Eindickung des Schlammes wurden vier Versuchsreihen mit selektiv abgezogenen ÜSS und Referenz-ÜSS durchgeführt. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils fünf Polymerdosierungen betrachtet. Als Referenzwert wurde eine Probe ohne Polymerdosierung herangezogen.

Der Ausgangs-TS-Gehalt des selektiv abgezogenen ÜSS lag zwischen 2,6 g/l und 3,6 g/l. Der Ausgangs-TS-Gehalt des Referenz-ÜSS lag zwischen 4,1 g/l und 5,5 g/l.

In Abbildung 21 ist der erreichbare TS-Gehalt der Schlämme nach 30 Minuten statischen Eindickens bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt.

Abbildung 21 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der Pilotanlage

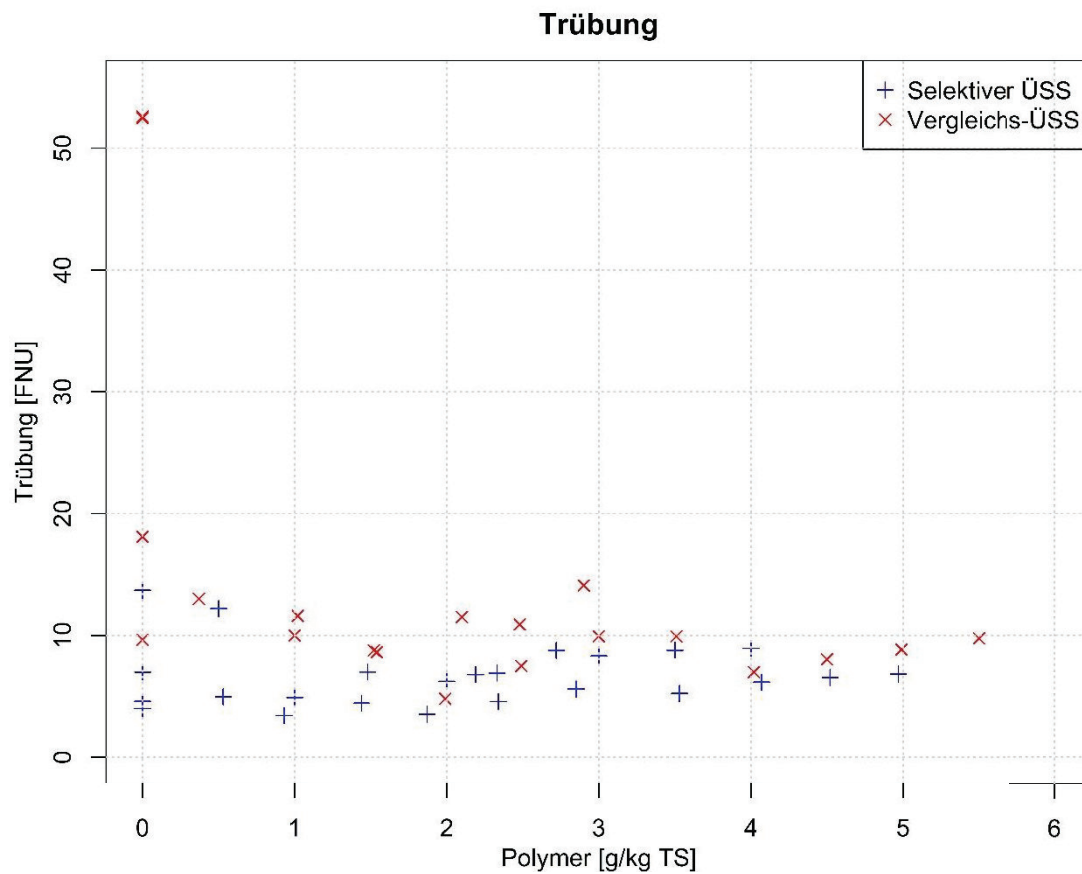


Der maximale erreichbare TS-Gehalt nach 30 Minuten statischen Eindickens (r^2 selektiver ÜSS = 0,86, r^2 Referenz-ÜSS = 0,94) ist beim Referenz-ÜSS um rund 1 g/l höher. Während das Polymer zu TS Verhältnis sich bei beiden maximalen TS-Werten um rund 0,2 g Polymer /kg TS unterscheidet ist die absolute Polymermenge beim selektiven ÜSS um rund 2,2 ml/l geringer.

Trotz des etwas geringeren erreichbaren TS-Gehaltes nach 30 Minuten statischen Eindickens (1 g/l) ergeben sich durch die Eindickung von selektivem ÜSS keine negativen Auswirkungen auf den Betrieb einer MÜSE. Auch eine Steigerung der Kosten für die Polymeranschaffung ist auf Grund der Messergebnisse nicht zu erwarten.

In Abbildung 22 ist die Trübung des Überstandes des selektiven und des Referenz-ÜSS nach 30 Minuten statischen Eindickens bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt.

Abbildung 22 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der Pilotanlage

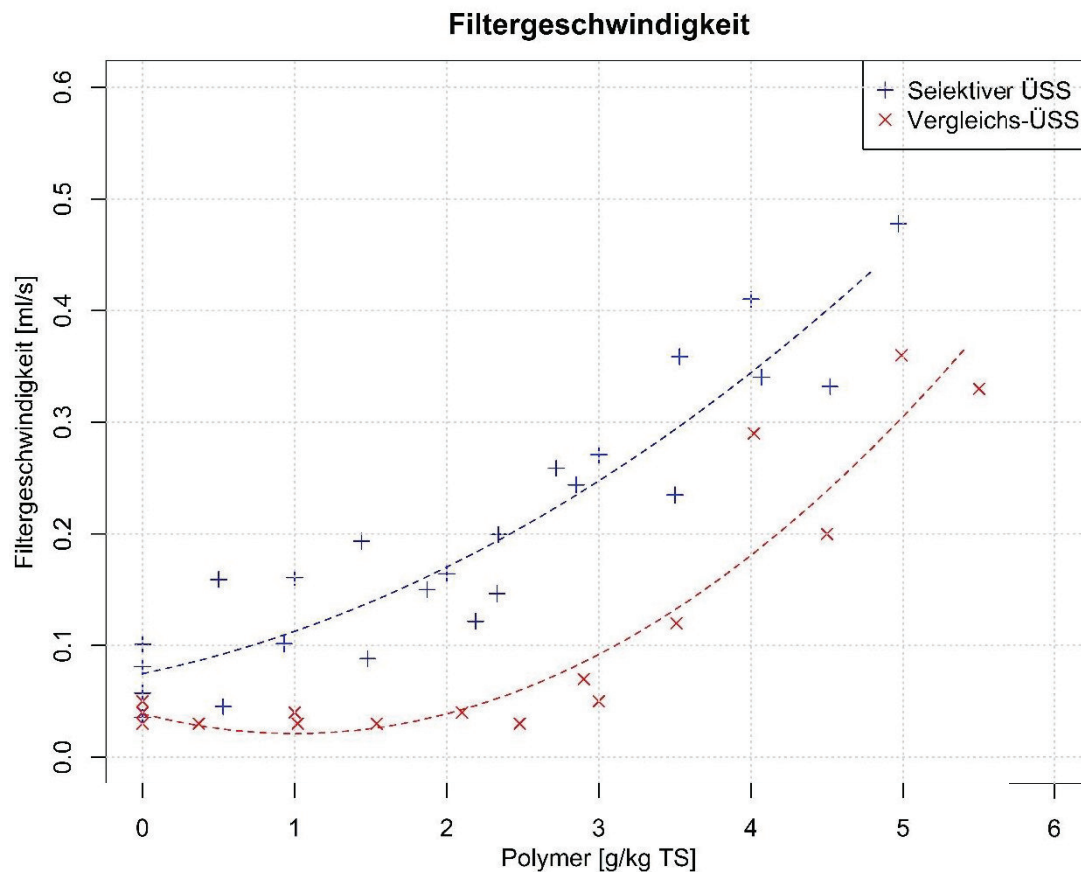


Die niedrigste Trübung im Überstand von 3,41 FNU wurde beim selektiven ÜSS bei einer Polymermenge von rund 1,4 ml/l gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung im Überstand von 4,8 FNU bei einer Polymermenge von 5,4 ml/l gemessen. Die niedrigste Trübung im Überstand beim selektiven ÜSS wurde bei einem Polymer zu TS Verhältnis von 0,93 g/kg TS gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung bei einem Polymer zu TS Verhältnis von 1,99 g/kg TS gemessen.

Die geringere Trübung im Überstand des selektiven ÜSS nach dem Eindicken ist positiv zu bewerten und würde im Betrieb einen geringeren Feststoffgehalt im Trübwasser bedeuten.

In Abbildung 23 ist die Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS und eine Filterkuchendicke von einem mm dargestellt.

Abbildung 23 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS pro mm Filterkuchen der Pilotanlage



Die Filtergeschwindigkeit ist, wie zu erwarten, beim selektiven ÜSS auf Grund des geringeren TS-Gehaltes höher. Der Anstieg der Filtergeschwindigkeit des selektiven ÜSS bei Polymermengen ab etwa 2,7 g/kg TS ist mit einer Steigung von 0,10 ml/l pro g Polymer/kg TS vergleichbar mit dem Anstieg bei Filtration des Referenz-ÜSS mit einer Steigung von 0,11 ml/l pro g Polymer/kg TS. Auf Basis der Laborergebnisse kann somit angenommen werden, dass das Eindickverhalten nicht negativ durch den selektiven ÜSS-Abzug beeinflusst wird.

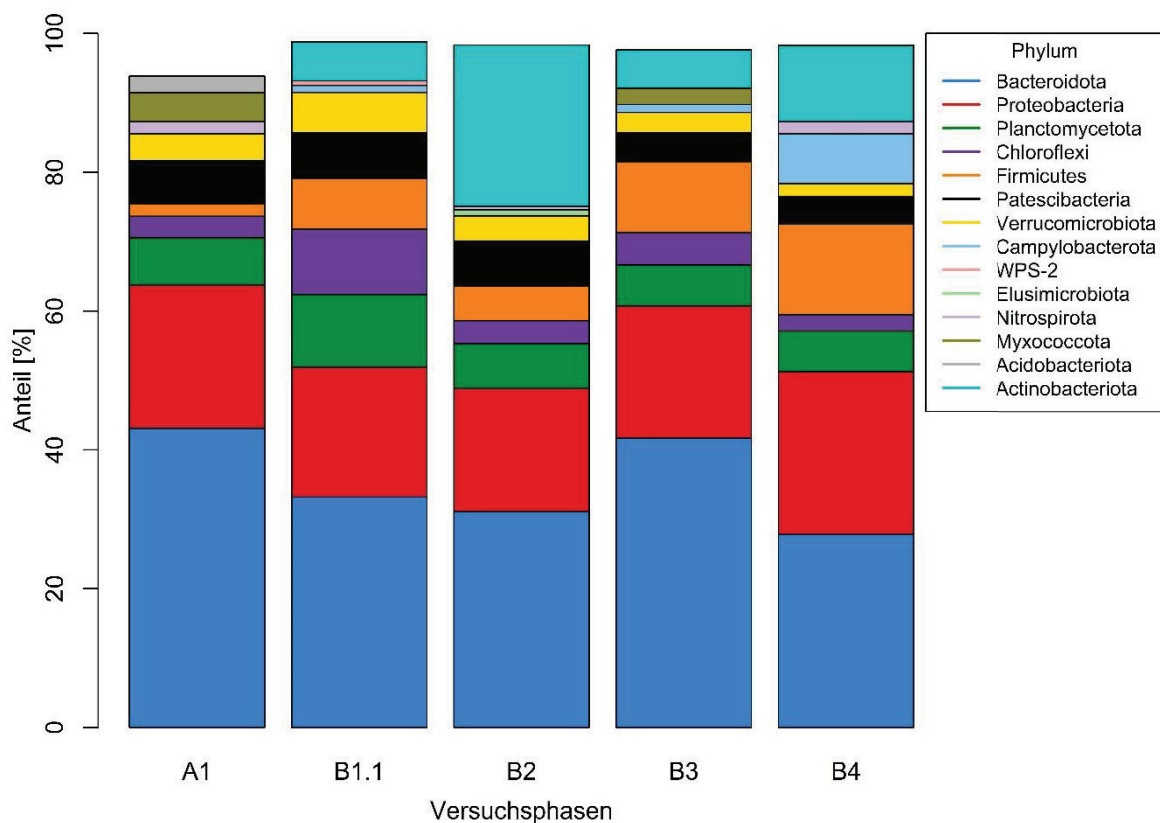
4.1.8 DNA Sequenzierung

Zur Ermittlung einer möglichen Änderung des PAO/GAO Verhältnisses wurden DNA-Proben aus den Versuchsphasen A1, B1.1, B2, B3 und B4 untersucht. Anhand der Ergebnisse der DNA Analysen konnte keine Veränderung des PAO/GAO Verhältnisses festgestellt werden, da kaum bekannte PAO oder GAO in den untersuchten Proben gefunden wurden. In Versuchsphase B3 fand jedoch eine signifikante Steigerung der

Phosphatentfernung durch biologischen Phosphatabbau statt. Um sicherzustellen, dass die Steigerung der Phosphatentfernungsrates auf biologische Phosphatentfernung zurückzuführen ist, wurde in einem Einzelversuch die Phosphatrücklösung untersucht. Da das Ergebnis der Untersuchung eindeutig einen biologischen Phosphatabbau nachwies, deutet das darauf hin, dass bisher unbekannte PAO für den biologischen Phosphatabbau verantwortlich sind. Es konnte keine mit der biologischen Phosphatentfernung in Verbindung stehende Änderung der Bakteriengemeinschaft beobachtet werden.

In Abbildung 24 sind die zehn am häufigsten vorkommenden Arten jeder Probe auf Phylum Ebene dargestellt.

Abbildung 24 Zehn am häufigsten vorkommenden Arten jeder Probe der Pilotanlage



4.1.9 Spurenstoff-Entfernung

Um den Einfluss eines reduzierten Schlammalters auf die Entfernung der organischen Spurenstoffe Iopromid und Amidotrizoesäure, die laut Ternes et al. (2004) bei

konventionellen Schlammaltern gut abbaubar sind, sowie Carbamezepin und Diazepam die bei Schlammaltern unter 20 Tagen bei einer Temperatur von 15°C nicht abbaubar sind zu untersuchen, wurde in den Versuchsphasen B4.1 und B4.2 die Spurenstoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotkläranlage gemessen. Das Schlammalter in Versuchsphase B4.1 betrug rund 18 Tage, das Schlammalter in Versuchsphase B4.2 betrug rund 12 Tage.

Ipromid und Diazepam konnten in keinen der Proben nachgewiesen werden. Amidotrizoesäure wurde nur in den Proben mit einem Schlammalter von rund 18 Tagen nachgewiesen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich die Konzentrationen der, laut Ternes et al. (2004) bei konventionellen Schlammaltern ebenfalls gut abbaubaren Spurenstoffen Bezafibrat und Sulfamethoxazol bestimmt.

Die Messung der Spurenstoffkonzentrationen ergab bei dem reduzierten Schlammalter von rund 12 Tagen eine verbesserte Abbauleistung der untersuchten Spurenstoffe. Dies könnte auf ein erhöhtes Schlammalter der dichteren Schlammfraktion infolge des selektiven ÜSS-Abzuges zurückzuführen sein. Aufgrund von analytischen Unsicherheiten, die auf unvollständige Dekonjugationsprozesse metabolisierter Substanzen zurückzuführen sind, kann keine eindeutige Aussage zu einem Zusammenhang der Spurenstoffentfernung und dem selektiven ÜSS-Abzug getroffen werden.

4.2 Großtechnische Anlage A

4.2.1 Betriebliche Rahmenbedingungen

4.2.1.1 Zulauffrachten

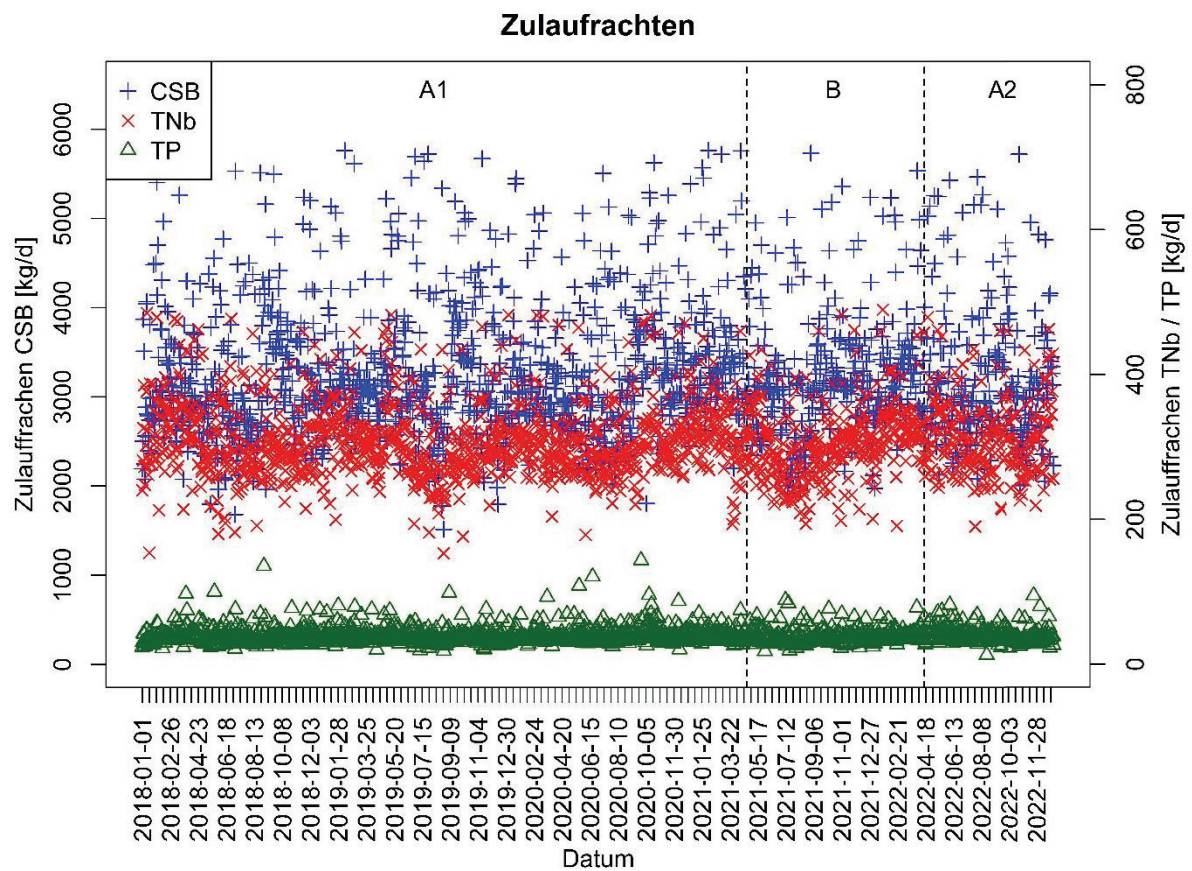
In Tabelle 14 sind die mittleren CSB, TN_b und TP Zulauffrachten der jeweiligen Jahre samt Standardabweichung in kg/d aufgelistet.

Tabelle 14 Mittlere Zulaufmengen der großtechnischen Anlage A

Parameter	CSB [kg/d]		TN _b [kg/d]		TP [kg/d]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	3197,0	+/- 728,4	312,1	+/- 54,9	39,0	+/- 11,3
2019	3294,6	+/- 764,9	305,6	+/- 51,0	38,7	+/- 9,6
2020	3264,4	+/- 728,6	308,6	+/- 48,9	40,4	+/- 12,6
2021	3294,2	+/- 713,8	307,1	+/- 49,8	38,9	+/- 9,4
2022	3244,9	+/- 732,2	318,0	+/- 51,2	39,8	+/- 9,7

In Abbildung 25 sind die Zulaufmengen der Anlage dargestellt. Der Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen ist durch die vertikalen Linien gekennzeichnet.

Abbildung 25 Zulaufmengen der großtechnischen Anlage A



4.2.1.2 Reinigungsleistung

Im Laufe des Projektes wurde zusätzlich zu dem Absetzverhalten der Schlämme auch die Reinigungsleistung der Anlagen überwacht. Wie auch bei den Zulauffrachten werden zusätzlich zu den Daten aus dem Versuchszeitraum auch die Daten der Vorjahre betrachtet.

In Tabelle 15 sind die mittleren Entfernungsraten samt Standardabweichung in den einzelnen Jahren aufgelistet.

Tabelle 15 Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der großtechnischen Anlage A in Prozent

Parameter	Entfernungsrates CSB [%]		Entfernungsrates TN _b [%]		Entfernungsrates TP [%]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	95,6	+/- 1,3	92,3	+/- 2,7	95,9	+/- 1,6
2019	95,2	+/- 1,4	92,4	+/- 2,6	96,2	+/- 1,7
2020	95,8	+/- 1,1	92,6	+/- 2,2	97,1	+/- 1,1
2021	95,6	+/- 1,1	93,0	+/- 2,8	96,4	+/- 1,5
2022	95,6	+/- 1,2	93,9	+/- 2,2	96,2	+/- 1,5

4.2.1.3 Temperatur/ pH Wert

In Tabelle 16 sind die maximale und minimale Temperatur des Ablaufs der großtechnischen Anlage in °C und die mittleren pH-Werte im Zulauf zur Anlage samt Standardabweichung der einzelnen Jahre aufgelistet.

Tabelle 16 Maximale und minimale Temperatur sowie mittlere pH-Werte der großtechnischen Anlage A

Parameter	Temperatur [°C]			pH-Wert
	max	min	Mittelwert	SD
2018	24,7	7,0	-	-
2019	24,0	8,0	-	-
2020	23,7	8,4	8,01	+/- 0,16
2021	23,5	8,7	8,10	+/- 0,12
2022	24,3	9,4	7,95	+/- 0,16

4.2.1.4 Belastung

In Tabelle 17 sind die mittlere Raumbelastung in kg CSB/(m³ d) und die mittlere Schlammbelastung in kg CSB/(kgTS d) der einzelnen Jahre samt Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 17 Mittlere Raum- und Schlammbelastung der großtechnischen Anlage A

Parameter	Raumbelastung [kg CSB / (m ³ d)]		Schlammbelastung [kg CSB / (kg TS d)]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2081	0,49	+/- 0,11	0,13	+/- 0,04
2019	0,51	+/- 0,12	0,15	+/- 0,04
2020	0,50	+/- 0,11	0,15	+/- 0,05
2021	0,51	+/- 0,11	0,14	+/- 0,04
2022	0,50	+/- 0,11	0,14	+/- 0,04

4.2.1.5 ÜSS-Menge und Schlammalter

In Tabelle 18 sind die abgezogene ÜSS-Menge in m³/d sowie das Schlammalter in Tagen in den unterschiedlichen Jahren aufgelistet.

Tabelle 18 Mittlere ÜSS-Menge und mittleres gesamtes Schlammalter der großtechnischen Anlage A

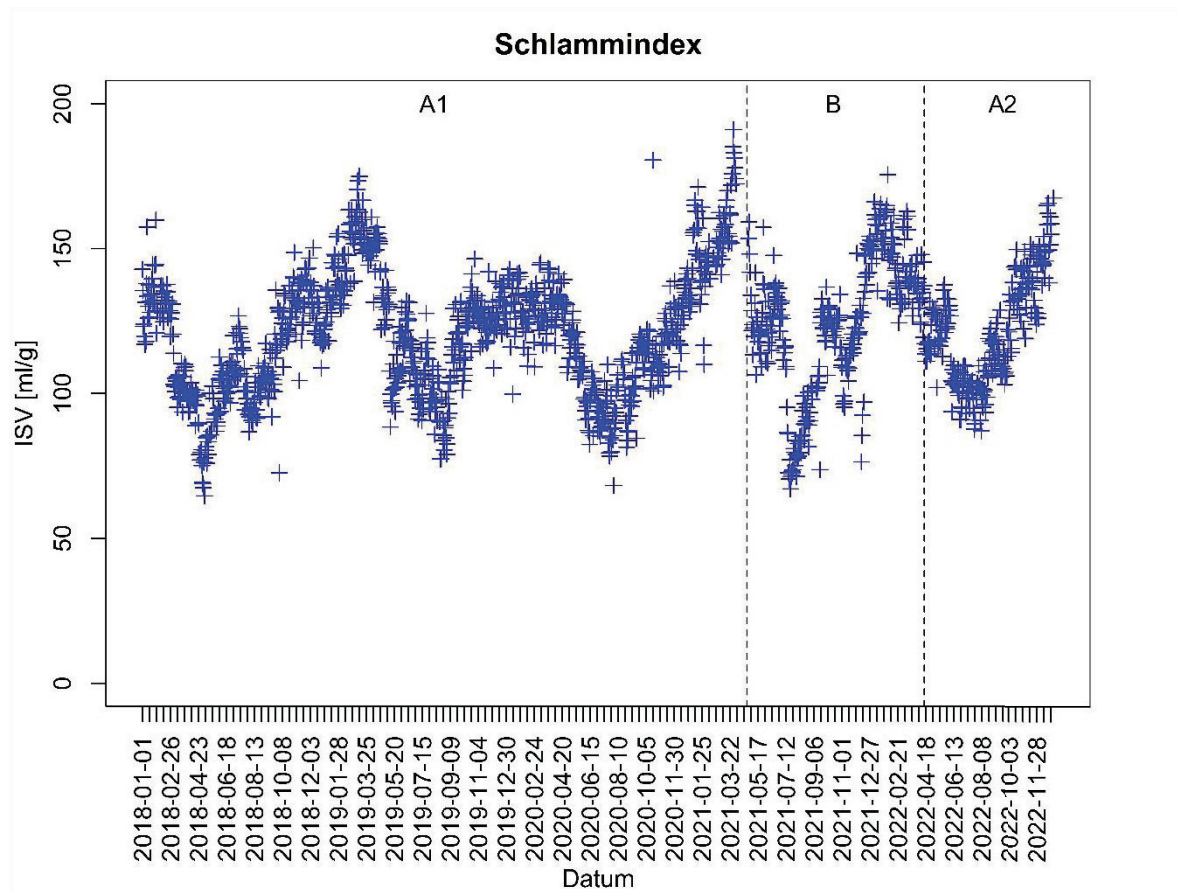
Parameter	Q _{ÜSS} [m ³ /d]		Schlammalter [d]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	160,7	+/- 72,0	-	-
2019	152,7	+/- 32,2	-	-
2020	148,3	+/- 53,1	11,8	+/- 2,6
2021	298,4	+/- 141,3	11,4	+/- 2,8
2022	245,9	+/- 143,6	11,2	+/- 2,1

4.2.2 Absetzverhalten

4.2.2.1 Schlammindex

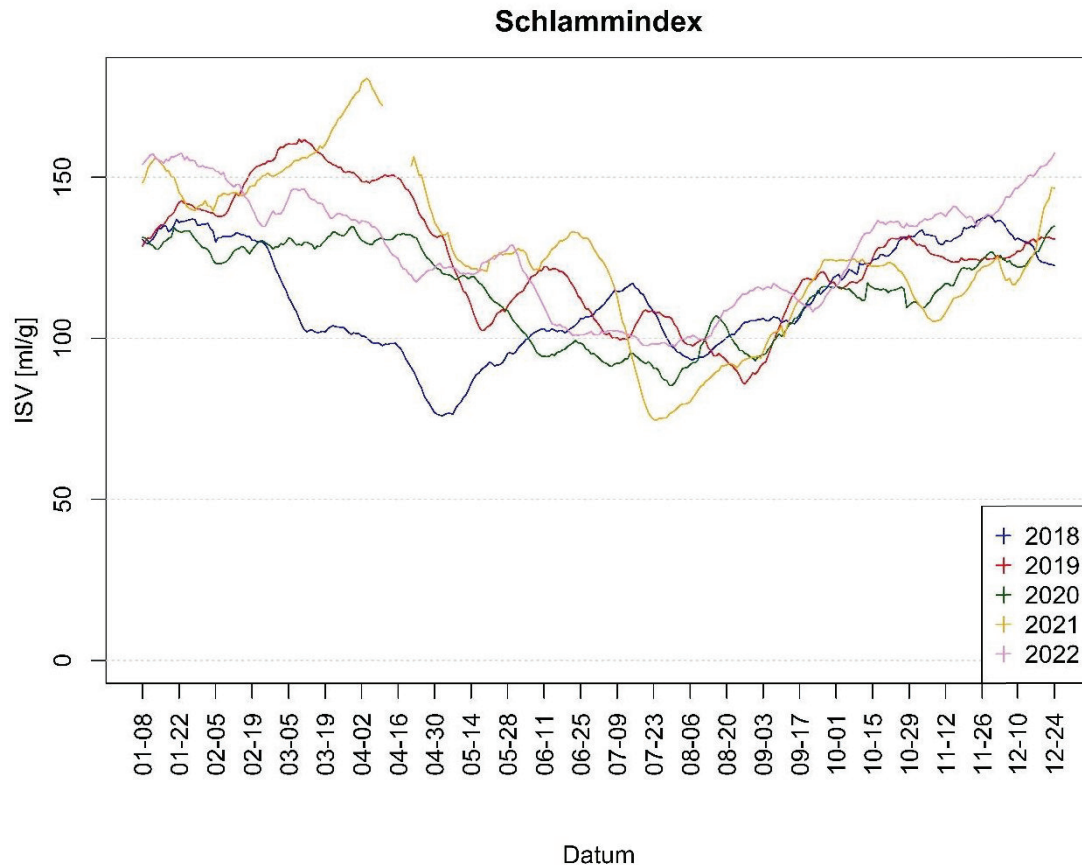
In Abbildung 26 ist der ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A dargestellt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 26 ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A



In Abbildung 27 sind die gleitenden Mittelwerte des ISV der einzelnen Jahre einander gegenübergestellt.

Abbildung 27 Gleitender Mittelwert des ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren



In den Jahren 2018 - 2020 kam es, genauso wie im Projektjahr, im Juni zu einem Abfall des ISV. In dem Jahr in dem selektiv ÜSS abgezogen wurde kam es zwar zu einem stärkeren Abfall als in den vorhergehenden Jahren, allerdings fand Mitte September ein Anstieg auf ein vergleichbares Niveau wie in den Vorjahren statt. Mit Ausnahme eines Anstiegs Mitte Dezember bis Mitte Jänner lag der ISV während der Versuchsphase jedoch vergleichsweise niedrig. Als Grund für den Anstieg des ISV ab August werden die Probleme bei der ÜSS-Entnahme und die daraus resultierende Umstellung auf einen nur teilweise selektiven ÜSS-Abzug vermutet.

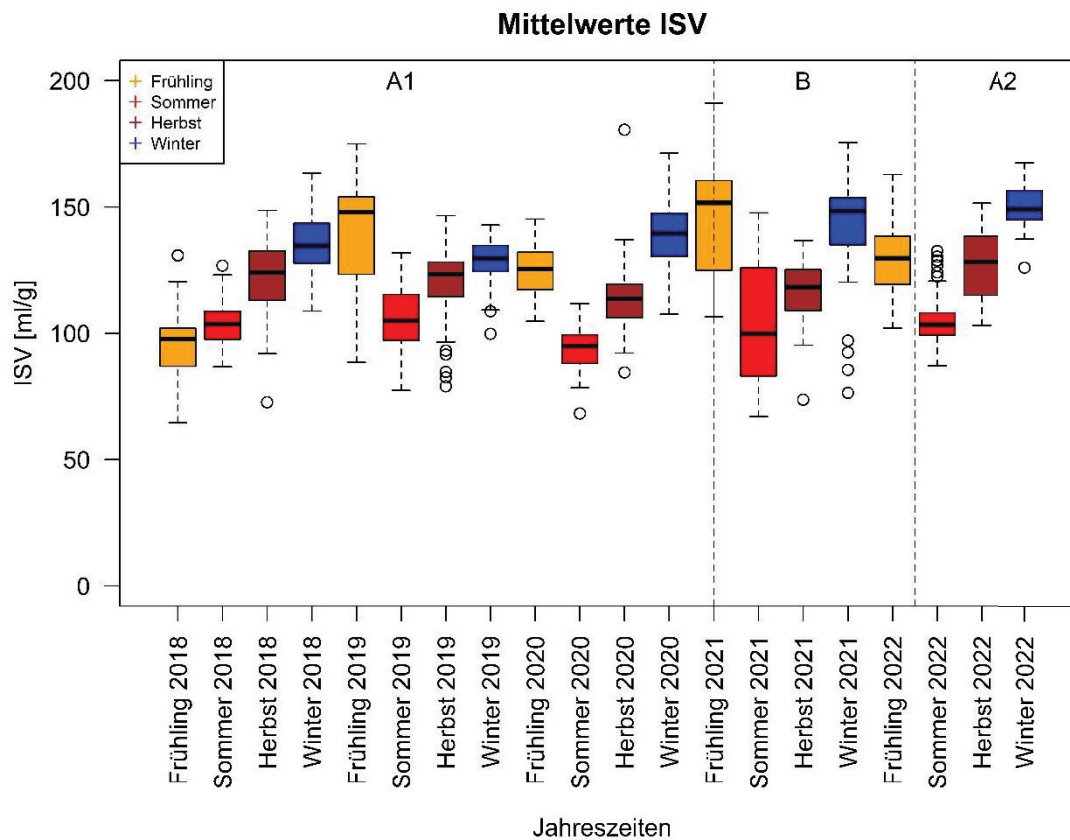
In Tabelle 19 ist der mittlere, auf der Anlage gemessene ISV des belebten Schlammes in den unterschiedlichen Jahren und Jahreszeiten samt Standardabweichung in ml/g aufgelistet.

Tabelle 19 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g

Parameter	ISV BB [ml/g]							
	Frühling		Sommer		Herbst		Winter	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	95	+/- 12,4	104	+/- 8,7	122	+/-14,2	136	+/-12,1
2019	139	+/- 21,7	106	+/- 12,7	120	+/- 12,7	129	+/-8,4
2020	125	+/- 10,5	95	+/- 8,6	113	+/- 12,1	140	+/-13,9
2021	146	+/- 21,5	104	+/- 22,6	116	+/- 11,1	144	+/- 17,4
2022	130	+/- 12,6	105	+/- 9,6	127	+/- 13,4	150	+/-9,5

In Abbildung 28 sind die mittleren ISV der einzelnen Jahre nach Jahreszeiten als Boxplot dargestellt. Die Einteilung der Jahreszeiten erfolgt nach der meteorologischen Einteilung. Der Winter wird dabei immer dem Jahr zugeordnet in dem der Dezember liegt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 28 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g



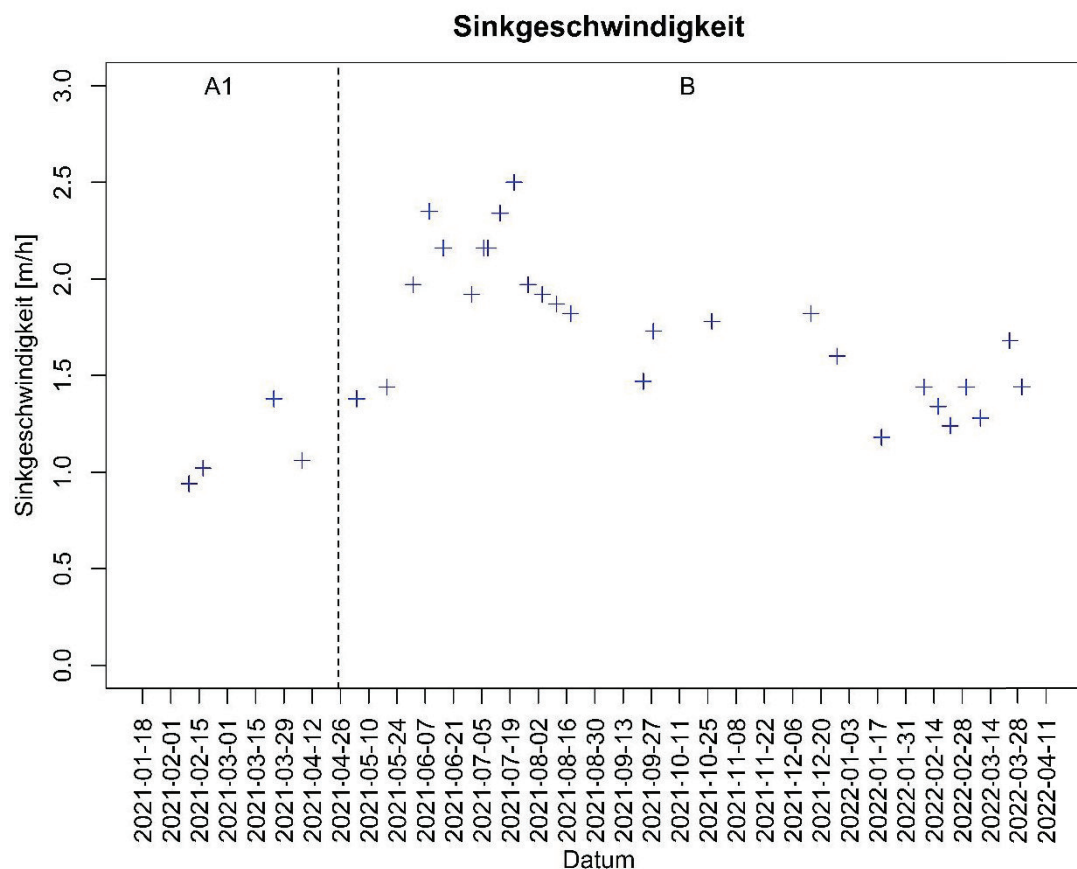
Zum Vergleich der mittleren ISV wurde eine ANOVA zwischen den einzelnen Jahren und Jahreszeiten durchgeführt. Dabei war keine signifikante Änderung des ISV durch den selektiven ÜSS-Abzug im Vergleich zu den langjährigen Referenzzeiträumen erkennbar. Dies ist auf die vergleichsweise geringe Selektionswirkung der ÜSS-Abzugsmethode und die starken jährlichen Schwankungen im ISV zurückzuführen.

Bei gesonderter Betrachtung der Vergleichszeiträume A1 im Winter/Fröhling 2021 und B im Winter/Fröhling 2022 zeigte sich jedoch eine signifikante Reduktion des ISV von rund 9% ($p = 0,0000001$). Die Berechnung des möglichen TS-Gehaltes im Belebungsbecken laut DWA (2016) bei einer Verweilzeit von zwei Stunden und einem Rücklaufverhältnis von $RV = 1$ ergab eine rechnerisch mögliche Steigerung des TS-Gehaltes im Belebungsbecken und damit eine Kapazitätssteigerung der großtechnischen Anlage von etwa 9%. Auf Grund der starken Schwankungen zwischen denselben Zeiträumen unterschiedlicher Jahre ist diese Kapazitätssteigerung jedoch nicht eindeutig dem selektiven ÜSS-Abzug zuzuordnen.

4.2.2.2 Sinkgeschwindigkeit

In Abbildung 29 sind die auf der Anlage gemessenen Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes im Versuchszeitraum dargestellt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 29 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in m/h



Der Abfall der Sinkgeschwindigkeit ab August 2021 liegt in dem Zeitraum in dem auf Grund von Problemen mit der ÜSS-Entnahme nur eine Hälfte des ÜSS selektiv abgezogen wurde.

Auf Grund der geringen Anzahl an Messwerten in den Jahren 2018 - 2020 sowie im Jahr 2022 war eine Auswertung der mittleren Sinkgeschwindigkeiten nach Jahr und Jahreszeit nicht möglich. Die Auswertung der Sinkgeschwindigkeit beschränkte sich daher auf die Vergleichszeiträume in den Jahren A1 im Winter/Frühling 2021 und B im Winter/Frühling 2022.

In Tabelle 20 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes in den Vergleichszeiträumen inklusive Standardabweichung in m/h aufgelistet.

Tabelle 20 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den Vergleichszeiträumen

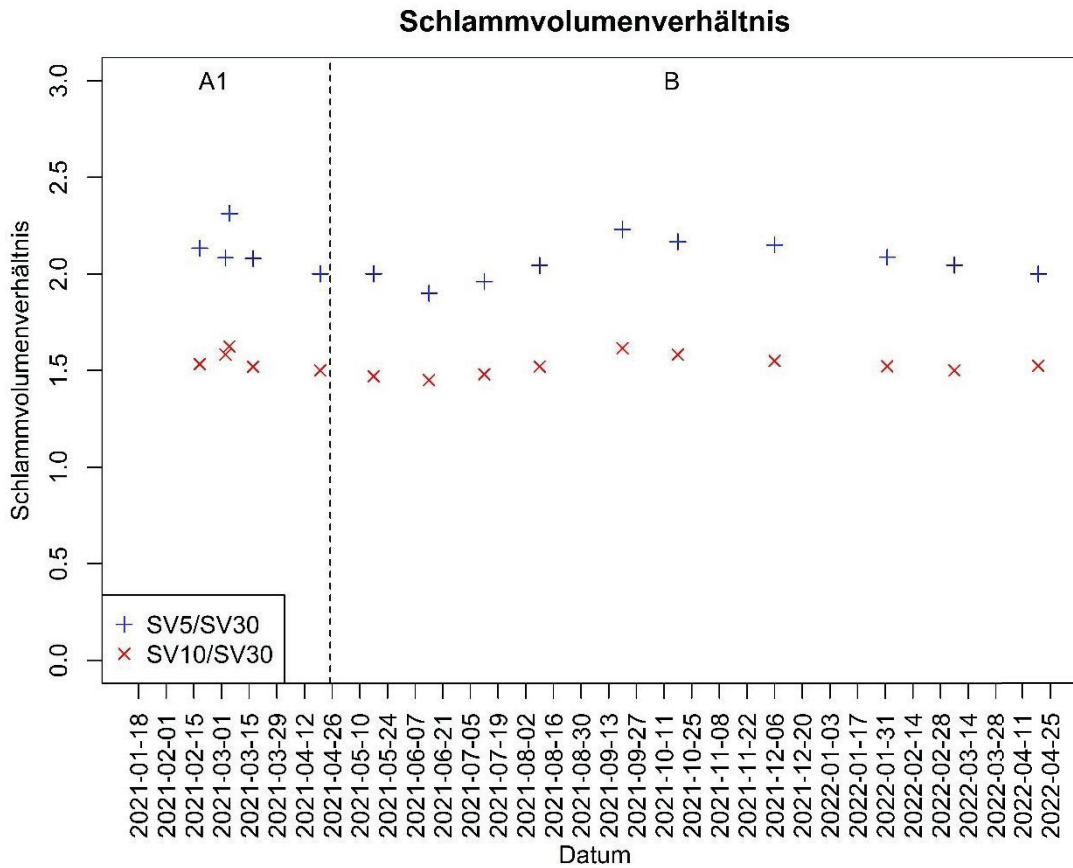
Parameter	vs BB [m/h]	
	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	1,10	+/- 0,19
Versuchsphase B	1,38	+/- 0,16

Bei den Sinkgeschwindigkeiten zeigte sich bei der Auswertung der Vergleichszeiträume 2021 und 2022 mittels ANOVA ein ähnliches Bild wie bei dem ISV. In Versuchsphase B war eine signifikante Steigerung ($p = 0,02$) der Sinkgeschwindigkeit um rund 25% verglichen mit demselben Zeitraum in Versuchsphase A1 zu beobachten

4.2.2.3 Schlammvolumenverhältnis

In Abbildung 30 ist das Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes im Versuchszeitraum dargestellt. Die vertikalen Linien markieren den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 30 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A



Der leichte Anstieg der Schlammvolumenverhältnisse im Sommer 2021 erfolgte zeitlich mit einem Abfall der Sinkgeschwindigkeit und einem Anstieg des ISV in diesem Zeitraum. Ein möglicher Grund hierfür ist die teilweise Umstellung des ÜSS-Abzuges zwischen August und September 2021.

In Tabelle 21 ist das mittlere Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes samt der Standardabweichung in den Vergleichszeiträumen aufgelistet.

Tabelle 21 Mittleres Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den Vergleichszeiträumen

Parameter	SV ₅ /SV ₃₀		SV ₁₀ /SV ₃₀	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A1	2,12	+/- 0,12	1,55	+/- 0,51
Versuchsphase B	2,04	+/- 0,04	1,52	+/- 0,01

Zwischen den Versuchsphasen zeigte sich sowohl bei SV₅/SV₃₀ als auch bei SV₁₀/SV₃₀ keine signifikante Änderung der Schlammvolumenverhältnisse.

4.2.3 Partikelgrößenverteilung

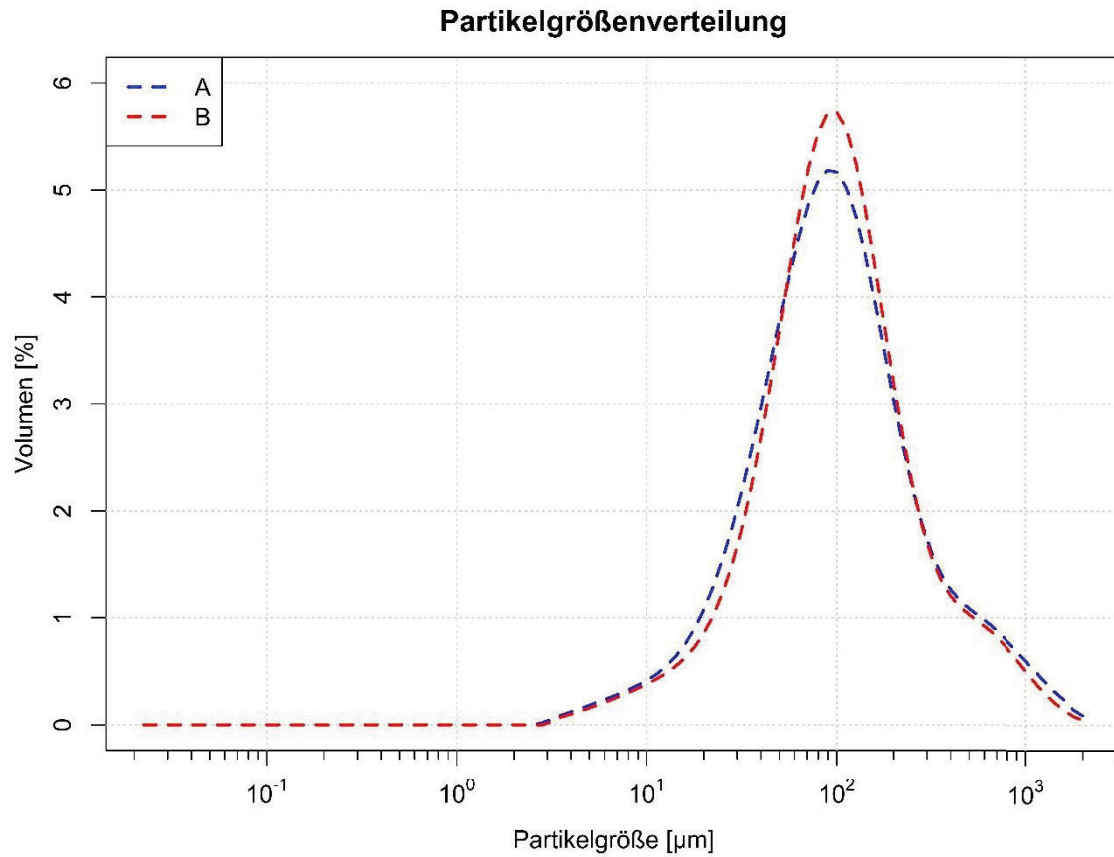
In Tabelle 22 sind die 50% und 90% Quantile der mittleren Partikelgrößenklassen der unterschiedlichen Versuchsphasen sowie die Größenklassen mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln dargestellt.

Tabelle 22 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der großtechnischen Anlage A

Parameter	50% Quantil [µm]	90% Quantil [µm]	Maximum [µm]
	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
Versuchsphase A	79,62 - 89,34	355,66 - 399,05	79,62 - 89,34
Versuchsphase B	89,34 - 100,24	316,98 - 355,66	89,34 - 100,24

In Abbildung 31 sind die mittleren Partikelgrößenverteilungen der unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 31 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den unterschiedlichen Versuchsphasen



Die mittlere Partikelgrößenklasse in der das 50% Quantil lag und die Partikelgrößenklasse mit dem prozentuell höchsten Anteil an Partikeln stieg in der Versuchsphase B an. Die Klasse in der das 90% Quantil lag verringerte sich in Versuchsphase B.

4.2.4 Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken

In Abbildung 32 und Abbildung 33 sind mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A aus den Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 32 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in Versuchsphase A1

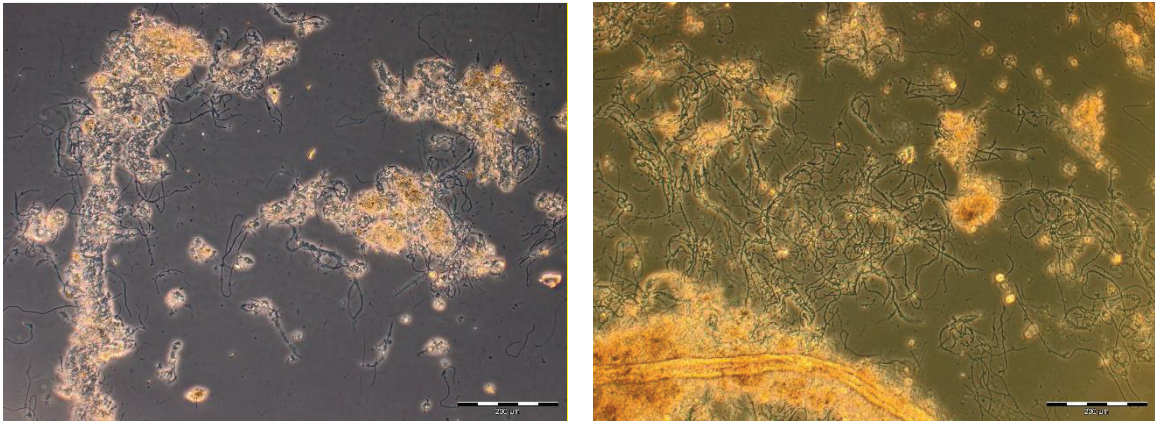
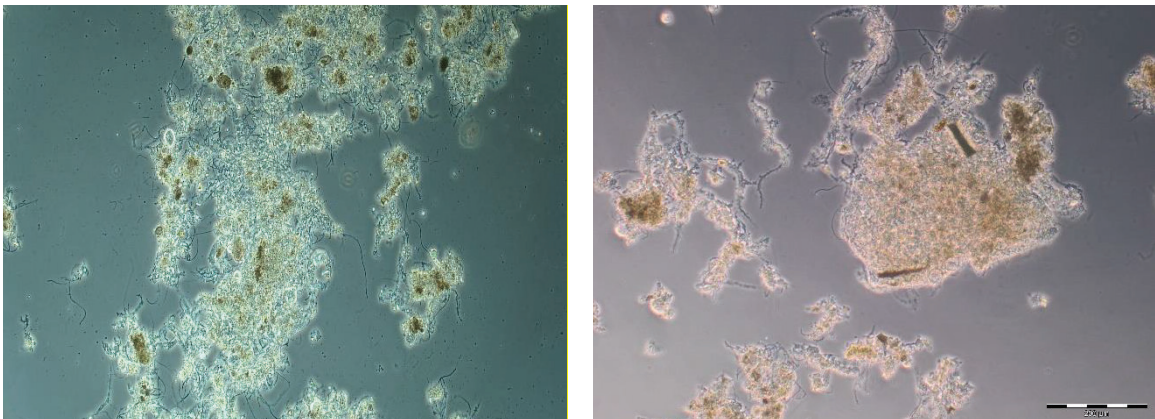


Abbildung 33 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in Versuchsphase B



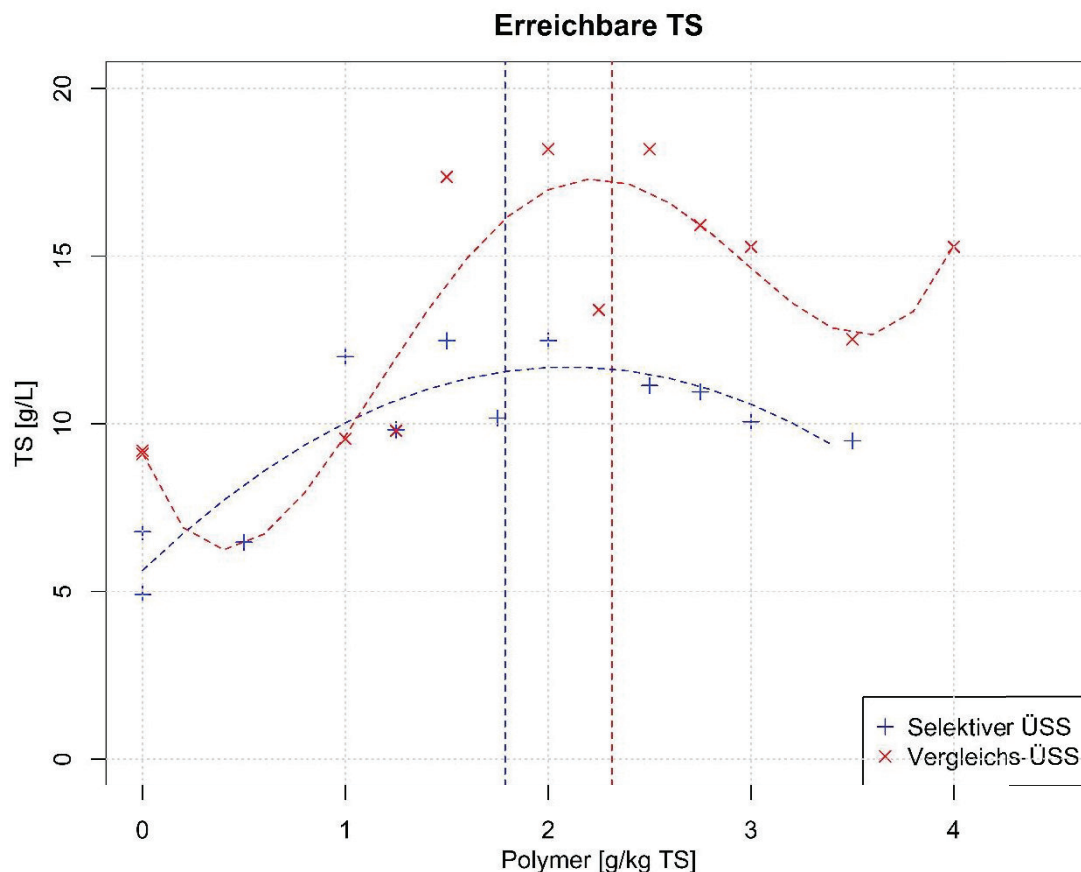
Im Versuchszeitraum B Winter/Frühling 2022, in dem es verglichen mit demselben Zeitraum A1 2021 zu einer signifikanten Verringerung des ISV und einer Steigerung der Sinkgeschwindigkeit kam, lies sich bei der mikroskopischen Beurteilung der Schlämme eine Verringerung der fadenförmigen Organismen feststellen. Das Vorhandensein von fadenförmigen Bakterien führt in der Regel zu einer Verschlechterung der Absetzeigenschaften. Diese Auswirkung des selektiven ÜSS-Abzuges wurde auch von Ahlendorf et al. (2006) beschrieben. Der selektive ÜSS-Abzug erwies sich somit als geeignetes Mittel zur Verringerung der Fädigkeit auf der großtechnischen Anlage A.

4.2.5 Schlammindickung

Zur Ermittlung der optimalen Polymermenge für die Eindickung des Schlammes wurden zwei Versuchsreihen mit selektiv abgezogenen ÜSS und Referenz-ÜSS durchgeführt. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils fünf Polymerdosierungen betrachtet. Als Referenzwert wurde eine Probe ohne Polymerdosierung herangezogen.

Der Ausgangs-TS-Gehalt des selektiv abgezogenen ÜSS lag zwischen 3,6 g/l und 3,9 g/l. Der Ausgangs-TS-Gehalt des Referenz-ÜSS lag bei 9,6 g/l. In Abbildung 34 ist der erreichbare TS-Gehalt der Schlämme nach 30 Minuten statischem Eindicken bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt. Die vertikalen Linien markieren die derzeitigen Polymerdosierungen bei vergleichbaren TS-Gehalten.

Abbildung 34 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Vergleichs ÜSS der großtechnischen Anlage A

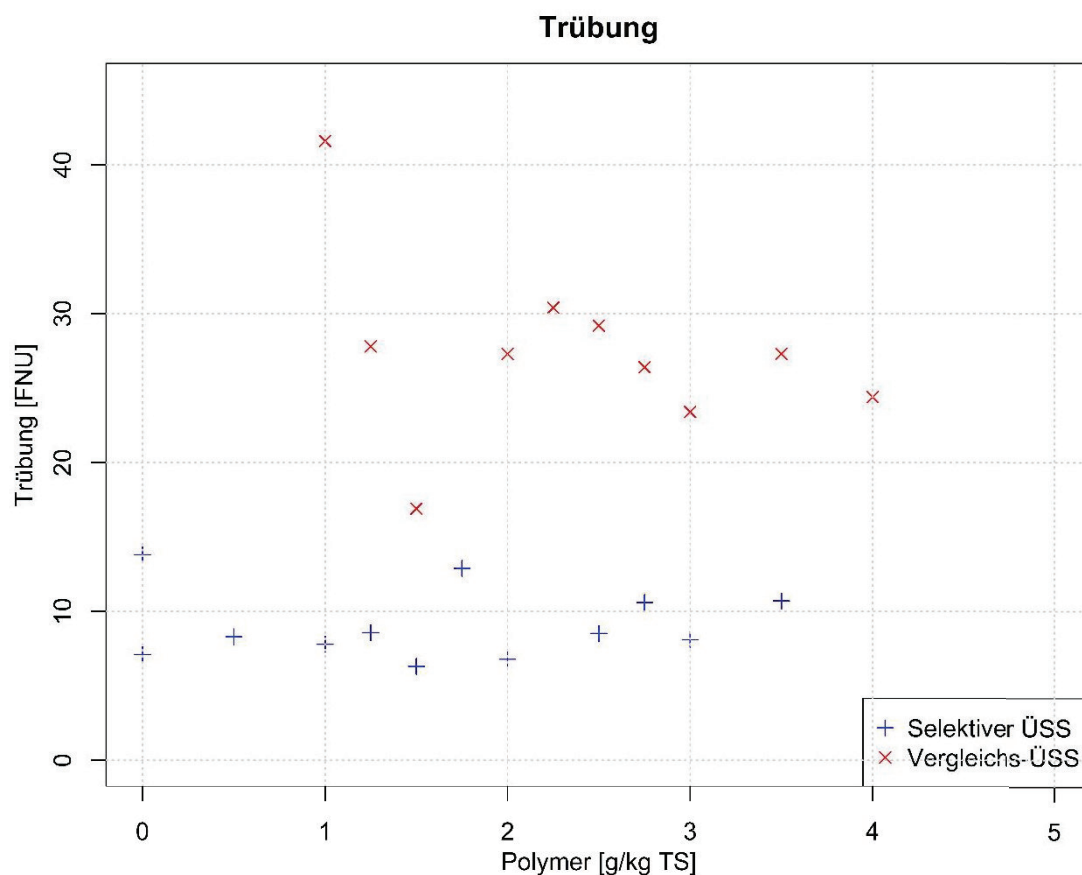


Der maximale erreichbare TS-Gehalt nach 30 Minuten statischem Eindicken (r^2 selektiver ÜSS = 0,74, r^2 Referenz-ÜSS = 0,62) liegt beim Referenz-ÜSS um rund 5,5 g/l

höher. Während das Polymer zu TS Verhältnis sich bei beiden maximalen TS-Werten um rund 0,25 g Polymer /kg TS unterscheidet ist die absolute Polymermenge beim selektiven ÜSS um rund 10,9 ml/l geringer. Da der Referenz-ÜSS bei der großtechnischen Anlage A aus der Rücklaufschlammlleitung, kurz nach der Fällmitteldosierung (AlCl₃), entnommen wurde, ist der höhere Fällmittelanteil im Referenz-ÜSS ein Mitgrund für das bessere Eindickverhalten.

In Abbildung 35 ist die Trübung des Überstandes des selektiven und des Referenz-ÜSS nach 30 Minuten statischem Eindicken bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt.

Abbildung 35 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage A

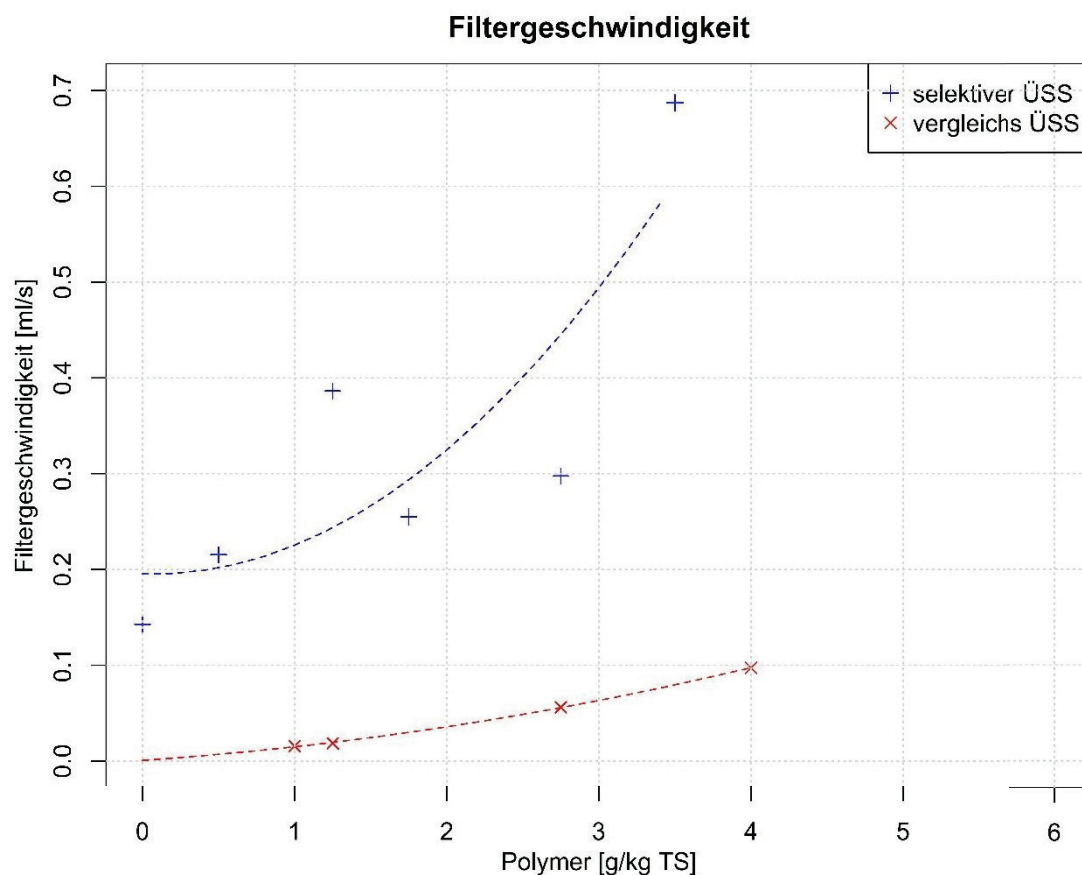


Die niedrigste Trübung im Überstand von 6,31 FNU wurde beim selektiven ÜSS bei einer Polymermenge von rund 4,65 ml/l gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung im Überstand von 16,9 FNU bei einer Polymermenge von 11,4 ml/l gemessen.

Die niedrigste Trübung im Überstand wurde beim selektiven ÜSS bei einem Polymer zu TS Verhältnis von 1,5 g/kg TS gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung ebenfalls bei einem Polymer zu TS Verhältnis von 1,5 g/kg TS gemessen. Während die Trübung beim selektiven ÜSS nur geringen Schwankungen unterlegen ist, zeigt sich beim Referenz-ÜSS ein deutlicher Anstieg bei höheren Polymermengen. In dem Bereich in dem die geringste Trübung des Überstandes des Referenz-ÜSS erreicht wurde liegt der erreichbare TS-Gehalt rund 3g/l über dem TS-Gehalt des selektiven ÜSS.

In Abbildung 36 ist die Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS und eine Filterkuchendicke von einem mm dargestellt.

Abbildung 36 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS Schlamm pro mm Filterkuchen der großtechnischen Anlage A



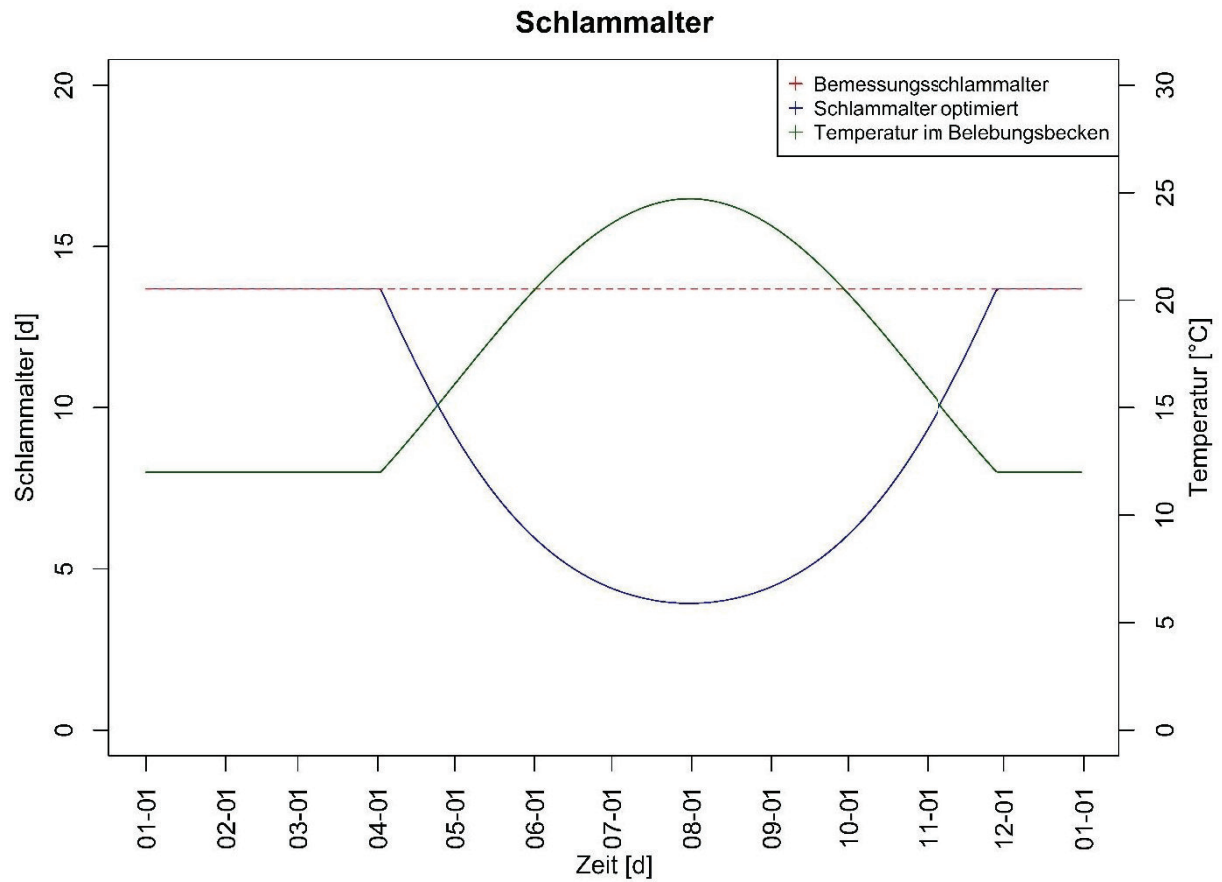
Die optimale Polymermenge bezogen auf die Filtergeschwindigkeit wurde bei beiden Schlämmen nicht erreicht. Es zeigt sich beim selektiven ÜSS jedoch bei steigender

Polymerdosierung ein weitaus steilerer Anstieg der Filtergeschwindigkeit als bei dem Referenz-ÜSS. Dies spricht für ein besseres Eindickverhalten des selektiven ÜSS.

4.2.6 Energetische Optimierung

Für die großtechnische Anlage A wurde anhand der Betriebsdaten bei der Bemessungstemperatur von 12 °C nach DWA (2016) ein erforderliches Schlammalter von 13,7 Tagen, ein TS-Gehalt im Belebungsbecken von 2,04 g/l und ein Sauerstoffbedarf von 1655,2 kg O₂/d ermittelt. Der Prozessfaktor wurde mit 1,5 und das V_{DN}/V_{BB} Verhältnis mit 0,5 angesetzt. Die, für die Ermittlung der zu denitrifizierenden Nitratstickstoffkonzentration nötige Ablaufkonzentration des Nitratstickstoffes wurde, auf Grund des ausgeprägten Jahresganges auf der großtechnischen Anlage A ebenfalls durch eine Sinuskurve angenähert. Der Sauerstoffeintrag durch Oberflächenbelüfter in Reinwasser wurde nach DWA (2017) mit 1,6 kg O₂/kWh und einem alpha-Wert von 0,9 angesetzt. In Abbildung 37 ist das Bemessungsschlammalter, das nach der Temperatur optimierte Schlammalter sowie die Temperaturganglinie dargestellt.

Abbildung 37 Bemessungsschlammalter, optimiertes Schlammalter und Temperatur im Belebungsbecken der großtechnischen Anlage A



In Tabelle 23 sind der jährliche Sauerstoffbedarf sowie der jährliche Energiebedarf für die Belüftung bei dem Bemessungsschlammalter und dem nach der Temperatur optimierten Schlammalter zusammengefasst.

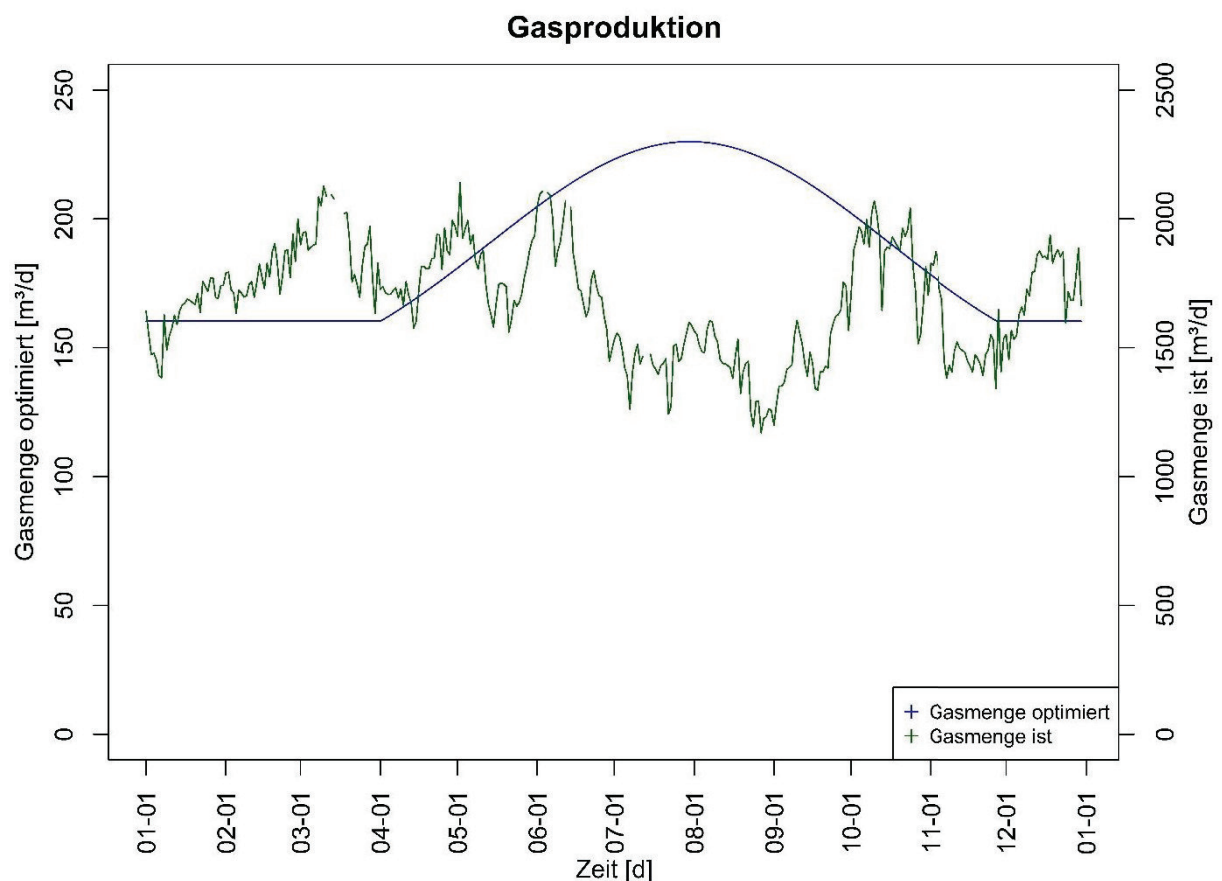
Tabelle 23 Jährlicher Sauerstoffbedarf und Energiebedarf bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage A

Parameter	$t_{TS,BEM}$	$t_{TS,OPT}$
Jährlicher Sauerstoffbedarf [t O ₂ /a]	588,437	571,298
Jährlicher Energiebedarf [MWh/a]	408,64	396,73

Durch den Betrieb der großtechnischen Anlage A nach dem optimierten Schlammalter wäre eine Einsparung bei der Belüftungsenergie von 11,9 MWh/a möglich.

In Abbildung 38 ist exemplarisch die Gasproduktion bei optimiertem Schlammalter der tatsächlichen Gasproduktion eines Jahres gegenübergestellt. Dabei zeigt sich die verminderte tatsächliche Gasproduktion in den Sommermonaten auf Grund der aeroben Teilstabilisierung des Schlammes. Die Unterschiede in der Größenordnung der Gasmengen ergeben sich aus der gemeinsamen anaeroben Stabilisierung des Schlammes der großtechnischen Anlage B mit dem Schlamm einer weiteren Kläranlage.

Abbildung 38 Gasproduktion bei optimiertem Schlammalter und tatsächliche Gasproduktion eines Jahres der großtechnischen Anlage A



Für die Berechnung des Energiegewinnes aus dem produzierten Gas wurde ein Methan-Gehalt von 60% und ein Energiegehalt von 9,97 kWh pro m³ Methan angesetzt.

In Tabelle 24 sind die jährliche Gasproduktion sowie der jährliche Energiegewinn bei dem Bemessungsschlammalter und dem nach der Temperatur optimierten Schlammalter zusammengefasst.

Tabelle 24 Jährliche Gasproduktion und Energieproduktion bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage A

Parameter	$t_{TS,BEM}$	$t_{TS,OPT}$
Jährliche Gasproduktion [m ³ /a]	58517,8	68336,2
Jährliche Energieproduktion [MWh/a]	350,05	408,79

Durch den Betrieb der großtechnischen Anlage A nach dem optimierten Schlammalter wäre eine zusätzliche Energieproduktion von 58,73 MWh/a möglich.

4.3 Großtechnische Anlage B

4.3.1 Betriebliche Rahmenbedingungen

4.3.1.1 Zulauffrachten

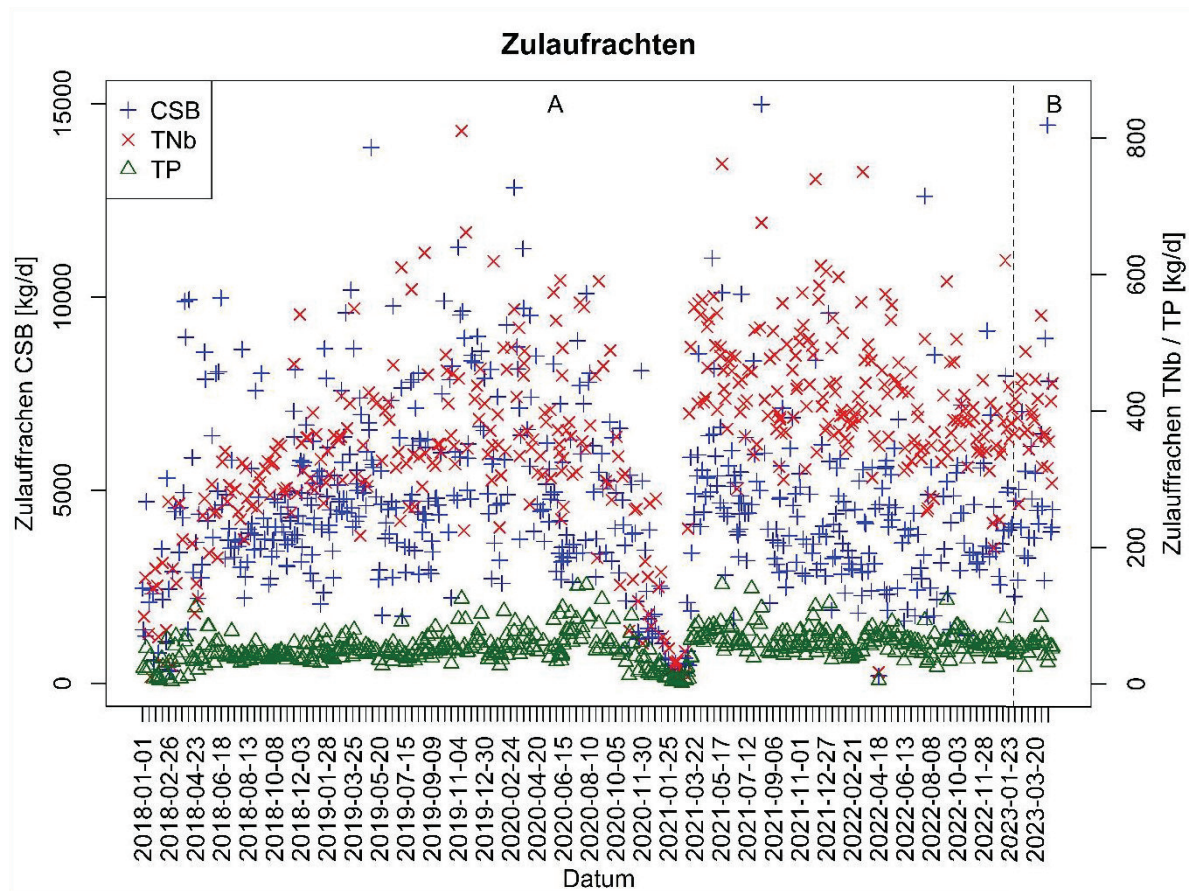
In Tabelle 25 sind die mittleren CSB, TN_b und TP Zulauffrachten der jeweiligen Versuchsphasen und Jahre samt Standardabweichung in kg/d aufgelistet.

Tabelle 25 Mittlere Zulauffrachten der großtechnischen Anlage B

Parameter	CSB [kg/d]		TN _b [kg/d]		TP [kg/d]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	4248,0	+/- 1977,0	248,4	+/- 101,8	40,4	+/- 17,5
2019	5654,0	+/- 2407,2	381,5	+/- 106,2	52,7	+/- 16,0
2020	5042,8	+/- 2767,0	349,6	+/- 126,1	58,1	+/- 27,6
2021	4153,3	+/- 2438,1	400,3	+/- 170,0	56,4	+/- 29,7
2022	4148,7	+/- 2255,8	396,7	+/- 90,4	58,6	+/- 17,5
2023	4878,8	+/- 2284,1	388,0	+/- 71,1	55,3	+/- 14,4

In Abbildung 39 sind die Zulauffrachten der Anlage dargestellt. Der Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen ist durch die vertikale Linie gekennzeichnet.

Abbildung 39 Zulauffrachten der großtechnischen Anlage B



4.3.1.2 Reinigungsleistung

Im Laufe des Projektes wurde zusätzlich zum Absetzverhalten der Schlämme auch die Reinigungsleistung der Anlagen überwacht. Wie auch bei den Zulauffrachten werden zusätzlich zu den Daten aus dem Versuchszeitraum auch die Daten des Vorjahres betrachtet.

In Tabelle 26 sind die mittleren Entfernungsraten samt Standardabweichung in den einzelnen Jahren aufgelistet.

Tabelle 26 Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der großtechnischen Anlage B in Prozent

Parameter	Entfernungsrates CSB [%]		Entfernungsrates TN _b [%]		Entfernungsrates TP [%]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	95,9	+/- 1,9	55,9	+/-39,6	88,9	+/- 9,1
2019	96,0	+/- 1,8	68,8	+/- 18,2	86,6	+/- 7,2
2020	96,2	+/- 1,5	72,2	+/- 15,7	91,0	+/- 4,2
2021	95,5	+/- 2,0	54,0	+/- 27,7	90,4	+/- 5,0
2022	95,9	+/- 2,3	57,9	+/- 32,8	90,1	+/- 7,1
2023	96,6	+/- 1,1	50,2	+/- 25,9	88,6	+/- 4,5

Die niedrige Gesamtstickstoffentfernungsrates erklärt sich durch die fehlenden Gesamtstickstoffwerte im Ablauf der großtechnischen Anlage B. Im Ablauf wurde statt dem Gesamtstickstoff die Summe aus NH₄-N und NO₃-N herangezogen.

4.3.1.3 Temperatur/ pH Wert

In Tabelle 27 sind die maximale und minimale Temperatur des Ablaufs der großtechnischen Anlage in °C und die mittleren pH-Werte im Zulauf samt Standardabweichung der einzelnen Jahre aufgelistet.

Tabelle 27 Maximale und minimale Temperatur sowie mittlere pH-Werte der großtechnischen Anlage B

Parameter	Temperatur [°C]			pH-Wert
	max	min	Mittelwert	SD
2018	24,2	9,0	7,86	+/- 0,26
2019	23,1	8,9	7,45	+/- 0,26
2020	22,5	10,4	7,25	+/- 0,46
2021	22,0	10,0	7,15	+/- 0,84
2022	23,5	10,4	7,22	+/- 0,87
2023	15,2	9,0	7,58	+/- 0,25

4.3.1.4 Belastung

In Tabelle 28 sind die mittlere Raumbelastung in kg CSB/ (m³ d) und die mittlere Schlammbelastung in kg CSB/ (kgTS d) der einzelnen Jahre samt Standardabweichung aufgelistet.

Tabelle 28 Mittlere Raum- und Schlammbelastung der großtechnischen Anlage B

Parameter	Raumbelastung [kg CSB / (m ³ d)]		Schlammbelastung [kg CSB / (kg TS d)]	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	0,31	+/- 0,14	0,08	+/- 0,05
2019	0,41	+/- 0,18	0,08	+/- 0,04
2020	0,36	+/- 0,20	0,09	+/- 0,05
2021	0,30	+/- 0,18	0,13	+/- 0,10
2022	0,30	+/- 0,16	0,09	+/- 0,05
2023	0,35	+/- 0,16	0,15	+/- 0,07

4.3.1.5 ÜSS Menge

In Tabelle 29 ist die abgezogene ÜSS Menge in m³/d in den unterschiedlichen Jahren aufgelistet.

Tabelle 29 Mittlere ÜSS Menge der großtechnischen Anlage B

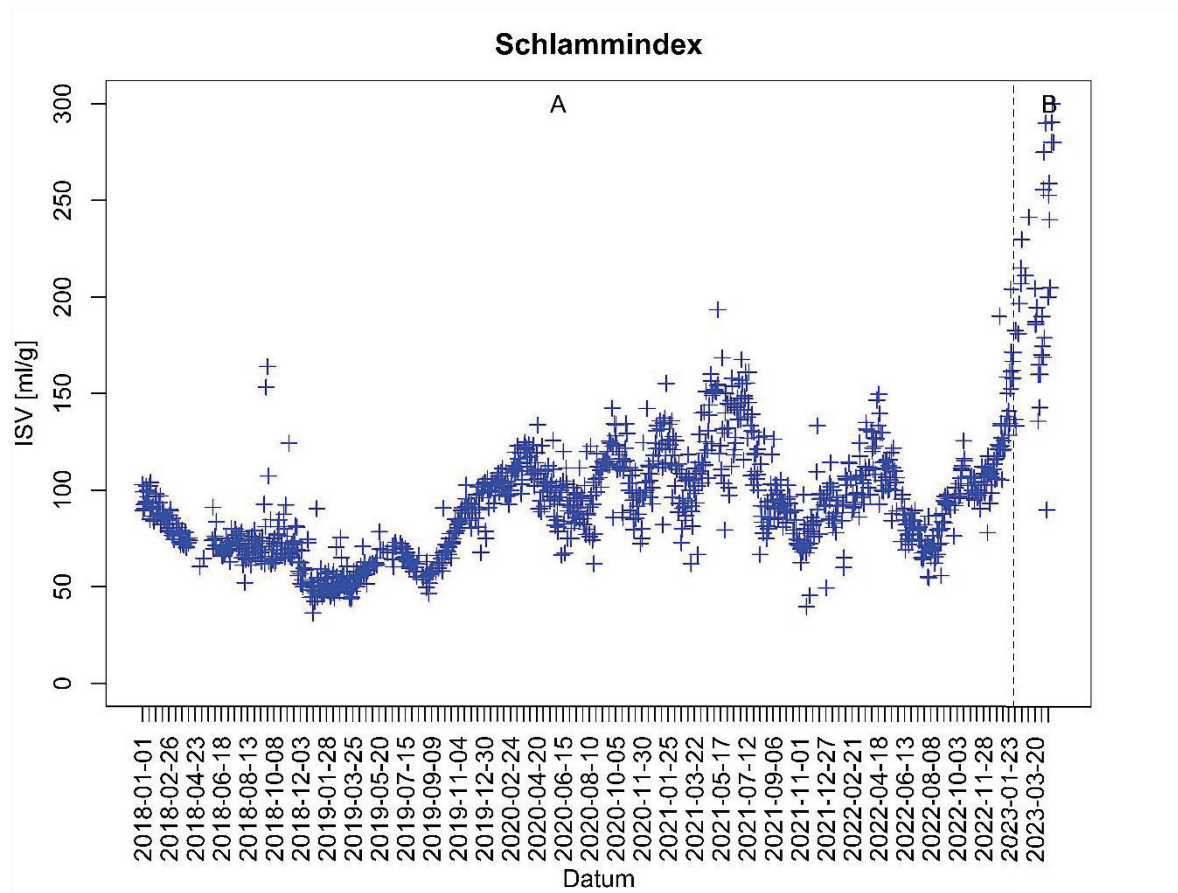
Parameter	Q _{ÜSS} [m ³ /d]	
	Mittelwert	SD
2081	205,4	+/- 62,1
2019	175,5	+/- 57,5
2020	210,4	+/- 69,6
2021	113,5	+/- 73,0
2022	142,4	+/- 83,7
2023	207,0	+/- 90,6

4.3.2 Absetzverhalten

4.3.2.1 Schlammindex

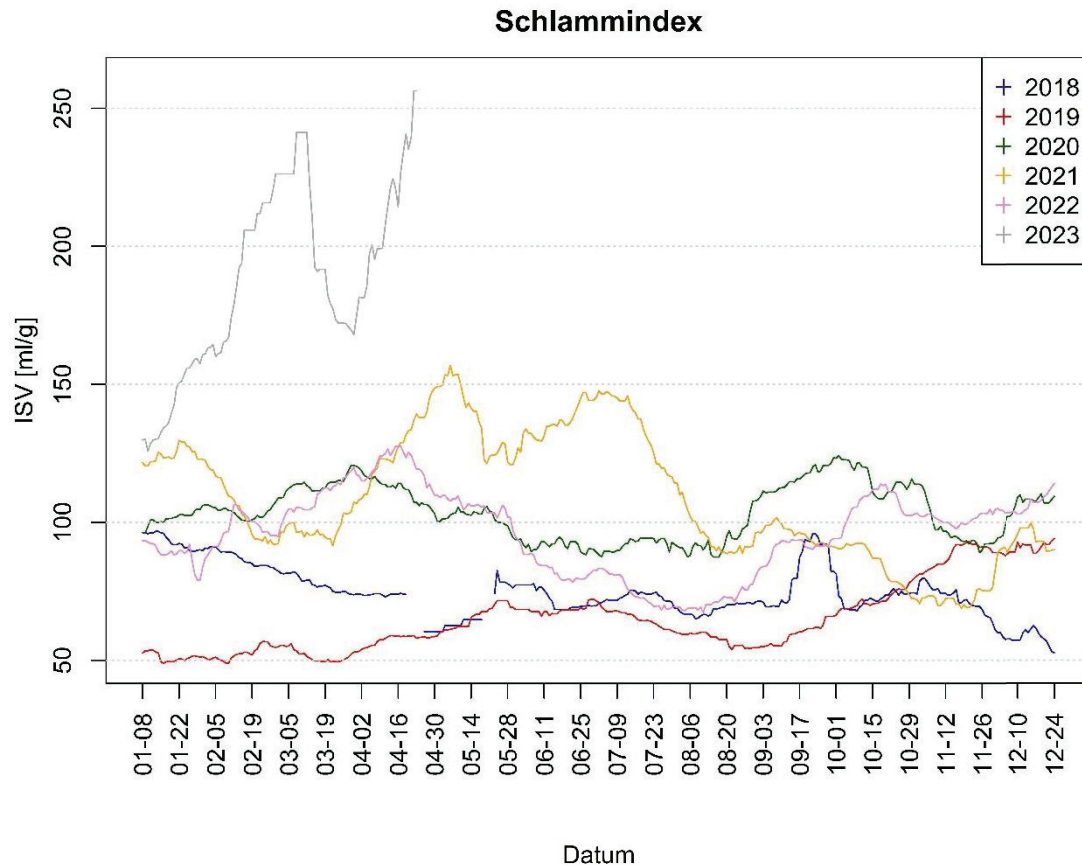
Abbildung 40 ist der ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B dargestellt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 40 ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B



In Abbildung 41 sind die gleitenden Mittelwerte des ISV der einzelnen Jahre einander gegenübergestellt.

Abbildung 41 Gleitender Mittelwert des ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren



Der starke Anstieg des ISV in Versuchsphase B ist auf Betriebsprobleme der Anlage in diesem Zeitraum zurückzuführen.

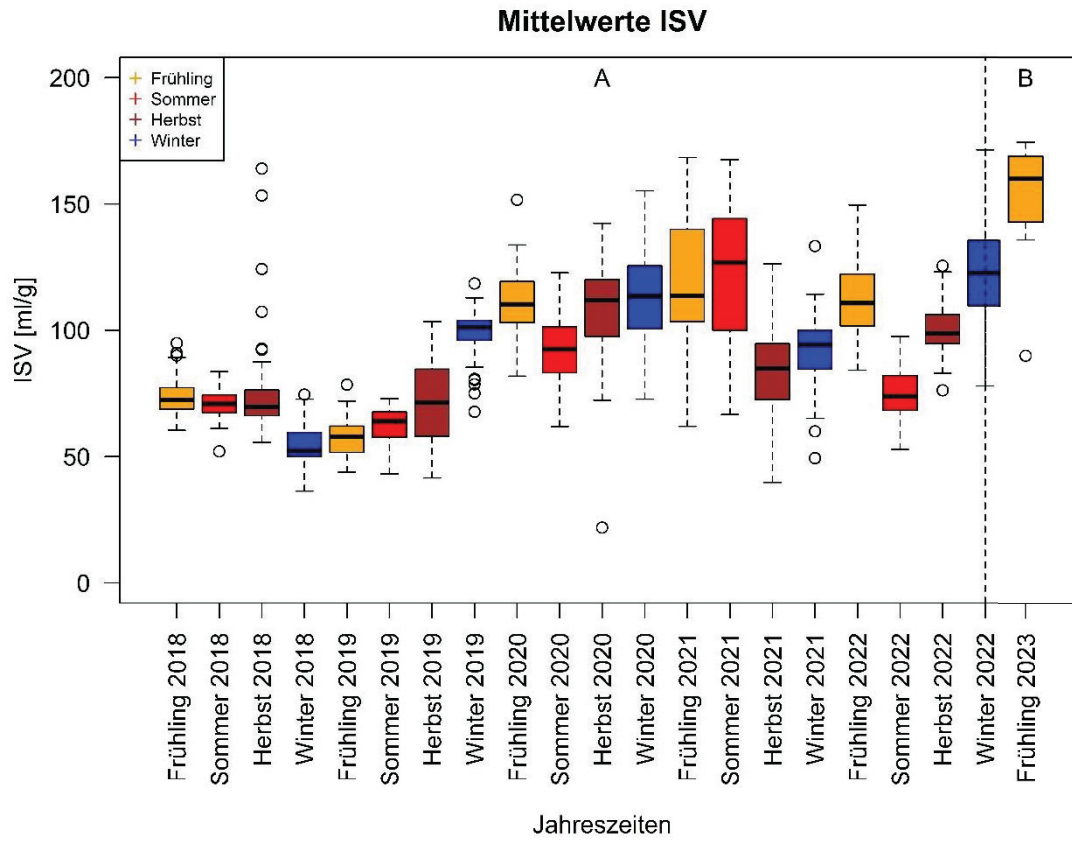
In Tabelle 30 ist der mittlere, auf der Anlage gemessene ISV des belebten Schlammes in den unterschiedlichen Jahren und Jahreszeiten samt Standardabweichung in ml/g aufgelistet.

Tabelle 30 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g

Parameter	ISV BB [ml/g]							
	Frühling		Sommer		Herbst		Winter	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	73	+/- 7,4	71	+/- 5,4	75	+/- 18,7	55	+/- 9,3
2019	58	+/- 7,4	63	+/- 6,5	72	+/- 15,6	99	+/- 9,2
2020	110	+/- 12,2	93	+/- 13,8	108	+/- 19,0	113	+/- 17,7
2021	118	+/- 24,5	121	+/- 26,3	85	+/- 14,9	93	+/- 14,1
2022	112	+/- 14,9	75	+/- 9,8	100	+/-9,1	94	+/- 12,7
2023	152	+/- 26,5	-	-	-	-	-	-

In Abbildung 42 sind die Mittleren ISV der einzelnen Jahre nach Jahreszeiten als Boxplot dargestellt. Die Einteilung der Jahreszeiten erfolgte nach der meteorologischen Einteilung. Der Winter wird immer dem Jahr zugeordnet in dem der Dezember liegt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 42 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g



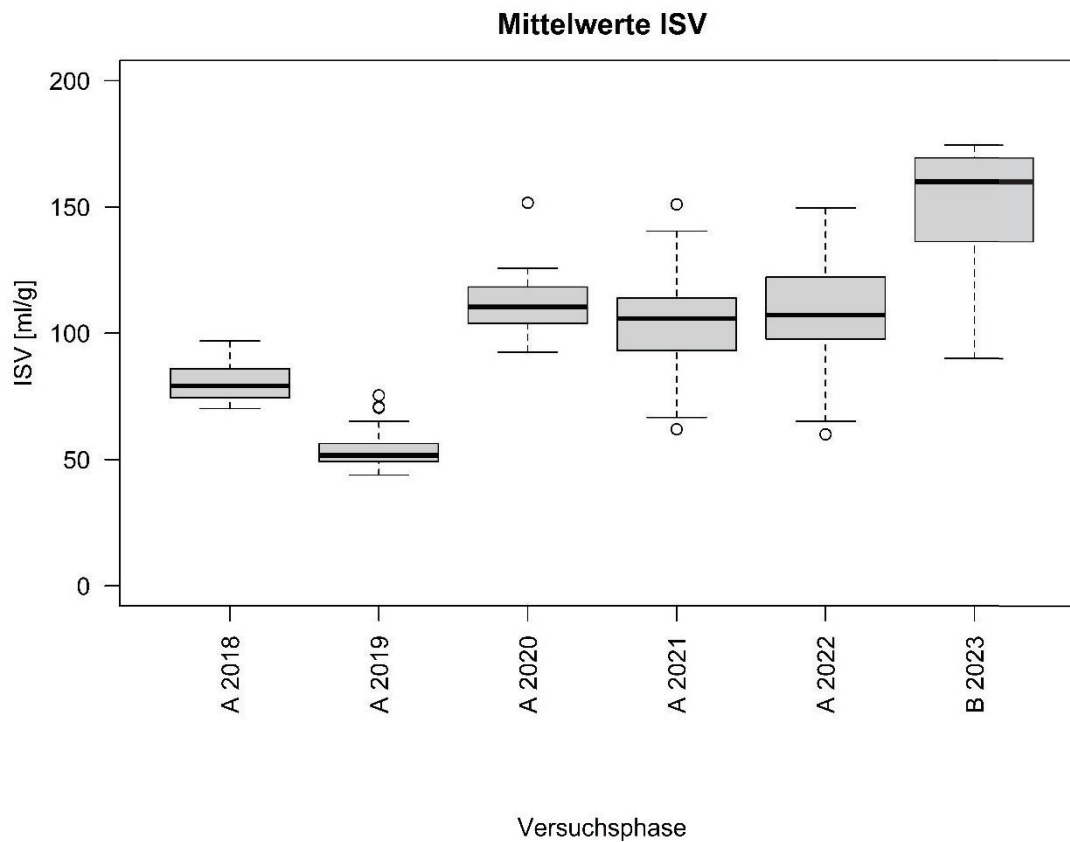
In Tabelle 31 ist der mittlere, auf der Anlage gemessene ISV des belebten Schlammes in den unterschiedlichen Jahren im Vergleichszeitraum samt Standardabweichung in ml/g aufgelistet.

Tabelle 31 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen der einzelnen Jahre in ml/g

Parameter	ISV BB [ml/g]		
	Vergleichsphase	Mittelwert	SD
2018	A	81	+/- 6,9
2019	A	53	+/- 6,7
2020	A	110	+/- 8,2
2021	A	105	+/- 17,5
2022	A	109	+/- 18,4
2023	B	193	+/- 43,9

In Abbildung 43 sind die mittleren ISV der einzelnen Jahre im Vergleichszeitraum als Boxplot dargestellt.

Abbildung 43 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen der einzelnen Jahre in ml/g

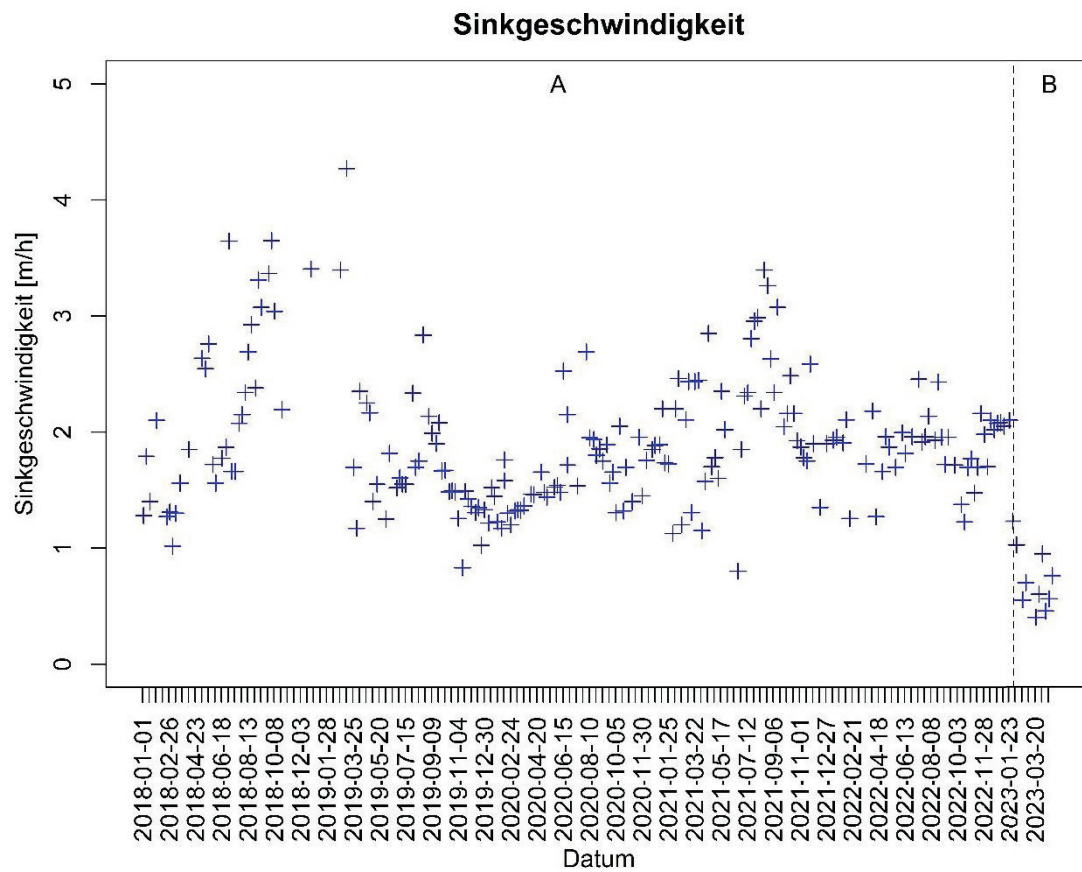


Auf Grund der Betriebsprobleme mit dem Nachklärbecken sowie dem Vorklärbecken der großtechnischen Anlage B im Versuchszeitraum B lassen sich keine Aussagen über den Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges auf das Absetzverhalten des Schlammes treffen. Die Betriebsprobleme die zu einer starken Steigerung des ISV geführt haben, begannen Anfang des Jahres 2023. Bis kurz vor Beginn der Versuchsphase B waren die Auswirkungen jedoch im Bereich der jahreszeitlichen Schwankungen. Ein negativer Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges auf das Absetzverhalten des Schlammes ist auszuschließen. Die ebenfalls durch Betriebsprobleme verursachte zu geringe Entnahme von ÜSS während der Versuchsphase B könnte jedoch durch den höheren TS-Gehalt und die gegenseitige Beeinflussung der Flocken beim Absetzvorgang zur Verschlechterung der Absetzeigenschaften beigetragen haben.

4.3.2.2 Sinkgeschwindigkeit

In Abbildung 44 ist die Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes über den betrachteten Zeitraum dargestellt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 44 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in m/h



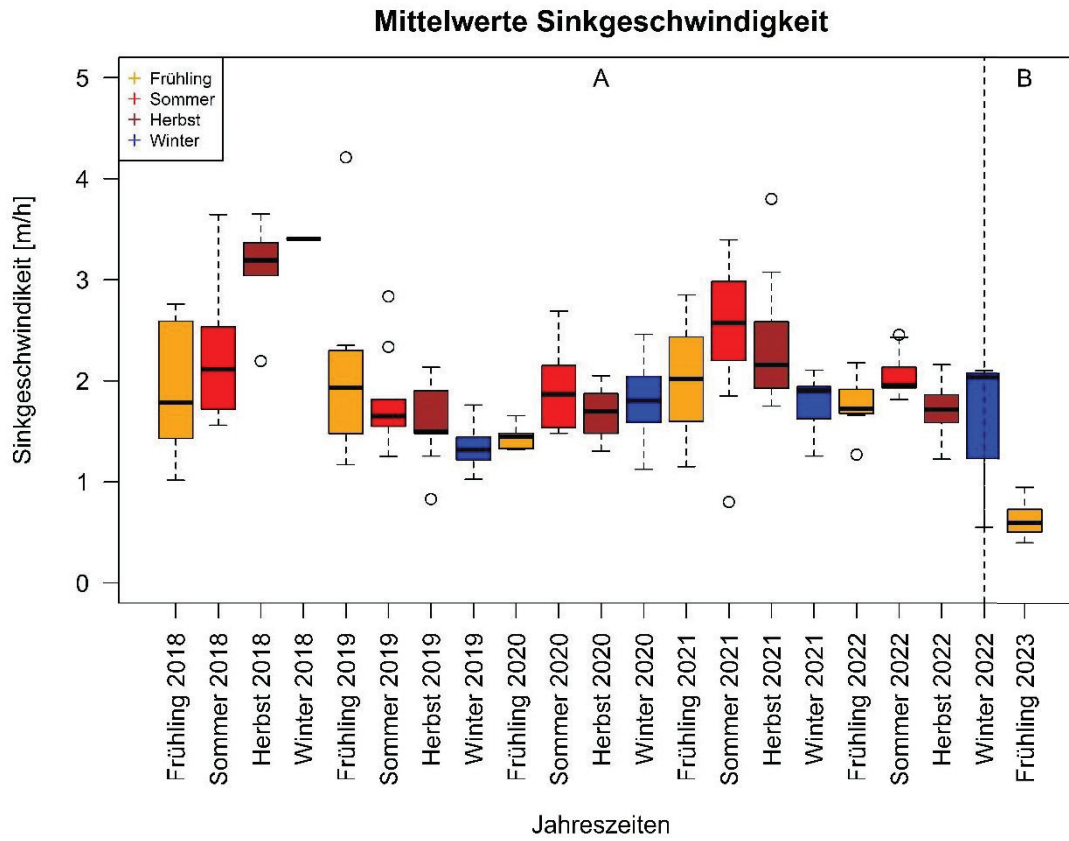
In Tabelle 32 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten inklusive Standardabweichung in m/h aufgelistet.

Tabelle 32 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten

Parameter	vs BB [m/h]							
	Frühling		Sommer		Herbst		Winter	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
2018	1,92	+/- 0,65	2,23	+/- 0,62	3,11	+/- 0,50	3,41	-
2019	2,11	+/- 0,97	1,79	+/- 0,46	1,61	+/- 0,36	1,34	+/- 0,19
2020	1,44	+/-0,11	1,93	+/- 0,42	1,68	+/- 0,26	1,79	+/- 0,40
2021	1,98	+/- 0,51	2,49	+/- 0,77	2,35	+/- 0,58	1,79	+/- 0,31
2022	1,77	+/- 0,28	2,06	+/- 0,22	1,71	+/- 0,27	1,69	+/- 0,56
2023	0,63	+/- 0,19	-	-	-	-	-	-

In Abbildung 45 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten der einzelnen Jahre und Jahreszeiten als Boxplot dargestellt. Die Einteilung der Jahreszeiten erfolgt nach der meteorologischen Einteilung. Der Winter wird immer dem Jahr zugeordnet in dem der Dezember liegt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 45 Mittlere Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in m/h



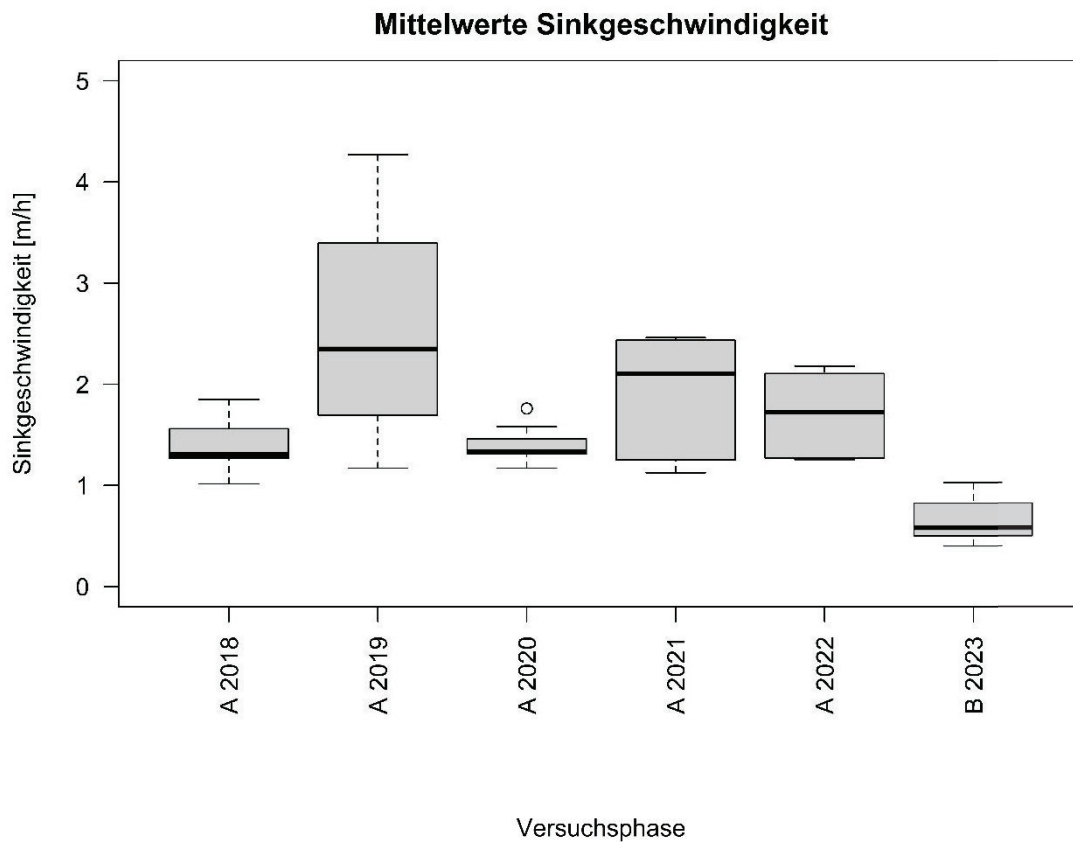
In Tabelle 33 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes in den einzelnen Jahren im Vergleichszeitraum inklusive Standardabweichung in m/h aufgelistet.

Tabelle 33 Mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren im Vergleichszeitraum

Parameter	vs BB [m/h]		
	Vergleichsphase	Mittelwert	SD
2018	A	1,38	+/- 0,29
2019	A	2,58	+/- 1,26
2020	A	1,39	+/- 0,17
2021	A	1,86	+/- 0,58
2022	A	1,71	+/- 0,44
2023	B	0,66	+/- 0,23

In Abbildung 46 sind die mittleren Sinkgeschwindigkeiten der einzelnen Jahre im Vergleichszeitraum als Boxplot dargestellt.

Abbildung 46 Mittlere Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen

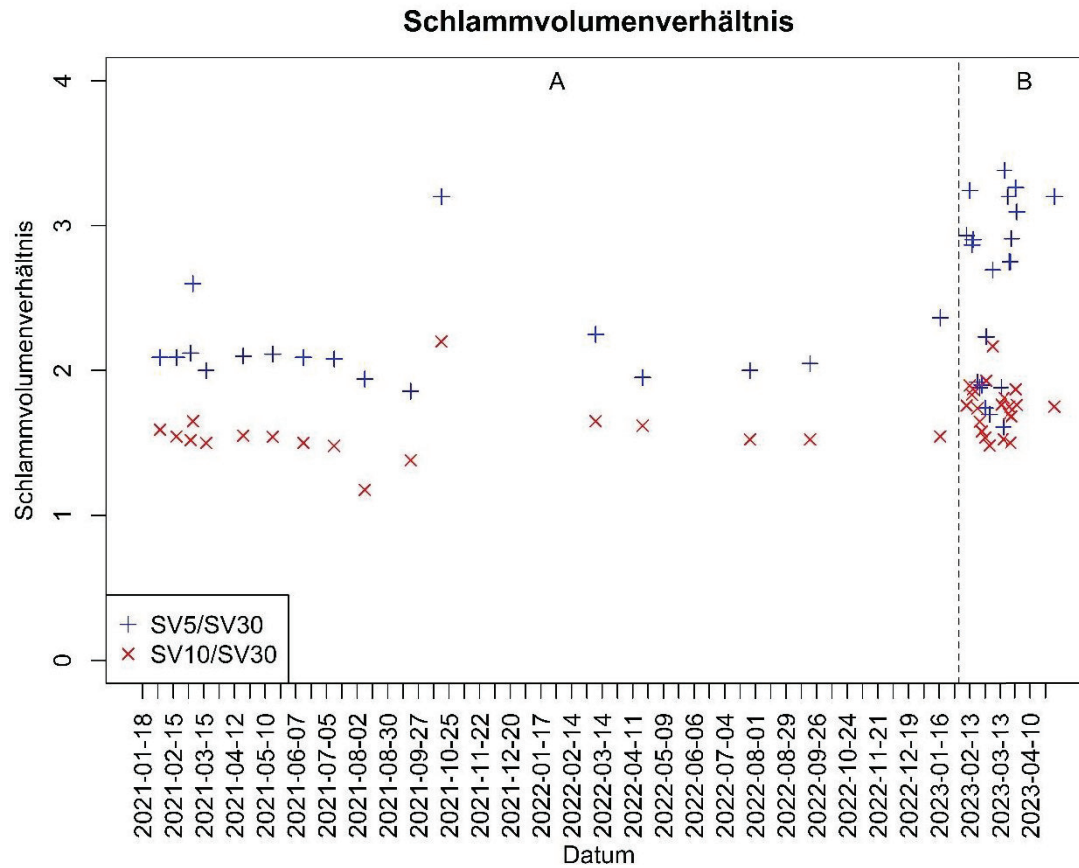


Die signifikant niedrigere Sinkgeschwindigkeit in Versuchsphase B ($p = 0,000068$) ist wie der erhöhte ISV auf Betriebsprobleme auf der großtechnischen Anlage B zurückzuführen. Auf Grund der Betriebsprobleme ist ein möglicher Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges nicht erkennbar.

4.3.2.3 Schlammvolumenverhältnis

In Abbildung 46 ist das Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Die vertikale Linie markiert den Beginn der unterschiedlichen Versuchsphasen.

Abbildung 47 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B



In Tabelle 34 ist das mittlere Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes samt der Standardabweichung in den Vergleichszeiträumen aufgelistet.

Tabelle 34 Mittleres Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen

Parameter	SV ₅ /SV ₃₀		SV ₁₀ /SV ₃₀	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Versuchsphase A	2,15	+/- 0,20	1,58	+/- 0,06
Versuchsphase B	2,54	+/- 0,21	1,74	+/- 0,02

Auf Grund der starken Schwankung des SV₅/SV₃₀ Verhältnisses in Versuchsphase B ist kein signifikanter Unterschied der Mittelwerte der Schlammvolumenverhältnisse zwischen

Versuchsphase A und Versuchsphase B erkennbar. Die zwischenzeitliche starke Steigerung des SV_5/SV_{30} Verhältnisses ist auf die Betriebsprobleme der großtechnischen Anlage B in Versuchsphase B zurückzuführen. Die Steigerung des SV_{10}/SV_{30} Verhältnisses in Versuchsphase B ist laut ANOVA signifikant ($p = 0,01$). Es lassen sich auf Grund der Betriebsprobleme keine Aussagen zum Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges treffen.

4.3.3 Partikelgrößenverteilung

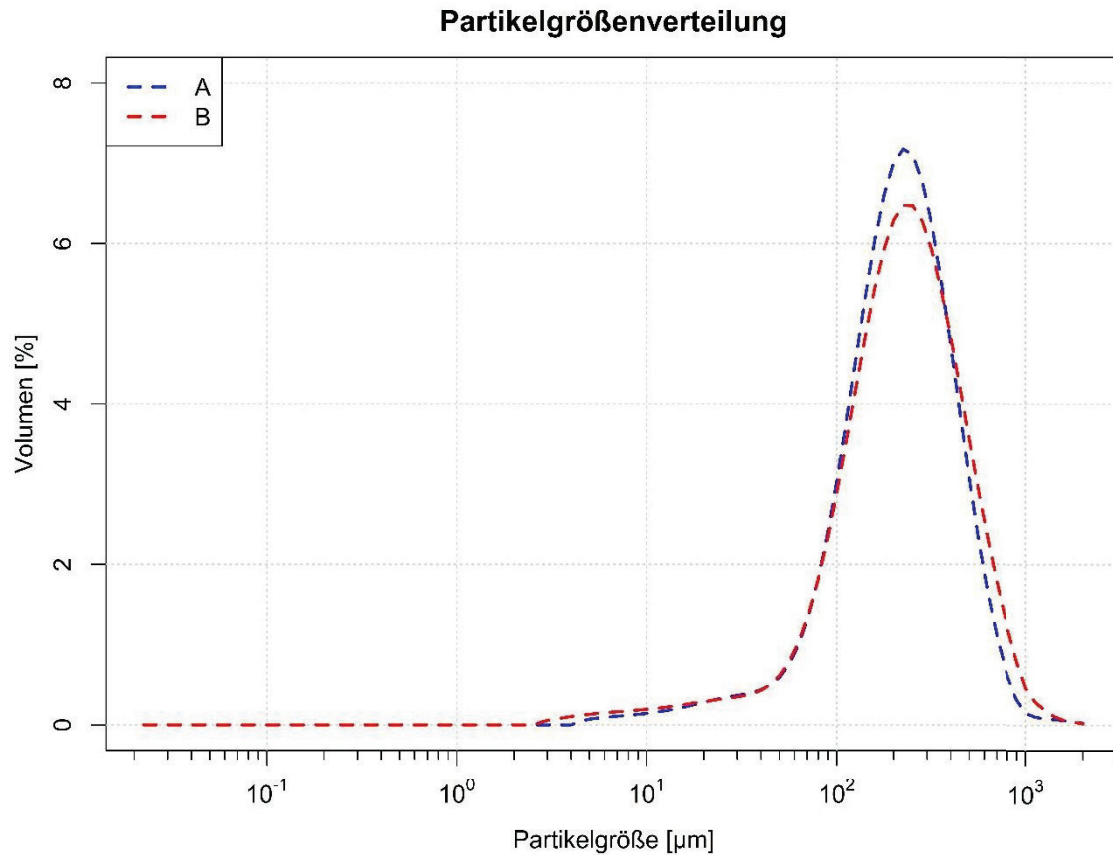
In Tabelle 22 sind die 50% und 90% Quantile der mittleren Partikelgrößenklassen der unterschiedlichen Versuchsphasen sowie die Größenklassen mit der höchsten Anzahl an Partikel dargestellt.

Tabelle 35 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der großtechnischen Anlage B

Parameter	50% Quantil [μm]	90% Quantil [μm]	Maximum [μm]
	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
Versuchsphase A	200,00 - 224,40	399,05 - 447,74	200,00 - 224,40
Versuchsphase B	200,00 - 224,40	502,38 - 563,68	200,00 - 224,40

In Abbildung 48 sind die mittleren Partikelgrößenverteilungen der unterschiedlichen Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 48 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den unterschiedlichen Versuchsphasen



Während die mittlere Partikelgrößenklasse in der das 50% Quantil lag und die Partikelgrößenklasse mit der höchsten prozentuellen Anzahl an Partikeln sich in den unterschiedlichen Versuchsphasen nicht unterschied, gab es in der Partikelgrößenklasse in der das 90% Quantil lag eine Steigerung um zwei Klassen hin zu größeren Partikeln. Die höhere Anzahl an größeren Partikeln in Versuchsphase B kann jedoch auch mit Betriebsproblemen mit der Vorklärung in diesem Zeitraum zusammenhängen, wodurch mehr grobe, partikuläre Stoffe in die biologische Stufe gelangten und dadurch die Belebtschlammflocken quervernetzten und vergrößerten. Auf der großtechnischen Anlage B zeigte sich keine, auf den selektiven ÜSS-Abzug zurückzuführende, Änderung der Partikelgröße im Belebtschlamm.

4.3.4 Mikroskopische Beurteilung der Schlammflocken

In Abbildung 49 und Abbildung 50 sind mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B aus den Versuchsphasen dargestellt.

Abbildung 49 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in Versuchsphase A

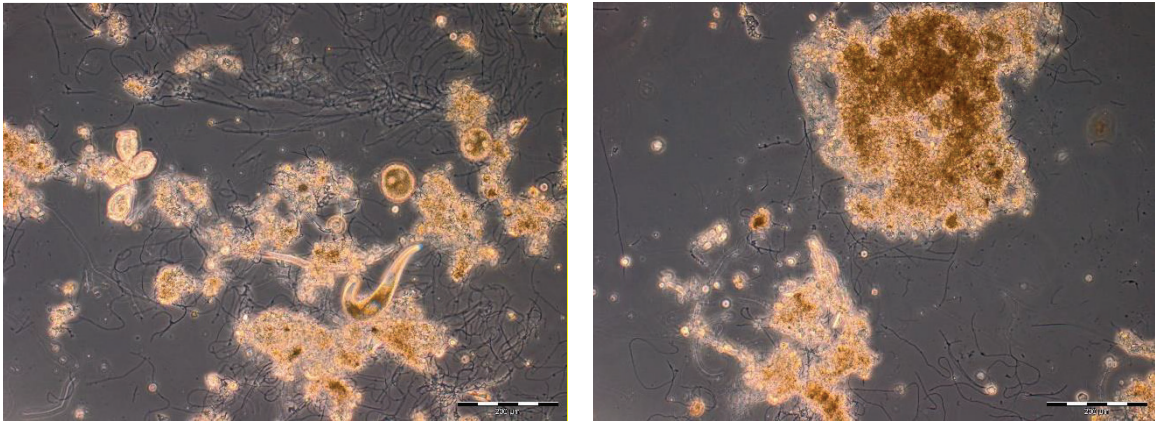
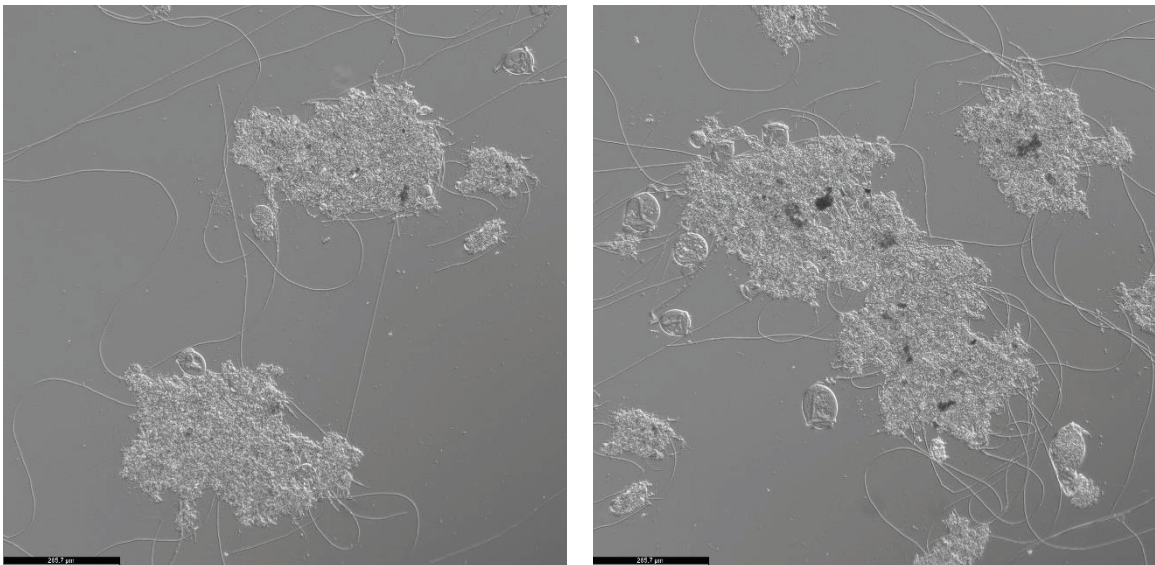


Abbildung 50 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in Versuchsphase B



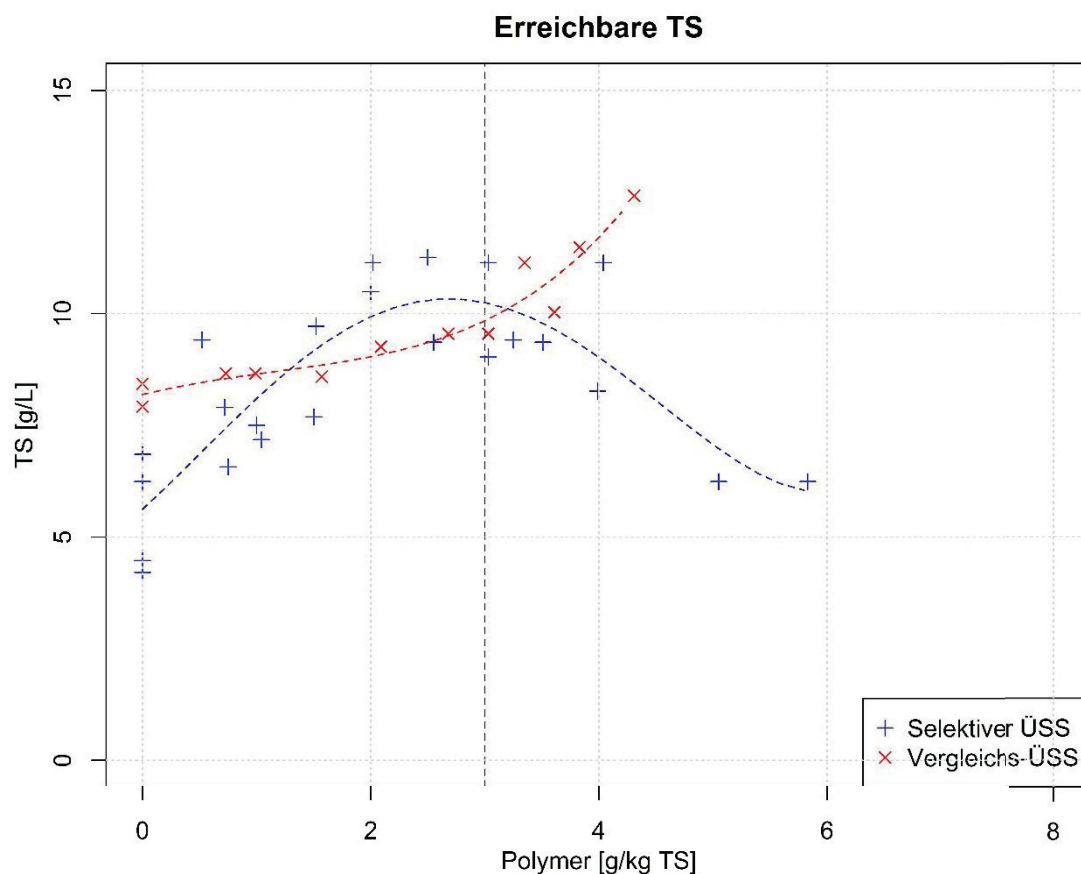
Wie auch bei der Pilotanlage zeigte sich bei der mikroskopischen Beurteilung der Schlammflocken eine Tendenz zu etwas kompakteren Flocken. Diese Tendenz kann auf den selektiven ÜSS zurückgeführt werden. Der Einfluss auf die Fädigkeit der bei der großtechnischen Anlage A zu beobachten war, zeigte sich auf der großtechnischen Anlage B nicht. Weiters wurde keine Änderung der Größe der Schlammflocken festgestellt.

4.3.5 Schlammindickung

Zur Ermittlung der optimalen Polymermenge für die Eindickung des Schlammes wurden vier Versuchsreihen mit selektiv abgezogenen ÜSS und Referenz-ÜSS durchgeführt. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils fünf polymer Dosierungen betrachtet. Als Referenzwert wurde eine Probe ohne Polymerdosierung herangezogen.

Der Ausgangs-TS-Gehalt des selektiv abgezogenen ÜSS lag zwischen 3,16 g/l und 3,94 g/l. Der Ausgangs-TS-Gehalt des Referenz-ÜSS lag bei 7,9 g/l. In Abbildung 51 ist der erreichbare TS-Gehalt der Schlämme nach 30 Minuten statischem Eindicken bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt. Die vertikale Linie kennzeichnet die derzeitige Polymerdosierung auf der Anlage.

Abbildung 51 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage B

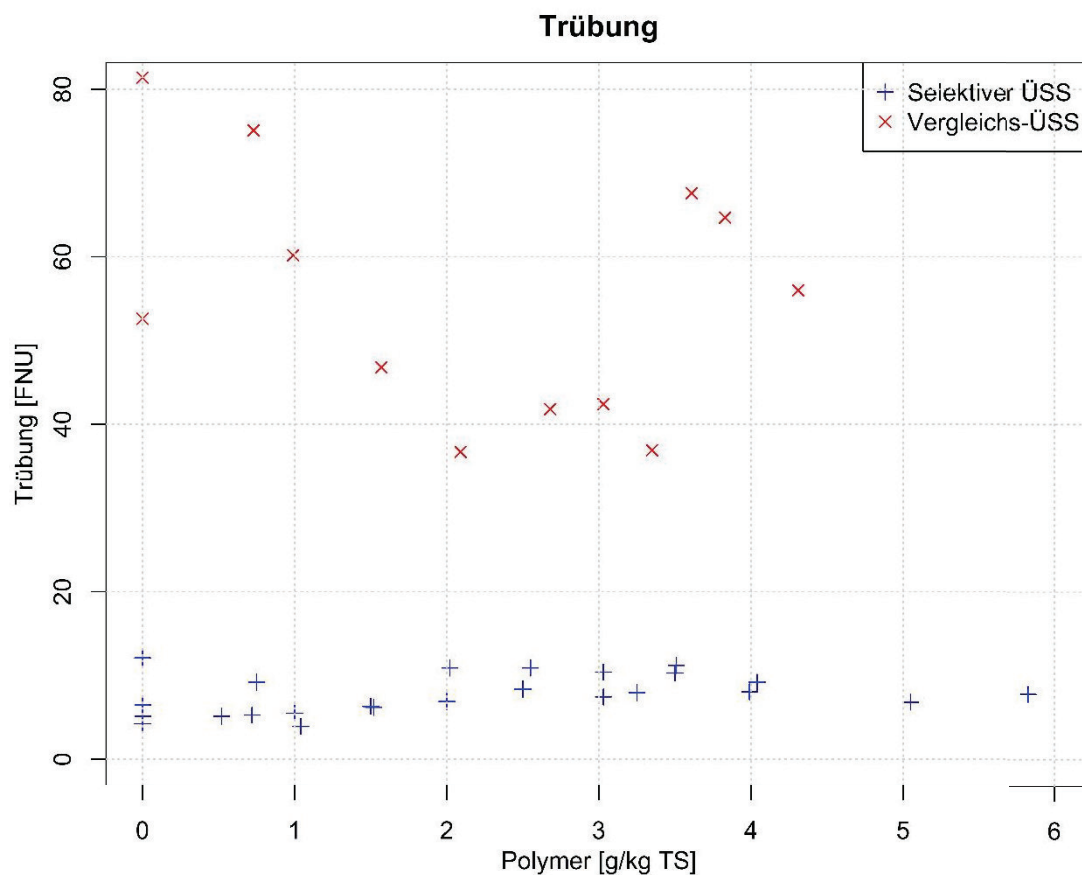


Der maximale erreichbare TS-Gehalt nach 30 Minuten statischem Eindickens (r^2 selektiver ÜSS = 0,64, r^2 Referenz-ÜSS = 0,88) ist beim Referenz-ÜSS um rund 2,3 g/l

höher. Während das Polymer zu TS Verhältnis sich bei beiden maximalen TS-Werten um rund 1,76 g Polymer /kg TS unterscheidet ist die absolute Polymermenge beim selektiven ÜSS um rund 9,1 ml/l geringer. Im Bereich der derzeitigen Polymerdosierung auf der Anlage liegt der TS-Gehalt des selektiven ÜSS tendenziell höher. Auch wird die optimale Polymermenge in Bezug auf den erreichbaren TS-Gehalt beim Referenz-ÜSS nicht erreicht.

In Abbildung 52 ist die Trübung des Überstandes des selektiven und des Referenz-ÜSS nach 30 Minuten statischen Eindickens bezogen auf die Polymermenge pro kg TS dargestellt.

Abbildung 52 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage B



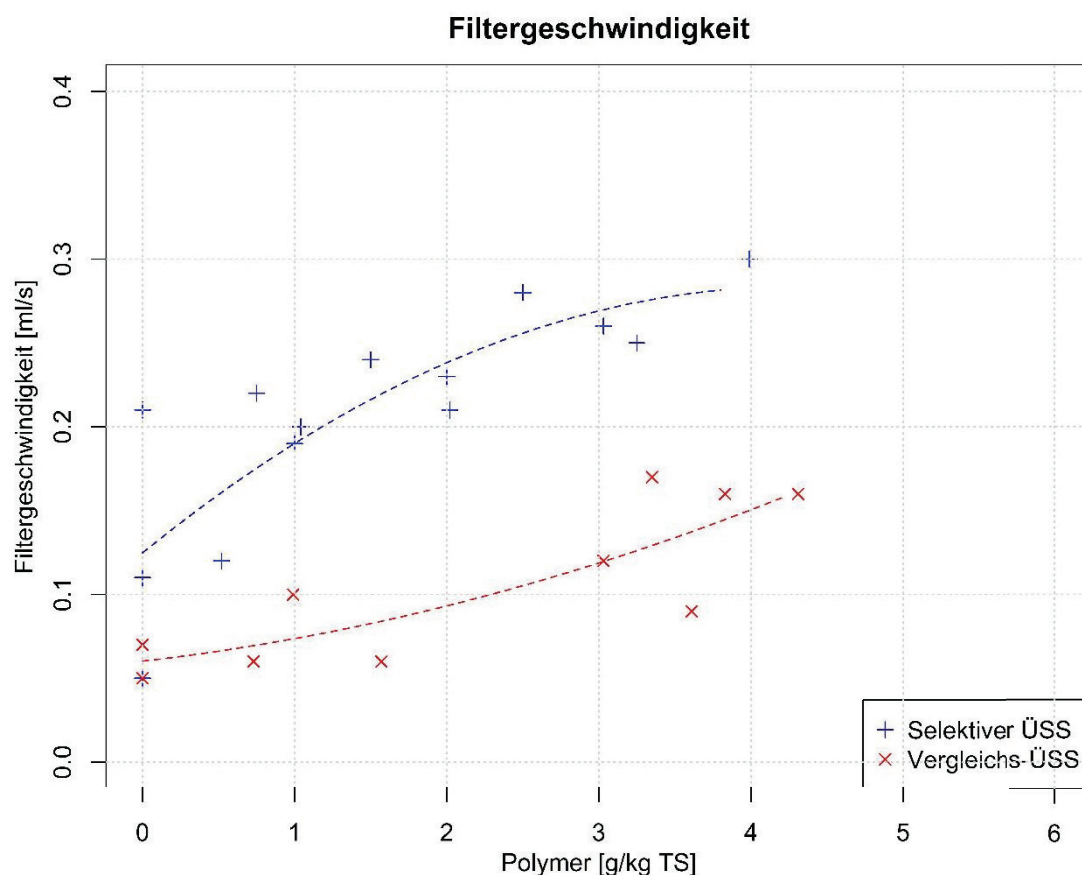
Die niedrigste Trübung im Überstand von 3,9 FNU wurde beim selektiven ÜSS bei einer Polymermenge von rund 1,4 ml/l gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung im Überstand von 36,7 FNU bei einer Polymermenge von 6,24 ml/l gemessen. Die niedrigste Trübung im Überstand wurde beim selektiven ÜSS bei einem Polymer zu TS

Verhältnis von 1,04 g/kg TS gemessen. Beim Referenz-ÜSS wurde die niedrigste Trübung bei einem Polymer zu TS Verhältnis von 2,09 g/kg TS gemessen.

In dem Bereich, in dem die optimale Polymermenge bezogen auf die Trübung des Überstandes des Referenz-ÜSS lag, ist der erreichbare TS-Gehalt des selektiven ÜSS höher als der erreichbare TS-Gehalt des Referenz-ÜSS. Während die Trübung des selektiven ÜSS nur gering schwankt, steigt die Trübung des Referenz-ÜSS in dem Bereich in dem höhere TS-Gehalte als beim selektiven ÜSS erreicht werden stark an.

In Abbildung 53 ist die Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS und eine Filterkuchendicke von einem mm dargestellt.

Abbildung 53 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS Schlamm pro mm Filterkuchen der großtechnischen Anlage B



Die optimale Polymermenge bezogen auf die Filtergeschwindigkeit wurde beim selektiven ÜSS erreicht. Ab einer Polymerdosis von rund 2,5 g/kg TS war ein Abflachen der

Regressionskurve zu beobachten. Beim Referenz-ÜSS sind noch um einiges höhere Dosiermengen für ein Erreichen der optimalen Polymermenge nötig.

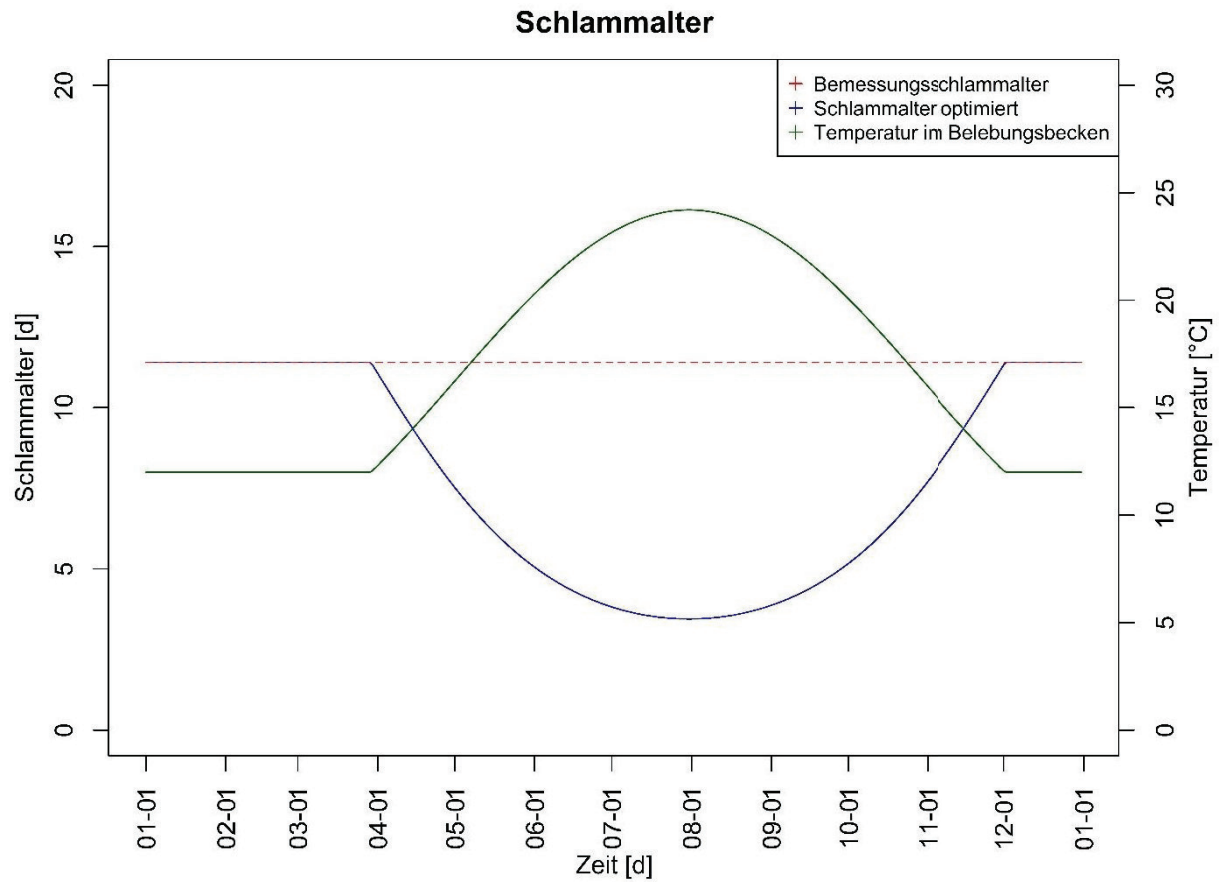
Es kann festgestellt werden, dass sich bei Eindickung des selektiven ÜSS der großtechnischen Anlage B höhere TS-Gehalte bei einer geringeren Polymerdosierung erreichen lassen, die außerdem eine geringere Trübung des Überstandes und eine bessere Entwässerbarkeit im Vergleich zum Referenz-ÜSS aufweisen.

4.3.6 Energetische Optimierung

Für die großtechnische Anlage B wurde anhand der Betriebsdaten bei der Bemessungstemperatur von 12 °C nach DWA (2016) ein erforderliches Schlammalter von 11,4 Tagen, ein TS-Gehalt im Belebungsbecken von 1,2 g/l und ein Sauerstoffbedarf von 2451,4 kg O₂/d ermittelt. Der geringe TS-Gehalt ergibt sich durch den kürzlichen Ausbau der großtechnischen Anlage B und die daraus resultierende geringe Auslastung der Anlage. Der Prozessfaktor wurde mit 1,5 und das V_{DN}/V_{BB} Verhältnis mit 0,4 angesetzt. Für die Ablaufkonzentration des Nitratstickstoffes wurde der Mittelwert über den Betrachtungszeitraum gewählt. Der Sauerstoffeintrag durch Druckbelüfter in Reinwasser wurde nach DWA (2017) mit 3,2 kg O₂/kWh und einem alpha-Wert von 0,65 angesetzt.

In Abbildung 54 ist das Bemessungsschlammalter, das nach der Temperatur optimierte Schlammalter sowie die Temperaturganglinie dargestellt.

Abbildung 54 Bemessungsschlammalter, optimiertes Schlammalter und Temperatur im Belebungsbecken der großtechnischen Anlage B



In Tabelle 36 sind der jährliche Sauerstoffbedarf sowie der jährliche Energiebedarf für die Belüftung bei dem Bemessungsschlammalter und dem nach der Temperatur optimierten Schlammalter zusammengefasst.

Tabelle 36 Jährlicher Sauerstoffbedarf und Energiebedarf bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage B

Parameter	$t_{TS,BEM}$	$t_{TS,OPT}$
Jährlicher Sauerstoffbedarf [t O ₂ /a]	894,75	871,53
Jährlicher Energiebedarf [MWh/a]	430,17	419,00

Durch den Betrieb der großtechnischen Anlage B nach dem optimierten Schlammalter wäre eine Einsparung bei der Belüftungsenergie von 11,16 MWh/a möglich.

Für die Berechnung des Energiegewinnes aus dem produzierten Gas wurde ein Methan-Gehalt von 60% und ein Energiegehalt von 9,97 kWh pro m³ Methan angesetzt.

In Tabelle 37 sind die jährliche Gasproduktion sowie der jährliche Energiegewinn bei dem Bemessungsschlammalter und dem nach der Temperatur optimierten Schlammalter zusammengefasst.

Tabelle 37 Jährliche Gasproduktion und Energieproduktion bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage B

Parameter	t _{TS,BEM}	t _{TS,OPT}
Jährliche Gasproduktion [m ³ /a]	98685,9	114787,0
Jährliche Energieproduktion [MWh/a]	590,34	686,66

Durch den Betrieb der großtechnischen Anlage B nach dem optimierten Schlammalter wäre eine zusätzlicher Energieproduktion von 96,32 MWh/a möglich.

5 Diskussion

Im vorliegenden Projekt SelektAra wurde die gezielte Anreicherung von gut absetzbarer Biomasse durch die Verwendung von selektiven Überschussschlammabzug aus dem Belebungsbecken untersucht. Im Pilotmaßstab wurde der Abzug mittels Abzugsrinne und Steigrohres, im großtechnischen Maßstab nur mittels Abzugsrinne realisiert.

Bei der Pilotanlage und der großtechnischen Anlage A wurden durch den geringeren ISV maximale mögliche Kapazitätssteigerungen von 11% bzw. 9% in der Versuchsphase B erreicht. Während bei der Pilotanlage, vermutlich durch den hohen Anteil der organischen Trockensubstanz keine signifikante Änderung der Sinkgeschwindigkeit durch den geringeren ISV zu beobachten war, steigerte sich die Sinkgeschwindigkeit bei der großtechnischen Anlage A um 25%. Bei den Schlammvolumenverhältnissen war bei beiden Anlagen keine signifikante Änderung zu beobachten. Die mögliche Kapazitätssteigerung der Pilotanlage lässt sich auf den selektiven ÜSS-Abzug zurückführen. Bei der großtechnischen Anlage A konnte der Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges auf den niedrigeren ISV und die höhere Sinkgeschwindigkeit nicht gesichert nachgewiesen werden. Bei der großtechnischen Anlage B war es auf Grund der Betriebsprobleme in der Versuchsphase B nicht möglich, gesicherte Aussagen über den Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges auf das Absetzverhalten zu tätigen.

Bei der Pilotanlage ließ sich bei der Beurteilung des mikroskopischen Bildes eine Tendenz zu kompakteren und größeren Flocken feststellen. Auch die Analyse der Partikelgrößenverteilung zeigte ein Ansteigen der Partikelgröße durch den selektiven ÜSS-Abzug. Eine Auswirkung auf die Fädigkeit des Schlammes wie von Ahlendorf et al. (2006) beobachtet ließ sich bei der Pilotanlage auf Grund der über den gesamten Untersuchungszeitraum sehr geringen Fädigkeit nicht feststellen. Bei der großtechnischen Anlage A zeigte sich keine Auswirkung des selektiven ÜSS-Abzuges auf die Flockendichte. Die Fädigkeit des Schlammes in Versuchsphase B konnte im Vergleich zu Versuchsphase A reduziert werden. Damit ist der selektive ÜSS-Abzug auf der großtechnischen Anlage A zur Fadenbekämpfung geeignet. Die Partikelgrößenanalyse zeigte auf der großtechnischen Anlage A zwar eine Steigerung der Größenklasse in der das 50% Quantil der Flockengröße lag sowie der Größenklasse mit dem größten prozentuellen Anteil an Partikeln, gleichzeitig verringerte sich aber die Größenklasse, in der das 90% Quantil lag. Die Gründe hierfür konnten nicht geklärt werden. Auf der großtechnischen Anlage B zeigte sich wie bei der

Pilotanlage eine Tendenz zu etwas dichteren Flocken. Dies spiegelte sich jedoch nicht im Absetzverhalten wieder. Der Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges auf die Fädigkeit, der auf der großtechnischen Anlage A beobachtet wurde, zeigte sich auf der großtechnischen Anlage B nicht. Der Grund hierfür ist die, durch Betriebsprobleme verursachte, zu geringe selektive ÜSS-Entnahme. Eine Änderung der Partikelgröße war nur bei der Größenklasse in der das 90% Quantil lag zu beobachten. Dies ist auf Betriebsprobleme mit der Vorklärung und einem damit verbundenen verstärkten Eintrag grober Partikulärer Stoffe in die Belebung zurückzuführen.

Bezüglich des Eindickverhaltens konnte nach 30 Minuten statischen Eindickens bei den Schlämmen der Pilotanlage und der großtechnischen Anlage B trotz des erhöhten Volumenstromes beim selektiven ÜSS-Abzug ein ähnlicher TS-Gehalt wie im Referenz-ÜSS erreicht werden. Bei der großtechnischen Anlage A, bei der der erreichbare TS-Gehalt des selektiven ÜSS deutlich unter dem des Referenz-ÜSS lag, war der Einfluss der dosierten Fällmittel dominant und somit ausschlaggebend. Die Trübung im Überstand des selektiven ÜSS lag bei allen drei Schlämmen - mit wenigen Ausnahmen bei der Pilotanlage - unter der Trübung im Überstand des Referenz-ÜSS. Der selektive ÜSS wies bei allen drei Schlämmen eine gleich gute oder vielfach bessere Entwässerbarkeit auf, als der Referenz-ÜSS. In Abhängigkeit der Fällmitteldosierung ist es möglich, bei der Eindickung des selektiven ÜSS ein besseres Eindickverhalten bei gleichen erreichbaren TS-Gehalten und einem verringerten Polymerbedarf verglichen mit dem Referenz-ÜSS zu erreichen. Als Einschränkung für die Eindickung von selektivem ÜSS ist die hydraulische Kapazität der MÜSE zu erwähnen, da sich die zu behandelnde ÜSS-Menge infolge des geringeren TS-Gehaltes ca. verdoppelt.

Die in der Pilotanlage untersuchte Entfernung organischer Spurenstoffe zeigte keine Verschlechterung bei einem reduzierten Schlammalter. Ob dies auf eine höhere Verweilzeit und damit partiell höherem Schlammalter der dichteren Schlammfraktion zurückzuführen ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden.

Mit Ausnahme der Versuchsphase A2, bei der es kurzzeitig zu Problemen bei der ÜSS-Entnahme kam, war es durch den selektiven ÜSS-Abzug aus dem Belebungsbecken der Pilotanlage möglich, die Schlammbelastung und das Schlammalter in der Pilotanlage weitgehend konstant zu halten und die Anlage nach dem Schlammalter zu betreiben. Bei einer entsprechenden Anpassung der Intensität der Belüftung an die Belastungssituation ist damit eine Verringerung der Belüftungsenergie möglich.

Bezüglich des Energieverbrauchs der Anlagen bedeutet ein selektiver ÜSS-Abzug eine Steigerung der benötigten Pumpenergie, da auf Grund des geringeren TS-Gehaltes etwa die doppelte Menge an ÜSS gepumpt werden muss. Durch die Möglichkeit die Anlage auf Grund des ÜSS-Abzuges aus dem Belebungsbecken nach dem tatsächlichen Schlammalter zu betreiben, kann die zusätzliche Pumpenenergie jedoch durch Einsparungen bei der Belüftungsenergie ausgeglichen werden. Auf der großtechnischen Anlage A wäre auf Grund der Optimierung des Schlammalters nach der Temperatur durch die Energieeinsparung bei der Belüftung und den Energiegewinn durch die zusätzliche Faulgasproduktion ein energetisches Optimierungspotential von rund 70,64 MWh/a gegeben. Das entspricht rund 11% des jährlichen Energiebedarfs der biologischen Stufe. Bei der großtechnischen Anlage B beträgt das energetische Optimierungspotential rund 107,48 MWh/a. Das entspricht rund 18% des jährlichen Energiebedarfs der biologischen Stufe.

Für Anlagen an der Kapazitätsgrenze mit geringer verfügbarer Fläche zur Errichtung zusätzlicher Behandlungskapazitäten und einer ausreichenden hydraulischen MÜSE Kapazität ist der selektive ÜSS ein geeignetes Mittel, um mit geringen zusätzlichen Betriebs- und Investitionskosten die Behandlungskapazität zu erhöhen. Die erreichbare Kapazitätssteigerung wird basierend auf den Projektergebnissen mit etwa 10% abgeschätzt. Allerdings muss für den selektiven ÜSS-Abzug eine beruhigte Zone im Belebungsbecken geschaffen werden oder bei Vorhanden sein von Druckbelüftern, die Abzugsintervalle in die nicht belüfteten Phasen mit geringen Turbulenzen und Flockulation gelegt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den selektiven ÜSS-Abzug aus dem Belebungsbecken die Absetzeigenschaften des belebten Schlammes langfristig verbessert werden können und Kapazitätssteigerungen im Bereich von etwa 10% möglich sind. Auch der Betrieb der Anlagen nach dem Schlammalter und eine damit mögliche energetische Optimierung durch eine Anpassung der Belüftungsintensität an das Schlammalter und die Schlammbelastung ist ohne Probleme möglich. Durch die Eindickung von selektivem ÜSS kommt es zu keinen zusätzlichen Betriebsmittelkosten. Je nach Fällmitteldosierung ist unter Umständen eine Reduktion der Betriebsmittel möglich. Bezüglich des PAO/GAO Verhältnisses können keine definitiven Aussagen getroffen werden, da kaum derzeit bekannte Organismen in der Pilotanlage gefunden wurden. Im Laufe des Projektes kam es jedoch zu einer signifikanten Steigerung der biologischen Phosphatentfernung was für einen positiven Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges spricht.

6 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt SelektAra wurden die Auswirkungen des selektiven Überschussschlammabzuges (ÜSS-Abzug) aus kontinuierlich durchflossenen Belebungsbecken kommunaler Abwasserreinigungsanlagen auf die Absetzeigenschaften von belebtem Schlamm untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss des selektiven ÜSS-Abzuges aus dem Belebungsbecken auf mögliche Energieeinsparungen durch die Anpassung der Belüftungsintensität an das Schlammalter und die Schlammbelastung, die Auswirkung der Eindickung von selektivem ÜSS-Abzug auf den Betriebsmittelbedarf und mögliche Verbesserungen des PAO/GAO Verhältnisses durch den selektiven ÜSS-Abzug in dem Projekt näher betrachtet.

Zu diesem Zweck wurden über einen Zeitraum von 3 Jahren Versuche an einer Pilotanlage der Technischen Universität Wien sowie an zwei großtechnischen Anlagen in Österreich durchgeführt. Während auf der Pilotanlage der TU Wien zwei Systeme zum selektive ÜSS-Abzug untersucht wurden (Abzug aus den oberen Wasserschichten und Abzug mittels Steigrohres mit definierter Aufstiegs geschwindigkeit), konzentrierten sich die Versuche auf den großtechnischen Anlagen auf den selektiven ÜSS-Abzug aus den oberen Wasserschichten.

Als Parameter für die Beurteilung der Absetzeigenschaften wurden der Schlammvolumenindex (ISV), die Sinkgeschwindigkeit (v_s) und die Schlammvolumenverhältnisse nach 5 und 10 Minuten (SV_5/SV_{30} und SV_{10}/SV_{30}) herangezogen. Zusätzlich wurden die Partikelgrößenverteilung und das mikroskopische Bild zur Charakterisierung der Schlämme verwendet. Der Polymerbedarf zur Eindickung der Schlämme wurde durch Batch-Tests mit selektivem ÜSS und Referenz-ÜSS ermittelt. Die Untersuchung des PAO/GAO Verhältnisses erfolgte durch DNA-Analysen des Schlammes der Pilotanlage.

In der Pilotanlage wurde die größte Reduktion des ISV durch einen kontinuierlichen selektiven ÜSS-Abzug aus den oberen Wasserschichten erreicht. Dabei konnte sich im Vergleich zum Referenzzeitraum eine rechnerische Kapazitätssteigerung der Anlage von etwa 11% erreicht werden. Bezüglich der Sinkgeschwindigkeit und der Schlammvolumenverhältnisse ließen sich keine Aussagen zu der Auswirkung des selektiven ÜSS-Abzuges treffen. Die Partikelgrößenverteilung zeigte bei selektivem ÜSS-

Abzug einen Anstieg der Partikelgröße im Vergleich zur Referenzphase. Im mikroskopischen Bild zeigte sich eine Tendenz zu kompakteren und größeren Flocken.

Auf der großtechnischen Anlage A konnte im Vergleich zum Referenzzeitraum eine rechnerische Kapazitätssteigerung von etwa 9% bei einer Steigerung der Sinkgeschwindigkeit von etwa 25% erreicht werden. Auf Grund der starken jährlichen Schwankungen konnte die Verbesserung des ISV und der v_s jedoch nicht eindeutig dem selektiven ÜSS-Abzug zugeordnet werden. Des Weiteren zeigte sich durch den selektiven ÜSS-Abzug eine deutliche Reduktion der Fädigkeit in den Wintermonaten.

Auf der großtechnischen Anlage B konnte auf Grund von Betriebsproblemen im Versuchszeitraum keine Aussage zu den Auswirkungen des selektiven ÜSS-Abzuges auf das Absatzverhalten des Schlammes getroffen werden. Im mikroskopischen Bild war jedoch eine Tendenz zu etwas kompakteren Flocken erkennbar.

Die Untersuchungen zum Eindickverhalten ergaben bei allen drei Schlämmen eine gleich gute oder vielfach bessere Entwässerbarkeit des selektiven ÜSS im Vergleich mit dem Referenz-ÜSS. Damit ist es in Abhängigkeit der Fällmitteldosierung möglich ein besseres Eindickverhalten bei gleichen erreichbaren TS-Gehalten und einem verringerten Polymerbedarf bei der Eindickung des selektiven ÜSS zu erreichen.

Die Untersuchungen zur Auswirkung des selektiven ÜSS-Abzuges auf das PAO/GAO Verhältnis kamen zu keinem eindeutigen Ergebnis, da in dem Schlamm der Pilotanlage kaum bekannte Organismen gefunden wurden. Über den Versuchszeitraum verbesserte sich die biologische Phosphatentfernung jedoch signifikant.

Der selektive ÜSS-Abzug aus den Belebungsbecken kontinuierlich durchflossener kommunaler Abwasserreinigungsanlagen ist eine Möglichkeit, mit geringen zusätzlichen Betriebs- und Investitionskosten die Behandlungskapazität von Anlagen an der Kapazitätsgrenze mit begrenzter vorhandener Fläche zu erhöhen. Die zusätzlich benötigte Pumpenergie durch die größeren Volumenströme des ÜSS kann, durch den möglichen Betrieb der Anlagen nach dem Schlammalter und die dadurch gegebene Möglichkeit die Belüftungsintensität auf das Schlammalter und die Belastungssituation zu optimieren, ausgeglichen werden. Bei beiden großtechnischen Kläranlagen ergab sich ein großes Potential zur energetischen Optimierung durch den Betrieb der Anlagen nach dem Schlammalter.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Untersuchungszeiträume	17
Tabelle 2 Versuchsaufbauten in den unterschiedlichen Versuchsphasen der Pilotanlage .	21
Tabelle 3 Chemische Abwasserparameter	26
Tabelle 4 Mittlere Zulauffrachten samt Standardabweichung der Pilotanlage in g/d.	32
Tabelle 5: Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der Pilotanlage in Prozent	35
Tabelle 6 Mittlere Temperaturen und pH-Werte der Pilotanlage	36
Tabelle 7 Mittlere Raum- und Schlammbelastungen der Pilotanlage	37
Tabelle 8 Mittlere ÜSS Menge, mittleres gesamtes und mittleres aerobes Schlammalter der Pilotanlage.....	38
Tabelle 9 Mittlere TS-Gehalte des belebten Schlammes und des ÜSS zu verschiedenen Belüftungszeitpunkten bei Entnahme des ÜSS aus der Pilotanlage mittels Rinne.....	39
Tabelle 10 Mittlerer ISV des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in ml/g....	42
Tabelle 11 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in m/h	46
Tabelle 12 Mittlere Schlammvolumenverhältnisse und Standardabweichung des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage	49
Tabelle 13 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der Pilotanlage	50
Tabelle 14 Mittlere Zulauffrachten der großtechnischen Anlage A.....	61
Tabelle 15 Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der großtechnischen Anlage A in Prozent	62
Tabelle 16 Maximale und minimale Temperatur sowie mittlere pH-Werte der großtechnischen Anlage A.....	63
Tabelle 17 Mittlere Raum- und Schlammbelastung der großtechnischen Anlage A.....	63
Tabelle 18 Mittlere ÜSS-Menge und mittleres gesamtes Schlammalter der großtechnischen Anlage A.....	64
Tabelle 19 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g.....	67
Tabelle 20 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den Vergleichszeiträumen	70
Tabelle 21 Mittleres Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den Vergleichszeiträumen	72

Tabelle 22 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der großtechnischen Anlage A	72
Tabelle 23 Jährlicher Sauerstoffbedarf und Energiebedarf bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage A.....	79
Tabelle 24 Jährliche Gasproduktion und Energieproduktion bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage A.....	81
Tabelle 25 Mittlere Zulauffrachten der großtechnischen Anlage B.....	82
Tabelle 26 Mittlere Entfernungsraten und Standardabweichung der großtechnischen Anlage B in Prozent	84
Tabelle 27 Maximale und minimale Temperatur sowie mittlere pH Werte der großtechnischen Anlage B.....	85
Tabelle 28 Mittlere Raum- und Schlammbelastung der großtechnischen Anlage B	85
Tabelle 29 Mittlere ÜSS Menge der großtechnischen Anlage B	86
Tabelle 30 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g.....	89
Tabelle 31 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen der einzelnen Jahre in ml/g.....	91
Tabelle 32 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten	94
Tabelle 33 Mittleren Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren im Vergleichszeitraum	96
Tabelle 34 Mittleres Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen.....	98
Tabelle 35 50%- und 90%-Quantil der mittleren Partikelgrößenklasse und Partikelgrößenklasse mit dem höchsten prozentuellen Anteil an Partikeln der unterschiedlichen Versuchsphasen der großtechnischen Anlage B	99
Tabelle 36 Jährlicher Sauerstoffbedarf und Energiebedarf bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage B.....	106
Tabelle 37 Jährliche Gasproduktion und Energieproduktion bei dem Bemessungsschlammalter und dem optimierten Schlammalter der großtechnischen Anlage B.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Der Absetzvorgang in einem 1 l Messzylinder (adaptiert nach Merkel 1971) ..	9
Abbildung 2 Fließbild der Pilotanlage (Fa. Adiro 2015, oben) und Foto der Pilotanlage (unten).....	18
Abbildung 3 Steigrohr zur Überschussschlammmentnahme (oben) und Rinne mit Zahnschwelle zum Überschussschlammabzug (unten).....	22
Abbildung 4 Geschlitzte Tauchrohre zur Überschussschlammmentnahme auf der großtechnische Anlage A.....	24
Abbildung 5 Schematischer Aufbau eines Laserdiffraktometers (Keck 2009).....	27
Abbildung 6 Zulauffrachten der Pilotanlage	33
Abbildung 7 ISV des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage	41
Abbildung 8 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der Pilotanlage in den einzelnen Versuchsphasen in ml/g	43
Abbildung 9 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage in m/h	45
Abbildung 10 Mittlere Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der Pilotanlage in m/h	47
Abbildung 11 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes und des ÜSS der Pilotanlage.....	48
Abbildung 12 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der Pilotanlage in den unterschiedlichen Versuchsphasen.....	51
Abbildung 13 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase A1	52
Abbildung 14 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B1.1.....	52
Abbildung 15 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B2.....	53
Abbildung 16 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B3.....	53
Abbildung 17 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B4.1.....	53
Abbildung 18 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B4.2.....	54
Abbildung 19 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase A2	54

Abbildung 20 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der Pilotanlage in Versuchsphase B1.2.....	54
Abbildung 21 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der Pilotanlage	56
Abbildung 22 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der Pilotanlage.....	57
Abbildung 23 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS pro mm Filterkuchen der Pilotanlage	58
Abbildung 24 Zehn am häufigsten vorkommenden Arten jeder Probe der Pilotanlage	59
Abbildung 25 Zulauffrachten der großtechnischen Anlage A	61
Abbildung 26 ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A.....	65
Abbildung 27 Gleitender Mittelwert des ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren	66
Abbildung 28 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g.....	68
Abbildung 29 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in m/h	69
Abbildung 30 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A.....	71
Abbildung 31 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in den unterschiedlichen Versuchsphasen	73
Abbildung 32 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlag A in Versuchsphase A1	74
Abbildung 33 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage A in Versuchsphase B	74
Abbildung 34 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Vergleichs ÜSS der großtechnischen Anlage A	75
Abbildung 35 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage A	76
Abbildung 36 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS Schlamm pro mm Filterkuchen der großtechnischen Anlage A .	77
Abbildung 37 Bemessungsschlammalter, optimiertes Schlammalter und Temperatur im Belebungsbecken der großtechnischen Anlage A.....	79
Abbildung 38 Gasproduktion bei optimiertem Schlammalter und tatsächle gasproduktion eines Jahres der großtechnischen Anlage A.....	80
Abbildung 39 Zulauffrachten der großtechnischen Anlage B	83
Abbildung 40 ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B.....	87

Abbildung 41 Gleitender Mittelwert des ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren	88
Abbildung 42 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in ml/g.....	90
Abbildung 43 Mittlerer ISV des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen der einzelnen Jahre in ml/g.....	92
Abbildung 44 Sinkgeschwindigkeit des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in m/h	93
Abbildung 45 Mittlere Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den einzelnen Jahren und Jahreszeiten in m/h.....	95
Abbildung 46 Mittlere Sinkgeschwindigkeiten des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den Vergleichszeiträumen.....	97
Abbildung 47 Schlammvolumenverhältnis des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B.....	98
Abbildung 48 Mittlere Partikelgrößenverteilungen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in den unterschiedlichen Versuchsphasen	100
Abbildung 49 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in Versuchsphase A	101
Abbildung 50 Mikroskopische Aufnahmen des belebten Schlammes der großtechnischen Anlage B in Versuchsphase B.....	101
Abbildung 51 Erreichbarer TS-Gehalt bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage B	102
Abbildung 52 Trübung bezogen auf die Polymermenge pro kg TS für selektiven und Referenz-ÜSS der großtechnischen Anlage B.....	103
Abbildung 53 Filtergeschwindigkeit des selektiven und des Referenz-ÜSS bezogen auf die Polymermenge pro kg TS Schlamm pro mm Filterkuchen der großtechnischen Anlage B	104
Abbildung 54 Bemessungsschlammalter, optimiertes Schlammalter und Temperatur im Belebungsbecken der großtechnischen Anlage B	106

Literaturverzeichnis

Ahlendorf, W.-K., Kühn, V., & Krebs, P. (2006). Selektive Entfernung fadenförmiger Mikroorganismen durch Klassierung von leichten und schweren Belebtschlammflocken (SEFMO).

Bassin, J. P., Winkler, M.-K. H., Kleerebezem, R., Dezotti, M., & van Loosdrecht, M. C. M. (2012). Improved phosphate removal by selective sludge discharge in aerobic granular sludge reactors. In: *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 109(8), pp. 1919-1928.

Bisogni, J., J., Lawrence, A., WM. (1971). Relationships between biological solids retention time and settling characteristics of activated sludge. In: *Water Research Pergamon Press*, Vol: 5, pp. 753-763.

Daigger, G. T., Redmod, E., Downing, L. (2018). Enhanced settling in activated sludge: design and operation considerations. In: *Water Science and Technology*, Vol. 78, issue 2, pp. 247-258.

Dick, R. I., Vesilind, P. A. (1969). The Sludge Volume Index: What is it? In: *Water Pollution Control Federation*. Vol. 41, No. 7, pp. 1285-1291.

DWA (2016). Arbeitsblatt DWA-A131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

DWA (2017) Merkblatt DWA-M229-1 Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Korrigierte Fassung: Stand Februar 2021. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Fitch, B. (1971). Sedimentation of flocculent suspensions: State of the Art. In: *American Institute of chemical Engineers Journals*. Vol. 25, No. 6, pp. 913-930.

Gujer, W. (2007). *Siedlungswasserwirtschaft*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 3. Aufl.

Hosang, W., Bischof, W. (1998). *Abwassertechnik*. Teubner, Stuttgart, 11. Auflage

Jahn, L. Schaar, H., Svardal, K., Krampe, J. (2017). Granulares Belebtschlammverfahren in Kontinuierlich durchflossenen Belebungsanlagen Endbericht. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Keck, C. M. (2009). Kapitel 3.1. Laserdiffraktometrie. In: Moderne Pharmazeutische Technologie Berlin FU (ed.).

Maltos, R. A., Holloway, R. W., Cath, T. Y. (2020). Enhancement of activated sludge wastewater treatment with hydraulic selection. In: Separation and Purification Technology Vol. 250 Article 117214.

Mennerich A, Müller M, Krüger B and Sporys F. (2001). Influence of activated sludge SRT on anaerobic excess sludge digestion. In: Fachhochschule Nordostniedersachsen UoAS. Department Water and Environmental, Engineering H-M-S, Suderburg.

Merkel, W. (1971). Untersuchungen über das Verhalten des belebten Schlammes im System Belebungsbecken - Nachklärung. GWA No.5, Aachen.

Mikkelsen, L., H., Keiding, K. (2001). Effects of solids concentration on activated sludge deflocculation, conditioning and dewatering. In: Water Science and Technology Vol. 44 No. 2-3, pp 417-425.

Nielsen, P., H., Mclroy, S., J., Albertsen, M., Nierychla, M. (2019). Re-evaluating the microbiology of the enhanced biological phosphorus removal process. In: Current Opinion in Biotechnology Vol. 57, pp. 111-118.

Roche, C., Donnaz, S., Murthy, S., Wett, B. (2021). Biological process architecture in continuous-flow activated sludge by gravimetry: Controlling densified biomass form and function in a hybrid granule-floc process at Dijon WRRF, France. In: Water Environment Research Vol. 94, Issue 1.

Sepúlveda-Mardones, M., Campos J.L., Magrí, A., Vidal, G. (2019). Moving forward in the use of aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment an overview. In: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology Vol. 18(4), pp. 741-769.

Tu, Y., Schuler, A., J. (2013). Low acetate concentrations favor polyphosphate-accumulating organisms over glycogen-accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal from wastewater. In: Environmental Science and Technology Vol. 47, pp. 3816-3824.

Van Loosdrecht, M., C., M., Hooijmans, C., M., (1997). Biological phosphate removal processes. In: Applied Microbiological Biotechnology Vol. 48, pp. 289-296.

Welling, C. M. (2015). Improving Settleability and Enhancing Biological Phosphorus Removal through the Implementation of Hydrocyclones, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.

Abkürzungen

BB	Belebungsbecken
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
EW	Einwohnerwert
GAO	Glycogen-akkumulierende Organismen
ISV	Schlammindex
oTS	Organische Trockensubstanz
PAO	Phosphat-akkumulierende Organismen
PF	Prozessfaktor
Q _{ÜSS}	Überschussschlammmenge
RV	Rücklaufverhältnis
SBR	Sequenz Batch Reactor
SV	Schlammvolumen
T	Temperatur
t _E	Eindickzeit
TN _b	Gesamtstickstoff
TP	Gesamtphosphor
TS	Trockensubstanz
TS _{BB}	Trockensubstanz Belebungsbecken
TS _{BS}	Trockensubstanz Bodenschlamm
TS _{RS}	Trockensubstanz Rücklaufschlamm
TS _{ÜSS}	Trockensubstanz Überschussschlamm
t _{TS}	Schlammalter
t _{TS,BEM}	Bemessungsschlammalter
t _{TS,OPT}	Nach der Temperatur optimiertes Schlammalter
ÜSS	Überschussschlamm
v _s	Sinkgeschwindigkeit
V _{BB}	Belebungsbeckenvolumen
V _{DN}	Denitrifikationsvolumen

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Stubenring 1, 1010 Wien

bml.gv.at