

Verbesserung der Absetz- und Eindickeigenschaften von Belebtschlämmen

H. Kroiss, R. Fenz, L. Prendl

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, TU-Wien

1 Einleitung

Im Zuge der großen Bedeutung des Belebungsverfahrens für den Gewässerschutz stand über lange Zeit die Reaktionskinetik im Belebungsbecken im Vordergrund der wissenschaftlichen Arbeiten. Insbesondere die Prozesse der Nitrifikation, Denitrifikation und der biologischen Phosphorentfernung. Für die Funktion des Verfahrens ist jedoch die Schlammabscheidung im Nachklärbecken von stets gleichbleibender Bedeutung, gewissermaßen unabhängig vom Reinigungsziel. Es hat sich deshalb auch z.B. die Arbeitsgruppe "population dynamics" der IAWQ gebildet, die sich vorrangig mit den Problemen des Zusammenhanges zwischen Prozeßführung im Belebungsbeckenbereich und den Schlammabsetz- und Eindickeigenschaften des Belebtschlammes befaßt. Man geht heute davon aus, daß die Funktion der Nachklärbecken ab Überschreitung einer bestimmten Schlammvolumenbeschickung q_{SV} nicht mehr gewährleistet ist. Diese steigt bei sonst gleichen Bedingungen linear mit dem Schlammindex ISV an, der in der Praxis in weiten Bereichen von etwa 25 bis über 1000 ml/g schwanken kann. Die Beeinflussbarkeit der Schlammabsetz- und Eindickeigenschaften stellt daher für Planung und Betrieb von Belebungsanlagen ein zentrales Anliegen dar

2 Grundlagen der Funktion von Nachklärbecken

2.1 Allgemeines

Zum besseren Verständnis der folgenden Kapitel wird versucht, die wesentlichen Kriterien für die einwandfreie Funktion von Nachklärbecken darzustellen. Insbesondere geht es darum, das Versagen der Nachklärbeckenfunktion in vereinfachter Weise herauszuarbeiten.

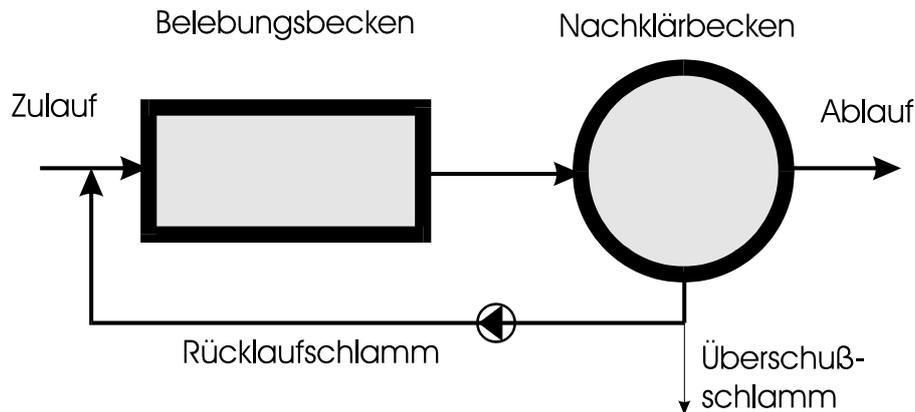


Abbildung 1: Belebungsverfahren, Fließschema

Der zulässige Schwebstoffgehalt im Ablauf von Nachklärbecken wird heute vor allem durch die niedrigen Grenzwerte für Gesamtphosphor bzw. BSB₅ bestimmt. Überschreitungen dieser Grenzwerte durch zu hohe Feststoffgehalte können prinzipiell zwei Ursachen haben, die nur teilweise gekoppelt sind:

- durch ungünstige Strömungsverhältnisse bedingter Austrag von schlecht absetzbaren Schwebstoffen (geringe Sinkgeschwindigkeit von Belebtschlammflocken, Konzentration von Strömungen bzw. Turbulenzen)
- Versagen des Nachklärbeckens durch “Überfließen” des Belebtschlammes aus dem (mit Schlamm gefüllten) Becken, weil mehr Feststoffe zufließen als über Rücklaufschlammförderung und Überschussschlammabzug abgezogen werden (mangelnde Eindickung, nicht ausreichende Raumleistung).

2.2 Erhöhte Feststoffgehalte im Ablauf durch mangelnde Flockenabscheidung

Für das Verständnis der Wirkungsweise des Nachklärbeckens muß man sich immer die Massenbilanz des Beckens vor Augen halten. Tabelle 1 zeigt den Wirkungsgrad der Feststoffabtrennung für einen üblichen Anwendungsfall bei unterschiedlichen Feststoffgehalten im Ablauf (TS_e) und Rücklaufverhältnissen (RV) (Annahme: $TS_{BB} = 4 \text{ kg/m}^3$). Der Wirkungsgrad wird definiert als:

$$\eta = 100 \cdot (Q_{ZU} + Q_{RS}) \cdot TS_{BB} / (Q_{ZU} \cdot TS_e) \quad (\%) \quad (1)$$

Tabelle 1: Abscheidewirkungsgrad eines Nachklärbeckens [%]

T _{se}	TS-Fracht zum NB	TS-Fracht im Ablauf	Abscheidewirkungsgrad η		
			RV = 70%	RV = 100%	RV = 200%
mg/l	kg/d	kg/d	%	%	%
10	8000	10	99,85	99,88	99,92
20	8000	20	99,71	99,75	99,83
40	8000	40	99,41	99,50	99,66
80	8000	80	98,82	99,00	99,33

Man sieht, daß mit steigendem Rücklaufverhältnis (RV) der Abscheidungsgrad besser werden muß, wenn gleiche Schwebstoffgehalte im Ablauf (TS_e) erreicht werden sollen. Mit steigendem Rücklaufverhältnis nimmt die Turbulenz im Nachklärbecken zu und verschlechtert damit die Voraussetzungen für einen hohen Abscheidewirkungsgrad. Aus dieser Betrachtung ergibt sich, daß eine Minimierung des Rücklaufverhältnisses anzustreben sei. Dem steht jedoch entgegen, daß eine Verringerung des Rücklaufverhältnisses zu einer Verlängerung der Aufenthaltszeit des Schlammes im Nachklärbecken führen muß, weil ein höherer Eindickgrad notwendig wird. Dies fördert die Gefahr des Schwebstoffabtriebes durch Denitrifikation (anoxische Bedingungen), die Rücklösung von biologisch fixiertem Phosphor, sowie die Blähschlammentwicklung durch das Wachstum fadenförmiger Bakterien zufolge anaerober Bedingungen. Hier muß also ein Kompromiß gefunden werden, der zumindest die Gefahr von Blähschlamm durch zu lange Aufenthaltszeiten im Nachklärbecken sicher vermeidet.

Bei nach ATV bemessenen Nachklärbecken erreichen wir heute, zumindest bei Trockenwetter, häufig Abscheidegrade von ca. 99,9%. Die Tabelle 1 zeigt nun, daß selbst bei einem Schwebstoffgehalt von 80 mg/l im Ablauf (Sichttiefe ca. 10 cm) immer noch ein Wirkungsgrad von ca. 99% auftritt. Man kann daraus schließen, daß die hier diskutierten Unterschiede im Schwebstoffgehalt des Ablaufs primär auf die Strömungsverhältnisse im Becken sowie die Absetzgeschwindigkeit der Belebtschlammflocken zurückzuführen sind und

nicht auf ein "Überlaufen" des Schlammes aus dem (mit Schlamm gefüllten) Nachklärbecken.

Zufolge der Einlauf- und der Ablaufkonstruktion kommt es bei jedem Nachklärbecken zur Ausbildung von lokalen Strömungskonzentrationen und Turbulenzen. Auch Dichteströmungen sind prinzipiell nicht zu vermeiden. Es kommt daher in der Praxis immer zu deutlich höheren lokalen Strömungsgeschwindigkeiten als sie den einfachen Modellvorstellungen der gleichmäßigen Durchströmung (z.B. Oberflächenbeschickung q_A) entsprechen. Neben dem Verhältnis von maximaler Sinkgeschwindigkeit ($\max v_S$) des Belebtschlammes zur Oberflächenbeschickung q_A werden daher die konstruktive Ausbildung und das Flockungsverhalten des Schlammes maßgebend für eine stabile niedrige Ablaufkonzentration sein.

Je größer das Verhältnis $\max v_S/q_A$ ist, desto geringer ist die Gefahr des Flockenabtreibens bei sonst gleichen Bedingungen, wenn nicht zufolge hoher Sinkgeschwindigkeit der Flocken die Neigung zu Dichteströmungen zunimmt, was leider befürchtet werden muß (KREBS 1997). Wenn die Sinkgeschwindigkeit einzelner Flocken in erster Näherung mit dem Stokes'schen Gesetz beschrieben wird, so erhöht sich die Sinkgeschwindigkeit indem man entweder die Flockung verbessert oder die Dichte der Flocken vergrößert. In der Gleichung (2) ist eine stark vereinfachte Form des Stokes'schen Gesetzes dargestellt:

$$v_S = \text{Konst.} \cdot \sqrt{(V / F) \cdot \lambda \cdot \Delta\rho} \quad (2)$$

V..Volumen der Flocke, F.. Querschnittsfläche senkrecht zur Sinkrichtung, λ .. Formbeiwert, $\Delta\rho$.. Dichteunterschied zwischen Flocke und Wasser (Ablauf)

Bei sonst gleichen Bedingungen geht sowohl die Flockenform (bzw. -größe) $(V/F) \cdot \lambda$, wie der Dichteunterschied der Flocken gegenüber Wasser $\Delta\rho$ nur gedämpft (Wurzel) in den Zusammenhang ein. Die Konstante ist von der Temperatur abhängig. Der Wert für $\Delta\rho$ von Bakterien liegt nur knapp über 0, sodaß erst größere $(V/F$ groß) und kugelförmige (λ groß) Flocken eine technisch relevante Sinkgeschwindigkeit besitzen. Eine Verzehnfachung des Flockendurchmessers führt demnach etwa zu einer Verdreifachung von v_S . In der Tabelle 2 ist der Einfluß des Dichteunterschieds $\Delta\rho$ beispielhaft dargestellt, wie er z.B. durch einen erhöhten Anteil an mineralischen Bestandteilen in der Flocke bedingt sein kann.

Eine Dichte der Flocke von $\rho=1,5$ könnte z.B. durch massive Zugabe von Gesteinsmehl (ca. 100% von TS_{BB}) zum Belebtschlamm erreicht werden. Voraussetzung für diese Wirkung wäre allerdings, daß dieses Material weitgehend in die Flocken eingebaut wird.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Dichte der Flocken und der Sinkgeschwindigkeit bei gleichbleibender Flockenform

ρ -Flocke	$\sqrt{\Delta\rho}$	Sinkgeschwindigkeit, z.B.
-	-	m/h
1,005	0,07	0,2
1,05	0,22	0,7
1,5	0,71	2,0

Blähschlamm zeichnet sich auch bei guter Flockung durch einen sehr ungünstigen Formbeiwert λ der Flocken aus, was den Widerstand beim Absetzen stark vergrößert, bzw. die Sinkgeschwindigkeit vermindert. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, daß die Stokes'sche Gleichung für kugelähnliche Teilchen entwickelt wurde, während bei Belebtschlamm weder V noch die Querschnittsfläche F definiert sind. Des weiteren berücksichtigt sie nicht die gegenseitige Behinderung der Schlammflocken. Die Formel darf also nur für qualitative Überlegungen und vorwiegend für Einzelflocken verwendet werden, wie sie im Ablauf auftreten.

Bei Schlämmen mit Neigung zu überwiegend sehr kleinen Flocken, sogenannten "pin flocs" (V/F klein), kann zufolge der geringen Sinkgeschwindigkeit ein hoher Schwebstoffgehalt im Ablauf auftreten. Bei dieser Schlammstruktur dürfte die Inkorporation von Mineralstoffen schwierig sein. Abhilfe ist hier durch Verbesserung der Flockung zu erreichen.

Der biologische Abbau im Belebungsbecken wird durch den Abtrieb schlecht absetzbarer (Einzel)flocken i.A. nicht gefährdet. Die Einhaltung der Grenzwerte für die Ablaufverschmutzung (z.B. $gesP$) wird allerdings bereits ab $TS_e \geq 20$ mg/l schwierig. Erst wenn der Verlust an Trockensubstanz in die Nähe des Überschussschlammanfalles gerät ($TS_e = 150-250$ mg/l) ist die Funktion des Belebungsverfahrens insgesamt nicht mehr gesichert.

2.3 Überlaufen von Schlamm aus dem Nachklärbecken

Schlechte Eindickeigenschaften des Belebtschlammes und/oder mangelnde Transportkapazität des Räumers im Nachklärbecken können dazu führen, daß die zufließende Feststofffracht nicht mehr zur Gänze abgeschrieben und ins Belebungsbecken zurückgeführt werden kann. Dies hat ein Überlaufen des Schlammes aus dem Nachklärbeckens zur Folge (im ungünstigsten Fall $TS_e = TS_{BB}$).

Abbildung 2 stellt die Feststoffbilanz eines Nachklärbeckens für einen stationären Betriebszustand dar.

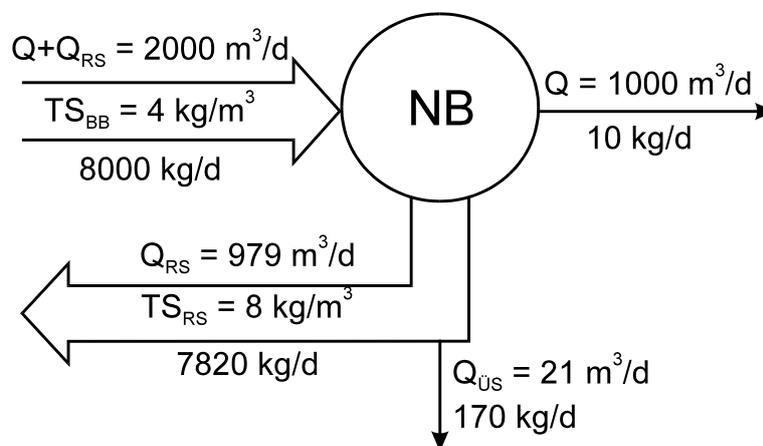


Abbildung 2: Feststoffbilanz eines Nachklärbeckens unter stationären Betriebsbedingungen (Beispiel).

Man sieht, daß sowohl die Schwebstofffracht im Ablauf (10 kg/d) als auch der Überschussschlammabzug (170 kg/d) für die Massenbilanz des Nachklärbeckens in erster Näherung vernachlässigt werden können, weil sie im Bereich der Meßgenauigkeit liegen. Die einwandfreie Funktion des Nachklärbeckens ist also primär an die Bedingung gebunden, daß der Schlamm im Nachklärbecken so weit eindickt, daß er vollständig ins Belebungsbecken zurückgefördert werden kann.

Von Interesse ist in diesem Zusammenhang auch die Feststoffverteilung in den einzelnen Becken einer Belebungsanlage in Abhängigkeit des Schlammalters (t_s). Sie ermöglicht die Beurteilung der Wirkung von Eingriffsmöglichkeiten des Betreibers (analog zu obigem Beispiel).

Die Tabelle 2 zeigt, daß nur bei geringem Schlammalter ($< 4\text{d}$) durch die Erhöhung des Überschussschlammabzuges z.B. auf das Doppelte ein nennenswerter rasch wirksamer Einfluß auf den Feststoffgehalt im Gesamtsystem ausgeübt werden kann ($TS_{\text{ÜS}}/TS_{\text{ges}}$ groß).

Bei den heute üblichen Schlammaltern von > 8d (bis 30d) kann mit dieser Maßnahme keine kurzfristig wirksame Verringerung der Schlammfrachtbeschickung des Nachklärbeckens erreicht werden ($TS_{\text{ÜS}}/TS_{\text{ges}}$ klein). Aus wirtschaftlichen Überlegungen ist es nicht sinnvoll, die Schlammbehandlungskapazität über etwa das Doppelte der mittleren Kapazität hinaus zu vergrößern. Damit sind der Erhöhung des Überschussschlammabzuges in der Praxis enge Grenzen gesetzt.

Tabelle 3: Feststofffrachten in einer Belebungsanlage ($Q_{\text{Zu}} 1000\text{m}^3/\text{d}$, $70\text{m}^3/\text{h}$, $CSB_{\text{Zu}} = 400\text{mg/l}$, $TS_{\text{BB}} = 4\text{kg/m}^3$, $I_{\text{SV}} = 120\text{ml/g}$)

t_s	$TS_{\text{ÜS}}$	V_{BB}	TS_{BB}	V_{NB}	TS_{NB}	TS_{ges}	$TS_{\text{ÜS}}/TS_{\text{ges}}$	$TS_{\text{NB}}/TS_{\text{ges}}$
[d]	[kg/d]	m^3	kg	m^3	kg	kg	%	%
1	200	50	200	166	200	400	50	50
2	190	95	380	196	250	630	30	40
4	180	180	720	226	290	1010	18	30
8	170	340	1360	270	300	1660	10	18
16	160	640	2560	300	300	2860	6	10
32	160	1280	5120	300	300	5420	3	5

Eine Verlagerung von Schlamm vom Belebungsbecken in das Nachklärbecken kann zwei Ursachen haben:

- Instationäre Erhöhung des Zulaufes, sodaß vorübergehend mehr Schlamm abgeschieden werden muß.
- Verschlechterung der Eindickeigenschaften bei sonst "stationären" Verhältnissen, sodaß der ins Becken fließende Schlamm nicht mehr vollständig rückgeführt wird.

Das Problem der Schlammverlagerung bei instationären Erhöhungen des Zuflusses (z.B. bei Regenwetter) ist bei kurzem Schlammalter (1-2 Tage) kaum problematisch, weil bei einem Schlammindex unter ca. 100 ml/g fast der gesamte Schlammgehalt des Belebungsbeckens im Nachklärbecken Platz hat.

Bei den heute üblichen Schlammaltern von 10 bis 30 Tagen führt bereits eine 10%ige Verlagerung des Belebtschlammes aus dem Belebungsbecken ins Nachklärbecken zu etwa einer Verdoppelung des Schlammgehaltes im Nachklärbecken. Wenn sich nach Erhöhung des Zuflusses (z.B. RW) nicht relativ rasch ein neues Feststoffbilanzgleichgewicht einstellt, kommt es zum Überlaufen von Schlamm aus dem Nachklärbecken. Dieses in der Praxis wohlbekannte Problem wird umso gefährlicher, je höher der Feststoffgehalt im Belebungsbecken wird (Winterbetrieb, zu geringe Schlammmentsorgungsmöglichkeit).

Eine Erhöhung der Rücklaufschlammförderung bei Regenwetter (konstantes Rücklaufverhältnis) ist dann notwendig, wenn bereits bei Trockenwetter zufolge schlechter Eindickeigenschaften und/oder hoher Feststoffgehalte des Belebtschlammes im Nachklärbecken die maximale Eindickfähigkeit erreicht werden muß, um eine vollständige Schlammrückführung zu erreichen. Es muß zusätzlich genügend Speicherraum im Nachklärbecken vorhanden sein, so daß die Eindickzeit trotz der um ca. den Faktor 2 ($Q_{RW} = 2Q_{TW}$) erhöhten Schlammfracht gleich bleiben kann. Der Räumer und die Rücklaufschlammpumpe muß zudem in der Lage sein, die erforderliche erhöhte Förderleistung für den eingedickten Bodenschlamm zu erbringen.

Wenn der Schlammindex im "stationären" Betrieb laufend ansteigt (Blähschlamm Bildung) kommt es dazu, daß zufolge mangelnder Eindickfähigkeit weniger als 100 % der zufließenden Schlammfracht rückgeführt werden kann. Schon geringfügige Unterschreitungen der 100 % führen unweigerlich zum Überlaufen des Schlammes aus dem Nachklärbecken. In diesem Falle treten nicht nur massive Überschreitungen der Grenzwerte durch hohe Feststoffgehalte (bis zu $TS_e = TS_{BB}$) auf, sondern es wird auch der biologische Abbauprozess für die gelösten Stoffe gefährdet (z.B. Verlust der Nitrifikation), weil mehr Schlamm abfließt als produziert wird, was eine Verringerung des Schlammalters zur Folge hat.

2.4 Folgerungen aus den Zusammenhängen

Die größte Gefahr für das Belevungsverfahren droht durch Blähschlammentwicklung. Sie führt praktisch immer sowohl zu einer Verringerung der Sinkgeschwindigkeit als auch der Eindickfähigkeit des Schlammes. Letztere führt auch praktisch immer zu erhöhten Aufenthaltszeiten

des Schlammes im Nachklärbecken mit all den negativen Folgen für die Schlammabscheidung .

Das primäre Bestreben für Planer und Betreiber muß es daher sein, Blähschlammentwicklung vorbeugend zu vermeiden. Für eine ganze Palette unterschiedlicher, Blähschlamm verursachender, Fadenbakterien hat sich diesbezüglich die Anwendung von Selektoren verschiedener Art bewährt.

Die Entwicklung des Blähschlammes kann jedoch nach bisherigem Wissen nicht mit Sicherheit vermieden werden. Insbesondere tritt sie bei bestehenden Kläranlagen oft nur zeitweise (saisonal) auf. Der Anstieg des Schlammindezes erfolgt meist exponentiell. Die Zunahme ist daher anfänglich sehr gering und, wenn sich die Fadenbakterien schließlich durchgesetzt haben, rasant. Für solche Fälle besteht ein dringender Bedarf nach rasch wirksamen Methoden zur Verbesserung der Absetz- und der Eindickeigenschaften, die zu keiner Beeinträchtigung der Reinigungsleistung führen.

3 Einsatz von Talk zur Verbesserung der Belebtschlammabsetz- und -eindickeigenschaften

3.1 Allgemeines

Das Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft der TU-Wien wurde von der zur Luzenac-Gruppe gehörenden Firma Naintsch-Mineralwerke beauftragt, die Wirkung von Talk zur Verbesserung der Belebtschlammabsetz- und -eindickeigenschaften zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden auf 2 Kläranlagen zuerst Standversuche im Labormaßstab durchgeführt und anschließend die Wirkung der Talkzugabe im Betrieb getestet.

Das eingesetzte Talk-Mineralpulver gehört zur Familie der Schichtsilikate und ist eine Verwachsung von Talk-Chlorit mit kleinen Mengen von Quarz (ca. 50% Talk, 47% Chlorit und 3% Quarz). Talk ist gut spaltbar, fühlt sich fettig an und dient als Rohstoff zur Herstellung von Farben, Pudern, Schmiermitteln, etc. Die Dichte beträgt ca. 2,8 t/m³ und die Härte (Mohs) 1.

3.2 Voruntersuchungen

Vor der Talkzugabe in die Belebungsanlage wurden im 1 l Standzylinder Sinkgeschwindigkeiten und Schlammvolumina nach 30 minütiger Absetzzeit

bei unterschiedlichen Talkkonzentrationen bestimmt, wobei der Belebtschlamm mit Ablauf so weit verdünnt wurde, daß sich in der verdünnten Probe nach 30 minütiger Absetzzeit Schlammvolumina zwischen 250 und 300 ml/l ergaben. Die so meßtechnisch bestimmten Werte wurden dann mit dem Verdünnungsverhältnis multipliziert um VSV und v_s zu erhalten.

Weiters wurden Eindickversuche über einen Zeitraum von 24 Stunden durchgeführt, bei denen zylindrische Behälter mit einem Durchmesser von 13,85 cm und einer Höhe von 100 cm (ca. 15 l Inhalt) mit Schlamm gefüllt wurden. Anschließend wurde über einen Zeitraum von 24 Stunden die Schlammspiegelhöhe des eingedickten Schlamms verfolgt. Auf allen Kläranlagen konnte bei diesen Vortests eine markante Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit festgestellt werden, deren Ausmaß natürlich von der gewählten Talkdosierung abhängig war (

Abbildung 3) Auffällig war die Reduzierung der Flockungszeit durch die Talkzugabe. Die Verringerung der Schlammindeces durch die Talkzugabe war im Vergleich zur Verbesserung der Sinkgeschwindigkeit geringer (siehe

Abbildung 3). Die Eindickversuche über 24 Stunden wurden nur auf einer Kläranlage durchgeführt. Die Ergebnisse dieser mehrstündigen Eindickversuche liegen ungefähr im Bereich der Ergebnisse der Versuche im 1l Standzylinder.

Tabelle 4: Sinkgeschwindigkeit v_s und Schlammvolumen VSV bei unterschiedlichen Talkgehalten

ARA / %Talk	v_s (m/h)				VSV (ml/l)				TS _{BB}	Verd.
	0	25	50	100	0	25	50	100		
ARA-A	1,50	2,00	2,50		360	300	250		2,0	1:2
ARA-B	1,10	1,45	1,80	2,25	580	490	430	360	3,0	1:2

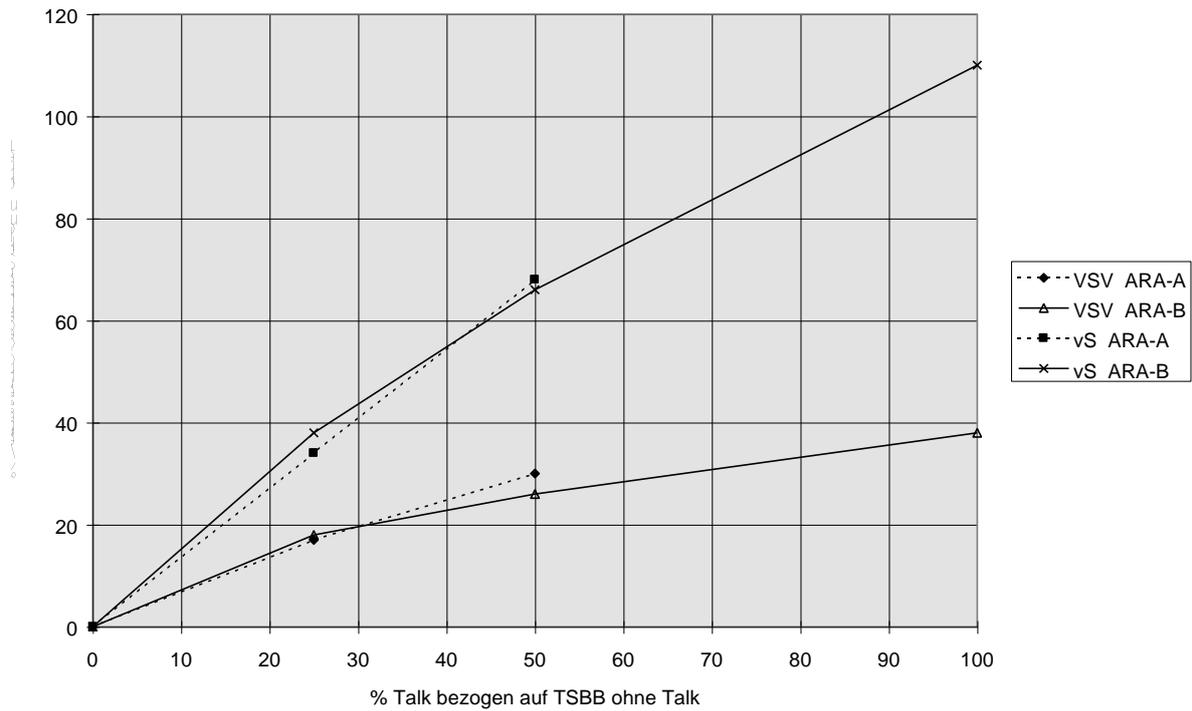


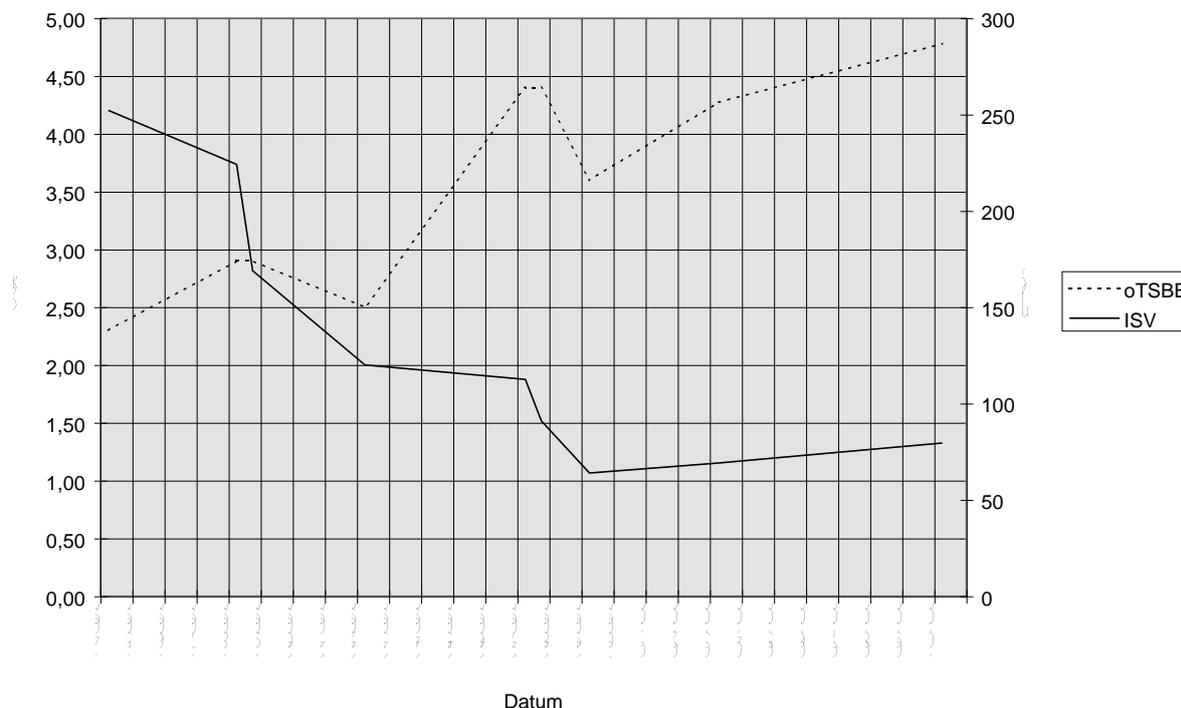
Abbildung 3: Verbesserung der Sinkgeschwindigkeit v_S und des Schlammvolumens VSV bei verschiedenen Talkgehalten (bezogen auf TS_{BB} ohne Talk)

3.3 Talkeinsatz auf der Kläranlage

Bei der Kläranlage A (Stadtgemeinde Weiz, 25.000 EW), handelt es sich um eine nur für Kohlenstoffabbau ausgelegte, einstufige Belebungsanlage mit Vorklärung (Schlammalter: 3 Tage). Sie verfügt über 2 Straßen mit völlig voneinander getrennten Schlammkreisläufen, so daß die Wirkung der Talkzugabe im Vergleich zu einer talkfreien Straße getestet werden konnte. Ziel der Versuche auf der Kläranlage A war, die Übertragbarkeit der Labortests auf Großanlagen zu überprüfen. Dieses Ziel wurde im Wesentlichen erreicht. Die bei den Voruntersuchungen festgestellten Verbesserungen der Belebtschlammabsetz- und -eindickeigenschaften wurden im Betrieb bestätigt. Bei 50% Talkgehalt wurde eine 60% Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit und eine 30% Reduktion des Schlammindex im Vergleich zur talkfreien Straße registriert. Auch die Schlammspiegelhöhe in der Nachklärung wurde in der Straße, in der Talk zudosiert wurde, deutlich verringert. Bei der Beurteilung der Schlammstruktur mittels optischen Mikroskopes konnte aber keine Veränderung der Schlammstruktur durch die Talkzugabe nachgewiesen werden. Die Oberflächenbeschickung q_A ($m^3/m^2 \cdot h$) der Nachklärung war ausreichend

gering, so daß es während der Versuchszeit, trotz des ungünstigen Schlammindezes (ISV= 200-250 ml/g), auch ohne Talkzugabe zu keinem nennenswerten Flockenabtrieb kam. Eine Verbesserung der Reinigungsleistung war daher nicht zu erwarten. Anhand des oTS/TS-Verhältnisses im Belebtschlamm aber auch in Proben, die vom Nachklärbeckenboden entnommen wurden, konnte nachgewiesen werden, daß die zugegebene Talkmenge wirklich in den Schlamm eingelagert wurde und daß es während des Eindickvorgangs im Nachklärbecken zu keiner Entmischung von Schlamm und Talk kam.

Im Gegensatz zur Kläranlage A kam es auf der Kläranlage B vor der Talkzugabe regelmäßig zu Schlammabtrieb und damit auch zu einer Beeinträchtigung der Reinigungsleistung. Es handelt sich um eine zweistufige Containerkläranlage (200 EW), in der die Abwässer eines Kurhotels gereinigt werden, wobei das Schlammalter in der 1.Stufe (Vorstufe) ca. 0,5 Tage betragen soll und in der 2.Stufe (Hauptstufe) 8-10 Tage. Die Kläranlage ist also für Nitrifikation ausgelegt. Aufgrund des wiederholt auftretenden Schlammabtriebes konnte aber das für die Nitrifikation erforderliche Schlammalter nicht erreicht werden. Ziel der Versuche auf dieser Kläranlage war daher, die Bekämpfung eines akuten Falles von Schlammabtrieb und die damit einhergehende Beeinträchtigung des Reinigungsergebnisses, mit Talkzugabe zu erproben. Begonnen wurde mit einer stoßartigen Talkdosierung in die Hauptstufe. 1 Stunde nach der Zugabe lag der Talkgehalt bei 80% bezogen auf TS_{BB} vor Talkzugabe. Dieser Gehalt wurde in den Wochen danach durch tägliche Dosierung konstant gehalten. Die Verbesserung der Sinkgeschwindigkeit (knapp 100%) und des Schlammvolumens (ca. 40%) unmittelbar nach der stoßartigen 1.Dosierung entsprachen den Ergebnissen der Voruntersuchungen. In den Tagen danach sank der Schlammindezes aber noch weiter, deutlicher als es die Vorversuche erwarten ließen. Vor der Talkzugabe lag der Index bei 250 ml/g, 14 Tage später lagen die Werte konstant unter 100 ml/g. In den Tagen nach der ersten Talkzugabe stieg der oTS-Gehalt in der Hauptstufe deutlich an, es konnte also ein höheres Schlammalter in der Belebung gehalten werden, was zu einer stabilen Nitrifikation führte. Auch die Flockenstruktur wurde eindeutig kompakter und die Fädigkeit ging, zwar nicht vollständig, aber deutlich zurück (dominierende Fäden: 021N und Thiotrix).



der Nachklärung schon vor der Talkzugabe ausreichend groß, so daß durch die Talkzugabe keine Verringerung des Flockenabtriebes mehr erreichbar war. Durch die deutliche Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit und die Verringerung der Schlamm Spiegelhöhe wurde aber die Sicherheit gegenüber Schlammabtrieb deutlich erhöht. Auf der Kläranlage B konnte der Schlammabtrieb sofort gestoppt, und ein weitgehend schwebstofffreier Ablauf erreicht werden.

Weniger ausgeprägt war die Verringerung des Schlammvolumens. Trotzdem konnte auf der Kläranlage B durch die Verbesserung der Eindickeigenschaften und des damit möglichen erhöhten Feststoffgehaltes in der Belebung, das Schlammalter deutlich erhöht werden. Bei Kläranlagen, deren Schlammalter für eine stabile Nitrifikation im Winter gerade nicht reicht, kann die Talkzugabe daher ein effizientes Hilfsmittel sein um ein ausreichendes Schlammalter über einen gewissen Zeitraum zu erreichen.

Eine direkte Wirkung der Talkzugabe auf die Schlammstruktur (indem z.B. die Talkteilchen als Aufwuchsfläche dienen) konnte nicht beobachtet werden. Eine Verringerung der fadenförmigen Bakterien und damit eine Verbesserung der Schlammstruktur ist daher nur zu erwarten, wenn die Ursachen der Blähschlamm bildung (wie zu lange Aufenthaltszeit in der Nachklärung oder z.B. Schlammalter bei 3-4 Tagen) bekämpft werden (Kläranlage B).

Es konnte weiters gezeigt werden, daß die Ergebnisse von Standversuchen im Labormaßstab (1 l Standzylinder) gut auf Betriebsverhältnisse übertragbar sind, so daß die Höhe der erforderlichen Talkdosierung (50 bis 100%) im Vorhinein abgeschätzt werden kann. Die Dosierung muß immer auf den Gesamtschlammgehalt (BB + NB) bezogen werden. Rasche Hilfe bei Schlammabtrieb ist nur durch rasche hohe Dosierung zu erreichen.

Vor allem bei Kläranlagen, die zu bestimmten Zeiten des Jahres mit Schlammabtrieb zu kämpfen haben (z.B. während der Weinlese) dürfte der Talk Einsatz eine sehr hilfreiche Maßnahme sein. Man wird im Einzelfall prüfen müssen, ob der Talk Einsatz billiger ist als andere (z.B. konstruktive) Maßnahmen. Wichtig sind jedenfalls geeignete Dosiereinrichtungen und eine gute Logistik um im Bedarfsfall rasch als „Blähschlammfeuerwehr“ reagieren zu können.

Bei allen Blähschlammereignissen, die zu Schlammabtrieb führen, kann nach den vorliegenden Ergebnissen eine sofortige Verbesserung bezüglich Schlammabtreiben und Stabilisierung des Schlammhaushaltes erwartet werden ohne daß eine Beeinträchtigung der Reinigungsleistung durch Chemikalien erforderlich ist.

4 Blähschlammvermeidung mit aerobem Selektor

4.1 Ursache der Blähschlammmentstehung

Die Biozönose in einem Belebtschlammssystem befindet sich in einem Fließgleichgewicht und paßt sich ständig an die aktuellen Umweltbedingungen im System an. In einem Belebtschlamm können nur jene Organismen in großer Zahl auftreten, die aufgrund ihrer physiologischen Eigenschaften im vorliegenden System konkurrierenden Organismen gegenüber das vorhandene Substrat am besten erreichen und für ihr Wachstum verwerten können. Arten, für die weniger optimale Wachstumsbedingungen vorliegen, werden durch Selektion zurückgedrängt oder verschwinden ganz aus dem System. Die Abwasserbeschaffenheit, die Betriebs- und Verfahrensweise sowie Randbedingungen wie Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffversorgung usw. haben daher einen maßgeblichen Einfluß auf die Artenzusammensetzung im Belebtschlamm. Zu einer Blähschlammmentwicklung kommt es immer dann, wenn sich eine oder mehrere fadenbildende Arten aufgrund der vorliegenden System- und Substratbedingungen gegenüber flockenbildenden Arten durchsetzen können.

4.2 Blähschlammvermeidung mit aerobem Selektor

Fast alle fadenbildenden Arten können sich nur dann gegenüber flockenbildenden Arten in für eine Blähschlammmentwicklung relevanter Anzahl durchsetzen, wenn leicht abbaubare gelöste Abwasserinhaltsstoffe wie niedermolekulare Kohlenhydrate und kurzkettige organische Säuren für die Fadenbildner zur Verfügung stehen. Eine Möglichkeit, den Fadenbildnern den Zugang zum leicht abbaubaren Substrat erheblich zu erschweren, ist die Einrichtung eines aeroben Selektors.

Nach den Untersuchungen von LEMMER (1990) und der umfassenden Literaturstudie von LEMMER (1992) können die Fadenbildner bezüglich ihrer Bekämpfung wie folgt charakterisiert werden:

- Fadenbildner, die mit einem aeroben Selektor beherrschbar sind, dazu gehören blaualgenähnliche Fadenorganismen, *Haliscomenobacter hydrossis*, *Leucothrix*, *Microthrix parvicella*, *Nostocoida limicola*, *Sphaerotilus natans*, Typ 0092, Typ 0961
- Fadenbildner, die mit einem aeroben Selektor beherrschbar sind, wo jedoch Fälle bekannt sind, wo trotz Einrichtung eines Substratgradienten oder eines

Selektors eine starke Fadenentwicklung beobachtet wurde, dazu zählen *Thiothrix*, Typ 0041, Typ 021N, Typ 0675, Typ 1701

- Fadenbildner, die mit Selektoren nicht unterdrückbar sind, dazu zählen vor allem die Actinomyceten (*Nocardia*)
- Fadenbildner, die sich durch Vorbelüftung des Abwassers zur Oxidation der reduzierten Schwefelverbindungen verdrängen lassen, dazu zählen *Beggiatoa*, *Thiothrix* und möglicherweise 021N.

Eigene Untersuchungen haben gezeigt, daß der häufig auftretende Fadenbildner Typ 021N mit aeroben Selektoren gesichert unterdrückbar ist, wenn die im weiteren Verlauf dieses Beitrages beschriebenen Randbedingungen eingehalten werden. Derzeit laufende Untersuchungen einer Belebungsanlage einer Papierfabrik weisen darauf hin, daß die Fadenbildner Typ 0041 und Typ 1701 mittels aerobem Selektor in ähnlicher Weise beherrschbar sind wie der Typ 021N

4.3 Substratelimination im aeroben Selektor

Wird Belebtschlamm dem zyklischen Wechsel von kurzzeitigem Substratüberschuß und lange andauerndem Substratmangel ausgesetzt, wie dies im Belebungsverfahren mit aerobem Selektor der Fall ist (Abbildung 5), wird in sehr kurzer Zeit ein erheblicher Teil des im Zulauf befindlichen CSB in den Belebtschlamm eingebunden. Dieses Phänomen ist nicht neu.

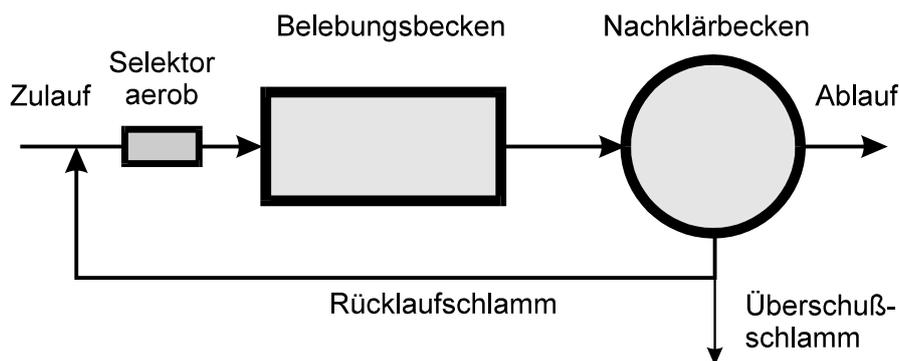


Abbildung 5: Belebungsverfahren mit Selektor, Fließschema

Bereits bei den ersten Laborversuchen und Versuchen im halbtechnischen Maßstab zur Entwicklung des aeroben Reinigungsverfahrens für Zuckerfabriksabwasser (KROISS 1981) kam es zu Blähschlammbildungen. Nach Ergänzung des Systems mit einem Selektor mit 2,5 % des Belebungsbeckenvolumens und der Sicherstellung der Stickstoff- und Phosphorversorgung trat kein weiteres Blähschlammereignis auf.

Aus der CSB-Bilanz der technischen Versuchsanlage mit

$$OVC + CSB\text{-}\ddot{U}S = \eta CSB \quad (3)$$

ergibt sich folgendes Bild:

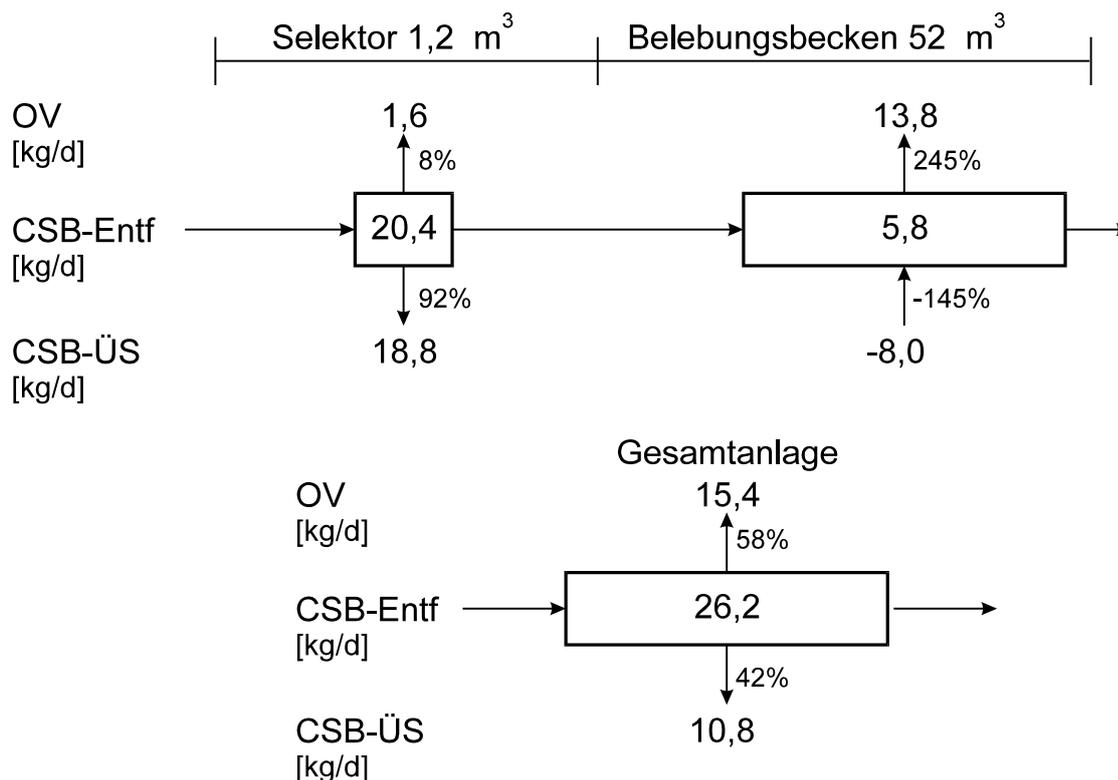


Abbildung 6: CSB-Bilanz, Versuchsanlage 1976

Ca. 70% des im Zulauf befindlichen CSB werden im Selektor bei einer Verweilzeit von ca. 5 Minuten entfernt. Im Belebungsbecken werden nur die restlichen ca. 20 % der Zulauffracht entfernt. Die CSB-Entfernung der gesamten Belebungsanlage beträgt knapp über 90%. Der Sauerstoffverbrauch im Selektor beträgt nur 8% des im Selektor entfernten CSB, 92 % werden in den Schlamm eingelagert.

Auf Basis der Pilotversuche wurde die Großanlage der Zuckerfabrik Leopoldsdorf errichtet und 1983 in Betrieb genommen. Die Versuchsergebnisse konnten sowohl hinsichtlich der CSB-Bilanz als auch der Blähschlammvermeidung über zehn Jahre hinweg verifiziert werden.

Mit steigender Belastung der Anlage und mit Veränderungen der Abwasserbeschaffenheit als Folge der Schließung des Wasserkreislaufes trat

erneut Blähschlamm, verursacht durch massenhafte Entwicklung des Fadenbildners 021N, auf. Im Zuge der Untersuchungen zur Lösung des Blähschlammproblems wurde festgestellt, daß Blähschlamm immer dann auftritt, wenn gelöstes leicht abbaubares Substrat (im gegenständlichen Fall Zucker sowie Milch-, Essig-, Propion- und Buttersäure) im Selektor nicht vollständig aus der flüssigen Phase entfernt wurde.

Lösungsansatz:

Es wurde daher angenommen, daß Blähschlammentwicklung durch den Fadenbildner 021N verhindert werden kann, wenn es gelingt, den Selektor so zu gestalten, daß das leicht entfernbare Substrat im Selektor sicher weitgehend aus der flüssigen Phase eliminiert wird.

4.4 Einflußfaktoren auf die Substratelimination im Selektor

4.4.1 Sauerstoffverbrauch für die Substratelimination im Selektor

Bei der Substratelimination in einer hochbelasteten Kontaktzone mit einer Aufenthaltszeit von 5 bis 10 Minuten, bezogen auf Abwasserzufluß und Rücklaufschlammmenge kann davon ausgegangen werden, daß die Hydrolyse des partikulären CSB in der zur Verfügung stehenden Zeit vernachlässigbar ist, ebenso der Sauerstoffbedarf für die Elimination von Hydrolyseprodukten. Weiters kann angenommen werden, daß das schwer abbaubare gelöste Substrat innerhalb von 5 bis 10 Minuten nicht angegriffen wird. Der Sauerstoffverbrauch im Selektor ergibt sich aus der Grundatmung des Schlammes und dem Sauerstoffverbrauch für die Elimination des leicht abbaubaren gelösten Substrates. Der Sauerstoffverbrauch für die Substratelimination im Selektor errechnet sich zu:

$$a_{CSB} = \frac{OVC - OVG}{v_{ges}} \quad (g O_2/gCSB)(4)$$

a_{CSB}	spezifischer Sauerstoffverbrauch für die Entfernung der Kohlenstoffverbindungen (g O ₂ /gCSB)
OVC	aktuelle Kohlenstoffatmung (g O ₂ /(m ³ .h))
OVG	Kohlenstoffgrundatmung (g O ₂ /(m ³ .h))
v_{ges}	Substratentfernungsgeschwindigkeit (g CSB/(m ³ .h))

a_{CSB} ist von der Substratbeschaffenheit und dem damit verbundenen Abbauverhalten abhängig. Für die Elimination von Zucker in den Selektoren der Zuckerfabrikskläranlagen in Leopoldsdorf und Hohenau ist ein Sauerstoffverbrauch von 5 bis 8 % des entfernten CSB erforderlich. Kommt es zu einer weitgehenden Versäuerung des Abwassers im Vorklärbecken und Erdkassetten, dann liegt das leicht abbaubare gelöste Substrat als Gemisch aus Milch-, Essig-, Propion- und Buttersäure vor. In diesem Fall tritt für die Elimination des leicht abbaubaren gelösten Substrates ein deutlich höherer spezifischer Sauerstoffverbrauch von 10 bis ca. 30 % auf.

4.4.2 Substratentfernungsgeschwindigkeit im Selektor

Für die weiteren Betrachtungen wird die spezifische Substratentfernungsgeschwindigkeit $q = v_{ges}/oTS$ (g CSB/(g oTS.h)) eingeführt. Betrachtet man den spezifischen Sauerstoffverbrauch für die Substratelimination a_{CSB} als Maß für die Substratbeschaffenheit, dann ergibt sich zwischen a_{CSB} und q folgender Zusammenhang:

$$q = \frac{v_{ges}}{oTS} = \frac{OV - OVG}{a_{CSB} \cdot oTS} \quad (5)$$

Geht man davon aus, daß für die Entfernung des nicht versäuerten gelösten Substrates ein spezifischer Sauerstoffbedarf a_s von 7 % und für die Entfernung der Säuren ein spezifischer Sauerstoffbedarf a_z von 22 % erforderlich sind, dann gilt bei limitierter Sauerstoffzufuhr folgende Beziehung:

$$q = \frac{\frac{OV - OVG}{a_z} \cdot \left(1 - \frac{CSB_s}{CSB_{gel}}\right) + \frac{OV - OVG}{a_s} \cdot \left(\frac{CSB_s}{CSB_{gel}}\right)}{oTS} \quad (6)$$

Die Gleichung (6) ist für eine Sauerstoffzufuhr von 370 mg/(l.h), einem OVG von 40 mg/(l.h) und einem oTS-Gehalt von 4,5 g/l, den typischen Randbedingungen, wie sie im Selektor der BARA Leopoldsdorf seit 1994 und in der ersten Kaskade des Selektors der BARA Hohenau auftreten, ausgewertet und in Abbildung 7 graphisch dargestellt. Die zum Vergleich eingetragenen Datenpunkte stammen von CSB-Bilanzen unter sauerstofflimitierten Bedingungen mit einer konstanten Sauerstoffzufuhr von 370 mg/(l.h) und einer Schlammkonzentration von 3,5 bis 5,0 g oTS/l und zeigen eine brauchbare Übereinstimmung mit der Auswertung nach Gleichung (6).

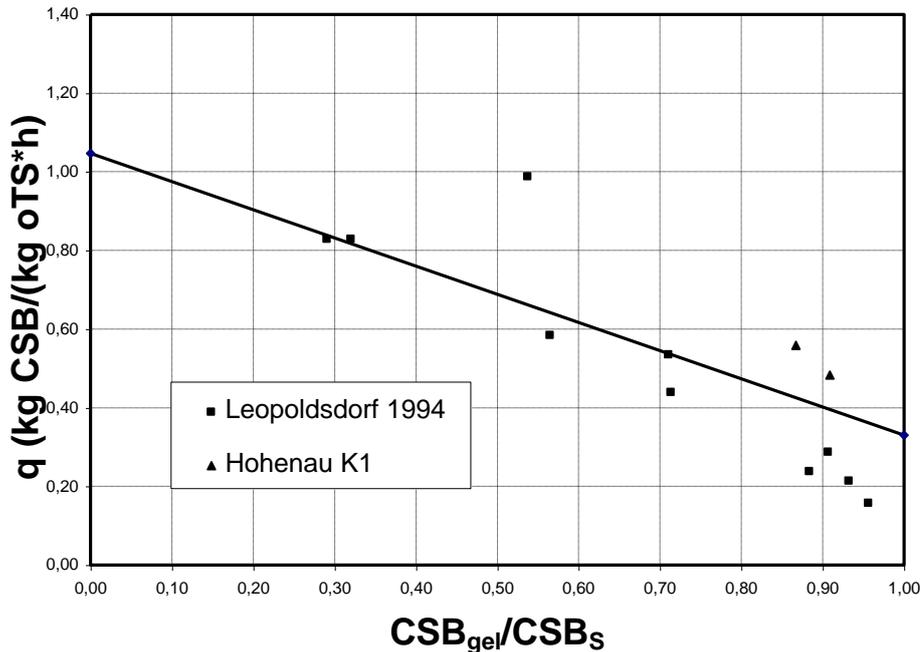


Abbildung 7: Substratentfernungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Anteils an organischen Säuren bezogen auf das entfernte S_s

Mit steigendem Versäuerungsgrad des Abwasser steigt der Sauerstoffbedarf für die Substratelimination im Selektor, und die spezifische Substratentfernungsgeschwindigkeit q wird kleiner. Damit das leicht abbaubare gelöste Substrat im Selektor vollständig entfernt werden kann, ist mit steigendem Versäuerungsgrad des Abwassers eine steigende Sauerstoffzufuhr im Selektor und eine höhere Aufenthaltszeit im Selektor erforderlich. Belebtschlamm, der an ein System mit aerobem (belüftetem) Selektor adaptiert ist und nicht regelmäßig unter anaeroben Bedingungen mit leicht abbaubarem Substrat in Kontakt kommt, wie dies in Bio-P Anlagen der Fall ist, ist ohne Sauerstoffversorgung nicht in der Lage, leicht abbaubares Substrat aus der flüssigen Phase zu eliminieren.

4.4.3 Wachstum und Speicherung im Selektor

Aus der CSB-Bilanz über den Selektor wie über die gesamte Anlage ergibt sich, daß im Selektor nur ein kleiner Teil des eliminierten CSB tatsächlich abgebaut wird. Der überwiegende Teil des gelösten leicht abbaubaren Substrates wird wahrscheinlich zellintern gespeichert. Als Beispiel wird die CSB-Bilanz der BARA der Zuckerfabrik Hohenau (Abbildung 8) für einen annähernd stationären Betriebszustand im November und Dezember 1995 mit einer Bilanzierungsdauer von 40 Tagen angeführt.

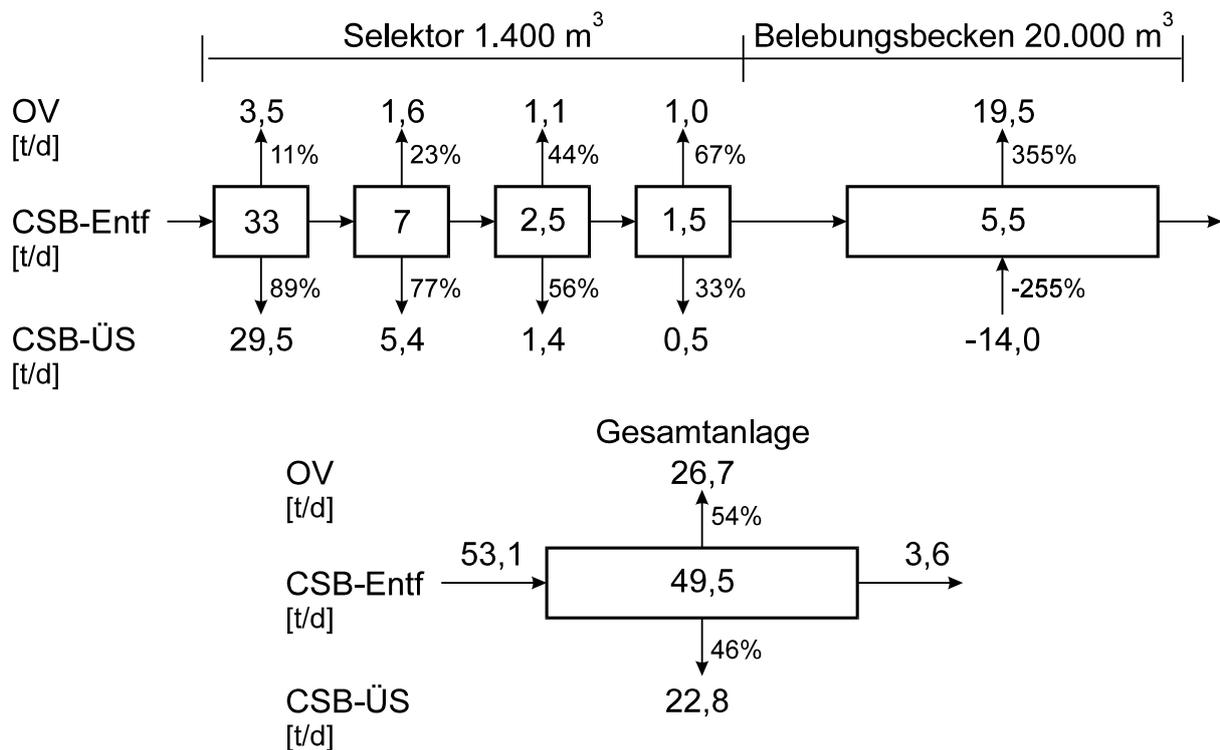


Abbildung 8: CSB-Bilanz der BARA Hohenau November bis Dezember 1995

Anhand des Stickstoffverbrauches im Selektor kann man abschätzen, daß die Bakterien ihren Baustoffwechsel im Selektor gegenüber dem Belebungsbecken nicht wesentlich beschleunigen, und nur 15 bis 20 % des im Selektor entfernten Substrates über Wachstumsvorgänge abgebaut werden (PRENDL 1997).

VAN LOOSDRECHT et al. (1996) beschreiben die zellinterne Speicherung von Polymeren wie Polyhydroxybuttersäure (PHB) oder Glycogen als internen Substratspeicher. Glycogen ist als Speichermedium von Bedeutung, wenn für den speichernden Bakterientyp Glycogen im Stoffwechsel eine entscheidende Rolle spielt, oder Zucker im Abwasser vorhanden ist. Bakterien, die zu dieser Speicherung mit hoher Geschwindigkeit fähig sind, müssen ihr Wachstum nicht an das momentan verfügbare Substratangebot anpassen, und können auf dem gespeicherten Substrat gleichmäßig wachsen, auch wenn kein externes Substrat zur Verfügung steht. Die zur Speicherung fähigen Bakterien haben in Regimen mit zyklischem Wechsel zwischen Substratüberschuß und Substratmangel (z.B. Anlagen mit Selektor oder SBR-Anlagen) einen großen Vorteil, und verdrängen die nicht zur Speicherung fähigen Bakterien. Die Speicherung kann unter anaeroben, anoxischen und aeroben Bedingungen erfolgen. Die Energie für die Speicherung des gelösten CSB in der Zelle wird durch Oxidation eines kleinen Teiles des gelösten CSB unter aeroben oder anoxischen Bedingungen gewonnen. Beim anaeroben Selektor wird die Energie durch Hydrolyse von

Polyphosphat gewonnen. Das bedeutet aber nicht, daß jede zur Speicherung fähige Art unabhängig von der Sauerstoffversorgung Substrat speichern kann.

Der spezifische Sauerstoffbedarf für die Elimination des gelösten leicht abbaubaren Substrates im Selektor aus der flüssigen Phase ist ein Maß für den Energiebedarf zur Umsetzung des im Abwasser enthaltenen leicht abbaubaren Substrates in zellinterne Speicherstoffe.

4.4.4 Speicherkapazität und Substratentfernung nach Stoßbelastung, maximale Speicherkapazität

Nach extremen Stoßbelastungen wurde festgestellt, daß im Selektor der BARA Leopoldsdorf sehr wenig Substrat entfernt wurde. Der Sauerstoffverbrauch und die entfernte CSB-Fracht weisen darauf hin, daß das entfernte Substrat sofort abgebaut wurde und keine Speicherung stattgefunden hat. Aus der Zulauffracht und dem aus der Sauerstoffzufuhr errechneten Abbau ergibt sich, daß im gesamten Belebtschlamm bis zu 0,3 g CSB je g oTS gespeichert wurden. Eine Erhöhung der CSB-Ablaufkonzentration konnte bei diesem Ereignis nicht beobachtet werden. Die Speicherkapazität war dabei weitgehend erschöpft, aber noch nicht überschritten. KROISS (1981) berichtet von Stoßbelastungsversuchen in der technischen Versuchsanlage in Leopoldsdorf, bei denen bis zu 0,28 g CSB je g oTS gespeichert wurden. DOHANYOSOS et al. (1971) stellt fest, daß bei Belebtschlamm, der nur einmal täglich in Form einer Stoßbelastung mit Glukosesubstrat versorgt wird, bis zu 400 mg Polysaccharid/g TS gespeichert werden. Bei einem Gemisch aus Pepton und Glukose wird eine maximale Speicherkapazität von 300 mg Polysaccharid/g TS erreicht. HATZICONSTANTINOUS und ANDREADAKIS (1996) geben an, daß bei Standversuchen unter aeroben Bedingungen bis zu 450 mg CSB je g TS innerhalb von 15 Minuten aufgenommen werden, wobei als Substrat Saccharose verwendet wurde.

4.4.5 Einfluß des Schlammalters und der Schlammbelastung auf die Substratelimination im Selektor

Die Aktivität des Belebtschlammes, ausgedrückt als Menge an aktiver Biomasse oder bestimmt über die Maximalatmung, ist eine Funktion des Schlammalters. Mit sinkendem Schlammalter nimmt die Speichergeschwindigkeit und vermutlich auch Speicherkapazität des Belebtschlammes zu. Dem steht jedoch gegenüber, daß die Speicherkapazität des Schlammes begrenzt ist. Mit sinkendem Schlammalter kann aber das im Selektor gespeicherte Substrat im

Belebungsbecken nicht mehr abgebaut werden, sodaß im Selektor keine weitere Speicherung mehr auftritt.

Bei den Untersuchungen in Leopoldsdorf bei einer Belebungsbeckentemperatur von ca. 18 °C wurde festgestellt, daß bei einem Schlammalter unter 5 Tagen oder einer CSB-Schlammbelastung über 0,3 bis 0,4 kg CSB/(kg.d) im Selektor keine Substratelimination durch Speicherung auftritt. Dagegen wurde in Hohenau bei einer Belebungsbeckentemperatur von ca. 28 °C und sonst vergleichbaren Verhältnissen erst bei einer Schlammbelastung über 0,5 kg CSB/(kg.d) und einem Schlammalter unter 4 Tagen eine Verringerung der Speicherung im Selektor festgestellt. Nach den Untersuchungen von DOHANYOS *et al.* (1971) erreicht die Speicherkapazität bei einem Schlammalter von ca. 10 Tagen ihren Höhepunkt. Bei einem Schlammalter unter 5 Tagen nimmt die Speicherkapazität sehr rasch ab. Diese Ergebnisse stehen auch mit den Untersuchungen von EIKELBOOM, (1982) im Einklang, wo festgestellt wurde, daß ab einer BSB₅-Schlammbelastung von 0,5 kg/(kg.d) die Biosorption deutlich abnimmt, weil der Speicher nicht mehr abgebaut werden kann.

4.4.6 Nährstoffversorgung und Substratelimination

Die zellinterne Substratspeicherung unter aeroben Bedingungen ist unabhängig von der Verfügbarkeit von Stickstoff. Für den Abbau des Speicherstoffe ist eine ausreichende Stickstoff- und Phosphorversorgung unerlässlich. Bei Stickstoff- oder Phosphormangel kann der Speicher nicht abgebaut werden und der Selektor verliert wie bei zu geringem Schlammalter bzw. zu hoher Schlammbelastung an Wirksamkeit

4.4.7 Adaptierung des Schlammes an den Selektorzyklus

Belebtschlamm, der an den zyklischen Wechsel von Substratüberschuß und Substratmangel nicht adaptiert ist, zeigt kein ausgeprägtes Speicherverhalten. Wird eine Belebungsanlage durch einen Selektor ergänzt, dauert es 1 bis 2 Schlammalter, bis der Belebtschlamm ausgeprägte Speichereigenschaften entwickelt. Bakterien, die effektiv Substrat speichern können, haben bei zyklischem Wechsel von Substratüberschuß und Substratmangel einen bevorzugten Zugang zum verfügbaren Substrat und reichern sich in einem Selektorsystem an.

Die Substratelimination durch Speicherung läuft bei einem Belebtschlamm mit guten Speichereigenschaften ca. 3 bis 10 mal schneller ab als der Abbau des Substrates bei maximaler Wachstumsrate.

4.5 Grundsätze für die Dimensionierung und Gestaltung eines aeroben Selektors

Damit das leicht abbaubare Substrat im Selektor möglichst vollständig entfernt werden kann, müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- Die Aufenthaltszeit des Rücklaufschlamm-Abwassergemisches muß so groß gewählt werden, daß bei maximaler Belastung mit leicht abbaubarem Substrat auch bei niedriger Substratentfernungsgeschwindigkeit das leicht abbaubare Substrat möglichst vollständig eliminiert werden kann. Damit wird den Fadenbildnern die Möglichkeit genommen, sich im Belebungsbecken zu vermehren.
- Die Substratelimination darf nicht durch Sauerstoffmangel eingeschränkt werden. Wenn die Substrateliminationsgeschwindigkeit durch die Sauerstoffzufuhr begrenzt ist, muß dies bei der Selektorgroße berücksichtigt werden.
- Die Konzentration an leicht abbaubarem Substrat soll möglichst hoch sein. Bei einer zu großen Aufenthaltszeit im Selektor bei zu geringer Substratkonzentration kann es bereits im Selektor zu einer unerwünschten Vermehrung der Fadenbildner kommen. Daraus ergibt sich die Forderung, den Selektor in mehrere Kaskaden zu unterteilen und die Rücklaufschlammförderung nach oben hin zu begrenzen.
- Die Speicherkapazität des Schlammes darf nicht überschritten werden, woraus sich eine minimale Rücklaufschlammmenge ergibt.
- Der Schlamm muß die Möglichkeit haben, den Speicher zu regenerieren daraus, ergibt sich die Begrenzung der Schlammbelastung und ein minimales Schlammalter.

4.6 Bemessung eines aeroben Selektors:

Das erforderliche Selektorvolumen kann nach Gleichung 8 berechnet werden:

$$V_{\text{SEL}} = \frac{\Delta S_s}{o\text{TS}_{\text{SEL}} \cdot q_{\text{min(SS, OV)}}} \quad (8)$$

V_{SEL} erforderliches Selektorvolumen (m^3)

ΔS_s Fracht an leicht abbaubarem Substrat, die im Selektor entfernt werden soll (kg CSB/h)

$o\text{TS}_{\text{SEL}}$ organische Trockensubstanz im Selektor (kg/m^3)

$q_{\text{min(SS, OV)}}$ minimale zu erwartende spezifische Substrateliminationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration an leicht abbaubarem Substrat und der Sauerstoffversorgung ($\text{kg CSB}/(\text{kg oTS}\cdot\text{h})$)

Anmerkung:

Die Bestimmung des leicht abbaubaren Substrates über die Atmungsmessung führt bei Belebtschlämmen mit guten Speichereigenschaften, wie dies bei Belebungsanlagen mit Selektor der Fall ist, zu einer deutlichen Unterschätzung des leicht abbaubaren Substrates. Die Bestimmung des leicht abbaubaren Substrates nach PRENDL (1997) führt zu brauchbaren Ergebnissen.-

Grundsätzlich sollte die gesamte Rücklaufschlammmenge über den Selektor geführt werden. Dann entspricht die Schlammkonzentration im Selektor der Schlammkonzentration im Belebungsbecken. Die Schlammkonzentration ergibt sich aus der herkömmlichen Bemessung von Belebung und Nachklärung. Wenn keine genauere Bestimmung möglich ist, kann der organische Schlammanteil bei Eintrag von mineralischen Feinteilen in die Belebung mit 40 bis 50 %, sonst mit 60 bis 70 % angesetzt werden.

Die versuchstechnische Bestimmung der spezifischen Substrateliminationsgeschwindigkeit führt nur dann zu Werten, die für die Selektordimensionierung herangezogen werden dürfen, wenn Belebtschlamm vorhanden ist, der an das Selektorsystem und das Abwasser adaptiert ist. Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn bei einer bestehenden Anlage der Selektor optimiert werden soll oder eine Versuchsanlage betrieben wird. Bei Untersuchungen mit einem an ein Selektorsystem adaptierten, jedoch an das Abwasser nicht oder nicht optimal adaptierten Schlamm, muß mit einer Unterschätzung der Substrateliminationsgeschwindigkeit gerechnet werden, die zu einer

Überdimensionierung des Selektors führen kann. Durch Unterteilung des Selektors in mehrere Kaskaden kann man dem entgegenwirken.

Für $q_{\min(SS, OV)}$ kann für Zuckerfabriksabwasser bei einer Konzentration an leicht abbaubarem Substrat von über 50 mg CSB/l in der ersten Selektorkaskade bei nicht sauerstofflimitierten Bedingungen ein Richtwert von 0,25 kg CSB/(kg oTS.h) angegeben werden. Bei Sauerstofflimitierung muß $q_{\min(SS, OV)}$ proportional zur Sauerstofflimitierung abgemindert werden. Für Zuckerfabriksabwasser bei einer Konzentration an leicht abbaubarem Substrat von 10 bis 50 mg CSB/l im Selektor ohne Sauerstofflimitierung kann für $q_{\min(SS, OV)}$ ein Richtwert von 0,1 kg CSB/(kg oTS.h) angegeben werden.

Für die Bestimmung der Selektorgröße wird folgende Vorgangsweise vorgeschlagen:

Das Volumen einer Selektorkaskade wird nach Gleichung 8 mit der mittleren zu erwartenden Fracht an leicht abbaubarem Substrat und der mittleren spezifischen Substrateliminationsgeschwindigkeit bestimmt. Ist eine versuchstechnische Bestimmung nicht möglich, dann kann nach den bisherigen Erfahrungen eine mittlere zu erwartende Substrateliminationsgeschwindigkeit $q_{(SS, OV)}$ von 0,5 kg CSB/(kg oTS.h) angenommen werden, wenn die Sauerstoffzufuhr nicht limitierend ist, und die rechnerische Konzentration an leicht abbaubarem Substrat in der Mischung von Abwasser und Rücklaufschlamm im Zulauf zum Selektor ≥ 200 mg CSB/l ist. Bei Konzentrationen an leicht abbaubarem Substrat unter 200 mg/l im Zulauf zum Selektor ist $q_{(SS, OV)}$ portional zur Konzentration an leicht abbaubarem Substrat abzumindern, wobei ein $q_{(SS, OV)}$ von $< 0,2$ kg CSB/(kg oTS.h) nicht angesetzt werden soll, um eine Überdimensionierung des Selektors zu vermeiden.

Das Gesamtvolumen des Selektors wird nach Gleichung 8 mit der maximal zu erwartenden Tagesfracht an leicht abbaubarem Substrat mit einem minimal zu erwartenden $q_{(SS, OV)}$ in der ersten Kaskade berechnet. Wenn keine Messungen vorliegen, wird ein Wert von 0,2 kg CSB/(kg oTS.h) vorgeschlagen.

Sind sehr kurzzeitige Spitzenbelastungen mit großer Fracht an leicht abbaubarem Substrat in Abständen von weniger als 5 Tagen zu erwarten, dann muß das Gesamtvolumen des Selektors auf diese Spitzen bemessen werden. In diesem Fall wird für 50 % des Selektorvolumens die mittlere zu erwartende Substrateliminationsgeschwindigkeit, z.B. 0,5 kg CSB/(kg oTS.h), und für die restlichen 50 % die minimale zu erwartende Substrateliminationsgeschwindigkeit, z.B. 0,2 kg CSB/(kg oTS.h), angesetzt.

Anmerkung:

Die Sicherheit gegen Durchschlagen von leicht abbaubarem Substrat aus dem Selektor liegt in den angegebenen Werten für die Substrateliminationsgeschwindigkeit. Bei versuchstechnisch bestimmten Werten für die Substrateliminationsgeschwindigkeit muß von den ungünstigsten Werten ausgegangen werden.

Für die meisten Anwendungsfälle wird man aus dieser Bemessung einen Selektor mit 2 bis 4 Kaskaden und eine Aufenthaltszeit bezogen auf Zulauf und Rücklaufschlamm von 10 bis 30 Minuten erhalten.

Der Sauerstoffbedarf im Selektor ergibt sich aus:

$$OV = a_{CSB} \cdot \Delta S \quad (\text{kg O}_2/\text{h}) \quad (9)$$

Der spezifische Sauerstoffbedarf für die Entfernung der leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen ist substratabhängig. Für unversäuertes Zuckerfabriksabwasser, in dem das leicht abbaubare Substrat hauptsächlich als Saccharose vorliegt, beträgt a_{CSB} 0,05 bis 0,1 g O₂/g CSB. Für die Entfernung des leicht abbaubaren Substrates von stark versäuertem Zuckerfabriksabwasser, wo das leicht abbaubare Substrat im wesentlichen ein Gemisch von Milch-, Essig- und Propionsäure ist, werden 0,15 bis 0,30 g O₂/g CSB benötigt. Der Sauerstoffverbrauch für die Substratelimination kann bei Untersuchungen zur Substrateliminationsgeschwindigkeit mitbestimmt werden. Liegen keine genaueren Bestimmungen des Sauerstoffbedarfes für die Substratelimination vor, dann sollte für die Sauerstoffzufuhrleistung des Selektors ein Wert von 0,25 g O₂/g zu eliminierendem CSB angenommen werden.

Damit die Substratelimination im Selektor durch die Speicherkapazität des Schlammes nicht begrenzt wird, muß bei minimaler Rücklaufschlammmenge gelten:

$$\frac{Q_Z \cdot S_{Zul}}{Q_{RS} \cdot oTS_{RS}} \leq 0,2 \quad (\text{g CSB/g oTS}) \quad (10)$$

Q_Z	Zulaufwassermenge (m ³ /h)
S_{Zul}	Zulaufkonzentration gelöstes leicht abbaubares Substrat (g/m ³)
Q_{RS}	Rücklaufschlammmenge (m ³ /h)
oTS_{RS}	organische Trockensubstanz im Rücklaufschlamm (g/m ³)

Damit wird berücksichtigt, daß die Speicherkapazität des Belebtschlammes, die bis zu 40 % der oTS beträgt, nur zu ca. 50 % ausgenützt wird und die Substrateliminationsgeschwindigkeit im Selektor durch die Speicherkapazität nicht zu stark reduziert wird.

Bei einer CSB-Schlammbelastung über 0,5 kg/(kg.d) oder einem Schlammalter unter 5 Tagen muß damit gerechnet werden, daß das gespeicherte Substrat nicht im ausreichenden Umfang abgebaut werden kann, womit die Speicherfähigkeit des Schlammes und die Wirksamkeit des Selektors reduziert werden. Damit die Wirksamkeit eines aeroben Selektors sichergestellt wird, muß die CSB-Schlammbelastung unter 0,5 kg/(kg.d) liegen. Ein Wert unter 0,3 kg/(kg.d) wird empfohlen. Das Mindestschlammalter sollte bei 20 °C 5 Tage betragen. Bei einer niedrigeren Bemessungstemperatur ist eine Erhöhung des Schlammalters nach der Funktion $f_{20} = f_{TB} \cdot e^{0,069(20 - TB)}$ zu empfehlen.

4.7 Bemessungsbeispiel

Zulauf:	Q	1430 m ³ /d
	CSB	700 g/l
	CSB _F	1000 kg/d

Der leicht abbaubare Anteil beträgt 30 % (12,5 kg CSB/h). Die Spitzenbelastung an leicht abbaubarem Substrat (aus einem Betrieb) wird mit 60 kg/h bzw. 1 g/l abgeschätzt.

Aus klärtechnischer Bemessung:

$$\begin{aligned} TS_{BB} &= 4 \text{ g/l}, & oTS_{BB} &= 2,4 \text{ g/l} \\ TS_{RS} &= 8 \text{ g/l}, & oTS_{RS} &= 4,8 \text{ g/l} \\ SA &= 15 \text{ d} \\ RV &= 1,0 \end{aligned}$$

Bemessung auf mittlere Belastung mit leicht abbaubarem Substrat

$$V_{SEL - K1} = \frac{12,5}{2,4 \cdot 0,2} = 26 \text{ m}^3$$

Bemessung auf maximale Belastung mit leicht abbaubarem Substrat

Kaskade 1:

$$V_{SEL - K1} = \frac{40}{2,4 \cdot 0,5} = 33m^3$$

Kaskade 2:

$$V_{SEL - K2} = \frac{20}{2,4 \cdot 0,2} = 42m^3$$

Gewählt: Selektor $70m^3$, 2 Kaskaden mit einem Volumen von je $35 m^3$

Erforderliche Sauerstoffzufuhr im Selektor:

$$OV = 0,25 \cdot 60 = 15kg / h$$

Überprüfung der Rücklaufschlammmenge

$$\frac{1430 \cdot 1,0}{1430 \cdot 4,8} = 0,21$$

Das Rücklaufschlammverhältnis von 1,0 reicht knapp aus, damit auch bei Spitzenbelastung mit leicht abbaubarem Substrat die Speicherkapazität des Schlammes nicht zum limitierenden Faktor wird.

4.8 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Reihe von Fadenbildnern wie *Haliscomenobacter hydrossis*, *Leucothrix*, *Microthrix parvicella*, *Nostocoida limicola*, *Sphaerotilus natans*, Typ 0092, Typ 0961, die häufig Blähschlamm verursachen, sind mit aerobem Selektor relativ leicht beherrschbar.

Der Fadenbildner 021N ist ebenfalls mit einem aeroben Selektor gesichert unterdrückbar. Die Blähschlammvermeidung gelingt jedoch nur, wenn das Belebungsverfahren so gestaltet ist, daß das leicht abbaubare gelöste Substrat im Selektor vollständig eliminiert wird.

Derzeit laufende Untersuchungen einer Belebungsanlage einer Papierfabrik weisen darauf hin, daß die Fadenbildner Typ 0041 und Typ 1701 mittels areobem Selektor in ähnlicher Weise beherrschbar sind wie der Typ 021N.

Das gelöste leicht abbaubare Substrat wird im Selektor vorwiegend durch Speicherung aus der flüssigen Phase entfernt. An ein aerobes Selektorsystem adaptierter Schlamm gewinnt die für die Speicherung erforderliche Energie durch Oxidation eines Teiles der leicht abbaubaren Verbindungen. Der Energiebedarf, und damit der Sauerstoffbedarf für die Speicherung im Selektor, ist von der Art des leicht abbaubaren Substrates abhängig (5 bis 30 % von η_{CSB}). Die Speicherfähigkeit des Belebtschlammes ist begrenzt. Damit die Speicherfähigkeit und damit die rasche Elimination des leicht abbaubaren Substrates im Selektor erhalten bleibt, muß der Schlamm die Möglichkeit haben, den Substratspeicher im Belebungsbecken abzubauen. Bei zu hoher Schlammbelastung, Sauerstoff- und Nährstoffmangel im Belebungsbecken, kann die Speicherkapazität des Belebtschlammes im Belebungsbecken nicht regeneriert werden, und der aerobe Selektor verliert an Wirksamkeit.

5 Verwendete Literatur

- DOHANYOS M., GRAU P., CHUDOBA J.: Kinetic assessment of glucose removal and saccharide accumulation capacities in activated sludge, *Wat.Poll.Res. Ed. S. H. Jenkins*, Pergamon Press, Oxford, II-3/1 - II-3/7 (1971)
- EIKELBOOM D.H.: Biosorption and prevention of bulking sludge by means of a high floc loading, *Bulking of activated sludge*, Ellis Horwood WRC Ltd., Chichester, 90-104 (1982)
- HATZICONSTANTINOUS G.J., ANDREADAKIS A.D.: Uptake and storage of soluble carbon under transient conditions in pre- DN activated sludge reactors, *Wat. Sci. Tech.*(First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology; München 18.-20. März 1996), Tagungs., 123-131 (1996)
- KREBS P.: Nutzung von Modellen für Gestaltung und Betrieb von Nachklärbecken, *Wiener Mitteilungen*, Band 137, 159-190 (1997)
- KROISS H.: Adsorptions- und Speichervorgänge beim Belebungsverfahren, *Schriftenreihe gwf Wasser Abwasser*, Heft 19, Band 1, 101-122 (1981)
- LEMMER H.: Fadenförmige Mikroorganismen aus belebtem Schlamm, *ATV Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis*, Band 30 (1992)
- LEMMER H.: Laborversuche zum Wachstumsverhalten verschiedener Fadenorganismen aus Blähschlamm und Schwimmschlamm, *Korr. Abw.*, 37, 54-60 (1990)
- PRENDL L. Ein Beitrag zu Verständnis und Anwendung aerober Selektoren für die Blähschlammvermeidung *Wiener Mitteilungen*, Band 139, (in Vorbereitung) (1997)
- Van LOOSDRECHT M.C.M., POT M., HEIJNEN J.J.: Importance of bacterial storage polymers in activated sludge processes, *Wat. Sci. Tech.*(First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology; München 18.-20. März 1996)Tagungs., 15-21 (1996)

Autoren:

o.Prof. Dipl.Ing. Dr. Helmut Kroiß
Dipl.Ing. Robert Fenz
Dipl.Ing. Dr. Leopold Prendl

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226

Tel.: +43/1/58801 - 3147
Fax: +43/1/504 21 57
E-Mail: hkroiss@iwag.tuwien.ac.at