

Universität Stuttgart



**Institut für Siedlungswasserbau,
Wassergüte- und Abfallwirtschaft**

**Untersuchung des Umweltentlastungspotenzials der
Thomomat-Technologie am Beispiel der Eindickung
von Klärschlamm aus der kommunalen
Abwasserreinigung**

**Abschlussbericht über DBU AZ 31131
gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Bearbeitet von:

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling

Projektleitung: Professor Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Peter Maurer

Stuttgart, Dezember 2013

Inhalt

Abbildungsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung und Motivation, Stand der Technik	2
2 Beschreibung und Funktionsweise Thomomat	2
3 Ziele und Arbeitsprogramm	3
3.1 Ziele und Vorgehensweise	3
3.2 Arbeitsprogramm	4
3.2.1 Aufbau und Inbetriebnahme des bestehenden Eindickers, Aufbau des Thomomaten	4
3.2.2 Durchführung der Versuche	4
3.2.3 Begleitende Analytik	5
4 Ergebnisse	5
5 Fazit	13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schlammeigenschaften während des Versuchszeitraums	6
Abbildung 2: Absetzkurven am 27.03.2013 und 15.04.2013	7
Abbildung 3: Absetzkurve mit Thomomat 11.03.2013 (Raute), 13.03.2013 (Kreis), 18.03.2013 (Dreieck), 21.03.2013 (ohne).....	7
Abbildung 4: Absetzkurven mit Thomomat und H ₂ SO ₄ am 03.07.2013 (Raute), 09.07.2013 (Quadrat) und 16.07.2013 (Dreieck).....	8
Abbildung 5: Übersicht über alle Absetzversuche	9
Abbildung 6: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (ohne Thomomat).....	10
Abbildung 7: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (mit Thomomat).....	10
Abbildung 8: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (mit Thomomat und H ₂ SO ₄)	11
Abbildung 9: CSB Konzentrationen im Trübwasser	11
Abbildung 10: Konzentrationen für P _{ges} , N _{ges} und NH ₄ -N im Trübwasser.....	13

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Einheit	Beschreibung
CSB	mg/L	Chemischer Sauerstoffbedarf
P _{ges}	mg/L	Gesamt Phosphor (gelöst und partikulär)
N _{ges}	mg/L	Gesamt (gelöste und partikuläre Stickstoffverbindungen)
NH-4N	mg/L	Ammoniumstickstoff
AFS	mg/L	Abfiltrierbare Stoffe (Membran mit 0,45µm)
TS	g/L	Trockensubstanzgehalt einer wässrigen Lösung, Gewicht der abfiltrierbaren getrockneten Feststoffe
SVI	g/mL	Schlammvolumenindex, Verhältnis von Trockensubstanz zu Absetzvolumen

Zusammenfassung

In der kommunalen Abwasserreinigung werden Mikroorganismen zur Entnahme der Abwasserinhaltsstoffe eingesetzt. Diese werden in Sedimentationsbecken abgeschieden und dadurch im Prozess angereichert. Die zu viel erzeugte Biomasse wird dem System entzogen und muss zur Volumenreduktion eingedickt werden. Die hierfür eingesetzten Verfahren benötigen entweder viel Raum (statische Eindicker) und haben eine begrenzte Eindickfähigkeit oder haben einen hohen Energieverbrauch (maschinelle Eindickung). Eine bessere Eindickung würde aber zu einer deutlichen Reduzierung des weiter zu behandelnden Volumenstromes führen. Des Weiteren könnten bei Anlagen mit bestehendem Faulturn bei Erhöhung des Feststoffgehaltes frei werdende Volumina z.B. zur Co-Vergärung und damit zur Gewinnung zusätzlicher Energie in Form von Methan genutzt werden.

Im Rahmen des Projektes sollte überprüft werden, in wie weit die Thomomattechnologie zur verbesserten Eindickung von Überschussschlamm bei gleichzeitig geringem Energieeinsatz führt. Dazu wurden Versuche im technischen Maßstab auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart durchgeführt.

Die Versuche zur Eindickung wurden in 3 Versuchsreihen unterteilt, bei denen jeweils mehrere Chargen (Versuchsphasen) ohne Einsatz des Thomomaten (Referenzversuche) und mit Einsatz des Thomomaten untersucht wurden.

Der vorhandene Voreindicker wurde dazu mit Überschussschlamm aus dem Klärwerk beschickt. Nach Erreichen der erforderlichen Füllung wurde die Beschickung gestoppt und der Schlamm setzte sich mindestens 12 Stunden lang ab. Abgesetzter Schlamm und Überstandswasser wurden getrennt abgezogen und untersucht.

Durch den Einsatz des Thomomaten konnte keine eindeutige Verbesserung der Absetzbarkeit nachgewiesen werden. Zwar wird die Feststoffkonzentration im Trübwasser (1m Tiefe) etwas geringer, aber der Eindickvorgang wird dadurch nicht verbessert. Im Schlamm sind keine höheren Feststoffkonzentrationen nachweisbar. Auch die Zugabe von Schwefelsäure in die Lanzenspitze führt nicht zu einer wesentlichen Veränderung der Eindickung.

Die Ergebnisse für die Feststoffgehalte in Trübwasser und abgesetztem Schlamm liegen im für statische Schlammeindicker üblichen Schwankungsbereich. Signifikante Veränderungen, wie sie z.B. durch maschinelle Eindickung erreicht werden können, konnten nicht festgestellt werden.

1 Einleitung und Motivation, Stand der Technik

Die kommunale Abwasserreinigung mit biologischen Reinigungsverfahren stellt heute den Stand der Technik dar. Mikroorganismen nutzen dabei die Abwasserinhaltsstoffe als Nahrung und vermehren ihre Biomasse dadurch. In der Nachklärung setzt sich die Biomasse ab, der Überschussschlamm wird dem System entzogen. Dabei liegt die Feststoffkonzentration i.d.R. unter 1%, so dass zur Volumenreduzierung für alle weiteren Verfahrensstufen im Zuge der Schlammbehandlung eine Eindickung erforderlich ist. Diese erfolgt häufig in statischen Eindickern, womit sich ein Feststoffgehalt von ca. 3% erzielen lässt. Mit maschinellen Eindickern wie z.B. Zentrifugen sind zwar höhere Feststoffkonzentrationen erzielbar, jedoch ist der dafür erforderliche Energiebedarf nicht unerheblich. Mit Hilfe von Flockungshilfsmitteln lassen sich die erzielbaren Feststoffgehalte steigern, aber auch dies führt zu zusätzlichen Kosten für die Flockungshilfsmittel und, je nach verwendeten Flockungshilfsmittel, zu Einschränkungen bei der landwirtschaftlichen Verwertung der Klärschlämme.

Eine bessere Eindickung würde aber zu einer deutlichen Reduzierung des weiter zu behandelnden Volumenstromes führen. Des Weiteren könnten bei Anlagen mit bestehendem Faulturm bei Erhöhung des Feststoffgehaltes frei werdende Volumina z.B. zur Co-Vergärung und damit zur Gewinnung zusätzlicher Energie in Form von Methan genutzt werden.

Somit kann eine verbesserte Eindickung nicht nur einen Beitrag zur Kosteneffizienz leisten, sondern auch unter Umweltgesichtspunkten einen wichtigen Beitrag zur Ausnutzung von Kapazitäten zur regenerativen Energiegewinnung leisten.

Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung von Systemen viel versprechend, die mit einfachen Mitteln, geringem Energieeinsatz und ohne die Erfordernis des Einsatzes zusätzlicher Chemikalien (wie Flockungshilfsmittel) eine Verbesserung des Absetzverhaltens von Überschussschlämmen ermöglichen.

2 Beschreibung und Funktionsweise Thomomat

Der Thomomat besteht aus einem Steuerschrank und einer Lanze. Im Schaltschrank befindet sich eine Steuereinheit und ein wassergefülltes größeres Glasgefäß, in welches 2 Kontakte eingeschmolzen sind, über die die Nachfuhr von Wasser (weniger als 2 L/Intervall) geregelt wird. Durch die Erzeugung von Mikrowellen wird das Wasser „behandelt“ und unter anderem auch verdunstet, was die Zufuhr neuen Wassers auslöst. Das behandelte Wasser wird in die Lanze, die im Eindicker eingetauscht ist, geleitet und tritt in einen dort ebenfalls installierten Behälter aus. Durch diesen Prozess soll das Absetzverhalten des Schlammes positiv beeinflusst werden. Je nach Zusammensetzung des Stoffgemischs, das beeinflusst

werden soll kann am Ende der Tauchlanze ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure angebracht werden. Die Säure soll Trennvorgänge beschleunigen. Der Überlauf des Behälters (ca. 10- 15 L pro Charge) fließt in den Eindicker.

Der Thomomat wird in unmittelbarer Nähe eines Eindickers aufgestellt und dort für ca. 0,75- 4 Stunden betrieben. Diese Zeit reicht nach Herstellerangaben aus, die Verbesserung des Absetzvorganges im Eindicker zu bewirken. Die erforderliche Dauer des Absetzvorganges ist vom Volumen des Eindickers abhängig und kann zwischen 4 h und ca. 12 h betragen.

Für den Betrieb des Thomomaten sind entsprechend ein Wasser- und ein Stromanschluss erforderlich, sowie ein geeigneter Aufstellplatz in unmittelbarer Nähe des Eindickers.

Das System ist einfach in bestehende Anlagen zu integrieren und könnte somit auf fast jeder Kläranlage in Deutschland zu Kosten- und Energieeinsparungen führen.

3 Ziele und Arbeitsprogramm

3.1 Ziele und Vorgehensweise

Mit dem beantragten Vorhaben sollen Vorversuche im großtechnischen Maßstab durchgeführt werden, um die Wirkung der Thomomat-Technologie auf das Eindickverhalten kommunaler Klärschlamm zu untersuchen. Die Versuchsergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, ob die Technologie für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen prinzipiell viel versprechend ist.

Ziel der im Rahmen dieses Projektes geplanten Versuche ist es, in einem großtechnischen Standeindicker des Lehr- und Forschungsklärwerks der Universität Stuttgart im Batch-Betrieb die Eindickwirkung mit und ohne Einsatz der Thomomat- Technologie zu vergleichen. Dafür sollen Phasen mit unterschiedlichen Schlammigenschaften untersucht werden, z.B. während des Winterbetriebes und im Frühjahr, wenn die Temperaturänderungen auf Kläranlagen meist zu einer Verschlechterung der Schlammabsetzeigenschaften führen.

Zur Überprüfung einer Verbesserung der statischen Überschussschlammindickung im technischen Maßstab unter Verwendung der Klärschlammseparationsanlage der Fa. Thom wird die in 3.2 beschriebene Vorgehensweise vorgeschlagen.

3.2 Arbeitsprogramm

3.2.1 Aufbau und Inbetriebnahme des bestehenden Eindickers, Aufbau des Thomomaten

Für die Versuche im technischen Maßstab wird ein vorhandener Voreindicker des LFKW mit ca. 94 m³ Volumen verwendet. Dazu wurde in Absprache mit dem Erfinder des Thomomaten ein geeigneter Aufstellort für den Thomomat gefunden. Hierfür waren kleinere bauliche Modifikationen erforderlich. So musste die Lanze an die Einbauhöhe angepasst werden. Ferner mussten die Anschlüsse für das Gerät gelegt werden.

Das Personal des LFKW sowie der zuständige wissenschaftliche Mitarbeiter wurden daran anschließend in die Bedienung des Thomomaten eingewiesen.

3.2.2 Durchführung der Versuche

Die Versuche wurden in 3 Versuchsreihen unterteilt, bei denen jeweils mehrere Chargen (Versuchsphasen) ohne Einsatz des Thomomaten (Referenzversuche) und mit Einsatz des Thomomaten untersucht wurden.

Diese Versuchsreihen waren erforderlich, um im Jahresverlauf schwankende Schlammeigenschaften und Änderungen der Abwasserzusammensetzung mit zu erfassen und eine gewisse statistische Absicherung zu erzielen.

In der jeweils ersten Versuchsphase wurde die Eindickleistung ohne Einsatz des Thomomaten ermittelt (Referenzwerte).

Der vorhandene Voreindicker (Durchmesser 5 m, Höhe max. 6,70 m, Volumen ca 94 m³) wurde dazu mit Überschussschlamm aus dem LFKW beschickt.

Nach Erreichen der erforderlichen Füllung wurde die Beschickung gestoppt und der Schlamm setzte sich mindestens 12 Stunden lang ab. Abgesetzter Schlamm und Überstandswasser wurden getrennt abgezogen und untersucht.

Nach Aussage des Erfinders bewirkt der Thomomat einen „Memory-Effekt“, d.h. nach Einsatz des Thomomaten kann die verbesserte Absetzwirkung auch ohne erneutes anschalten des Gerätes für einige Tage anhalten. Ursache dieses Effekts kann die Rückführung von Trübwasser und Schlamm in den Wasserkreislauf der Kläranlage sein. Deshalb wurden alle Teilströme aus dem Voreindicker in einem Anlagenteil ohne Kontakt zum Hauptstrom der Kläranlage behandelt und dann in den Vorfluter geleitet. Sollte eine verbesserte Absetzung nachweisbar sein, sollten nach Untersuchung der Wirkung des

Thomomaten noch 3 bis 4 weitere Versuche durchgeführt werden, um diesen „Langzeiteffekt“ zu untersuchen. Diese optionalen Versuche wurden nicht durchgeführt.

3.2.3 Begleitende Analytik

Zu- und Abläufe des Voreindickers wurden beprobt und auf den Parameter Feststoffgehalt untersucht. Das Trübwasser wurde zusätzlich je Charge auf die Parameter CSB, Pges, Nges und NH₄-N untersucht.

Die Absetzgeschwindigkeit und das Absetzverhalten sind wichtige Parameter für die Bemessung einer statischen Schlammmentwässerung. Um dies zu ermitteln wurden zu verschiedenen Zeitpunkten (nach ca. 1, 4, 8, und 24 Stunden) in zwei Höhen (1 m und 3 m) Proben mit einer Pumpe entnommen und der Feststoffgehalt ermittelt.

Zu Beginn und am Ende des Absetzvorgangs wurde in 1m Tiefe eine Stichprobe untersucht und auf die Parameter CSB, Nges, NH₄-N, Pges und abfiltrierbare Stoffe (AFS) untersucht. Für die Beurteilung der Absetzbarkeit wurden Werte der Regelanalytik des LFKW herangezogen. Hierzu zählen Schlammvolumen (SV in ml/L), TS im Belebungsbecken und Rücklaufschlamm, Schlammindex (SVI).

4 Ergebnisse

Der Voreindicker wurde für den ersten Referenzversuch ohne Einsatz des Thomomaten mit Überschussschlamm mit einem Volumenstrom von ca. 3 m³/h gefüllt. Dabei setzt sich ein Teil des Schlammes ab und es bildet sich eine Klarwasserzone aus. Nach Erreichen der Füllmarke wurde die Befüllung gestoppt und Proben in 1 m und 3 m Tiefe genommen. Diese Probenahme wurde nach ca. 2,5 bzw. 5 h und am folgenden Morgen (ca. 24 h) wiederholt. Der Überschussschlamm wurde aus dem Hauptabwasserstrom des LFKW entnommen. Die folgende Abbildung zeigt die Schlammparameter (Feststoffgehalt im Belebungsbecken und Überschussschlamm, Index, Glühverlust des Belebtschlammes) während des Versuchszeitraums.

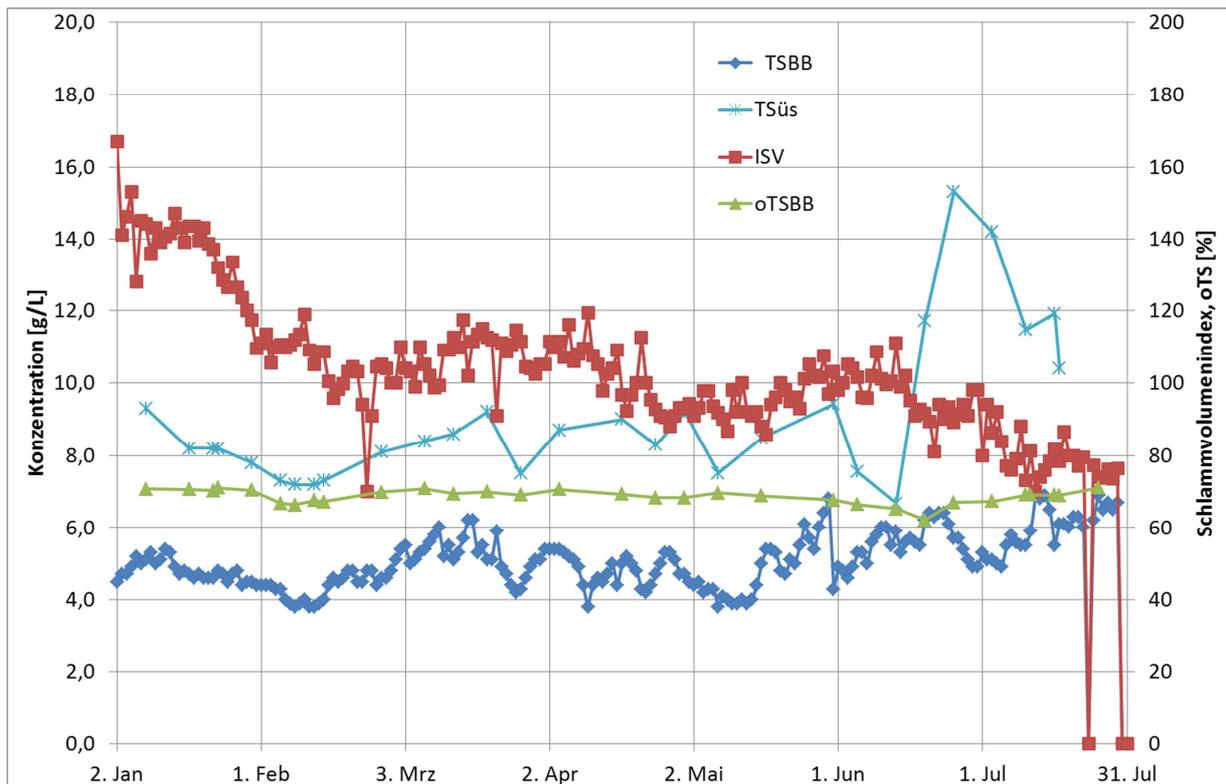


Abbildung 1: Schlammeigenschaften während des Versuchszeitraums

Der Feststoffgehalt im Belebungsbecken schwankt zwischen 4 g/l und 7 g/l. Die Eindickung in der Nachklärung führt zu einer Erhöhung des Feststoffgehalts im Überschussschlamm auf 7 bis 15 g/l. Der organische Anteil im Schlamm ist sehr konstant bei ca. 70%. Allein der Schlammindex als Maß für die Absetzbarkeit sinkt von ca. 140 auf unter 80 ml/L ab. Dies deutet auf eine Verbesserung der Absetzbarkeit und damit auch der Eindickfähigkeit hin. Die Referenzversuche und die Versuche mit dem Thomomaten ohne Schwefelsäureinsatz wurden im Zeitraum März/April 2013 bei relativ konstantem ISV von ca. 100 -120 ml/l durchgeführt, während die Versuche mit Schwefelsäure im Juli durchgeführt wurden, wo der Schlammindex mit ca. 80 bis 90 ml/L deutlich niedriger lag und somit auch ohne Thomomat von einer besseren Eindickfähigkeit ausgegangen werden kann. Dies zeigt sich bereits in der höheren Feststoff-Konzentration des Überschussschlammes.

Die folgende Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf des Feststoffgehalts der Proben für die beiden Absetzversuche ohne Einsatz des Thomomat.

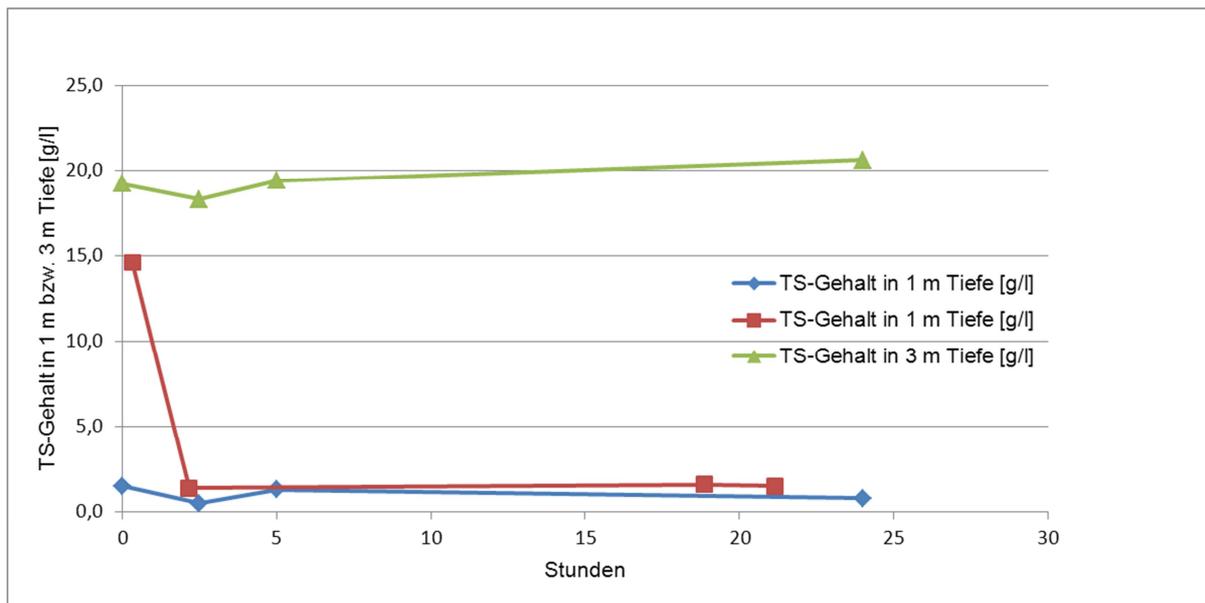


Abbildung 2: Absetzkurven am 27.03.2013 und 15.04.2013

Der Feststoffgehalt unterscheidet sich in beiden Tiefen deutlich. Durch die Absetzvorgänge verringert sich der Feststoffgehalt in 1 m Tiefe auf weniger als 1 g/l, in 3 m Tiefe verdichtet sich der Schlamm auf 18 bis 20 g/l.

Wird nach Beenden der Befüllung der Thomomat eingeschaltet ergeben sich die folgenden Kurven.

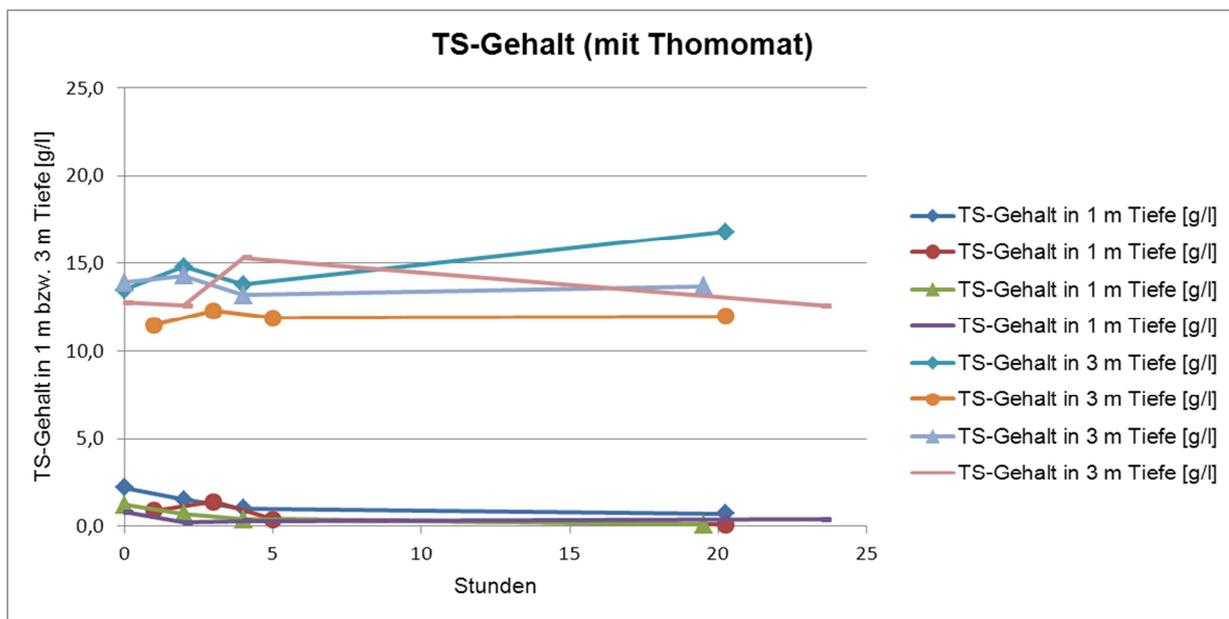


Abbildung 3: Absetzkurve mit Thomomat 11.03.2013 (Raute), 13.03.2013 (Kreis), 18.03.2013 (Dreieck), 21.03.2013 (ohne)

Der Feststoffgehalt in 1 m Tiefe ist etwas geringer und weist auch eine absinkende Tendenz während der ersten 5 Stunden auf. Bei Versuchsende werden Gehalte von 0,1 bis 0,7 g/l

erreicht. Der Feststoffgehalt in 3 m Tiefe liegt zwischen 11,5 g/l und 17 g/l. Eine zeitliche Tendenz ist bei einzelnen Versuchen aber nicht generell erkennbar.

Laut Herrn Thom können bei Einsatz des Thomomaten Trennvorgänge beschleunigt werden, wenn in einem Behälter am Ende der Tauchlanze konzentrierte Schwefelsäure einmalig eingefüllt wird. Die folgende Abbildung zeigt die Feststoffgehalte unter Einsatz des Thomomaten mit Schwefelsäure.

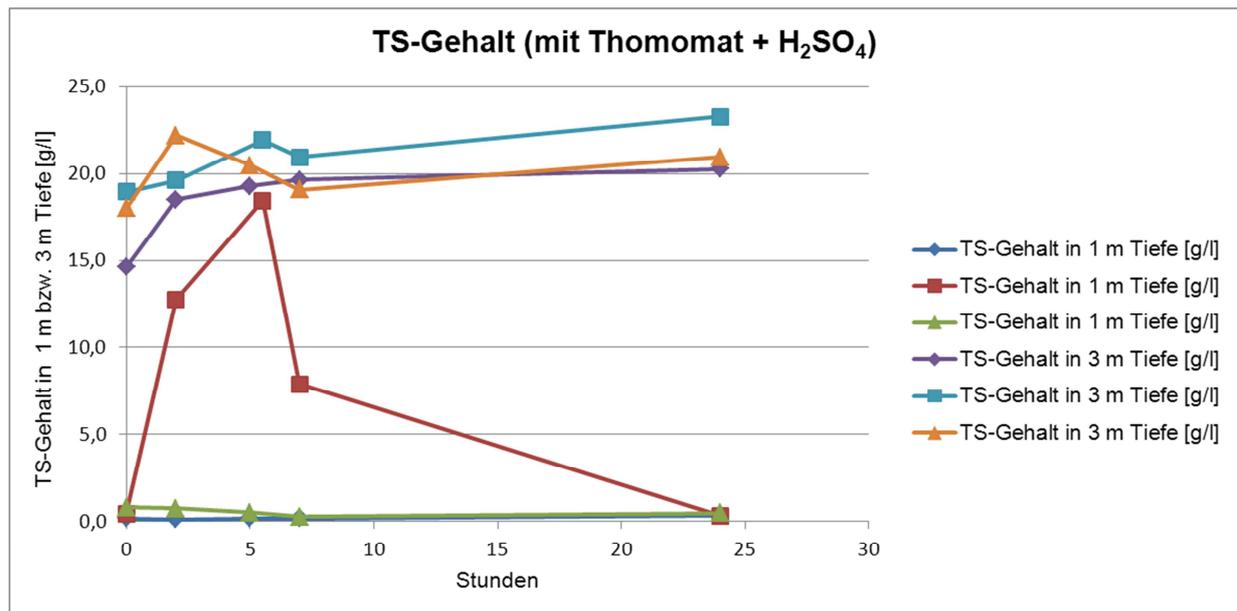


Abbildung 4: Absetzkurven mit Thomomat und H₂SO₄ am 03.07.2013 (Raute), 09.07.2013 (Quadrat) und 16.07.2013 (Dreieck)

Die Feststoffgehalte in 1 m Tiefe liegen bei Versuchsende im Bereich von 0,3 g/l bis 0,5 g/l. Bei einem Versuch (rote Kurve) trat allerdings eine deutliche Erhöhung auf die sich bis Versuchsende aber an die Ergebnisse der anderen Versuche anglich. In 3 m Tiefe können Feststoffgehalte von 15 g/l bis 23 g/l erreicht werden. Hier ist auch ein deutlicher Anstieg über der Versuchszeit zu vermerken.

Die folgende Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse aller Absetzversuche.

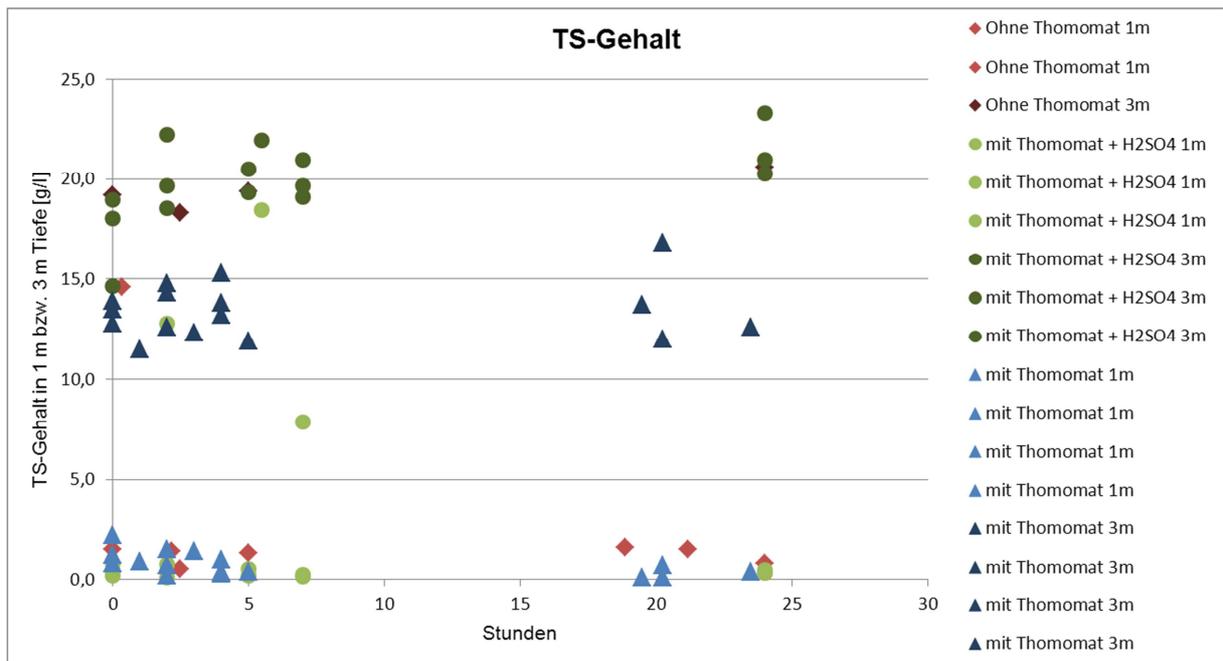


Abbildung 5: Übersicht über alle Absetzversuche

Die Feststoffgehalte in 1 m Tiefe unterscheiden sich kaum. Dagegen sind die Feststoffgehalte in 3 m Tiefe mit Thomomat niedriger als mit Thomomat und Schwefelsäure. Die erzielten Feststoffgehalte können allerdings auch ohne Einsatz des Thomomat erzielt werden. Der ISV änderte sich während der Versuche mit und ohne Thomomat nicht wesentlich (März und April ca. 110). Erst im Juli während der Versuche mit Schwefelsäure sank der ISV auf ca. 80 ab.

Nach Beenden der Absetzphase wurde der Voreindicker getrennt nach Trübwasser und Schlammphase entleert. Aus der Schlammphase wurde zu Beginn und immer nach 5 m³ Schlammabzug eine Probe genommen auf Feststoffgehalt untersucht.

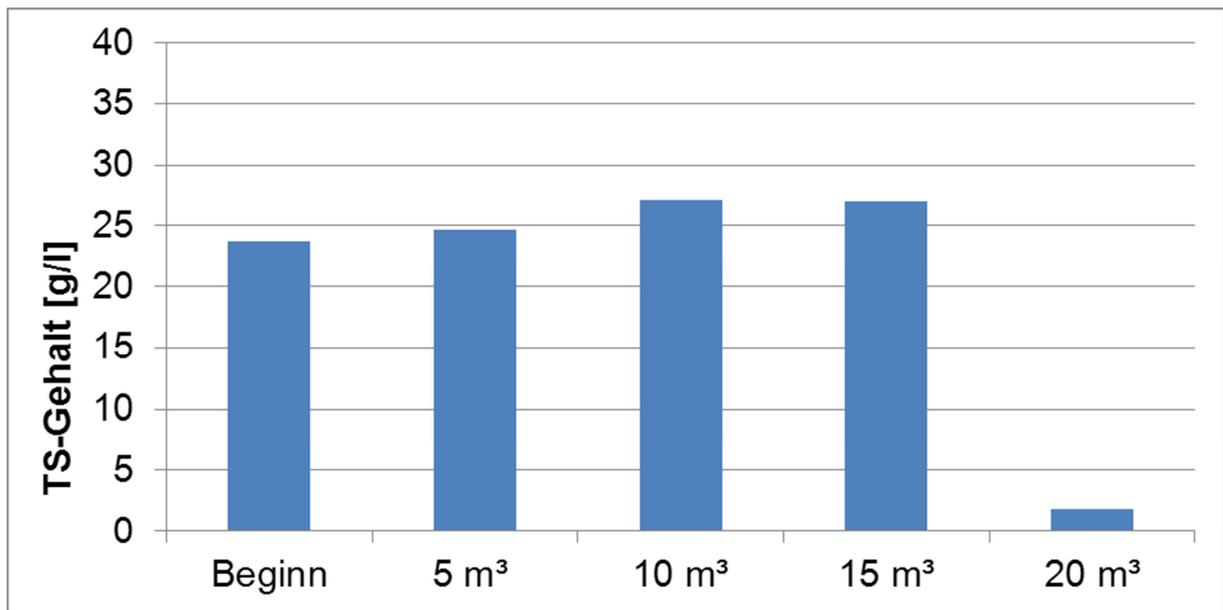


Abbildung 6: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (ohne Thomomat)

Das Ergebnis für den Versuch ohne Thomomat deckt sich mit den zeitlichen Messungen. Die Feststoffkonzentration im eingedickten Schlamm beträgt 23,7 g/l bis 27 g/l.

Die gleiche Beprobung wurde bei Einsatz des Thomomaten bei zwei Versuchen durchgeführt. Das Ergebnis zeigt die folgende Abbildung 7.

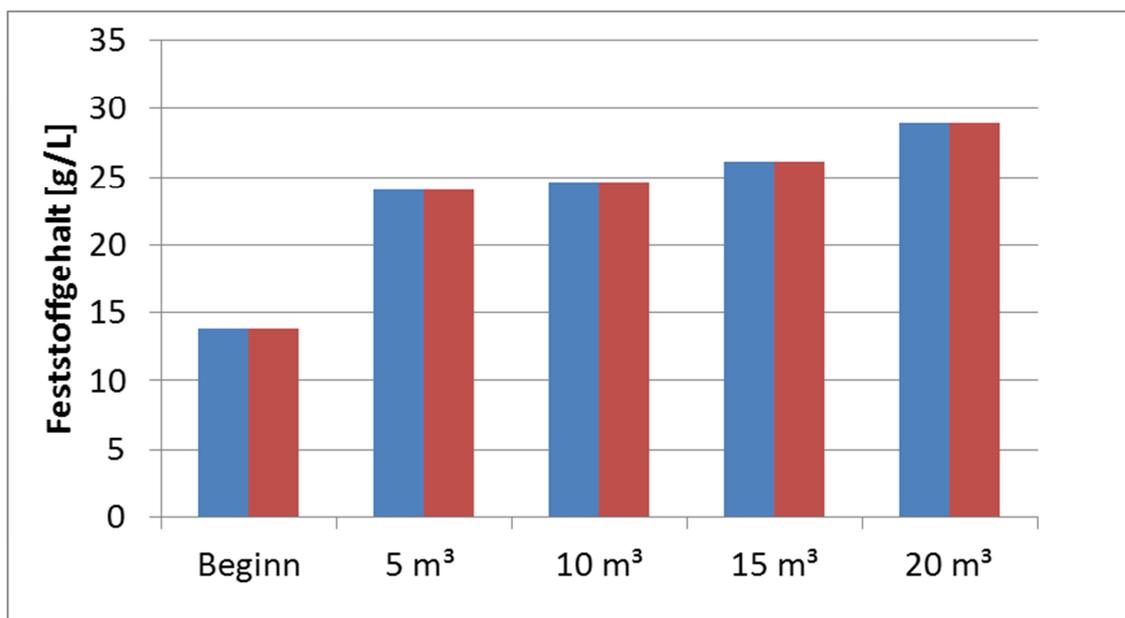


Abbildung 7: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (mit Thomomat)

Die Feststoffgehalte zu Beginn des Abzugs liegen im Bereich der Messung der Absetzlinie. Steigen nach einem Abzug von 5 m³ auf 24,1 g/l an. Die Eindickung ist vergleichbar mit der ohne Thomomat. Der Messwert ohne Thomomat bei einem Abzugsvolumen von 20 m³ ist

deutlich zu niedrig, da hier voraussichtlich eine Rückvermischung mit Trübwasser im Trichter stattgefunden hat.

Der gleiche Versuch mit einem zusätzlichen Einsatz von Schwefelsäure ergibt die folgende Abbildung 8.

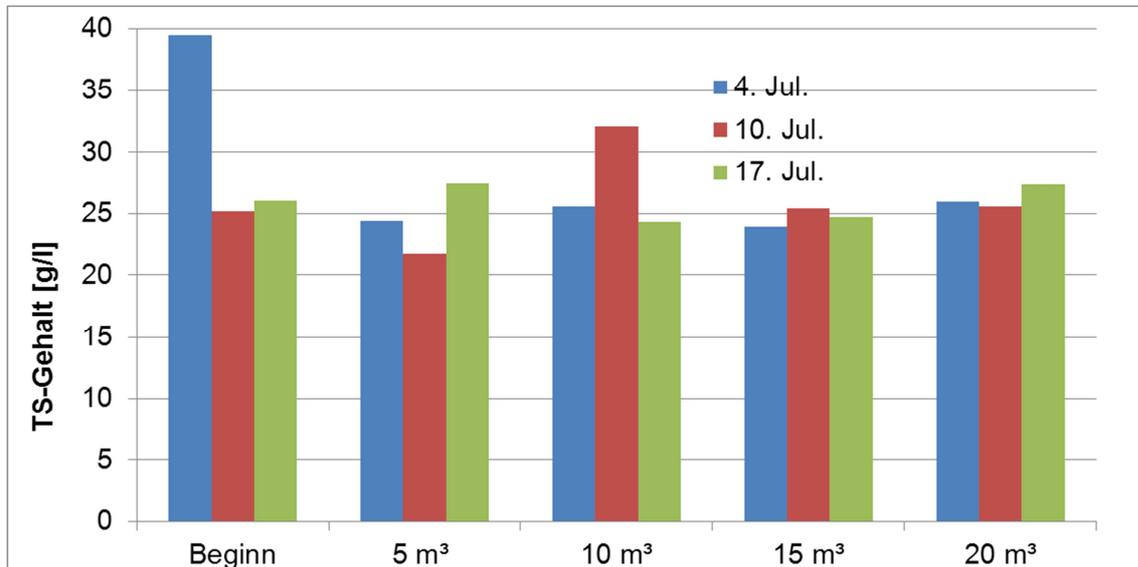


Abbildung 8: Feststoffgehalt im abgesetzten Schlamm (mit Thomomat und H₂SO₄)

Der Schlamm dickt sich auf Werte zwischen 24 g/l und 27 g/l ein. Eine wesentliche Veränderung zu den vorigen Ergebnissen ist nicht erkennbar.

Die Analyse des Trübwassers ergab die folgende Abbildung 9, die getrennt nach Parameter für die verschiedenen Phasen sind.

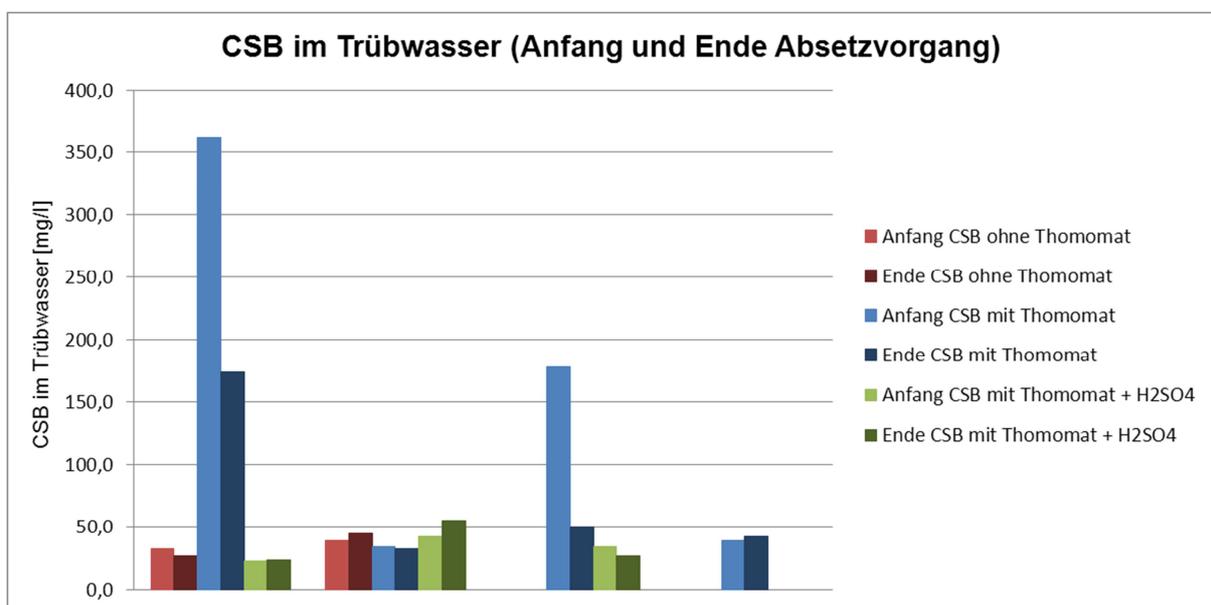
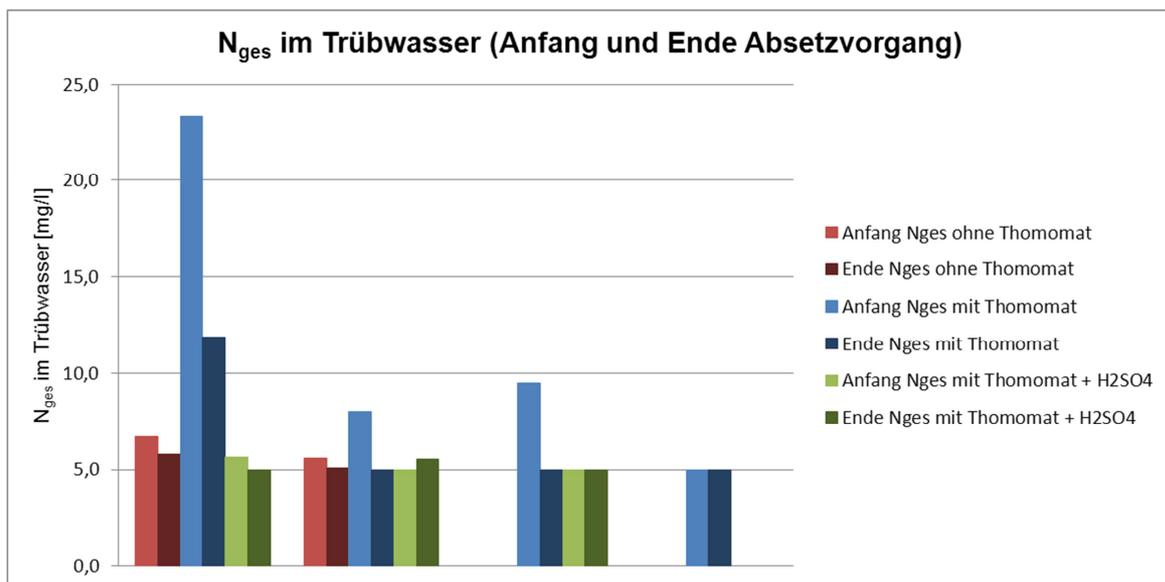
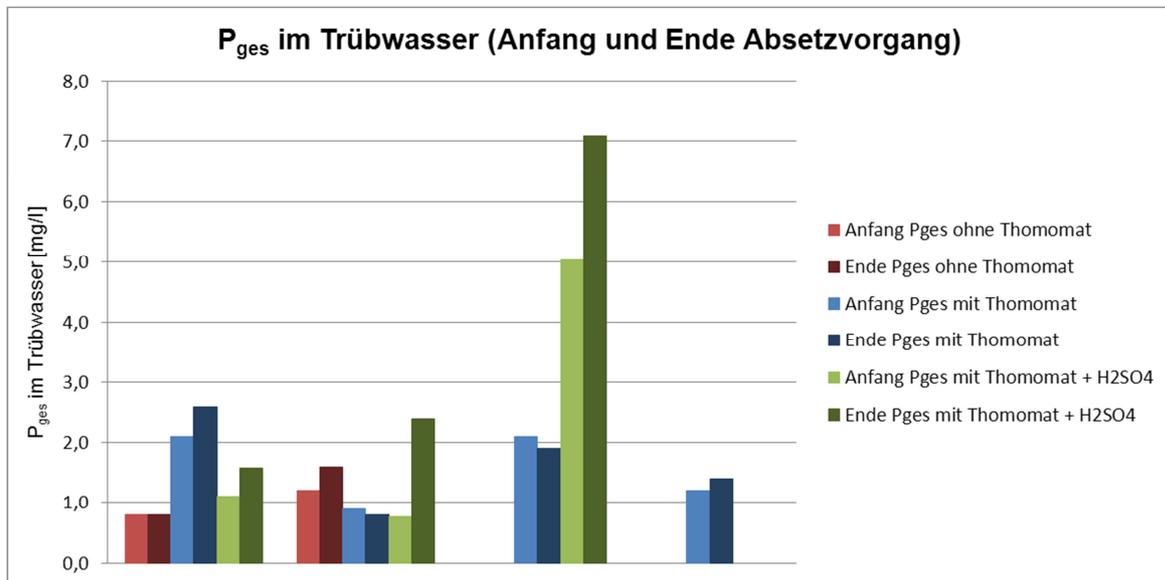


Abbildung 9: CSB Konzentrationen im Trübwasser

Für den Parameter CSB ergibt sich kein signifikanter Einfluss des Thomomaten. Die Schwankungen der Messwerte werden durch die Probenahme und Schwimmschlamm stärker beeinflusst als durch den Thomomat.



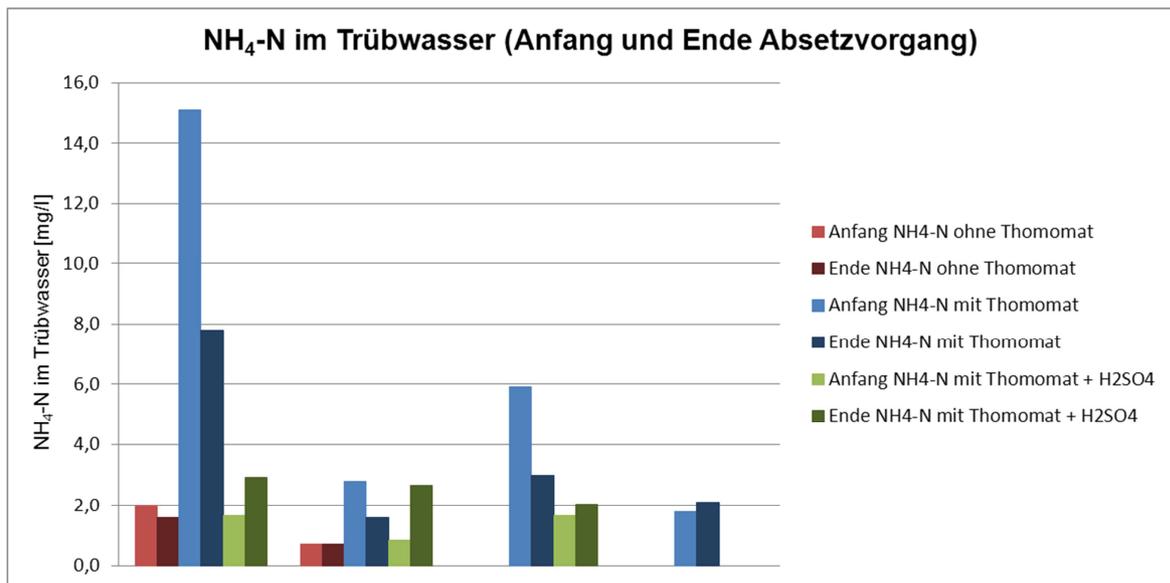


Abbildung 10: Konzentrationen für Pges, Nges und NH₄-N im Trübwasser

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Parameter Pges, Nges und NH₄-N. Ein ursächlicher Zusammenhang von veränderten Messwerten auf den Einsatz des Thomomaten kann nicht nachgewiesen werden. Die Eigenschaften des Trübwassers und damit die Rückbelastung auf die Kläranlage verändern sich nicht.

5 Fazit

Der Thomomat kann einfach installiert und betrieben werden. Während der Testphase gab es keine Probleme mit der Technik des Gerätes. Die Bedienung ist einfach und leicht verständlich. Wünschenswert wäre für zukünftige Anwendungen ein periodischer Dauerbetriebsmodus, bei dem Startzeitpunkt und Dauer des Betriebs vorgegeben werden können.

Durch den Einsatz des Thomomaten konnte keine eindeutige Verbesserung der Absetzbarkeit nachgewiesen werden. Zwar wird die Feststoffkonzentration im Trübwasser (1m Tiefe) etwas geringer, aber der Eindickvorgang wird dadurch nicht verbessert. Im Schlamm sind keine höheren Konzentrationen nachweisbar. Auch die Zugabe von Schwefelsäure in die Lanzenspitze führt nicht zu einer wesentlichen Veränderung. Die Schwankungen in der Absetzbarkeit im Versuchszeitraum sind dabei allerdings sehr hoch. Da die Versuche nicht parallel mit demselben Schlamm durchgeführt werden konnten besteht die Unsicherheit, dass Schwankungen im Schlamminde (ISV) sich auf die Ergebnisse auswirken. Während des Hauptversuchszeitraums hat sich der ISV nicht

wesentlich, aber hin zu einer besseren Absetzbarkeit verändert. Die Versuchsergebnisse sollten dadurch positiv beeinflusst werden.

Die Ergebnisse für die Feststoffgehalte in Trübwasser und abgesetztem Schlamm liegen im für statische Schlammeindicker üblichen Schwankungsbereich. Signifikante Veränderungen, wie sie z.B. durch maschinelle Eindickung erreicht werden können, konnten nicht festgestellt werden.

Stuttgart im Dezember 2013

Dipl.- Ing. Peter Maurer

Prof. Dr. Heidrun Steinmetz