

Titel

Einsatz von Ozon zur Verbesserung der Eigenschaften von Belebtschlämmen in aeroben Stufen biologischer Abwasserreinigungsanlagen

S. Bierbaum

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Abstract	4
3	Einleitung	5
4	Versuchsdurchführung	7
5	Variation von Ozonisierungszeit und Ozon-Konzentration	9
5.1	Eingesetzte Proben und Ozondosen.....	9
5.2	Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm	10
5.2.1	Absetzverhalten	10
5.2.2	Schlammindex	11
5.2.3	Schlammaktivität.....	13
5.3	Ergebnisse der Ozonisierung von Rückschlamm	14
5.3.1	Absetzverhalten	14
5.3.2	Filtrierbarkeit	15
5.3.3	Schlammindex	16
5.3.4	Schlammaktivität.....	18
5.4	Fazit	18
6	Variation der Ozon-Konzentration	20
6.1	Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm (Ozonisierung vor biol. Abbau)	20
6.1.1	Eingesetzte Proben und Ozondosen.....	20
6.1.2	Schlammeigenschaften	21
6.1.3	Bildanalyse.....	23
6.1.4	Kjeldahl-Stickstoff	25
6.1.5	Schlammaktivität.....	26
6.2	Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm (Ozonisierung nach biol. Abbau)	27
6.2.1	Eingesetzte Proben und Ozondosen.....	27
6.2.2	Schlammeigenschaften	28
6.2.3	Bildanalyse.....	30
6.2.4	Stickstoffparameter.....	32
6.2.5	Schlammaktivität.....	35

6.3	Ergebnisse der Ozonisierung von Rückschlamm	37
6.3.1	Eingesetzte Proben und Ozondosen.....	37
6.3.2	Schlammeigenschaften	38
6.3.3	Filtrierbarkeit	41
6.3.4	Bildanalyse.....	42
6.3.5	Stickstoffparameter	44
6.3.6	Schlammaktivität.....	48
7	Fazit	51
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	54
	Glossar	56
	Literaturverzeichnis	57

1 Zusammenfassung

Ziel	Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Absetzeigenschaften von Belebtschlämmen aus der Papierindustrie durch Ozonbehandlung zur sicheren Vermeidung von Schlammproblemen. Die dazu erforderlichen Ozonmengen und der am besten geeignete Dosierort für die Ozonbehandlung in der Abwasserreinigungsanlage von Papierfabriken sowie die Art des Ozoneintrags sollten ermittelt werden.
Durchführung	Es wurden Laborversuche mit Schlamm-Proben aus 3 Papierfabriken durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Dosierorte, Ozonisierungszeiten und Ozondosen untersucht.
Erfolg	Die Ozonbehandlung kann bei bestehenden Schlammproblemen deutliche Verbesserungen bewirken. Auch bei Schlamm, der keine großen Probleme aufweist, kann Ozon die Eigenschaften verbessern. Die Abbauleistung des eingesetzten Schlammes wurde in den Laborversuchen durch Ozon nicht beeinträchtigt.
Dosierort und Ozondosis	Die optimalen Stellen für eine Ozonbehandlung zur ISV-Reduzierung unterscheiden sich von Werk zu Werk. Die Ozon-Dosierung in den Belebt- bzw. in den Rückschlamm ist also individuell zu untersuchen. Oft führten zunehmende Ozoneinträge zu größeren Effekten. Die besten Ergebnisse konnten meist mit Ozondosen von 7 bis 10 bzw. 15 g O ₃ /TS Schlamm erreicht werden.
Grenzwerte	Grenzwertüberschreitungen als Folge von Schlammmentartungen und Schlammabtrieb können durch Ozonbehandlung des Schlammes vermieden werden.
Kosten	Die Kosten für eine Grenzwertüberschreitung aufgrund von Schlammabtrieb lassen sich durch eine Ozonbehandlung des Schlammes einsparen. Die Kosten für eine derartige Behandlung liegen niedriger als die einer Grenzwertüberschreitung und im ähnlichen Bereich von üblichen Notmaßnahmen (Talkum-, Peroxid- oder Fe ³⁺ bzw. Al ³⁺ -Dosierung).
Danksagung	<p>Das Forschungsvorhaben IGF14695 N der Forschungsvereinigung PTS wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.</p> <p>Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.</p>

2 Abstract

Project objectives	The objective of this project was to reliably avoid sludge problems by using ozone to improve the settling properties of activated sludge in the pulp and paper industry. The optimum ozone dosage, the best dosage point and the most effective method of ozone dosing shall be identified in order to improve sludge properties and avoid sludge problems.
Performance	Laboratory trials have been performed with sludge samples taken from 3 paper mills. Thereby, several dosage points, treatment times and ozone dosages were studied.
Success	If sludge problems exist, ozone treatment can improve the sludge properties significantly. Ozone can also improve the properties of sludge which causes no major problems. Ozonisation did not impair the efficiency of degradation.
Dosage point and ozone dosage	The optimum dosage point for ozone treatment aiming to reduce the sludge volume index differs from mill to mill. Individual studies are necessary on ozone dosing into activated sludge and on dosing into recirculated sludge. Increased ozone dosages often led to greater effects. In most cases, the best results were achieved with dosages of 7 to 10 or 15 g O ₃ /SS sludge.
Limits	Noncompliance with limit values due to sludge degeneration and sludge overflow can be avoided by treating the sludge with ozone.
Costs	Costs for exceeding the limit values due to sludge overflow can be saved by ozone treatment of the sludge. The costs of ozone treatment are lower than those of noncompliance, and are in the same range as usual emergency measures (dosage of talcum, peroxide, Fe ³⁺ and Al ³⁺ , respectively).
Acknowledgement	<p>The IGF14695 N research project of the research association PTS was funded within the programme of promoting “pre-competitive joint research (IGF)” by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi and carried out under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warm gratitude for this support.</p> <p>We would also like to express our thanks to the involved companies for providing proper samples as well as for supporting the project performance.</p>

3 Einleitung

Ausgangssituation

Die aerobe Abwasserreinigung auf Basis des Belebungsverfahrens ist in der Papierindustrie das am häufigsten angewandte Reinigungsverfahren. In den letzten Jahren wurden zunehmend Probleme durch **verschlechtertes Absetzverhalten von Belebtschlämmen** verzeichnet.

Eine im Auftrag vom VDP für das Jahr 2004 durchgeführte Umfrage „Wasser und Abfälle“ zeigt, dass Schlammmentartungsphänomene „Schwimm- und Blähschlamm, Schaumbildung und Schleim“ zu den häufig auftretenden Betriebsstörungen in biologischen Abwasserreinigungsanlagen gehören [1].

Trotz vieler Forschungsaktivitäten hierzu konnten bislang keine effektiven Maßnahmen für industrielle Abwässer und damit auch für Papierfabriksabwässer gefunden werden. Die Gründe hierfür sind die hohe Komplexität des Zusammenspiels abwasser- und betriebsspezifischer Parameter. Zu den allgemein wirksameren Bekämpfungsmaßnahmen gehören oxidative Behandlungsverfahren, z. B. mittels Wasserstoffperoxid oder Ozon.

Definition Schlamm- ntartung

Von entartetem Belebtschlamm spricht man beim Auftreten von Schwamm-
schlamm, Blähschlamm, feindispersen Schlamm/pin-flocs und Schaum. Die Ursache ist meistens ein massenhaftes Wachstum fadenförmiger Mikroorganismen. [2], [3]

Fadenbakterien

In Belebtschlämmen industrieller Abwasserreinigungsanlagen treten gleichzeitig mehrere Typen fadenförmiger Mikroorganismen in großer Menge auf. Da die Zusammenhänge mit dem Phänomen der Schlammmentartung wesentlich komplexer sind als in Anlagen mit kommunalem Abwasser, ist es schwierig, erfolgreiche Vermeidungs- und/oder Bekämpfungsstrategien zu entwickeln. [4]

In den letzten Jahren haben sich die Selektionsmechanismen in den Belebtschlamm-biozöten verändert. Es wird eine Verschiebung von früher dominanten Hochlast-Fadenbakterien hin zu Niedriglastbakterien (low F/M-Bakterien) beobachtet. Insbesondere der verstärkte Einsatz von Belebungsanlagen als 2. Reinigungsstufe mit schwacher Belastung wird als Ursache beschrieben. [2], [3].

Mit Ausnahme des Fadenbakteriums „*Microthrix parvicella*“ spielen die sog. Niedriglastbakterien [5] eine dominante Rolle bei Schlammproblemen in Abwasserreinigungsanlagen von Papierfabriken. Die zu den jeweiligen Morphotypen „*Nostocoida limicola*, Typ 0041/0675“ sowie „Typ 0092“ und „Typ 1851“ gehörenden Mikroorganismen, die in Belebtschlämmen der Papierindustrie häufig anzutreffen sind, zeigen eine hohe Diversität bezüglich ihrer Zugehörigkeit zu unterschiedlichen Bakteriengruppen. Zur Bekämpfung von Hochlastbakterien bewährte Maßnahmen wie die Anwendung von Selektoren oder eine angepasste Nährstoffversorgung sind bei Betriebsproblemen durch Niedriglastbakterien in der Regel wirkungslos, da die unterschiedlichen biologischen Charakteristika eine effektive Bekämpfung erheblich erschweren.

Maßnahmen zur Bekämpfung von Schlammabsetzproblemen

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der auftretenden Schlammabsetzprobleme sind die Maßnahmen zur Vermeidung und Bekämpfung an das jeweilige Problem anzupassen. Einen Überblick geeigneter Vermeidungsmaßnahmen gibt [5]. Neben der Änderung der Abwasserzusammensetzung und der Veränderung von Betriebs- und Verfahrensweise werden folgende Verfahren in Abwasserreinigungsanlagen von Papierfabriken eingesetzt:

- Beschwerung der Belebtschlammflocke durch den Zusatz von Eisensalzen, Aluminiumsalzen, Kalk oder organischen Zusatzstoffen (z. B. Polyelektrolyte) [5]
- Schädigung der fadenförmigen Mikroorganismen durch H₂O₂ [2], [5], [6] oder Kalk [5]
- Zugabe von mutierten Bakterien [7]. Positive Wirkungen dieser Produkte in Anlagen der Papierindustrie konnten in eigenen Untersuchungen nicht gefunden werden. [8]

Bekämpfung von Schwimmschlamm in der Papierindustrie

Für die in der Papierindustrie relevanten Schwimmschlamm verursachenden Organismen stehen nur sehr wenige Bekämpfungsmaßnahmen zur Verfügung. Die wichtigste Maßnahme ist die Entfernung der Schwimmschlammfraktion aus dem System. Für die in der Papierindustrie bei Schwimmschlammförmung dominant auftretenden Fadenbakterien kommen neben Substratgradienten und der Zugabe von Eisensalzen insbesondere Oxidationsverfahren zur Bekämpfung in Frage. Von Bedeutung sind hierbei hauptsächlich Wasserstoffperoxid und Ozon.

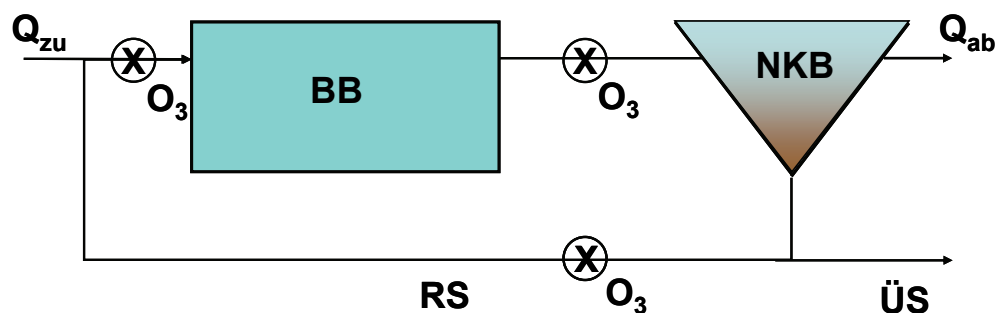
Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Absetzeigenschaften von Belebtschlämmen aus der Papierindustrie durch Ozonbehandlung zur sicheren Vermeidung von Schlammproblemen. Die dazu erforderlichen Ozonmengen und der am besten geeignete Dosierort für die Ozonbehandlung in der Abwasserreinigungsanlage von Papierfabriken sowie die Art des Ozoneintrags sollten ermittelt werden.

4 Versuchsdurchführung

Allgemeines Es wurden Ozonbatchversuche durchgeführt und Batchversuche in Anlehnung an den Zahn-Wellens-Test zur Abbildung der aeroben biologischen Stufe.

Probenahmestellen An den mit (X) markierten Stellen einer ARA kann Ozon zur Verbesserung der Schlammeneigenschaften eingesetzt werden. Um die Wirkungen einer Ozonisierung im Zu- und Ablauf des Belebungsbeckens (BB) sowie im Rückschlamm (RS) zu untersuchen, wurden an diesen Stellen auch die Schlamm-Proben zur Ozonisierung entnommen.



Arbeitspaket I Für ein Werk (A) wurden unterschiedliche Arten des Ozoneintrags untersucht. Diese sind:

- Begasung mit hoher O₃-Konzentration und kurzer Zeit und
- Begasung mit geringer O₃-Konzentration und langer Zeit.

Es wurde der Ozoneinsatz im Zulauf zur Belebung und im Rückschlamm untersucht.

Dazu wurden die aeroben Batchversuche durchgeführt. Neben dem nicht zu ozonisierenden Referenzansatz wurden 5 unterschiedlich hohe Gesamt-Ozonmengen zwischen 1 und 10 g O₃/kg TS · d mit je 2 unterschiedlichen Begasungszeiten täglich in die Schlämme eingetragen. Während der gesamten Versuchszeit wurden die Ansätze zum biologischen Abbau belüftet und gerührt. Arbeitstäglich wurden Proben zur Analytik entnommen. Nach Ende der Versuchslaufzeit wurde die Schlammaktivität untersucht, um auszuschließen, dass der Schlamm durch die Behandlung mit Ozon zerstört wurde.

Arbeitspaket II Dieser Abschnitt diente der Bestimmung der optimalen Ozondosis und Dosierstelle. Es wurden die im Arbeitspaket I beschriebenen Versuche für die Werke B und C durchgeführt. Dabei wurde für Werk B neben dem Rückschlamm der Belebtschlamm sowohl im Zulauf als auch im Ablauf der Belebung mit Ozon behandelt. Für Werk C wurde der Belebtschlamm im Ablauf der Belebung und der Rückschlamm behandelt. Die Versuche wurden mit konstanter Begasungszeit durchgeführt. Ozonkonzentrationen und Begasungszeiten wurden anhand der Ergebnisse des vorhergehenden Arbeitspakets gewählt.

Ozonisierung von Belebtschlamm vor biol. Abbau

In den Ansätzen wurde ein TS von ca. 3 g/l eingestellt. Arbeitstäglich vor der Ozonisierung fand für jeden Ansatz die Probenahme zur Bewertung der Schlammeigenschaften statt. Das entnommene Probenvolumen wurde durch frischen Schlamm vermischt mit Rohabwasser (Zulauf Belebung) ersetzt. Nach Behandlung mit der geplanten Ozondosis und Begasungszeit wurden die Ansätze bis zur nächsten Probenahme belüftet.

Ozonisierung von Belebtschlamm nach biol. Abbau

Der TS in den Ansätzen betrug während dieser Versuchsreihe 3 bis 4,5 g/l. Nach Zugabe des Schlamm-Rohabwasser-Gemisches wurden die Ansätze für 24 Stunden zum biologischen Abbau belüftet. Nach biologischem Abbau erfolgte die Ozonisierung der Ansätze und anschließend die Probenahme zur Analytik.

Ozonisierung von Rückschlamm

In allen Ansätzen wurde ein TS von 3 bis 4 g/l eingestellt. Arbeitstäglich vor der Ozonisierung fand für jeden Ansatz die Probenahme zur Bewertung der Schlammeigenschaften statt. Frischer Rückschlamm wurde mit der geplanten Ozondosis und Begasungszeit behandelt und anschließend mit Rohabwasser vermischt. Diese Mischung wurde den Ansätzen zugeführt. Die Ansätze wurden bis zur nächsten Probenahme belüftet.

Versuchsplanung zur Variation von Ozonisierungszeit und Ozonkonzentration (AP I)

Es wurden je Probenahmestelle vier verschieden hohe Ozoneinträge und jeweils zwei verschieden lange Ozonisierungszeiten angestrebt. Damit ergibt sich für jede Probenahmestelle neben dem Referenzansatz der folgende Versuchsplan:

O₃-Dosis [g O₃/kg TS]	1	4	7	10
Ozonisierungszeit [min]	10	60		

Versuchsplanung zur Variation der Ozonkonzentration (AP II)

Es wurden je Probenahmestelle für beide Werke neben dem Referenzansatz die folgenden Ozoneinträge bei einer Ozonisierungszeit von 30 Minuten angestrebt:

- 1 g O₃/kg TS
 - 4 g O₃/kg TS
 - 7 g O₃/kg TS
 - 10 g O₃/kg TS
 - 15 g O₃/kg TS
-

Schlammaktivität

Bei jeder Versuchsreihe wurde nach Ende der Versuchslaufzeit die Ozonisierung beendet, die Ansätze aber weiterhin belüftet und gerührt. Um die Schlammaktivität zu untersuchen, wurden alle Ansätze täglich mit Glucose versetzt, entsprechend einem zugeführten CSB von 500 mg/l. Das Abbauverhalten wurde durch regelmäßige Probenahmen über drei Tage untersucht.

Untersuchungen/Analytik

In allen entnommenen Proben wurden Schlammparameter wie Absetzverhalten und -geschwindigkeit, Eindickbarkeit und Entwässerbarkeit untersucht sowie die Einflüsse auf diese Parameter durch Mikroskopie und Bildanalyse. Um die Abbauleistung - insbesondere Nitrifikation und Denitrifikation - der Schlämme zu beurteilen, diente die Messung von Stickstoffparametern. Zusätzlich wurde Wasserparameter gemessen, um deren Einflüsse auf die Schlammeigenschaften und die Veränderung durch Ozonisierung zu erkennen.

5 Variation von Ozonisierungszeit und Ozon-Konzentration

5.1 Eingesetzte Proben und Ozondosen

Schlamm- charakteristika

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes A wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

Reihe	TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
	[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/g TS]	[mg/g oTS]	[mg/g oTS]	[mS/cm]
	S	S	S	F	S	S	F	F	F	F	S	S	S
1	5,4	3,3	62	161	7,3	166	1,4	0,1	1,7	80	129	114	3,2
	4,8	2,7	56	203	7,5	92	1,2	1,2	3,5	-	-	-	2,9
	7,9	4,7	59	110	7,4	189	0,6	4,6	6,7	-	-	-	2,3
2	6,5	4,3	66	89	7,5	165	1,3	0,1	55,6	141	214	201	2,3
	7,0	4,8	69	102	7,1	202	1,7	0,1	2,0	-	-	-	1,9
	6,3	4,4	69	140	7,5	325	1,6	0,1	6,9	-	-	-	2,7
3	7,0	5,2	75	234	7,3	-125	2,4	0,3	5,9	107	146	147	2,7
	8,3	-	-	136	7,3	-71	4,1	0,3	2,7	-	-	-	3,3
4	4,9	3,7	75	248	7,4	-	14,4	0,3	-	68	91	83	-
	3,8	-	-	147	7,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Dabei wurden die mit „S“ bezeichneten Werte im Schlamm gemessen und die mit „F“ bezeichneten im Schlammfiltrat.

TKN

Anhand der TKN-Werte wurde untersucht, ob sich der eingesetzte Schlamm während der Lagerungszeit zersetzt hat. Dazu wurden die TKN-Werte direkt beim Probeneingang bestimmt und jeweils am letzten Einsatztag. Diese Werte sind in obiger Tabelle mit TKN_A (Anfang, Probeneingang) und TKN_E (Ende, letzter Einsatztag) bezeichnet. Hier hat sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 11 % reduziert. Es fand folglich keine übermäßige Zehrung statt.

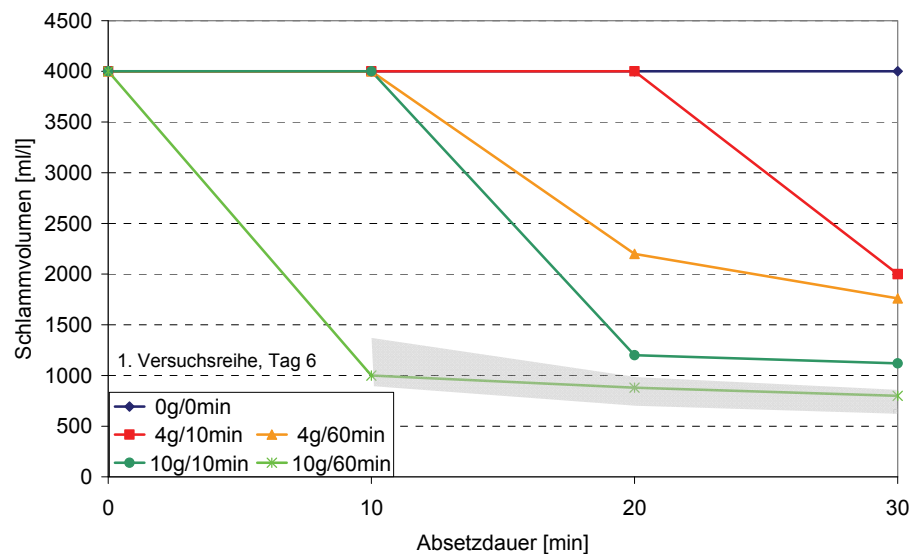
eingetragene O₃- Dosen

Bezeichnung	Tatsächliche O ₃ -Dosis [g O ₃ /kg TS]	
	Reihe 1 + 2 Ozonisierung von Belebtschlamm	Reihe 3 + 4 Ozonisierung von Rückschlamm
0g/0min, Referenz	0 (nicht ozonisiert)	0 (nicht ozonisiert)
1g/10min	1,3	1,1
1g/60min	1,4	1,4
4g/10min	3,6	3,9
4g/60min	3,9	4,5
7g/10min	5,4	5,8
7g/60min	6,7	7,0
10g/10min	7,9	10,5
10g/60min	10,0	9,8

5.2 Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm

5.2.1 Absetzverhalten

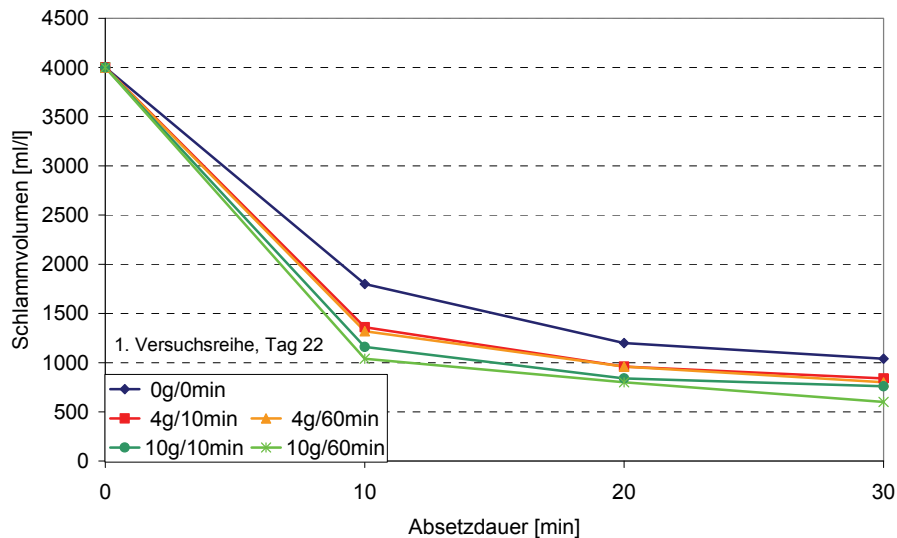
Versuchsanfang Der unbehandelte Schlamm wies mit 4000 ml/l während der ersten Versuchsreihe einen relativ hohen Schlammvolumenanteil auf und setzte sich nicht ab. Die Ozonbehandlung führte zur Verringerung des Schlammvolumenanteils. Sowohl eine höhere Ozondosis als auch eine längere Ozonisierung beschleunigten dabei den Absetzvorgang.



Je mehr Ozon eingetragen wurde, desto schneller wurde der graue markierte Bereich erreicht. Dieser beschreibt den Bereich, in dem alle Kurven der ozonierten Ansätze zum Versuchsende lagen. Dies zeigt die folgende Abbildung vom letzten Versuchstag.

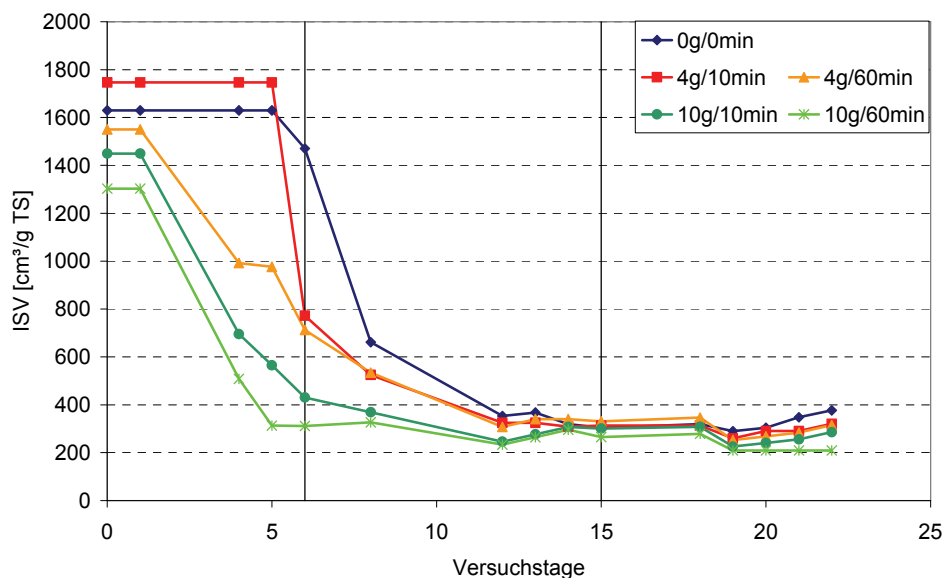
Versuchsende

Hier zeigt die Referenz ebenfalls ein verbessertes Absetzverhalten, da der Schlamm zum Zeitpunkt der Probenahme im Werk mit Peroxid versetzt worden war. Der Absetzvorgang konnte dennoch durch Ozon beschleunigt werden.



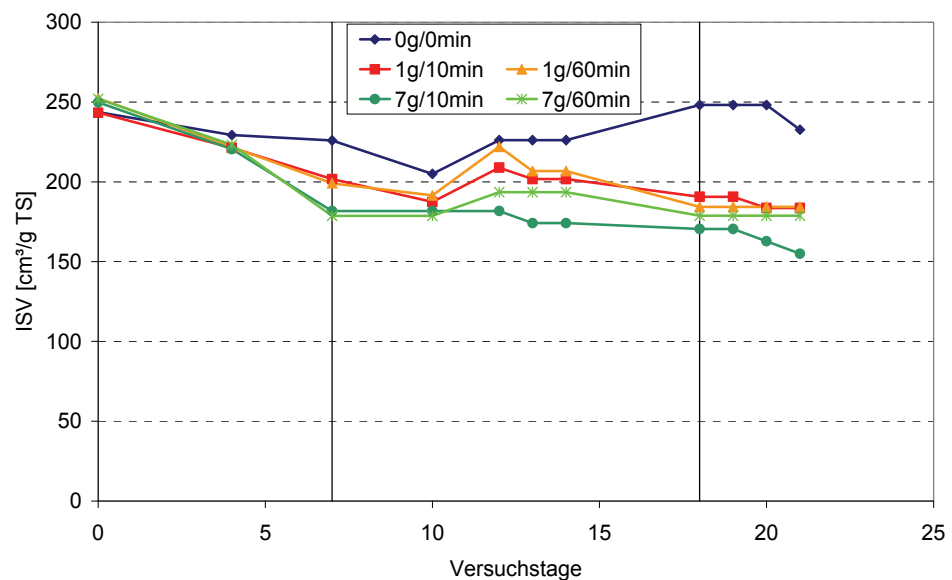
5.2.2 Schlammindex

1. Versuchsreihe Zu Beginn der Versuchsreihe lagen die Schlammindizes (ISV) zwischen 1300 und 1750 cm³/g TS und damit relativ hoch. Schlämme mit ISV größer als 150 cm³/g TS gelten als Blähschlamm. Die Anfangswerte lagen hier deutlich darüber. Durch Ozonbehandlung wurden die Indizes aller Ansätze deutlich reduziert auf 200 bis 350 cm³/g TS. Bereits nach einmaliger Behandlung wurden deutliche Verbesserungen erzielt, weitere Ozonisierung führte zu weiterer Verbesserung. Dabei zeigten sich sowohl höhere Ozondosen als auch eine längere Ozonisierung als vorteilhaft. Der Einfluss der Ozonisierungsdauer verschwindet mit zunehmender Versuchslaufzeit.



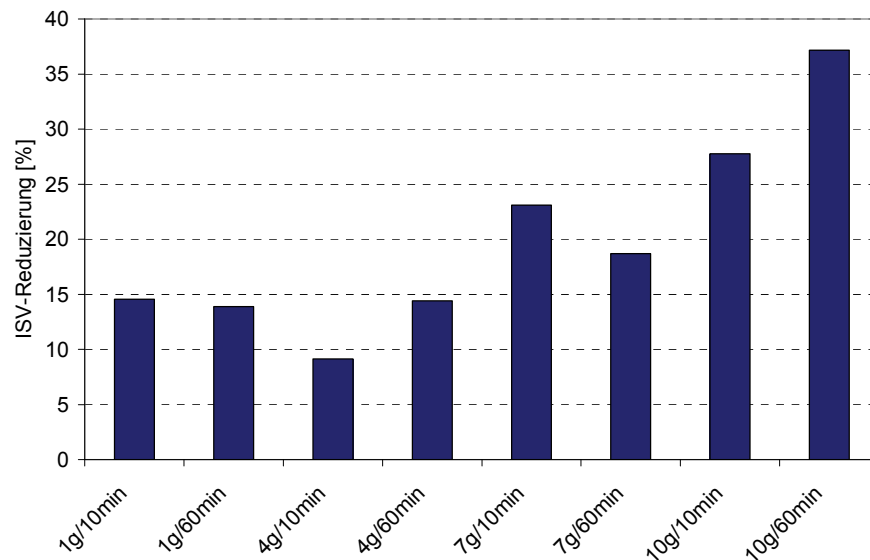
2. Versuchsreihe Zu Beginn der 2. Versuchsreihe lagen die Indizes aller Ansätze ungefähr bei 250 cm³/g TS und damit deutlich niedriger als bei der 1. Versuchsreihe. Die eingesetzten Schlämme sind aber ebenfalls als Blähschlämme zu bezeichnen. Die Indizes der Referenz lagen während der gesamten Versuchsreihe zwischen 200 und 250 cm³/g TS. Bereits nach einmaliger Behandlung wurde der Schlamminde-
dex reduziert. Weitere Ozonisierung führte zu zunehmender Verbesserung. Durch Ozonbehandlung wurden die Indizes aller Ansätze auf Werte zwischen 150 und 200 cm³/g TS deutlich reduziert. Ab dem 13. Versuchstag blieben die Schlammvolumina der einzelnen Ansätze weitgehend auf dem erreichten Niveau.

Beim Eintrag von 7 g O₃/g TS zeigte sich die kürzere Ozonisierungsdauer von 10 Minuten nahezu während der gesamten Versuchslaufzeit als vorteilhafter gegenüber 60 Minuten. Beim Eintrag von 1 g O₃/g TS zeigt sich kein Einfluss der Ozonisierungsdauer.



Reduzierungen des Schlammindexes

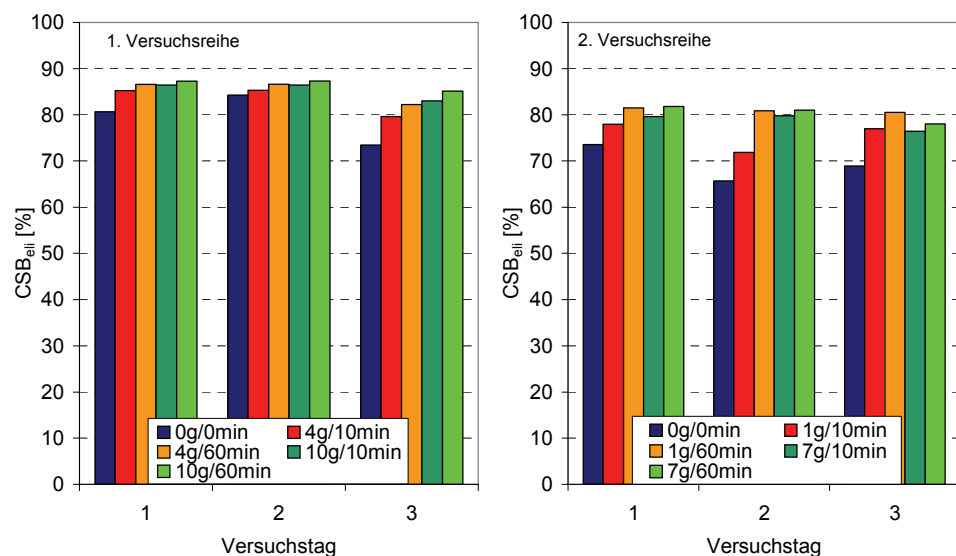
Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Reduzierungen der Schlammindizes bezogen auf die Referenz für die Ansätze aus den Versuchsreihen 1 und 2. Generell zeigen sich stärkere Reduzierungen durch höhere Ozon-einträge. Ein Einfluss der Ozonisierungsdauer zeigt sich nur bei den Ozondosen 4 g O₃/kg TS und 10 g O₃/kg TS. Ein allgemein ableitbarer Einfluss der Ozonisierungsdauer zeigt sich nicht.



5.2.3 Schlammaktivität

CSB-Elimination

In der folgenden Abbildung sind die CSB-Eliminationen jeweils innerhalb von 24 Stunden nach Glucose-Zugabe für die 1. und 2. Versuchsreihe dargestellt. Die CSB-Elimination betrug in der 1. Reihe fast immer mehr als 80 %, in der 2. Reihe immer mehr als 65 %. Durch die hier durchgeführte Ozonbehandlung hat keine Beeinträchtigung der Abbauleistung der Schlämme stattgefunden. In den ozonisierten Ansätzen fand sogar eine höhere CSB-Elimination statt als in der Referenz. Dies zeigt sich besonders deutlich in der 2. Versuchsreihe.

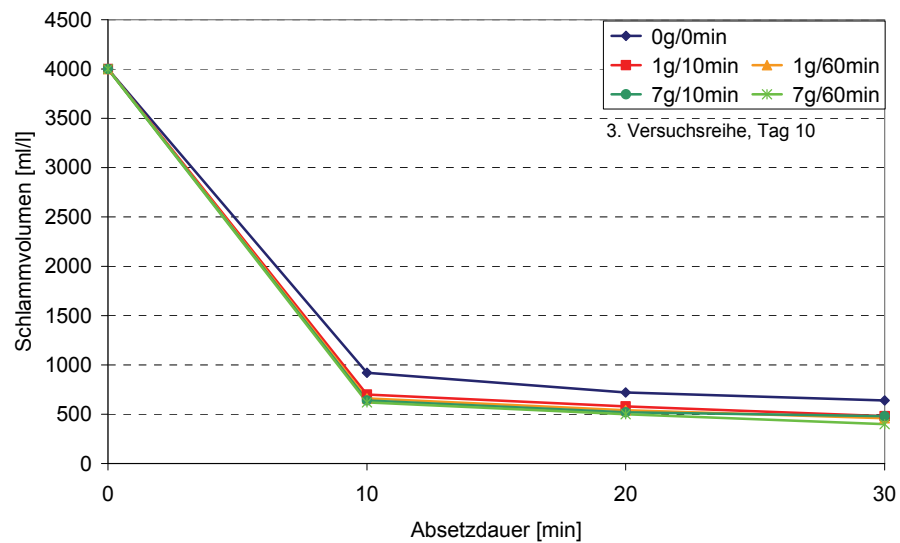


5.3 Ergebnisse der Ozonisierung von Rückschlamm

5.3.1 Absetzverhalten

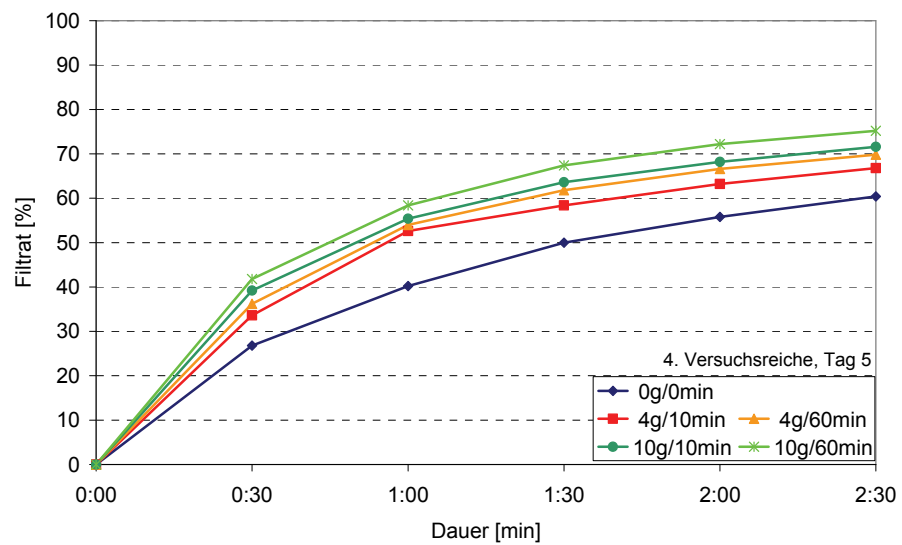
3. + 4. Versuchsreihe

In diesen Versuchsreihen hat sich die Referenz vergleichsweise schnell abgesetzt und wies, wie beispielhaft im folgenden Bild dargestellt, nach 30minütiger Absetzzeit einen Schlammvolumenanteil von 640 ml/l auf. In beiden Versuchsreihen konnte die Ozonbehandlung den Absetzvorgang etwas beschleunigen, so dass in den ozonisierten Ansätzen das gleiche Schlammvolumen bereits nach 10 Minuten erreicht wurde. Weder die Höhe noch die Dauer des Ozoneintrags haben hier einen wesentlichen Einfluss.



5.3.2 Filtrierbarkeit

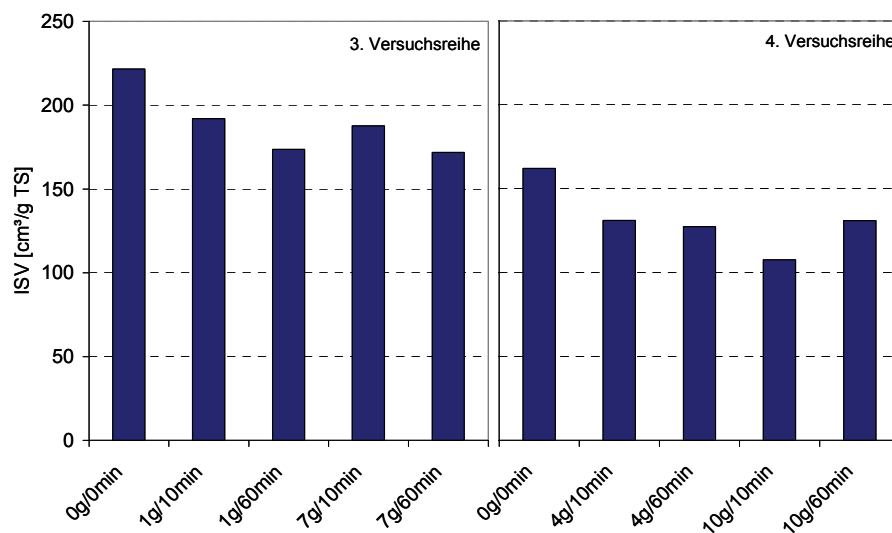
Beschleunigung Stellt man den Anteil der Filtratmenge am eingesetzten Volumen in Abhängigkeit von der Dauer des Filtrationsversuchs dar, zeigt sich, dass sich die Schlämme mit zunehmendem Ozoneintrag und zunehmender Ozonisierungsdauer schneller filtrieren ließen. Die Filtratmenge des unbehandelten Schlammes betrug in diesem Beispiel nach 2:30 Minuten 60 % der eingesetzten Schlammmenge. Dieser Wert wurde mit den ozonisierten Schlämmen bereits nach ca. 1:00 bis 1:30 Minuten erreicht, je nach Ozondosis und Ozonisierungszeit.



5.3.3 Schlammindex

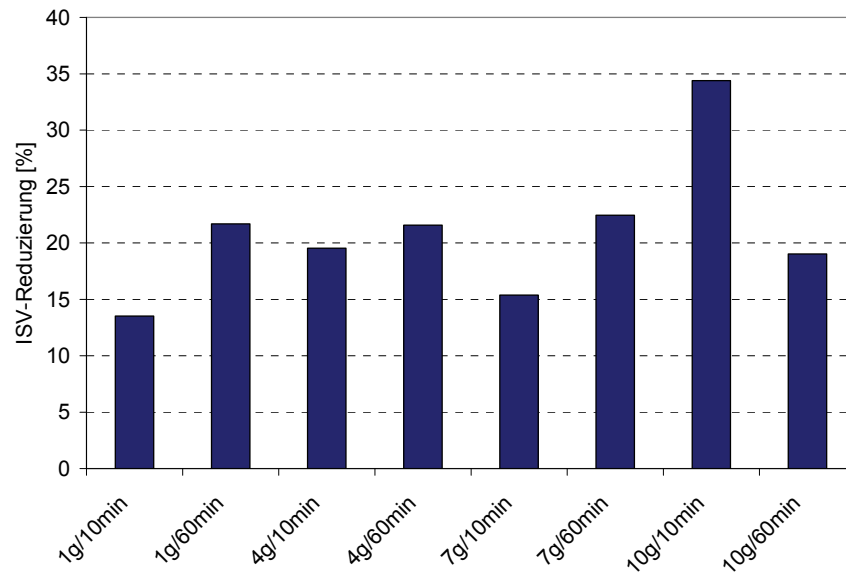
Schlammindex Bei der Ozonisierung von Rückschlamm wurden die ozonisierten Schlämme nicht im Kreislauf geführt, d.h. die Schlämme wurden nicht mehrfach ozonisiert. Aus diesem Grund werden die Schlammindizes in der nachfolgenden Abbildung als Mittelwerte für die einzelnen Ansätze je Versuchsreihe dargestellt.

Der Schlammindex der unbehandelten Referenz lag während der 3. Versuchsreihe zwischen 200 und 250 cm³/g TS und damit auf dem gleichen Niveau der 2. Versuchsreihe. In der 4. Versuchsreihe lag der Index der Referenz mit 130 bis 200 cm³/g TS niedriger. Ozoneintrag reduzierte die Schlammindizes in allen Fällen deutlich, wobei keine eindeutigen Vorteile höherer Ozoneinträge oder längerer Begasungszeiten auftraten.



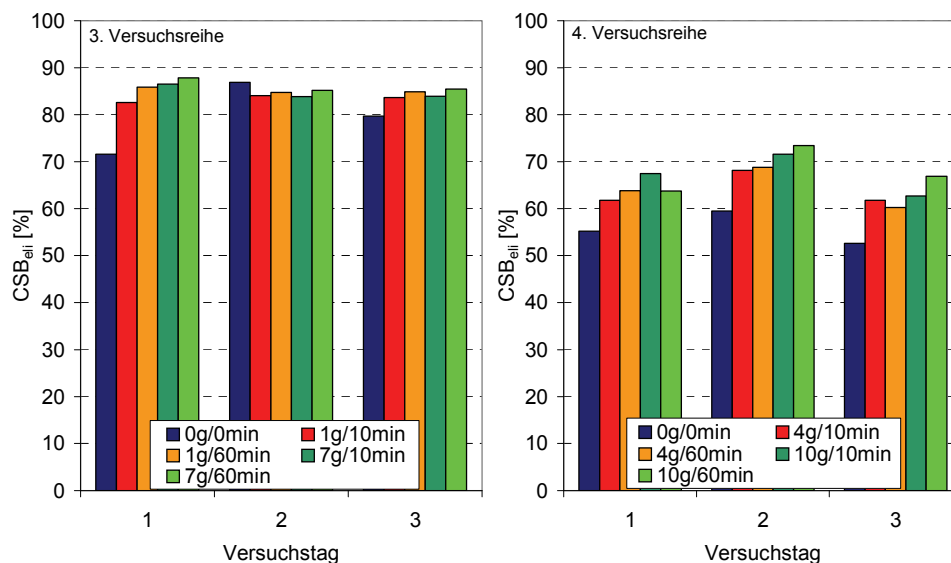
Reduzierung des Schlammindexes

Die durchschnittliche Reduzierung des ISV durch Ozon ist in der folgenden Abbildung dargestellt. In allen ozonisierten Ansätzen zeigte sich eine deutliche Verbesserung des ISV durch Ozon. Bereits mit geringen Ozondosen wurden Verbesserungen von 14 % und mehr erzielt. In vielen Fällen zeigte sich hier die längere Ozonisierung als vorteilhafter. Lediglich beim höchsten hier realisierten Ozoneintrag von 10 g O₃/kg TS erwies sich die kurze Ozonisierung als vorteilhafter.



5.3.4 Schlammaktivität

CSB-Elimination Die CSB-Eliminationen jeweils innerhalb von 24 Stunden nach Glucose-Zugabe lagen in den Ansätzen der 3. Versuchsreihe insgesamt höher als in denen der 4. Versuchsreihe. Durch die hier durchgeführte Ozonbehandlung wurde die Abbauleistung der Schlämme nicht beeinträchtigt. Wie bei der Ozonisierung von Belebtschlamm zeigt sich auch hier eine gesteigerte Aktivität in den ozonbehandelten Ansätzen.



5.4 Fazit

Erfolg

Die Ozonisierung sowohl von Belebtschlamm als auch von Rückschlamm erwies sich als sehr gut geeignet zur Verbesserung der Schlammigenschaften. Dabei wurden folgende Verbesserungen erzielt:

- Schnelleres Absetzen der Schlämme,
- Reduzierung von Schlammvolumenanteil und Schlammindex:
 - bis durchschnittlich 37 % mit 10 g O₃/kg TS bei 60 min Ozonisierung im Belebtschlamm und
 - bis durchschnittlich 34 % mit 10 g O₃/kg TS bei 10 min Ozonisierung im Rückschlamm
- Schnellere Filtrierbarkeit des ozonisierten Rückschlammes.

Ozondosis	<p>Bei der Ozonisierung von Belebtschlamm zeigten zunehmende Ozondosen in allen Fällen vorteilhafte Effekte.</p> <p>Bei der Ozonisierung von Rückschlamm führten zunehmende Ozondosen zur Beschleunigung der Filtrierbarkeit der behandelten Schlämme. Auf das Absetzverhalten sowie auf Schlammvolumenanteil und –index zeigten zunehmende Ozondosen keine oder nur geringe zusätzliche positiven Einflüsse.</p>
Ozonisierungsdauer	<p>Bei der Ozonisierung von Belebtschlamm zeigte die Ozonisierungsdauer von 60 Minuten gegenüber 10 Minuten Vorteile in einigen Fällen.</p> <p>Bei der Ozonisierung von Rückschlamm führte längere Ozonisierungsdauer zur Beschleunigung der Filtrierbarkeit der behandelten Schlämme. Auf das Absetzverhalten sowie auf Schlammvolumenanteil und –index zeigte die längere Ozonisierungsdauer keine oder nur geringe zusätzliche positiven Einflüsse.</p>
Dosierort	<p>Sowohl bei der Ozonisierung von Belebtschlamm als auch bei der Ozonisierung von Rückschlamm lag die Senkung der Schlammindizes im gleichen Bereich. Bei der Ozonisierung von Belebtschlamm lässt sich der Erfolg durch zunehmende Ozoneinträge weiter steigern. Bei geringen Ozoneinträgen bis 4 g O₃/kg TS zeigt sich daher die Ozonisierung von Rückschlamm wirkungsvoller, ab 7 g O₃/kg TS ist die Ozonisierung von Belebtschlamm wirkungsvoller. Es lässt sich kein pauschaler Vorteil für einen der beiden Dosierorte ableiten.</p>
Schlammaktivität	<p>Die Abbauleistung des eingesetzten Schlammes wurde in keinem Ansatz durch Ozon beeinträchtigt. Es wurden sogar höhere CSB-Eliminationen in den Ansätzen mit ozonisiertem Schlamm gemessen.</p>

6 Variation der Ozon-Konzentration

6.1 Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm (Ozonisierung vor biol. Abbau)

6.1.1 Eingesetzte Proben und Ozondosen

Schlamm- charakteristika Werk B

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes B wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	OFS	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[N/m]	[mg/l]	[mg/ g oTS]	[mg/ g oTS]	[mS/ cm]
S	S	S	F	S	S	S	F	S	S	S
7,5	-	-	750	6,7	296	39	17	260	272	2,5
14,0	13,3	95	882	6,0	316	42	53	70	57	2,3

TKN

Im Originalschlamm, der für diese Versuche eingesetzt wurde, hat sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 18 % reduziert. Folglich fand lediglich eine leichte Zehrung statt.

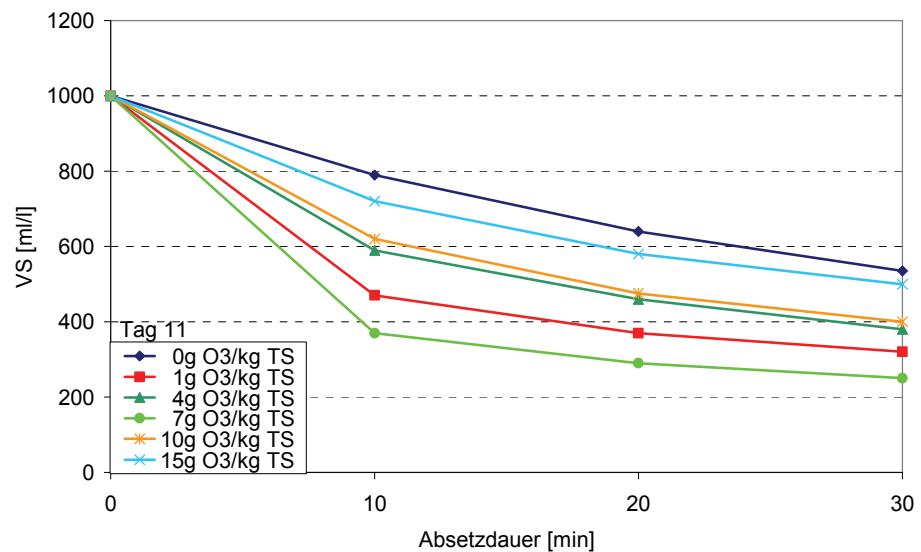
durchschnittlich eingetragene O₃- Dosen

In der nachfolgenden Tabelle sind die durchschnittlichen Ozondosen aufgeführt, die während der gesamten Versuchslaufzeiten durchschnittlich eingetragen wurden.

Bezeichnung	Tatsächliche O ₃ -Dosis [g O ₃ /kg TS]
0g, Referenz	0 (nicht ozonisiert)
1g	2,0
4g	5,1
7g	8,1
10g	10,6
15g	17,0

6.1.2 Schlammeigenschaften

Absetzverhalten Die ozonisierten Schlämme setzten sich schneller ab als der unbehandelte Schlamm. So wies der unbehandelte Schlamm nach 30 Minuten einen Schlammvolumenanteil von 535 ml/l auf. Die ozonisierten Schlämme erreichten diesen Bereich bereits nach 10 bzw. 20 Minuten. Dabei beschleunigte die Ozondosis von 7 g O₃/kg TS den Absetzvorgang am stärksten. Höhere Ozoneinträge zeigten nur geringe Effekte. An den übrigen Versuchstagen zeigten sich ähnlich Ergebnisse. Zum Ende der Versuchsreihe (ab Tag 18) lieferte der Eintrag von 10 g O₃/kg TS die besten Ergebnisse, 15 g O₃/kg TS führten dagegen zu einer deutlichen Verschlechterung.

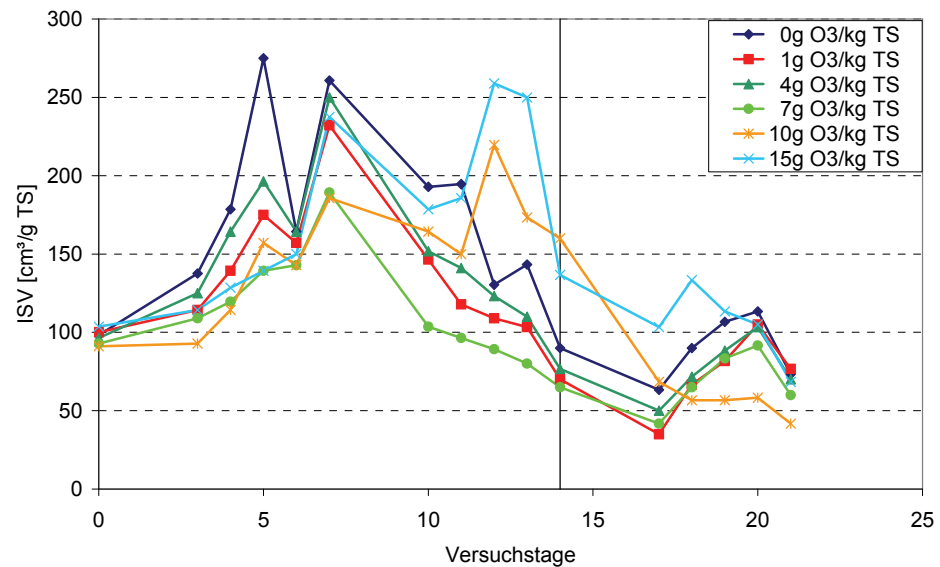


Schwimmschlamm Während der Versuchsdurchführung wiesen alle Ansätze einen minimalen Anteil an Schwimmschlamm auf, der meistens zwischen 10 und 25 ml/l lag. Der Schwimmschlamm wurde durch die Ozonbehandlung nur unwesentlich und nicht systematisch beeinflusst, was bei derart geringen Schwimmschlammengen zu erwarten war. Auf dessen Diskussion wird hier deshalb verzichtet.

Schlammindex

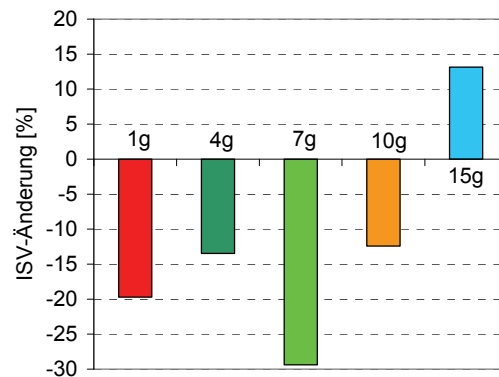
Zu Beginn der Versuchsreihe lagen die Schlammindizes bei 100 cm³/g TS und stiegen dann deutlich an auf Werte über 250 cm³/g TS. Die Zunahme scheint in der Versuchsanordnung begründet zu sein, beeinträchtigt die Auswertung aber nicht, da hier die Veränderung des ISV im Vergleich zur Referenz und nicht zum Originalschlamm betrachtet wird. Im weiteren Versuchsverlauf sinken die ISV-Werte wieder, was zeigt, dass sich die im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen an die Testbedingungen adaptiert haben. Schlämme mit ISV größer als 150 cm³/g TS gelten definitionsgemäß als Blähschlamm. Die Werte lagen hier zeitweise darüber.

In der ersten Versuchshälfte wurden die Indizes aller Ansätze durch Ozonbehandlung deutlich reduziert. Deutliche Einflüsse zeigt die Höhe der eingetragenen Ozondosis. So lag zum Anfang und Ende der Versuchsreihe das Optimum bei 10 g O₃/kg TS, in der Mitte bei 7 g O₃/kg TS. In der zweiten Versuchshälfte dagegen zeigt der Eintrag von 10 und 15 g O₃/kg TS sogar negative Auswirkungen auf die Schlammindizes. Bei Betrachtung der gesamten Versuchslaufzeit zeigt der Eintrag von 7 g O₃/kg TS die besten Ergebnisse.



Reduzierung des Schlammindexe

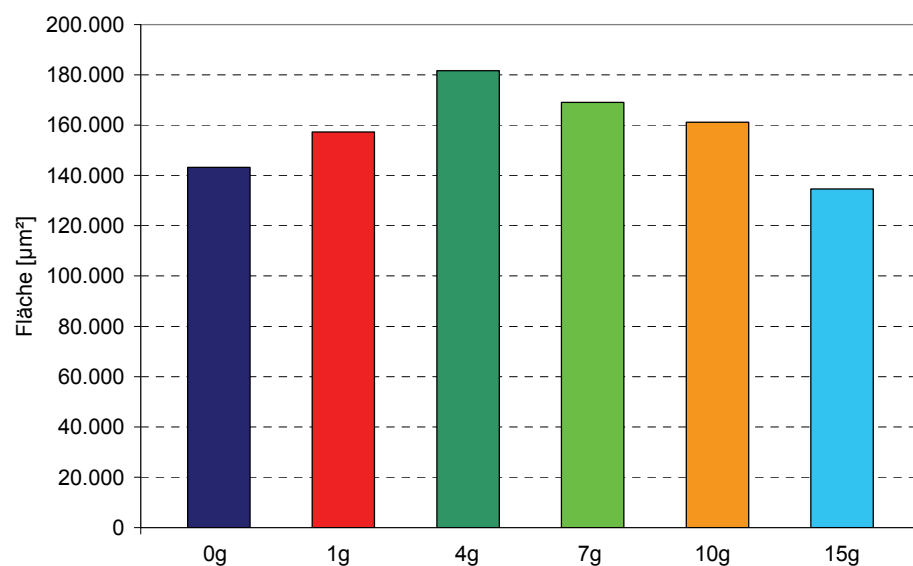
Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Reduzierungen der Schlammindizes bezogen auf die Referenz gemittelt über die gesamte Versuchreihe. Beim Eintrag von 1 bis 10 g O₃/kg TS zeigt sich eine Reduzierung des ISV, wobei sich die stärkste Reduzierung von nahezu 30 % durch 7 g O₃/kg TS zeigt. 15 g O₃/kg TS dagegen erhöhten den Schlammindex. Es bestätigen sich die Erkenntnisse der einzelnen Versuchstage.



6.1.3 Bildanalyse

Größe der Flocken

In der folgenden Abbildung sind die durchschnittlichen Flockengrößen aus der Bildanalyse der einzelnen Ansätze vom 13. Versuchstag dargestellt. Den Mittelwerten liegen die Werte aus 20 einzelnen Bildern zugrunde. Es zeigt sich, dass mit Ozoneinträgen bis 4 g O₃/kg TS die Flockengröße zunimmt, höhere Ozoneinträge haben die Flockengröße dann wieder reduziert. Da beim Absetzverhalten und den Schlammindizes der optimale Bereich bei mittleren Ozondosen gefunden wurde, wäre in diesem Bereich eher eine Abnahme der Flockengröße zu erwarten.



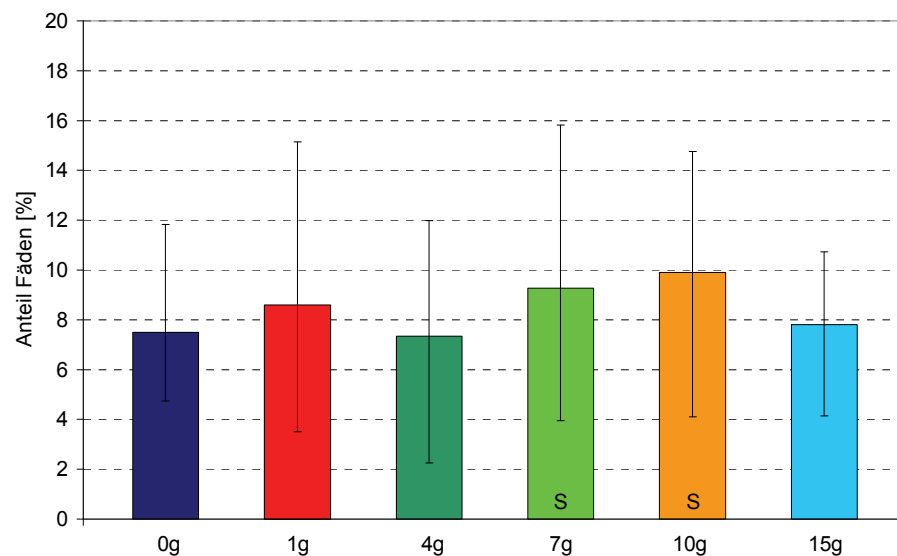
Gestalt der Flocken

Die Gestalt der Flocken wurde anhand der Rundheit bewertet. Die Schlämme aller Ansätze wiesen mit 0,80 bis 0,86 die gleichen Rundheiten auf. Hier zeigt sich folglich kein Einfluss der Ozonbehandlung.

Anteil Fäden

Der Anteil der Fäden der Schlämme in den einzelnen Ansätzen nahm durch zunehmenden Ozoneintrag zu von 7,5 % im Referenzansatz ohne Ozoneintrag auf 9,9 % nach Eintrag von 10 g O₃/kg TS. Es ist zu beachten, dass die Werte der einzelnen Aufnahmen, die hier der Mittelwertbildung zugrunde liegen, stark streuten. Im Diagramm sind die Spannen zwischen kleinstem und größtem Wert nach Elimination von Ausreißern dargestellt. Die Variationskoeffizienten lagen zwischen 25 und 36 %. Die Varianzanalyse ergab für die mit 7 und 10 g O₃/kg TS behandelten Ansätze verglichen mit der Referenz Effekte mit geringer Signifikanz. Diese sind im nachfolgenden Diagramm mit „S“ gekennzeichnet. Die Werte der anderen Ansätze zeigten keine signifikanten Veränderungen.

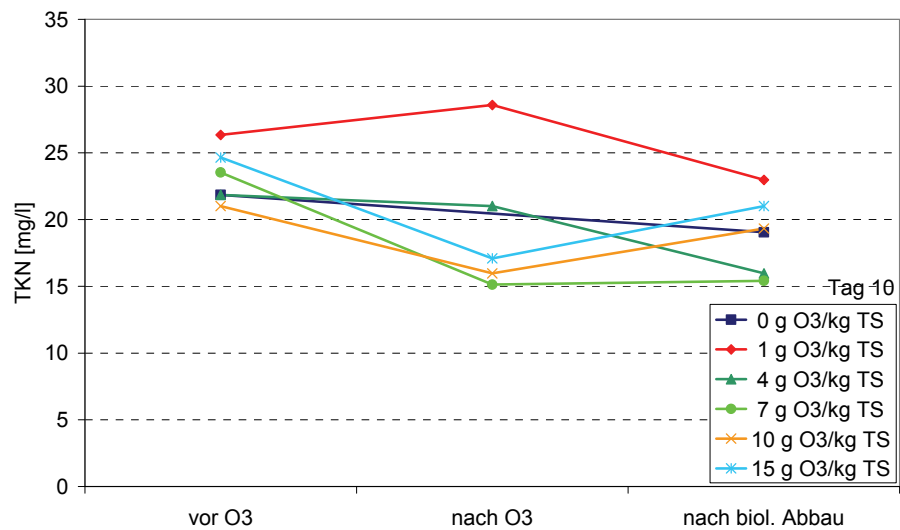
Die erwartete Zerstörung der Fäden durch Ozoneintrag konnte hier nicht beobachtet werden. Die tendenzielle Zunahme der Anteile der Fäden insbesondere bei den höheren Ozoneinträgen lässt sich dadurch begründen, dass Ozon die Flockenstruktur zerstört hat und dadurch die im Flockeninneren gebundenen Fäden freigesetzt wurden. Mit der durchgeführten Bildanalyse ist keine Aussage darüber möglich, ob die Fadenbakterien leben oder ob sie durch den Ozoneintrag abgetötet wurden.



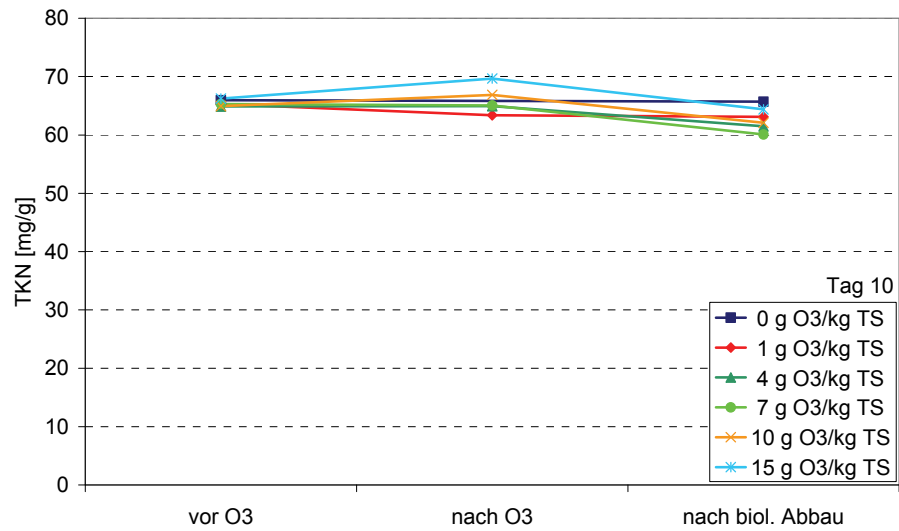
6.1.4 Kjeldahl-Stickstoff

TKN

Durch Ozoneintrag nehmen die Kjeldahl-Werte, die im Filtrat der Schlämme gemessen wurden, ab, mit Ausnahme in dem Ansatz, der mit 1 g O₃/kg TS behandelt wurde. Der nachfolgende biologische Abbau zeigt unterschiedliche Auswirkungen auf die TKN-Werte. In den Ansätzen, die nicht und mit Ozondosen bis 7 g O₃/kg TS behandelt wurden, nahm die TKN-Konzentration durch biologischen Abbau ab, bei höheren Ozondosen nahm die TKN-Konzentration zu.

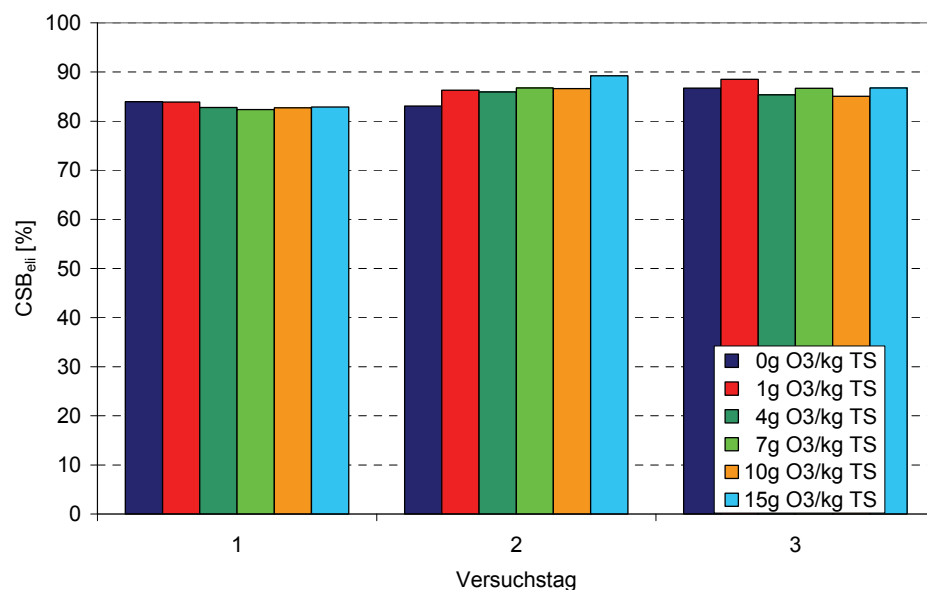


TKN im Schlamm Zusätzlich wurde der Gehalt an TKN im Schlamm bestimmt, bezogen auf dessen Feststoffgehalt. Die Werte liegen zwischen 60 und 70 mg/g. Durch Ozoneintrag ist keine Veränderung festzustellen Während des biologischen Abbaus ist insbesondere bei den Schlämmen, die mit hohen Ozondosen behandelt wurden, eine minimale Abnahme zu verzeichnen. Das kann darauf hindeuten, dass die Mikroorganismen durch Ozon geschädigt wurden und organische Stickstoffverbindungen abgegeben haben, die dann im Wasser gelöst vorlagen.



6.1.5 Schlammaktivität

CSB-Elimination Die CSB-Elimination jeweils innerhalb von 24 Stunden nach Glucose-Zugabe betrug immer mehr als 80 %. Durch die Ozonbehandlung hat also keine Beeinträchtigung der Abbauleistung der Schlämme stattgefunden.



6.2 Ergebnisse der Ozonisierung von Belebtschlamm (Ozonisierung nach biol. Abbau)

6.2.1 Eingesetzte Proben und Ozondosen

Schlamm- charakteristika Werk B

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes B wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	OFS	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[N/m]	[mg/l]	[mg/ g oTS]	[mg/ g oTS]	[mS/ cm]
S	S	S	F	S	S	S	F	S	S	S
8,8	7,7	87	972	6,7	333	53	64	107	87	2,7
9,2	8,0	87	364	6,7	-45,3	57	20	109	109	2,0

Schlamm- charakteristika Werk C

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes C wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	OFS	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[N/m]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/ g oTS]	[mg/ g oTS]	[mS/ cm]
S	S	S	F	S	S	S	F	F	F	F	S	S	S
6,8	5,4	79	241	7,2	73	43	20,1	0,1	2,3	28	101	96	2,3
6,0	4,6	77	653	6,9	192	42	20,8	0,3	5,0	36	81	81	2,4
8,5	7,0	83	323	7,0	32	41	0,8	0,1	3,1	32	94	89	2,8

TKN

Im Originalschlamm, der für diese Versuche eingesetzt wurde, hat sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 18 % reduziert. Dieser Wert trat lediglich bei einer Schlammlieferung aus Werk B auf. In den anderen Schlämmen reduzierte sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 6 %. Damit fand lediglich in dem einen Fall eine leichte Zehrung statt. In allen anderen Fällen wurde keine Zehrung beobachtet.

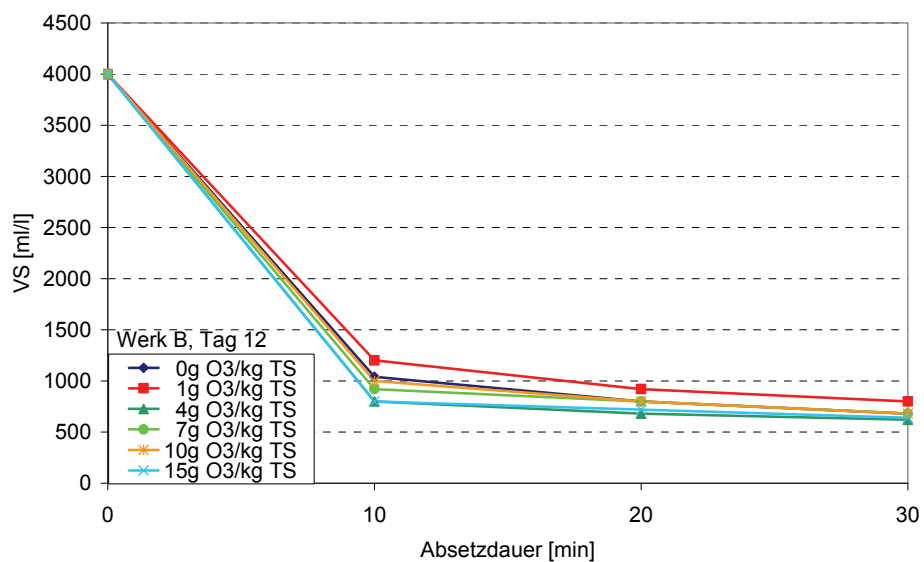
durchschnittlich eingetragene O₃- Dosen

In der nachfolgenden Tabelle sind die durchschnittlichen Ozondosen aufgeführt, die für die beiden untersuchten Werke während der gesamten Versuchslaufzeiten durchschnittlich eingetragen wurden.

Bezeichnung	Tatsächliche O ₃ -Dosis [g O ₃ /kg TS]	
	Werk B	Werk C
0g, Referenz	0 (nicht ozonisiert)	0 (nicht ozonisiert)
1g	1,5	1,0
4g	4,7	2,6
7g	7,6	3,6
10g	10,4	4,7
15g	17,1	6,7

6.2.2 Schlammeigenschaften

Absetzverhalten Während des gesamten Versuchsverlaufs zeigten sich nur wenige Unterschiede im Absetzverhalten der einzelnen Schlämme. Im dargestellten Beispiel setzte sich der Schlamm in den mit 4 bis 15 g O₃/kg TS behandelten Ansätzen etwas schneller ab als im unbehandelten, was sich insbesondere nach 10-minütiger Absetzzeit zeigt.

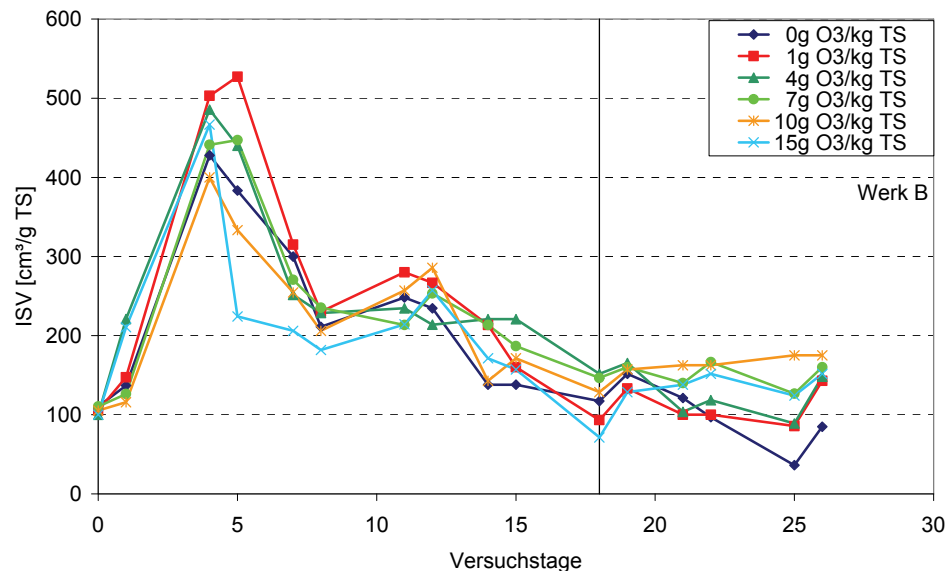


Schwimm- schlamm

Lediglich am ersten Versuchstag wiesen alle Ansätze einen minimalen Anteil an Schwimmschlamm auf, der im weiteren Versuchsverlauf verschwand.

Schlammindex

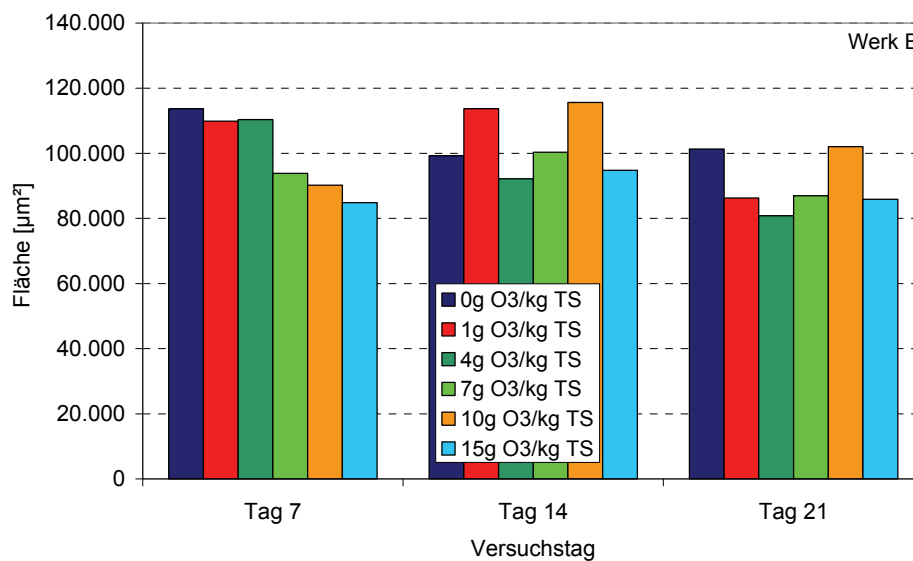
Es ist zu beachten, dass die Y-Achse der nachfolgenden Abbildung einen anderen Maßstab aufweist als die der ersten Versuchsreihe. Ebenso wie bei der ersten Versuchsreihe ist zu Versuchsbeginn ein starker Anstieg des ISV in allen Ansätzen zu verzeichnen. Im weiteren Versuchsverlauf senkte sich der ISV dann aber wieder ab und lag zum Ende teilweise unter dem Anfangsniveau. Die im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen haben sich offensichtlich an die Testbedingungen adaptiert. Die Schlammindizes der Ansätze dieser zweiten Versuchsreihe schwankten deutlich weniger als bei der ersten Versuchsreihe. Allerdings liegen die Werte aller Ansätze relativ nahe beieinander und zeigen keine eindeutigen Reaktionen auf die Behandlung mit verschiedenen Ozondosen. Im ersten Drittel der Versuchslaufzeit zeigen sich die besten Effekte beim höchsten Ozoneintrag von 15 g O₃/kg TS. Da im weiteren Versuchsverlauf durch Ozonisierung an einigen Tagen eine Verschlechterung des Absetzverhaltens beobachtet wurde, kann hier keine Einstellung als optimale empfohlen werden.



6.2.3 Bildanalyse

Größe der Flocken

In der folgenden Abbildung sind die durchschnittlichen Flockengrößen aus der Bildanalyse der einzelnen Ansätze vom 7., 14. und 21. Versuchstag dargestellt. Am 7. Versuchstag nimmt die Flockengröße mit zunehmendem Ozoneintrag ab. Mit zunehmendem Ozoneintrag hat sich an diesem Tag auch der ISV verbessert. Am 14. und 21. Versuchstag zeigte sich keine einheitliche Reaktion auf die Ozonbehandlung und kein Zusammenhang zum ISV. In vielen Fällen sind die Flockengrößen in den ozonisierten Ansätzen geringer als im nicht ozonisierten Ansatz, unabhängig von der Versuchsdauer.



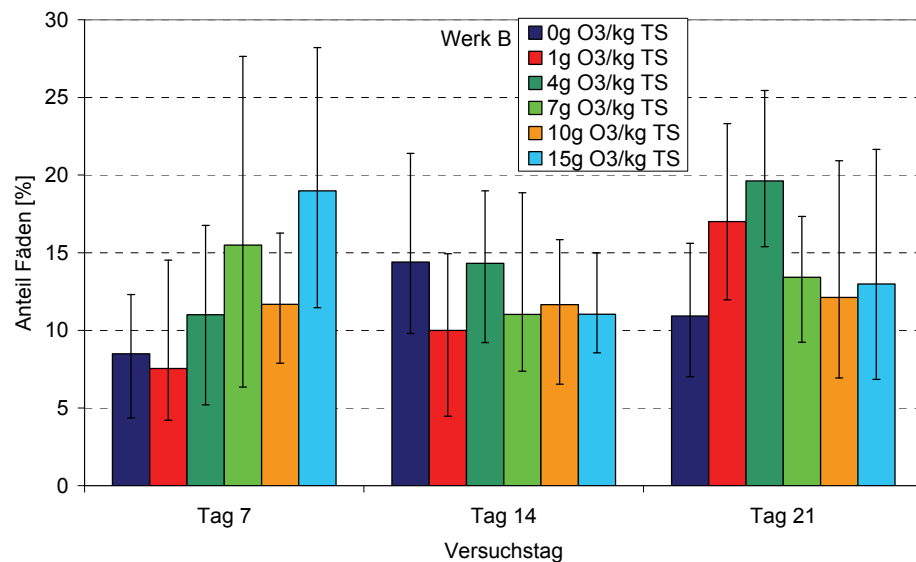
Gestalt der Flocken

Die Gestalt der Flocken wurde anhand der Rundheit bewertet. Die Schlämme aller Ansätze wiesen an allen Tagen mit 0,75 bis 0,78 die gleichen Rundheiten auf, die um 0,1 unter denen der ersten Versuchsreihe lagen. Im Vergleich zur ersten Versuchsreihe waren die Flocken also etwas unregelmäßiger. Hier zeigt sich ebenfalls kein Einfluss der Ozonbehandlung.

Anteil Fäden

Die Einzelwerte der Fadenanteile, die der Mittelwertbildung zugrunde liegen, streuten stark. Die Variationskoeffizienten lagen zwischen 15 und 39 %. Im Diagramm sind die Spannen zwischen kleinstem und größtem Wert nach Elimination von Ausreißern dargestellt. Die Varianzanalyse ergab für Versuchstage 7 und 14 für die mit 7, 10 und 15 g O₃/kg TS behandelten Ansätze verglichen mit der Referenz signifikante Effekte. Für den 21. Versuchstag ergaben sich signifikante Ergebnisse für die mit 1, 4 und 7 g O₃/kg TS behandelten Ansätze verglichen mit der Referenz.

Am 7. Versuchstag hat der Anteil der Fäden mit zunehmendem Ozoneintrag tendenziell zugenommen. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch die Ozonbehandlung die Fäden aus den Flocken herausgelöst wurden. Damit wies an diesem Tag der Schlamm mit dem geringsten Schlammindex die meisten Fäden auf. Die Ozonbehandlung kann das Vernetzen der Flocken unterbunden haben. An den weiteren Versuchstagen zeigte sich kein eindeutiger Einfluss der Ozondosis und auch keine Korrelation zum Schlammvolumen. Erwartungsgemäß weisen die Ansätze mit großen Flocken wenige Fäden auf, denn hier sind die Fäden in den Flocken enthalten.

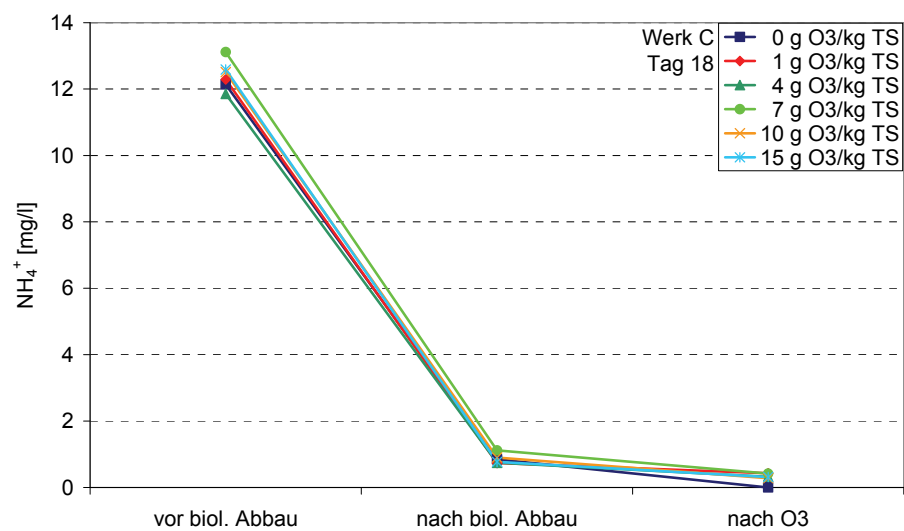


6.2.4 Stickstoffparameter

NH₄⁺

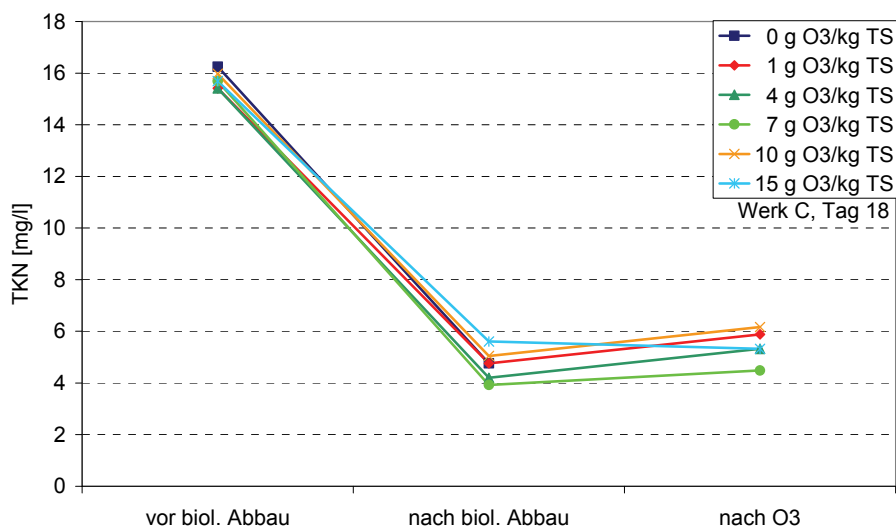
Wie erwartet hat der biologische Abbau in allen Ansätzen zu einer praktisch vollständigen NH₄⁺-Elimination geführt. Der biologische Abbau hat folglich in allen Ansätzen ungestört stattgefunden, es war keine Beeinträchtigung durch den Ozon behandelten Schlamm festzustellen. Durch die nachfolgende Ozonbehandlung hat eine weitere Abnahme der NH₄⁺-Konzentration stattgefunden, die mit steigender Ozonkonzentration größer wurde. Das gelöste Ammonium ist wahrscheinlich durch Ozon oxidiert worden.

Die NH₄⁺-Werte entsprechen NH₄-N-Werten von 9 bis 10 mg/l im Wasser vor biologischem Abbau bzw. <1 nach biologischem Abbau. Die TKN-Werte lagen hier bei 15 bis 16 mg/l bzw. < 6 mg/l (s. unten). Da NH₄⁺-N bei der TKN-Bestimmung vollständig miterfasst wird, sind die Werte zueinander plausibel.



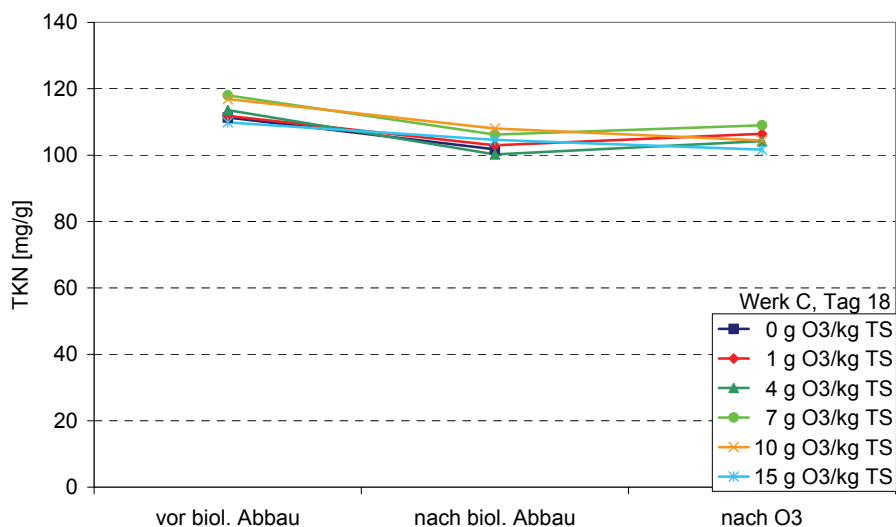
TKN

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Kjeldahl-Werte, die im Filtrat der Schlämme aus den einzelnen Ansätzen gemessen wurden. Es hat ein weitgehender TKN-Abbau stattgefunden, der in der Elimination von NH₄-N begründet ist. Die leichte „Zunahme“ der TKN-Konzentration durch Ozonbehandlung um jeweils ca. 1 mg/l liegt innerhalb der Messungenauigkeit.



TKN im Schlamm

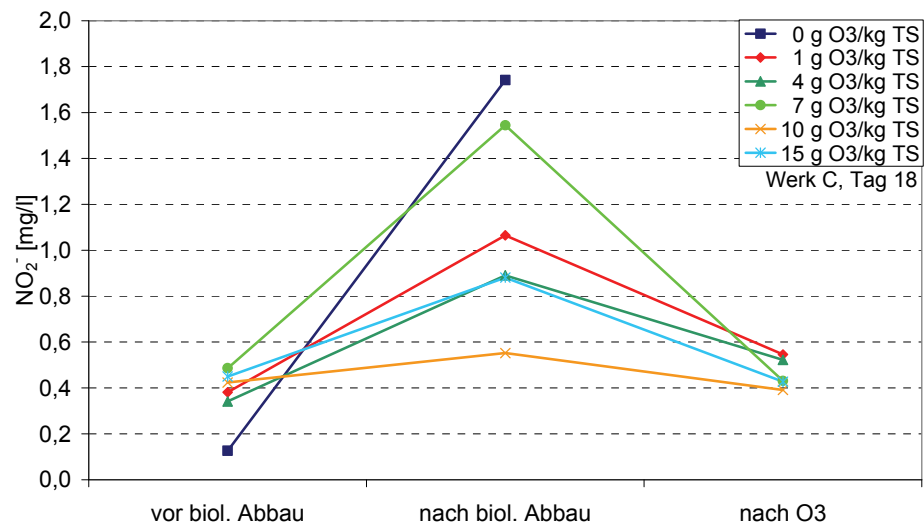
Zusätzlich wurde der Gehalt an TKN im Schlamm bestimmt, bezogen auf dessen Gehalt an organischer Trockensubstanz. Die Werte liegen zwischen 100 und 120 mg/g. Durch Ozoneintrag ist keine Veränderung festzustellen.



NO₂⁻

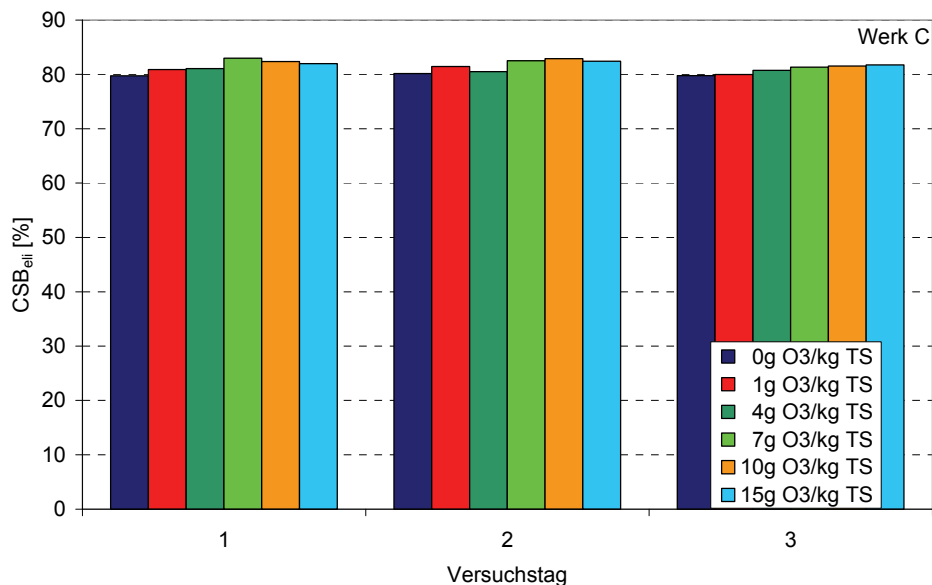
Die NO₂⁻-Werte zeigen eine unvollständige Nitrifikation beim biologischen Abbau. Eine Denitrifikation hat nicht stattgefunden, da die Ansätze während der gesamten Versuchslaufzeit belüftet wurden. In den einzelnen Ansätzen trat ein unterschiedlich hoher NO₂⁻-Anstieg auf. Die Werte stiegen an von Werten unter 0,5 mg/l auf 0,6 – 1,7 mg/l, wobei lediglich in den beiden Ansätzen mit den höchsten Ozoneinträgen eine geringere Nitrit-Zunahme im biologischen Abbau auftrat. Es kann aber keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Ursache eine Beeinträchtigung durch die Ozonbehandlung ist oder im unterschiedlichen hohen Grad der Nitrifikation liegt.

Durch Ozonbehandlung hat in allen Ansätzen die Nitrit-Konzentration abgenommen und die Werte liegen wieder auf ähnlichem Niveau wie vor dem biologischen Abbau. Wahrscheinlich hat das eingetragene Ozon das Nitrit zu Nitrat oxidiert.



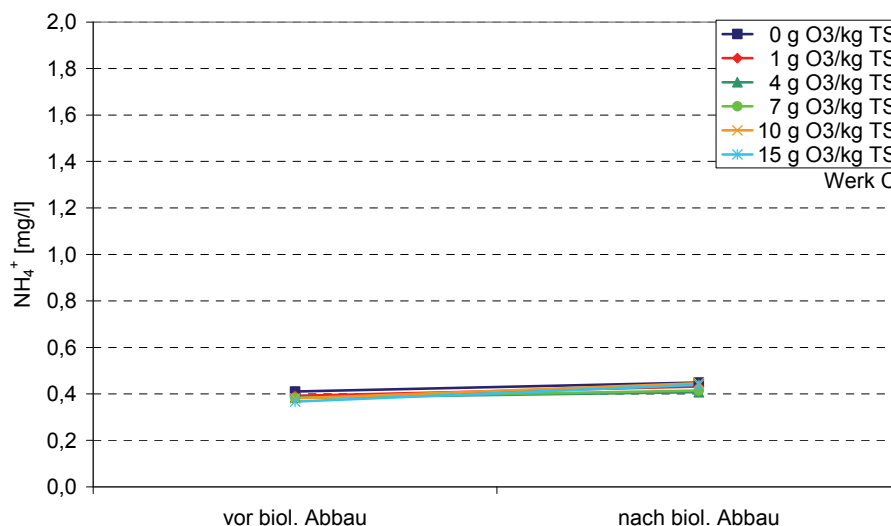
6.2.5 Schlammaktivität

CSB-Elimination Die CSB-Elimination innerhalb von 24 Stunden nach Glucose-Zugabe betrug immer 80 % oder mehr. Durch die hier durchgeführte Ozonbehandlung hat also keine Beeinträchtigung der Abbauleistung der Schlämme stattgefunden.



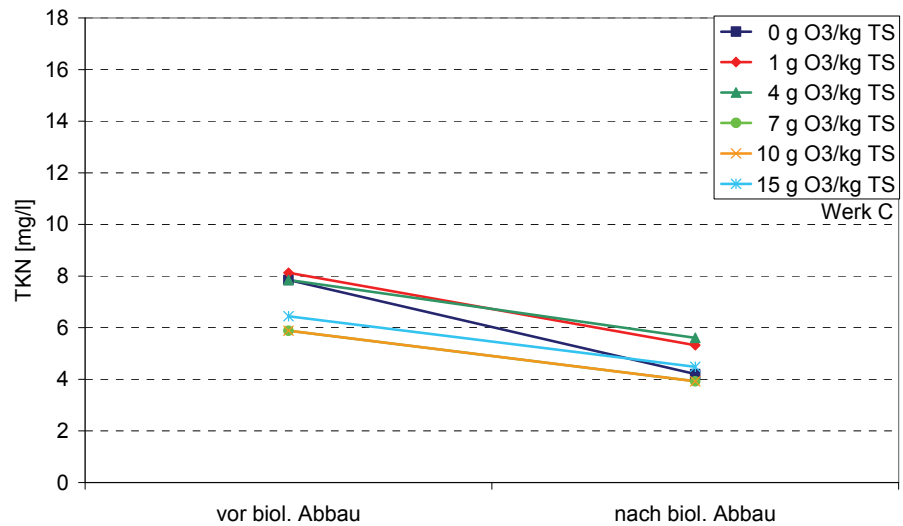
NH₄⁺

Die NH₄⁺-Werte liegen mit Werten bei 0,4 mg/l auf dem gleichen Niveau wie während der Versuchslaufzeit nach biologischem Abbau. Dies war zu erwarten, da während der Bestimmung der Schlammaktivität kein Rohabwasser und damit keine Stickstoffquelle zugeführt wurde.

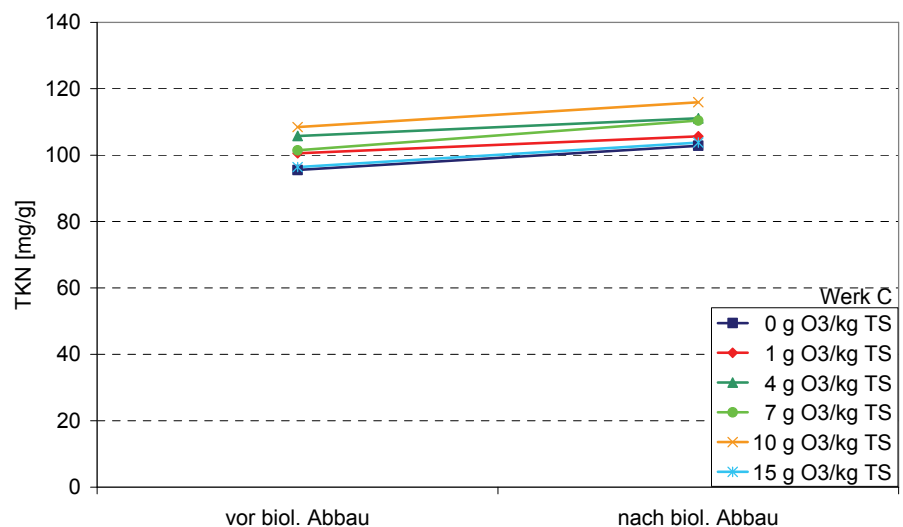


TKN im Filtrat

Die im Filtrat gemessenen TKN-Werte liegen ebenfalls auf einem niedrigen Niveau. Durch biologischen Abbau war eine geringe Abnahme zu verzeichnen. Da sich die NH₄⁺-Werte dagegen nicht verändert haben, wurde hier wahrscheinlich organisch gebundener Stickstoff abgebaut.

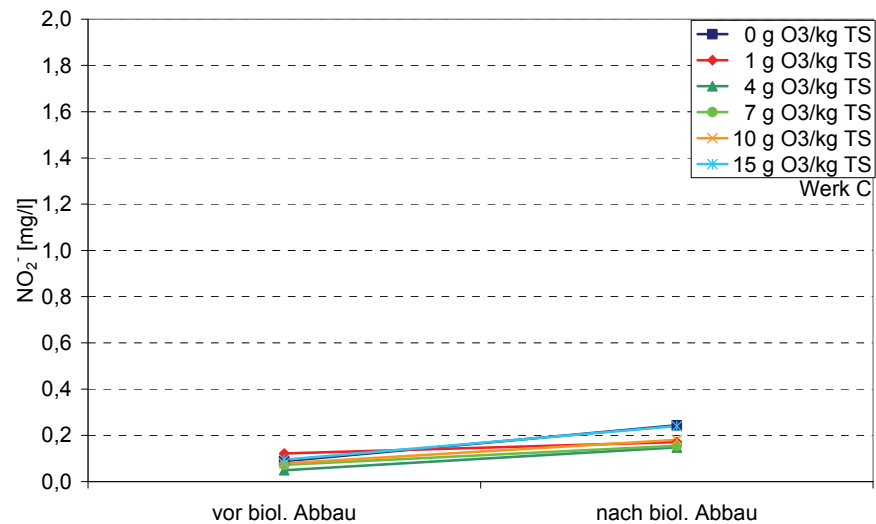
**TKN im Schlamm**

Die im Schlamm gemessenen TKN-Werte sind während des biologischen Abbaus auf gleichem Niveau geblieben. Es hat also keine Zehrung des Schlammes stattgefunden. Es zeigt sich in allen Ansätzen das gleiche Verhalten. Folglich hat die Ozonbehandlung den Schlamm nicht beeinträchtigt.



NO₂⁻ und NO₃⁻

Die NO₂⁻-Werte lagen auf niedrigerem Niveau als während der Versuchslaufzeit und sind durch biologischen Abbau leicht angestiegen.



6.3 Ergebnisse der Ozonisierung von Rückschlamm

6.3.1 Eingesetzte Proben und Ozondosen

Schlamm- charakteristika Werk B

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes B wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	OFS	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[N/m]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/g oTS]	[mg/g oTS]	[mS/cm]
S	S	S	F	S	S	S	F	F	F	F	S	S	S
7,7	6,3	82	990	7,0	266	55	13,9	300	824	19	98	86	3,9

Schlamm- charakteristika Werk C

Die eingesetzten Rückschlamm-Proben des Werkes C wiesen beim Probeneingang folgende Eigenschaften auf:

TS	oTS	GV	CSB	pH	U _H	OFS	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	TKN	TKN _A	TKN _E	LF
[g/l]	[g/l]	[%]	[mg/l]	[-]	[mV]	[N/m]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/g oTS]	[mg/g oTS]	[mS/cm]
S	S	S	F	S	S	S	F	F	F	F	S	S	S
7,5	6,1	81	203	7,6	333	41	1,1	0,2	3,3	30	96	90	2,8
9,1	7,6	83	174	7,6	-11,2	42	1,6	0,2	3,6	26	95	91	2,8

TKN

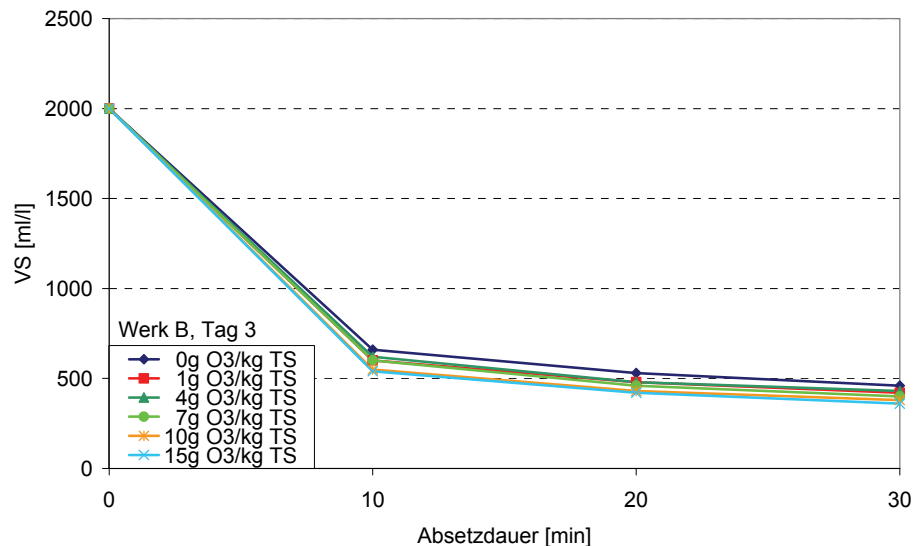
Im Originalschlamm, der für diese Versuche eingesetzt wurde, hat sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 13 % reduziert. Dieser Wert trat lediglich bei der Schlammlieferung aus Werk B auf. In den anderen Schlämmen reduzierte sich der TKN-Wert während der Lagerung um maximal 6 %. Damit fand lediglich in dem einen Fall eine leichte Zehrung statt. In allen anderen Fällen wurde keine Zehrung beobachtet.

durchschnittlich eingetragene O₃-Dosen

Bezeichnung	Tatsächliche O ₃ -Dosis [g O ₃ /kg TS]	
	Werk B	Werk C
0g, Referenz	0 (nicht ozonisiert)	0 (nicht ozonisiert)
1g	2,0	1,2
4g	4,9	4,0
7g	8,7	5,9
10g	12,6	8,6
15g	18,6	12,0

6.3.2 Schlammeigenschaften**Absetzverhalten**

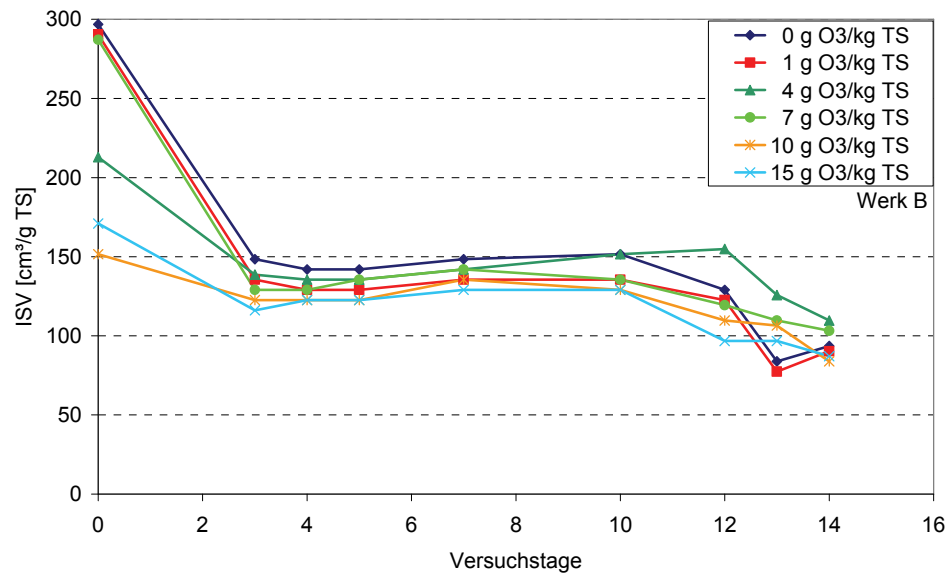
Der unbehandelte Schlamm setzte sich vergleichsweise gut ab. Zunehmende Ozoneinträge beschleunigten den Absetzvorgang etwas. Die besten Erfolge wurden während der gesamten Versuchsreihe mit 10 und 15 g O₃/kg TS erzielt.

**Schwimm-schlamm**

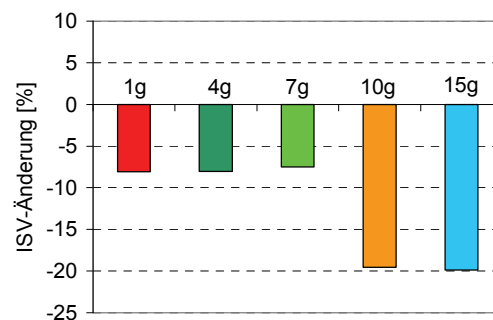
Während der gesamten Versuchsreihe bildete sich in keinem der Ansätze Schwimmschlamm.

Schlammindex

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchsreihen hat hier während der Versuchslaufzeit der Schlammindex in allen Ansätzen abgenommen, auch waren erheblich weniger Schwankungen zu verzeichnen. Tendenziell zeigen sich während des gesamten Versuchsverlaufs mit höheren in den Rückschlamm eingetragenen Ozondosen die stärksten Verbesserungen. Eine Ausnahme bilden die letzten drei Versuchstage, an denen uneinheitliche Effekte auftraten. Diese können durch das Alter des eingesetzten Schlammes verursacht worden sein.

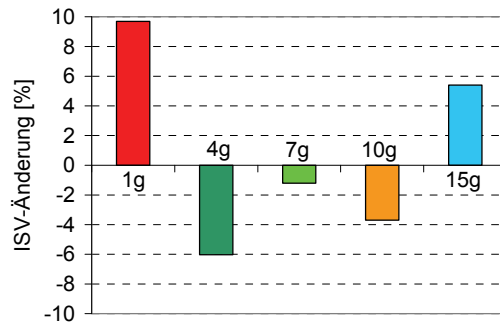
**Reduzierung des Schlammindexes Werk B**

Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Reduzierungen der Schlammindexe bezogen auf die Referenz. Da während der letzten drei Tage der Versuchslaufzeit unplausible und untypische Ergebnisse auftraten, wurden die Mittelwerte hier ohne die Tage 12 bis 14 gebildet. In den letzten Tagen der Versuchslaufzeit hat sich insbesondere die Referenz stark verändert, so dass die Ursachen für das unplausible Verhalten wahrscheinlich im Alter des eingesetzten Schlammes liegen. Es zeigen sich deutliche Reduzierungen des ISV durch die Ozonbehandlung des Rückschlammes, wobei die besten Ergebnisse durch den Eintrag von 10 und 15 g O₃/kg TS erzielt wurden.

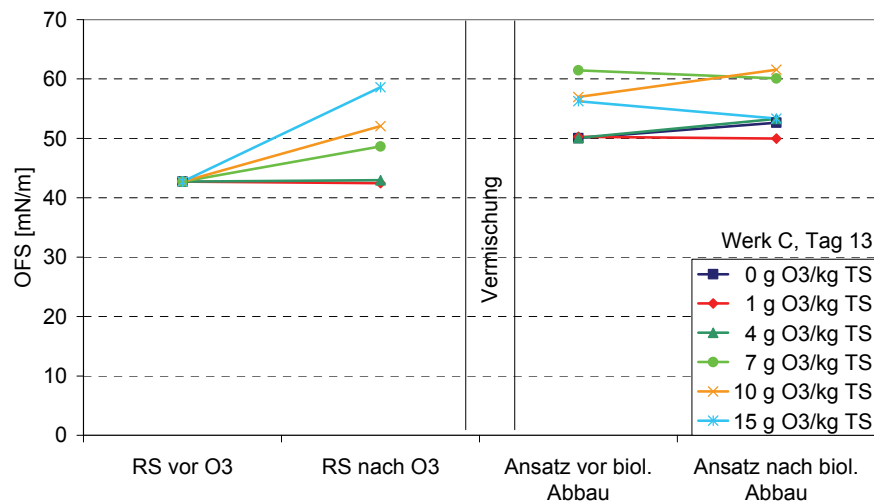


Reduzierung des Schlammindexes Werk C

Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Veränderungen der Schlammindizes bezogen auf die Referenz für Werk C. Die Behandlung des Rückschlammes mit 1 und 15 g O₃/kg TS wirkte sich nachteilig auf die Schlammindizes aus. Die Behandlung mit 4 g O₃/kg TS zeigte die stärkste Verbesserung.



**Oberflächen-
spannung**

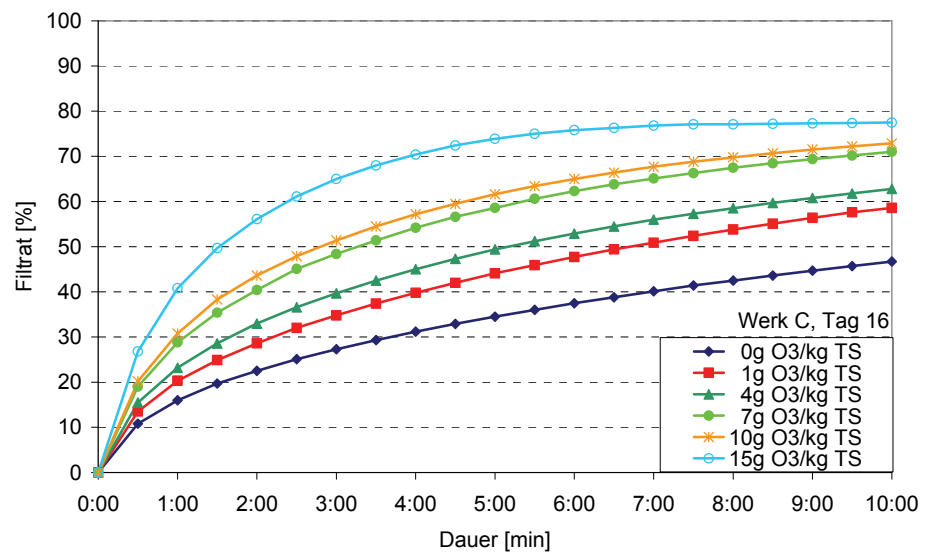


Durch Ozonbehandlung hat in allen Schlämmen die Oberflächenspannung zugenommen. Dabei nahm der Effekt mit steigenden Ozoneinträgen deutlich zu. In allen Ansätzen betrug die Oberflächenspannung nach Vermischung mit den ozonisierten Schlämmen zwischen 50 und 60 mN/m und lag damit wieder im üblichen Bereich für biologisch gereinigtes Wasser.

6.3.3 Filtrierbarkeit

Filtrierbarkeit

Die folgende Abbildung zeigt zu den einzelnen Zeitpunkten die Filtratmenge als Anteil des eingesetzten Volumens während der 10minütigen Filtrierversuche exemplarisch für einen Versuchstag für Werk C. Es zeigt sich eine deutliche Beschleunigung des Filtriervorganges durch die Ozonbehandlung. So nahm die Filtratmenge innerhalb der ersten Minute um bis zu 155 % zu. Zunehmende Ozondosen führten hier zu größeren Effekten. Eine Ursache kann hier die Destabilisierung der EPS (extrazelluläre polymere Substanzen – Bestandteile des Flockengerüsts) durch Ozon sein.



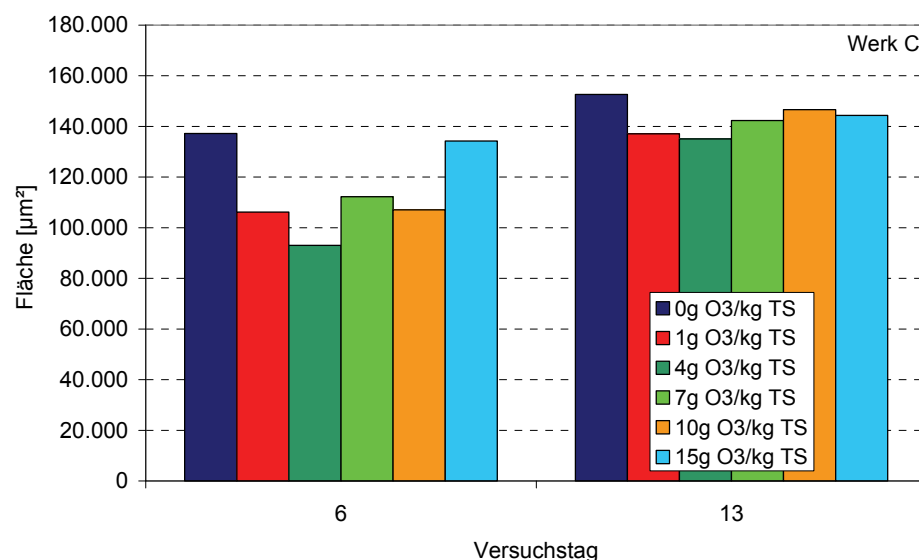
6.3.4 Bildanalyse

Größe der Flocken

In der folgenden Abbildung sind die durchschnittlichen Flockengrößen aus der Bildanalyse der einzelnen Ansätze von 2 Versuchstagen dargestellt. Den Mittelwerten liegen die Werte aus 20 einzelnen Bildern zugrunde. Die Werte, die an den einzelnen Versuchstagen gemessen wurden, lagen auf ähnlichen Niveaus. Die Flockenfläche der unbehandelten Rückschlämme unterschied sich in den beiden Schlammlieferungen nur unwesentlich, sie lag bei 110.000 μm^2 bzw. 100.000 μm^2 .

Am 6. Tag zeigte sich eine Abnahme der Fläche durch die Behandlung mit 1 bis 10 g O₃/kg TS, wobei die stärkste Abnahme durch 4 g O₃/kg TS verursacht wurde. Dieser Ansatz wies an dem Tag den niedrigsten Schlammindex auf. Die geringere Flockengröße kann ein Grund für den verbesserten Schlammindex sein. Der Eintrag von 4 g O₃/kg TS erscheint hier optimal.

Am 13. Versuchstag nahm die Flockenfläche durch Ozonbehandlung nur wenig ab und es zeigten sich keine wesentlichen Einflüsse der Höhe des Ozoneintrags.



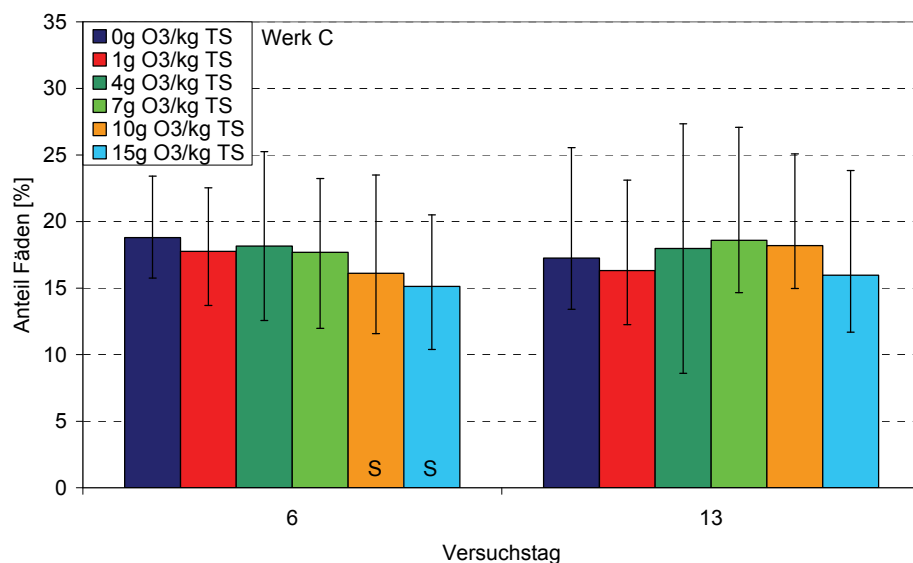
Gestalt der Flocken

Die Gestalt der Flocken wurde anhand der Rundheit bewertet. Die Schlämme aller Ansätze wiesen mit 0,77 bis 0,82 die gleichen Rundheiten auf. Hier zeigt sich folglich kein Einfluss der Ozonbehandlung.

Anteil Fäden

Die Anteile der Fäden für die Schlämme der einzelnen Ansätze sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Variationskoeffizienten der Einzelwerte lagen zwischen 14 und 27 %, die Schwankungen lagen damit also etwas geringer als bei der Ozonisierung von Belebtschlamm. Die Varianzanalyse ergab für die mit „S“ gekennzeichneten Ansätze verglichen mit der Referenz statistisch signifikante Effekte.

Die Niveaus lagen am 6. und 13. Versuchstag auf gleichem Niveau, die Anteile der Fäden haben sich also während der Versuchslaufzeit nicht wesentlich verändert. An Tag 6 wurde in den Ansätzen, dessen Schlamm mit hohen Ozonosen behandelt wurde, ein geringerer Anteil an Fäden gefunden. Eine Zerstörung der Flocken und Freisetzung der Fäden erfolgt hier also nicht.

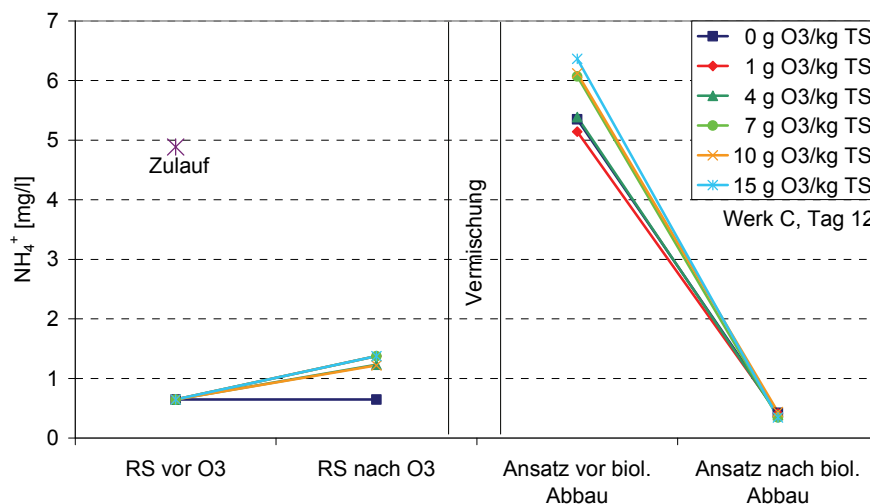


6.3.5 Stickstoffparameter

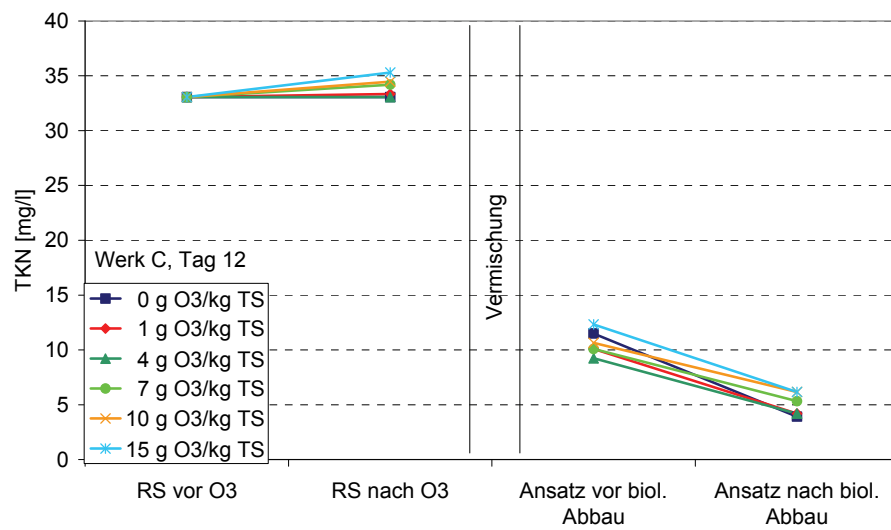
NH₄⁺

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die am 12. Versuchstag gemessenen NH₄⁺-Konzentrationen in der Probe aus dem Zulauf zur Belebungsanlage, im unbehandelten Rückschlamm (vor O₃) und im Rückschlamm nach den verschiedenen Ozoneinträgen (nach O₃) sowie nach Vermischung von Zulauf Belebung mit Rückschlamm und Zugabe zum bestehenden Ansatz jeweils vor und nach biologischem Abbau.

Die geringe Zunahme der NH₄⁺-Konzentrationen, die sich nach Ozonbehandlung zeigt, ist wahrscheinlich in der Messungenauigkeit begründet. Nach Vermischung von dem mit Ozon behandelten Rückschlamm mit dem Zulauf der Belebung und Zugabe dieser Mischung zu den bestehenden Ansätzen wurden in allen Ansätzen NH₄⁺-Werte über 5 mg/l gemessen. Diese Werte erscheinen aufgrund der niedrigeren Niveaus der Messwerte in den einzelnen Bestandteilen der Mischung unplausibel. Wahrscheinlich wurde hier die NH₄⁺-Messung gestört. Dennoch lässt sich eine starke NH₄⁺-Reduzierung durch biologischen Abbau in allen Ansätzen feststellen. Es war keine Beeinträchtigung des Schlammes durch die Ozonbehandlung festzustellen.

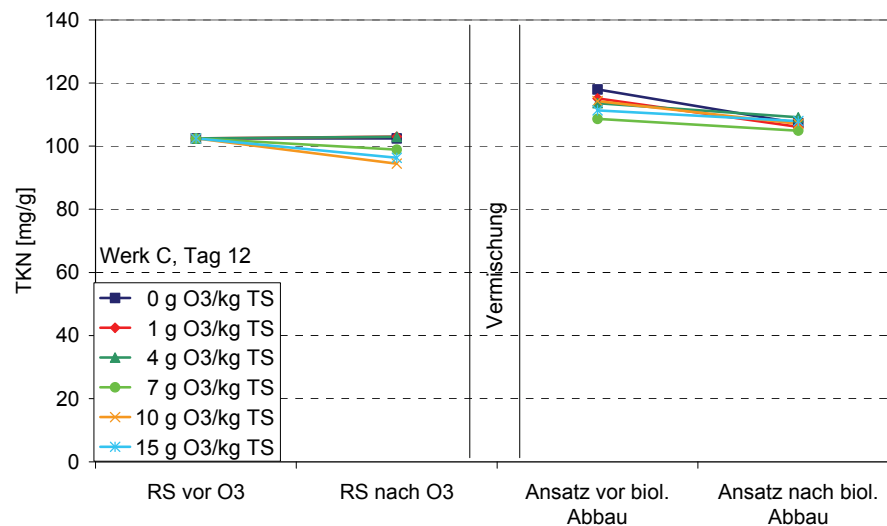


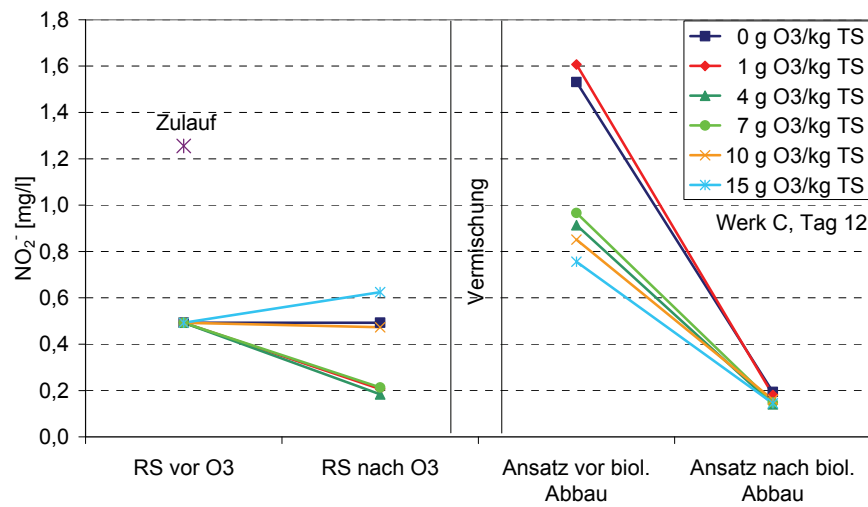
TKN



Die Kjeldahl-Werte, die im Filtrat der Schlämme gemessen wurden, zeigen ein ähnliches Verhalten wie die NH₄⁺-Werte desselben Tages (Abnahme durch biologischen Abbau). Das TKN-Niveau in den Ansätzen lag niedriger als in den eingesetzten Rückschlämme. Die Werte, insbesondere die nach Vermischung, sind plausibler als die NH₄⁺-Werte. Es zeigt sich keine Störung der Schlämme durch die Ozonbehandlung.

TKN im Schlamm Das folgende Diagramm zeigt die TKN-Werte des Schlammes, bezogen auf den Gehalt an organischer Trockensubstanz des Schlammes. Die Werte liegen zwischen 90 und 120 mg/g und damit im gleichen Bereich wie während der ersten Versuchsreihe zur Belebtschlammzonisierung. Durch Ozonbehandlung hat die TKN-Konzentration im Schlamm abgenommen, dabei wurden mit zunehmenden Ozoneinträgen stärkere TKN-Reduzierungen verzeichnet. Da zudem die TKN-Konzentration im Filtrat zugenommen hat, kann die Ursache darin liegen, dass einige Mikroorganismenzellen zerstört wurden und lysierten, wobei TKN ebenfalls in Lösung gegangen ist. Die TKN-Abnahme im Schlamm während des biologischen Abbaus kann darin begründet sein, dass durch das Rohabwasser zu wenig verfügbarer Stickstoff zugegeben wurde und dadurch eine Zehrung des Schlammes stattgefunden hat, wobei aufgrund des CSB-Abbaus während der Aktivitätstests eine starke Zersetzung des Schlammes ausgeschlossen werden kann.

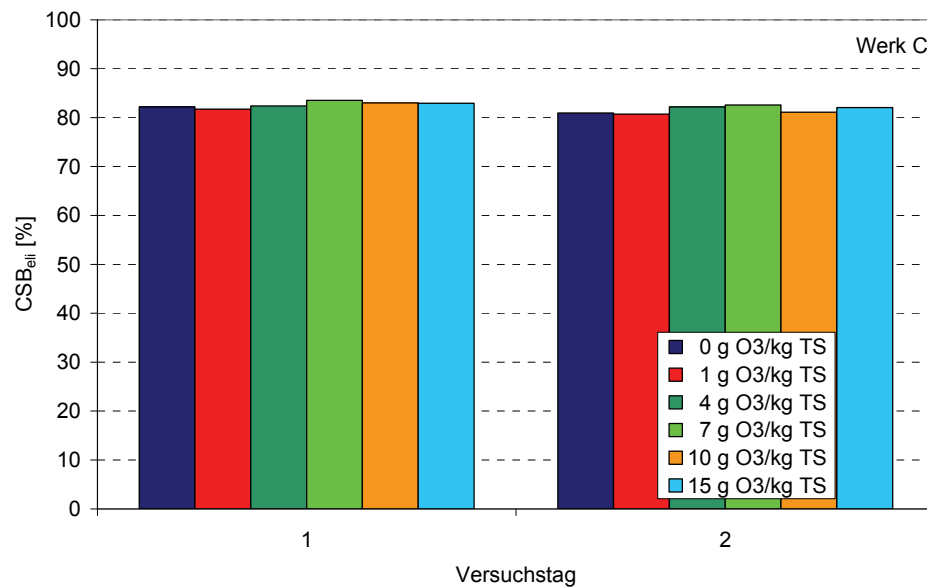


NO₂⁻

Die NO₂⁻-Konzentrationen lagen mit Werten bis 1,6 mg/l im gleichen Bereich wie während der Versuchsreihe zur Belebtschlammsozialisierung. Durch Ozonbehandlung mit 1 bis 7 g O₃/kg TS hat die NO₂⁻-Konzentration im Rückschlamm abgenommen, durch 15 g O₃/kg TS hat sie minimal zugenommen. Vermutlich hat Ozoneintrag zur Oxidation des gelösten NO₂⁻ zu NO₃⁻ geführt. Dieser Effekt wäre beim Eintrag von 10 und 15 g O₃/kg TS allerdings auch zu erwarten gewesen. Die Vermischung von ozonbehandeltem Rückschlamm und Zulauf Belebungs mit den Ansätzen führte bei den Ansätzen „0 g O₃/kg TS“ und „1 g O₃/kg TS“ zu unplausiblen Ergebnissen. In allen Ansätzen hat biologischer Abbau zum weitgehenden Nitrit-Abbau geführt. Die Nitrifikation ist also vollständig abgelaufen.

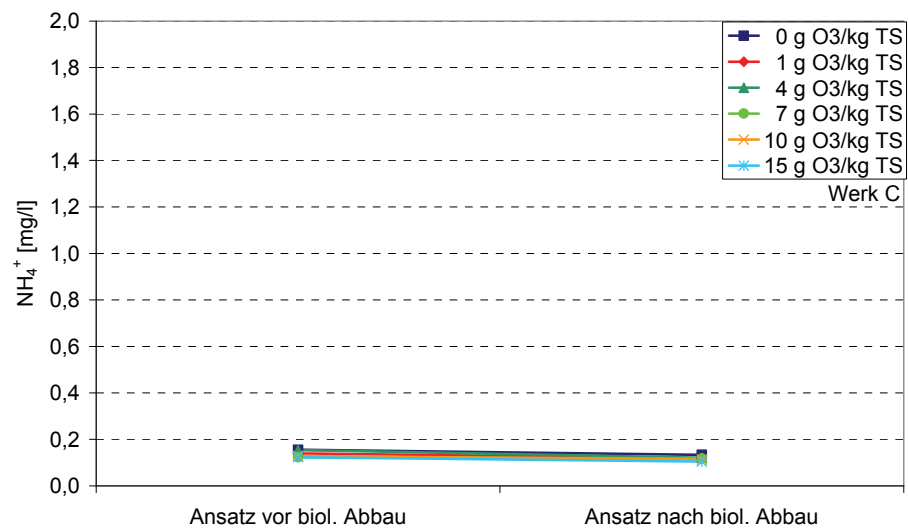
6.3.6 Schlammaktivität

CSB-Elimination In der folgenden Abbildung sind die CSB-Eliminationen jeweils innerhalb von 24 Stunden nach Glucose-Zugabe dargestellt. Alle CSB-Eliminationen lagen über 80 %. Es zeigt sich keine wesentliche Veränderung während der beiden Versuchstage. In allen Fällen wurden täglich über 500 mg CSB/l und damit die gesamte zudosierte Glucose abgebaut. Durch die hier durchgeführte Ozonbehandlung hat also keine Beeinträchtigung der Abbauleistung der Schlämme stattgefunden.



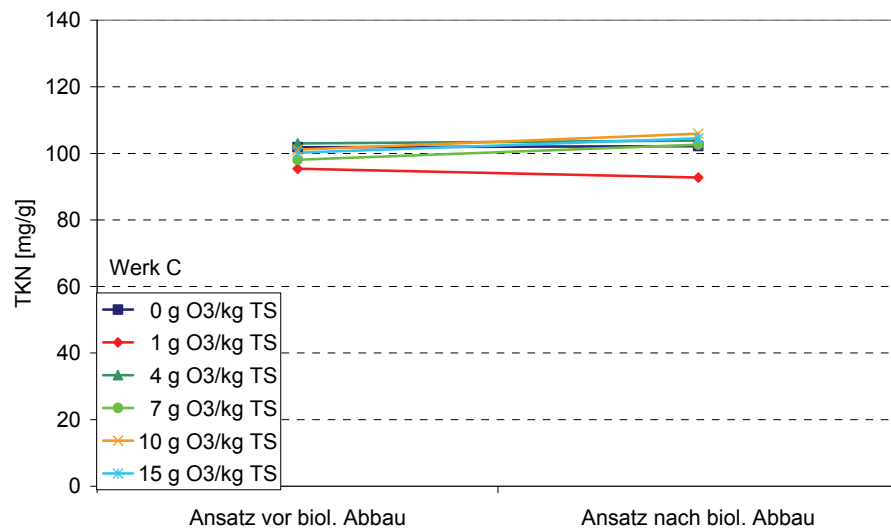
NH₄⁺

Die NH₄⁺-Werte liegen mit Werten zwischen 0,12 und 0,16 mg/l etwas unterhalb der Werte, die während der Versuchslaufzeit nach biologischem Abbau gemessen wurden. Dies war zu erwarten, da während der Bestimmung der Schlammaktivität kein Rohabwasser und damit keine Stickstoffquelle zugeführt wurde. In den Ansätzen, deren Schlamm mit höheren Ozondosen behandelt wurde, lagen die Ammonium-Konzentrationen tendenziell niedriger. Durch biologischen Abbau haben die NH₄⁺-Werte in allen Ansätzen in ähnlichem Maß abgenommen. Es zeigt sich also keine Beeinträchtigung des Schlammes durch die Ozonbehandlung.

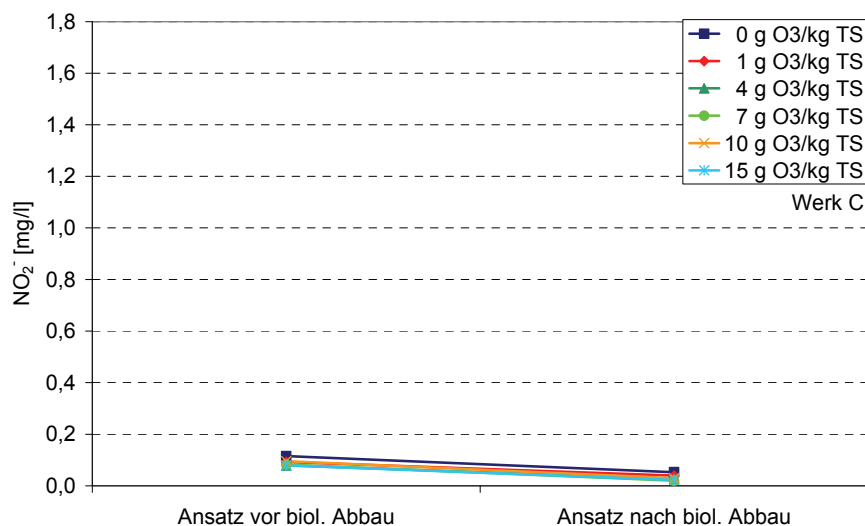


TKN

Die im Filtrat gemessenen TKN-Werte zeigen das gleiche Verhalten wie die NH₄-Werte. Die im Schlamm gemessenen TKN-Werte lagen auf dem gleichen Niveau wie während der Versuchslaufzeit und sind während des biologischen Abbaus auf gleichem Niveau geblieben. Es hat also keine Zehrung des Schlammes stattgefunden. Es zeigt sich in allen Ansätzen das gleiche Verhalten. Folglich hat die Ozonbehandlung den Schlamm nicht beeinträchtigt.

**NO₂⁻**

Die NO₂⁻-Werte lagen ebenfalls auf dem gleichen Niveau der Werte, die während der Versuchslaufzeit nach biologischem Abbau gemessen wurden und wurden durch biologischen Abbau reduziert.

**Fazit**

Da alle Ansätze das gleiche Verhalten zeigen, wurde keine Beeinträchtigung des Schlammes durch die Behandlung mit verschiedenen hohen Ozondosen beobachtet.

7 Fazit

Erfolg Die Ozonisierung sowohl von Belebtschlamm als auch von Rückschlamm erwies sich für die Werke A und B als sehr gut geeignet zur Verbesserung der Schlammeigenschaften. Bei Werk C erwies sich die Ozonisierung von Rückschlamm als besser geeignet.

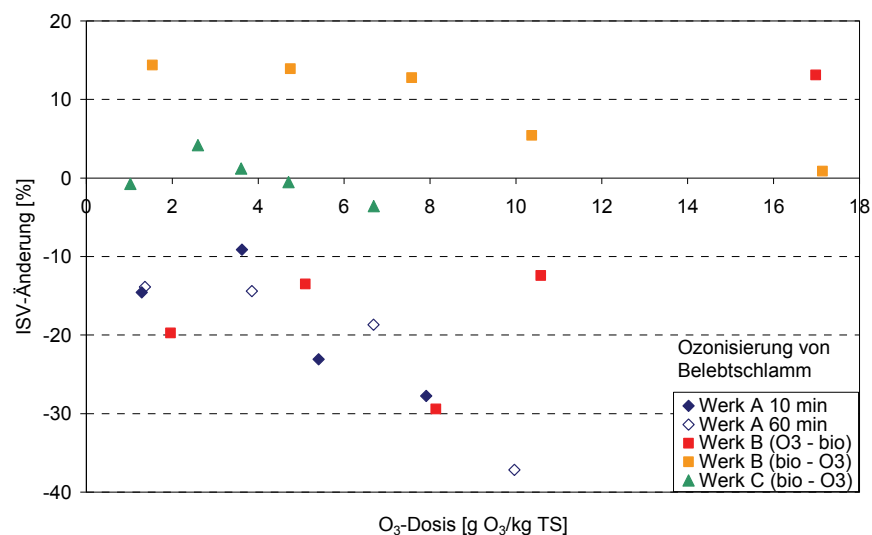
Änderung des Schlammindexes bei Ozonisierung von Belebtschlamm

Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Veränderungen der Schlammindezes bezogen auf die Referenz bei verschiedenen hohen Ozoneinträgen für die untersuchten Werke. Negative Werte bedeuten dabei eine Reduzierung des Schlammindexes und damit eine Verbesserung.

Es zeigt sich, dass die Schlämme der einzelnen Werke unterschiedlich auf die Ozonbehandlung reagiert haben. So bewirkte der Ozoneintrag bei Proben aus **Werk A** in allen untersuchten Fällen eine deutliche Reduzierungen des Schlammindexes, wobei zunehmende Ozondosen zu stärkere Effekte führten.

Mit Proben aus **Werk B** wurde bei der Ozonisierung vor biologischem Abbau beim Eintrag von 1 bis 10 g O₃/kg TS der ISV reduziert, wobei sich die stärkste Reduzierung von nahezu 30 % durch 8 g O₃/kg TS zeigt. 15 g O₃/kg TS dagegen erhöhten den Schlammindezes. Die Ozonbehandlung nach biologischem Abbau erwies sich als ungünstig, da hier die Schlammindezes zunahmen.

Bei **Werk C** zeigte die Ozonbehandlung nur geringe Effekte. Lediglich beim Eintrag von 7 g O₃/kg TS konnte ein positiver Effekt festgestellt werden.



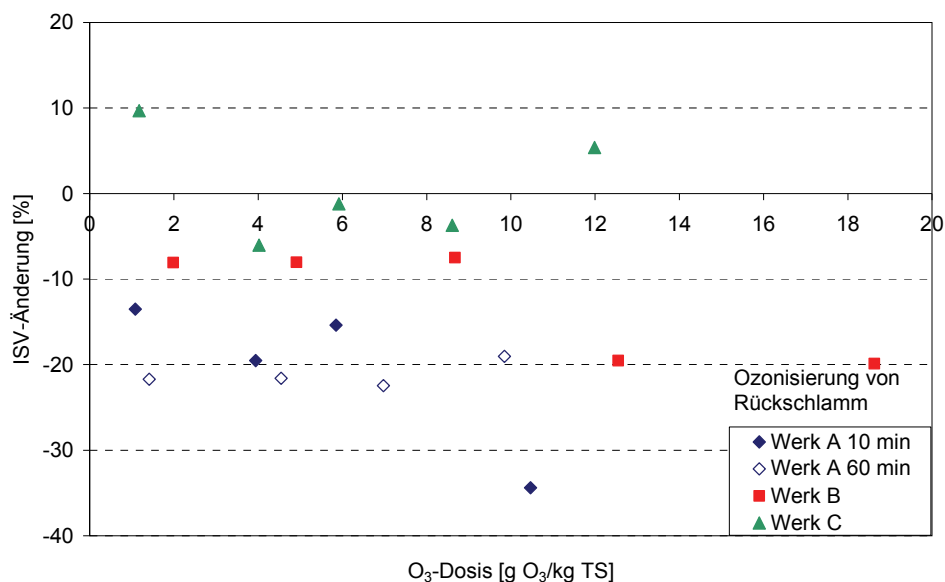
Änderung des Schlammindexes bei Ozonisierung von Rückschlamm

Auch bei der Behandlung von Rückschlamm zeigten sich unterschiedliche Effekte in den Proben der verschiedenen Werke.

In allen ozonisierten Ansätzen aus **Werk A** zeigte sich eine deutliche Verbesserung des ISV durch Ozon. Bereits mit geringen Ozondosen wurden Verbesserungen von 14 % und mehr erzielt. Zunehmende Ozondosen zeigten keine oder nur geringe positive Einflüsse.

Bei **Werk B** führten die höchsten Ozoneinträge von 12 und 19 g O₃/kg TS zur stärksten Verbesserung des Schlammindexes.

Bei **Werk C** wirkte sich die Behandlung mit 1 und 12 g O₃/kg TS nachteilig auf die Schlammindezes aus. Die Behandlung mit 4 g O₃/kg TS zeigte die stärkste Verbesserung.



Vergleich der Werke

Bei den Proben aus Werk A haben sich die deutlichsten Verbesserungen der Schlammigenschaften gezeigt, die Reduzierung der Schlammindezes fiel hier am stärksten aus. Das lässt sich dadurch erklären, dass der eingesetzte Schlamm aus Werk A vor Ozonbehandlung die schlechtesten Absetzeigenschaften aufwies und hier ein großes Verbesserungspotenzial bestand. Die Ozonbehandlung kann folglich bei bestehenden Schlammproblemen deutliche Verbesserungen bewirken. Auch bei unproblematischem Schlamm kann Ozon dessen Eigenschaften verbessern.

Dosierort

Bei Werk A zeigten sich bei der Ozonisierung von Belebtschlamm und von Rückschlamm gleich gute Effekte. Bei Werk B erscheint die Behandlung von Belebtschlamm effektiver zur Reduzierung des ISV. Bei Werk C ist dagegen die Ozonisierung von Rückschlamm zu bevorzugen.

Schlammaktivität Die Abbauleistung des eingesetzten Schlammes wurde in keinem Ansatz durch Ozon beeinträchtigt, weder hinsichtlich des CSB-Abbaus noch hinsichtlich der Stickstoffumsetzung.

Zusammenfassung

Parameter	Werk A	Werk B	Werk C
Reduzierung ISV			
Belebtschlamm	bis 37 % (10 g O ₃ /kg TS)	bis 30 % (7 g O ₃ /kg TS)	bis 4 % (15 g O ₃ /kg TS)
Rüchschlamm	bis 34 % (10 g O ₃ /kg TS)	bis 20 % (10 und 15 g O ₃ /kg TS)	bis 6 % (7 g O ₃ /kg TS)
Absetzen	Beschleunigung		
Filterierbarkeit	Beschleunigung: bis 70 % höhere Filtratmenge zu Beginn des Filtriervorgangs (10 g O ₃ /kg TS)	Beschleunigung: bis 70 % höhere Filtratmenge zu Beginn des Filtriervorgangs (1 g O ₃ /kg TS)	Beschleunigung: bis 155 % höhere Filtratmenge zu Beginn des Filtriervorgangs (15 g O ₃ /kg TS)
Ozondosis			
Belebtschlamm	Vorteil: höhere Ozondosen	kein eindeutiges Verhalten	15 g O ₃ /kg TS geeignet (4 g O ₃ /kg TS: Verschlechterung)
Rüchschlamm	Filterierbarkeit	Vorteil: höhere Ozondosen	Vorteil: geringere Ozondosen
	ISV	Vorteil: höhere Ozondosen	Vorteil: höhere Ozondosen
Ozonisierungsdauer			
Belebtschlamm	kein eindeutiger Vorteil	-	-
Rüchschlamm	längere Ozonisierung beschleunigt Filterierbarkeit, kein Einfluß auf Absetzbarkeit und ISV	-	-
Dosierort	kein eindeutiger Vorteil	Belebtschlamm	Rüchschlamm
Morphologie des Schlammes			
Belebtschlamm	-	Bildanalyse zeigt keine einheitliche Reaktion, Tendenzuelle Zunahme der freien Fäden durch Ozonbehandlung	Flockenfläche ↓ Fäden ↑ → Zerstörung der Flockenstruktur
Rüchschlamm	-		Flockenfläche ↓ Fäden ↓
Schlammaktivität	keine Beeinträchtigung durch Ozonisierung		

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundlagen

Beispielhaft soll hier die ARA einer mittelständischen Papierfabrik betrachtet werden. Die folgenden Angaben wurden dabei zugrunde gelegt:

Abwassermenge	7.000	m ³ /d
Q _{zu}	2.520.000	m ³ /a
TS _{BB}	3	g/l
Rückschlamm		
Q _{RS}	3.600	m ³ /d
TS _{RS} = TS _{ÜS}	8	g/l
RS-Menge	29	t/d
Überschussschlamm		
Q _{ÜS}	368	m ³ /d
ÜS-Menge	3	t/d

Grenzwertüberschreitungen

Schlammabsetzprobleme im Nachklärbecken biologischer Stufen führen häufig zu Schlammabtrieb. Die Folge sind neben einer erhöhten Feststoffkonzentration im Ablauf zum Vorfluter auch erhöhte CSB-Konzentrationen, da der CSB im Ablauf der ARA in der homogenisierten Probe gemessen wird. Eine Überschreitung des CSB-Überwachungswertes führt zu einer Erhöhung der Abwasserabgabekosten. Bei der beispielhaft betrachteten Papierfabrik bedeutet dies etwa eine Erhöhung von 180.000 €/a auf 275.000 €/a. Zudem drohen Strafen aufgrund der unerlaubten Gewässerverunreinigung. Die Entsorgung von entartetem Schlamm ist darüber hinaus mit Aufwand und Kosten verbunden.

Kostenvergleich

Es wurde der Einsatz verschiedener Verfahren zur Bekämpfung von Schlammproblemen bewertet. Für die Bewertung der Ozonbehandlung liegen die Ergebnisse aus den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuchen zugrunde. Für die zusätzlich betrachteten Verfahren wurden Dosiermengen aus eigenen Erfahrungen oder aus der Literatur verwendet. Die Kosten zur Schlammmentsorgung, die beim Einsatz von Talkum und FeCl₃ bzw. AlCl₃ anfallen, sind bereits berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die Kosten bei allen betrachteten Verfahren ungefähr im gleichen Bereich liegen, wobei beim Einsatz von Ozon die geringsten Kosten anfallen. Damit liegen die Kosten unterhalb der 95.000 €, die für eine erhöhte Abwasserabgabe bei Grenzwertüberschreitung aufzubringen sind.

Beschweren mit Talkum		
Dosierung Talkum	25	% TS BB
Talkum-Verlust	265	t/a
Kosten	300	€/t
	79.400	€/a
H₂O₂		
Dosierung H ₂ O ₂ 35 %ig	200	ml/m ³
H ₂ O ₂ -Bedarf	259	m ³ /a
Kosten	0,27	€/kg H ₂ O ₂ 35%ig
	69.600	€/a
FeCl₃/AlCl₃		
Dosierung	30	g/kg TS
Me-Bedarf	227	t/a
Kosten	300	€/t
	68.000	€/a
O₃		
Dosierung	5	g/kg TS _{beh}
TS _{beh}	28.800	kg/d
O ₃ -Bedarf	51,84	kg/d
Kosten	1,3	€/kg
	67.400	€/a

Außer den aufgeführten Verfahren können verschiedene Filter als Polizeifilter im Kläranlagenablauf eingesetzt werden, um den Schlammabtrieb in den Vorfluter zu verhindern. Die Betriebskosten können bis 63.000 €/a betragen, abhängig von der zu behandelnden Wassermenge, der Feststoffbelastung des zulaufenden Abwassers und des jeweiligen Filtrationssystems.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dipl.-Ing. Svenja Bierbaum
 Tel. 089/12146-144
svenja.bierbaum@ptspaper.de

Dipl.-Ing. (FH) Gabriele Weinberger
 Tel. 089/12146-463
gabriele.weinberger@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
 Heißstraße 134
 80797 München
 Tel. (089) 1 21 46-0
 Fax (089) 1 21 46-36
 e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Glossar

Glossar	ARA	Abwasserreinigungsanlage
	BB	Belebungsbecken
	CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
	CSB _{eli}	CSB-Elimination
	F	Werte im Schlammfiltrat gemessen
	GV	Glühverlust
	ISV	Schlammindex
	Lf	Leitfähigkeit
	NKB	Nachklärbecken
	oTS	organische Trockensubstanz
	O ₃	Ozon
	oTS	organischer Anteil der Trockensubstanz
	RS	Rückschlamm
	S	Werte im Schlamm gemessen
	U _H	Redoxspannung
	Q	Volumenstrom
	TKN	Kjeldahl-Stickstoff
	TS	Trockensubstanz
	ÜS	Überschussschlamm
	VS	Schlammvolumenanteil

Literaturverzeichnis

- 1 JUNG H., u. I. DEMEL, B. GÖTZ
„Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papierindustrie – Ergebnisse der Wasserumfrage 2004“
in: Wochenblatt für Papierfabrikation, 9, 2006, 478-481.
- 2 LEMMER H. und G. LIND
„Blähschlamm, Schaum, Schwimmschlamm – Mikrobiologie und Gegenmaßnahmen“
München: F. Hirthammer Verlag GmbH 2000.
- 3 LEMMER H.
„Stand der Forschung über Blähschlamm und Schwimmschlamm“
In: Verbandsbericht Nr. 539; 219. VSA-Mitgliederversammlung in Luzern, 20.09.2001.
- 4 EIKELBOOM D.H.,
„Fadenförmige Mikroorganismen in Belebtschlammanlagen mit einem hohen Anteil an Industrieabwasser“
In: Verbandsbericht Nr. 539; 219. VSA-Mitgliederversammlung in Luzern, 20.09.2001.
- 5 WEINBERGER G. u. F. SCHMID:
„Ursachen, Vermeidung und Bekämpfung von Betriebsproblemen durch Schlammertartung“
in: Mikroskopische Untersuchungen von Belebtschlamm zur Optimierung biologischer Abwasserreinigungsanlagen, Weinberger G. u. M. Reitberger (Hrsg.),
München: PTS 2003, PTS-Manuskript PTS-BM 327.
- 6 SCHWARZER H.:
„Blähschlamm bekämpfung mit Wasserstoffperoxid“
in: Wochenblatt für Papierfabrikation 1987, Jg. 115, Nr. 11/12, S. 527.
- 7 KAPPELER J., SCHÖN G., LEMMER H. u.a.:
„Einsatz von biologischen Zusatzstoffen in Kläranlagen“
Verbandsbericht Nr. 509 (1996), Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute.
- 8 SPÖRL R.:
„Verminderung des refraktären CSB im Abwasser Altpapier verarbeitender Papierfabriken durch den Einsatz mikrobiologischer Additive“, 2006
http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/97/BMWi_323_04497d6cecd5c7.pdf.