

# Ein Modell zur Bewertung des Einflusses der Primärschlammhydrolyse in Versäuerungseindickern auf den mesophilen Faulgasanfall

Konrad Buchauer

**Schlagwörter:** Abwasserbehandlung, Klärschlamm, Hydrolyse, Versäuerung, Eindicker, leicht abbaubares Substrat, Faulgas

Zur Optimierung des Gehaltes an leicht abbaubaren Substanzen im Abwasser bei Bio-P-Verfahrenskonfigurationen bietet die gezielte Primärschlammversäuerung in Eindickern ein wirkungsvolles Instrument. Um eine Kosten-Nutzen-Analyse solcher Reaktoren durchführen zu können, ist es wesentlich, auch ihre Auswirkung auf den mesophilen Faulgasanfall zu beurteilen. Der vorliegende Artikel erarbeitet ein Rechenmodell zur Bewertung dieses Aspektes. Wie die Auswertung des Modelles zeigt, lassen sich in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen unter mitteleuropäischen Verhältnissen Faulgasverluste zwischen nahe Null und ca. 25 % erwarten.

To optimize the performance of bio-P-plant-configurations the fermentation of primary sludge in thickeners offers a valuable tool. To enable a cost-benefit-analysis of such a reactor it is crucial also to consider its impact on the formation of gas in a mesophilic digester. The work presented derives a mathematical model for the assessment of this aspect. According to the evaluation of the model the loss of gas varies between close to zero and approximately 25 % under central European conditions – depending on the specific boundary conditions.

## 1. Ausgangssituation

Bis vor relativ kurzer Zeit war der Einsatz von Voreindickern aus der Schlammbehandlung kaum wegzudenken. Durch die statische Eindickung des Schlammes konnten das Schlammvolumen deutlich reduziert und alle nachfolgenden Anlagenteile der Schlammbehandlung entsprechend kleiner ausgelegt werden. In den letzten Jahren setzten sich am Markt aber immer mehr Systeme zur maschinellen Überschussschlammmentwässerung (MÜSE) durch. Solche Aggregate bieten neben dem Vorteil der effektiveren Eindickung auch den Vorteil, daß der Schlamm nicht über längere Zeit gelagert werden muß. Dadurch kommt es zu keiner Schlammhydrolyse, das Filtrat ist weitestgehend frei von rückgelösten Substanzen und der Faulgasanfall bleibt unbeeinflußt. – Beim „alten“

System der Voreindickung war man sich zwar immer bewußt, daß durch die einsetzende Schlammhydrolyse und Ausschwemmung von CSB im Hydrolysat eine Beeinflussung des Faulgasanfalles gegeben sein muß. Mangels Alternativen und im Bewußtsein, daß nur einige, wenige Prozent Gasverlust in Kauf genommen werden, fand man sich damit jedoch ab.

Durch die zunehmende Popularität von Verfahrensweisen zur verstärkten biologischen Phosphorelimination (Bio-P) könnte sich nun aber wieder eine teilweise Trendumkehr ergeben. Für das Funktionieren von Bio-P sind gewisse Mindestmengen an leicht abbaubaren Substanzen im Abwasser unabdingbar. Da in sehr vielen Fällen das Rohabwasser nicht den Anforderungen entspricht [1], wird unter anderem durch den gezielten Einsatz von Reaktoren zur Schlammversäuerung versucht, eine Aufstockung der leicht abbaubaren Substanzen zu erzielen. Solche Reaktoren können in sehr vorteilhafter Weise als Eindicker ausgeführt werden. Zur Maximierung der hydrolysierten Substanzen werden dabei Aufenthaltszeiten bis zu 10 Tagen eingesetzt. Dies wiederum wirkt in verstärktem Maße die Frage auf, inwieweit eine derart extensive Vorversäuerung dem mesophilen Faulgasanfall abträglich ist.

Man kann im wesentlichen davon ausgehen, daß der über das Hydrolysat ausgespülte CSB die Gasverluste widerspiegelt. Sollte es daher möglich sein, den Verlauf der Bildung von gelöstem CSB während der Hydrolyse vorherzusagen, und berücksichtigt man zusätzlich die partikulären Substanzen im Hydrolysat, so kann man mit diesem Instrumentarium auch Aussagen über die Veränderung des Faulgasanfalles ableiten.

## 2. Untersuchungen

### 2.1 Durchführung der Untersuchungen

Ein sehr wesentliches Kriterium war, daß die Ergebnisse der Untersuchungen allgemein gültigen Charakter haben sollten. Aus diesem Grund wurde Primär- und Belebtschlamm aus insgesamt 11 verschiedenen, kommunalen ARAs in Tirol für die Versuche verwendet. 44 Einzelproben kamen im Rahmen von 81 Batch-Versuchen, zum Teil unter gestaffelten Bedingungen, zur anaeroben Hydrolyse und Versäuerung. Die Temperatur wurde zwischen 5 und 27°C variiert, die Versuchsdauer lag bei jeweils 2 Wochen. Teilweise wurde mit und ohne Rührwerk gearbeitet und zur Unterbindung unerwünschter Sauerstoffeinträge über die Oberfläche diente generell eine PU-Abdeckung. Verschiedene Parameter – so auch  $CSB_f$  – wurden in regelmäßigen Zeitintervallen bestimmt.

### 2.2 Auswertung der Untersuchungen

Jeder Auswertung ging eine genaue CSB-Bilanzierung über die gesamte Versuchsdauer voraus. Daraus konnte gefolgert werden, daß bei Temperaturen unterhalb 20°C die Gasentwicklung vernachlässigbar ist. Die Gültigkeit der resultierenden Rechenmodelle wurde daher generell

auf einen psychrophilen Temperaturbereich  $\leq 20^\circ\text{C}$  beschränkt.

Wie die Ergebnisse der Auswertung ferner deutlich zeigen, ist für den Einsatz zur Hydrolyse insbesondere Primärschlamm gut geeignet. Hohe Konzentrationen an leicht abbaubaren Substanzen, gute Eindickbarkeit und nur geringe Rückbelastungen an Stickstoff und Phosphor ergeben eine ideale Kombination. Relativ gut geeignet zur Versäuerung ist auch Schlamm aus A-Stufen von A-B-Anlagen, am ungeeignetsten erwies sich der Schlamm schwachbelasteter Biologien [2].

Für die Modellierung von  $\text{CSB}_f$  erwies es sich als günstige Lösung, eine Reaktion 1. Ordnung bezüglich eines sich erschöpfenden Substrates anzusetzen. Zur Beschreibung des Verlaufes von  $\text{CSB}_f$  wurden daher folgende Angaben benötigt:

- Anfangswert von  $\text{CSB}_f (= \text{CSB}_{f_0})$ :  
Bei den verwendeten Primärschlammproben lag  $\text{CSB}_{f_0}$  im Mittel bei ca. 2700 mg/l. Zu beachten ist, daß bei den beprobten ARAs Primärschlamm 1–3 mal täglich abgezogen wird. Unter diesen Umständen ließ sich  $\text{CSB}_{f_0}$  auch relativ zuverlässig über  $0,077 \cdot \text{orgTS}_0$  abschätzen.
- Maximal erreichbarer  $\text{CSB}_f (= \text{CSB}_{f,\text{max}})$ :  
Aus den aufgenommenen Verläufen von  $\text{CSB}_f$  war es gut möglich, jeweils  $\text{CSB}_{f,\text{max}}$  abzuschätzen. Besonders interessant ist der Umstand, daß sich der jeweilige Maximalwert nicht als konstant erwies, sondern immer in klarem Zusammenhang mit der Temperatur stand. Mit steigender Temperatur stieg bei derselben Probe auch  $\text{CSB}_{f,\text{max}}$ . Die statistische Auswertung ergab bei Primärschlamm für Temperaturen unter  $20^\circ\text{C}$  näherungsweise folgenden linearen Zusammenhang:

$$\text{CSB}_{f,\text{max}} / \text{orgTS}_0 = 0,0159 \cdot T + 0,1447 \quad (1)$$

- Reaktionsgeschwindigkeit k:  
Die Reaktionsgeschwindigkeit zeigte sowohl eine leichte Abhängigkeit von der Temperatur (steigendes k bei steigender Temperatur) als auch von  $\text{orgTS}_0$  (fallendes k bei steigendem  $\text{orgTS}_0$ ). Da die k-Werte nur eine relativ geringe Streuung zwischen 0,11 und 0,19 1/d aufwiesen, und die Tendenzen statistisch nicht besonders gut abgesichert waren, wurde für das Rechenmodell ein Mittelwert von  $k = 0,14$  1/d angesetzt. (Die mittlere Temperatur betrug  $13,4^\circ\text{C}$ , und das mittlere  $\text{orgTS}_0$  lag bei ca.  $30 \text{ kg/m}^3$ .)

Auf Basis der genannten Zusammenhänge läßt sich der  $\text{CSB}_f$ -Verlauf von Primärschlamm während der Versäuerung näherungsweise wie folgt modellieren:

$$\text{CSB}_f(t) = (0,0159 T + 0,1447) (1 - e^{-0,14 \cdot t}) \text{orgTS}_0 + \text{CSB}_{f_0} \cdot e^{-0,14 \cdot t} \quad (2)$$

Unter Einbeziehung einer  $\text{CSB}$ -Bilanz zwischen dem Versuchsbeginn und einem beliebigen Zeitpunkt t kann man auch eine Beziehung für die Abnahme von  $\text{orgTS}(t)$  während der Versäuerung ableiten:

$$\begin{aligned} \text{orgTS}(t) &= \text{orgTS}_0 - (0,0159 T + 0,1447) \\ &\quad (1 - e^{-0,14 \cdot t}) \text{orgTS}_0 / 1,48 + \text{CSB}_{f_0} \\ &\quad (1 - e^{-0,14 \cdot t}) / 1,48 \end{aligned} \quad (3)$$

Kontrolle von Gl.(2) und (3):

- Die Werte für  $\text{CSB}_f(t)$  liegen auf Grund der Art ihrer Bestimmung etwas über jenen des gelösten  $\text{CSB}$ . Unter Beachtung dieses Aspektes stimmen die rechnerisch ermittelten  $\text{CSB}_f$ -Konzentrationen gut mit Literaturangaben über erzielbare Verflüssigungsgrade ( $= \text{CSB}_{\text{gelöst}} / \text{CSB}_f$ ) bei der Hydrolyse von Primärschlamm überein (Aesoy et al. [in 3], Bundgaard et al. [4], Siegrist [5], Jörgensen [6]).
- Beim Vergleich von  $\text{CSB}_f$ -Modellrechnung nach Gl. (2) mit den gemessenen Versuchs-Werten ergibt sich eine Streuung von ca.  $\pm 20\%$ .
- Beim Vergleich von  $\text{orgTS}$ -Modellrechnung nach Gl. (3) mit den gemessenen Versuchs-Werten ergibt sich eine Streuung von ca.  $\pm 3\%$  (bei  $\text{orgTS}$ -Abbau-raten von ca.  $20\%$ ).

In Anbetracht der großen Bandbreite von Primärschlamm-eigenschaften kann man somit durchaus von einer guten Aussagekraft von Gl. (2) und (3) unter psychrophilen Temperaturbedingungen  $\leq 20^\circ\text{C}$  ausgehen.

### 3. Auswirkung von Primärschlamm-Versäuerungseindickern auf den Faulgasanfall

#### 3.1 Prinzipielle Überlegungen und Annahmen

Den nachfolgenden Ableitungen liegen einige grundlegende Überlegungen und Annahmen zugrunde, die hier zusammengefaßt wiedergegeben werden:

- Bei der Berechnung der Gasverluste durch die Auswaschung von  $\text{CSB}$  aus dem versäuerten Schlamm sind 2 gegenläufige Aspekte zu beachten:

(1) Reduktion des in der Faulung noch abbaubaren  $\text{CSB}$   $\rightarrow$  Absinken des mesophilen Gasanfalles:

Das in einem psychrophilen Eindicker abgebaute organische Material ist immer ein Teil jener organischen Trockensubstanz, welche auch in einem mesophilen Faulbehälter abgebaut würde. Die Entfernung von solchen, vorabgebauten Substanzen aus dem Schlamm reduziert somit die in der mesophilen Faulung noch abbaubare Fracht. Zur näherungsweisen Abschätzung des Faulgasverlustes ist daher die Kenntnis des  $\text{CSB}$  im Eindicker-Hydrolysat sowie des im Faulbehälter abbaubaren  $\text{CSB}$  erforderlich. Für den  $\text{CSB}$  im Hydrolysat wird das Modell für  $\text{CSB}_f$  laut Gl. (2) zur Anwendung gebracht, und die partikulären Substanzen werden über einen Zuschlagfaktor  $f_{TS}$  erfaßt.

(2) Zusatzbelastung der Biologie  $\rightarrow$  Erhöhung der Schlammproduktion und dadurch Anstieg des mesophilen Gasanfalles:

Die Abschätzung der zusätzlich anfallenden Gasmenge erfolgt proportional zum Anstieg der Überschussschlammmenge. Es wird davon ausgegangen, daß die Belastungserhöhungen der Biologie durch das Hydrolysat keine derartige Erhöhung der Schlammproduktion bedingen, daß sich die spezifischen orgTS-Abbauraten  $f_{FB}$  dadurch verändern würden.

- Da der TS-Gehalt im Hydrolysat sehr stark schwanken kann, wird empfohlen, für das Hydrolysat 2 Wege einzuplanen: Zum einen sollte die Einleitung in das Vorklärbecken im Fall hoher TS-Gehalte möglich sein. Dadurch können sich die Feststoffe größtenteils wieder absetzen und belasten kaum die Biologie. – Oder aber das Hydrolysat wird im Fall geringer TS-Gehalte direkt in das Anaerobbecken geleitet und man vermeidet dadurch evtl. Verluste an leicht abbaubaren Substanzen in der Vorklärung.
- Bei der Berechnung der Auswaschrate  $q_h$  wird der TS im Zulauf und im Hydrolysat vernachlässigt.
- Es wird angenommen, daß orgTS und anorgTS näherungsweise im selben Verhältnis eindicken.
- Es wird angenommen, daß sich über die Tiefe des Versäuerungseindickers keine  $CSB_f$ -Konzentrationsunterschiede ausbilden, weil diese durch interne Schlamm-Kreisläufe oder Spülwasser unterbunden werden. Man kann daher folgern, daß z. B. im eingedickten Schlamm eines Eindickers dieselbe  $CSB_f$ -Konzentration auftritt wie im Hydrolysat. Untersuchungen von *Boll* [7] mit Phosphor bestätigen diese Annahme.
- Der Abbau der organischen Trockensubstanz im Eindicker wird bei der Eindickung berücksichtigt.

### 3.2 Mathematische Erfassung veränderter Faulgasmengen

#### Gasverluste $\Delta Gas_1(t)$ durch die Auswaschung von CSB

Entsprechend den Annahmen ist der Faulgasverlust eine Folge von CSB-Auswaschung aus dem Versäuerungseindicker. Bezieht man diese CSB-Verluste auf den in einem Faulbehälter abbaubaren CSB, erhält man prozentual die entsprechenden Verluste im Vergleich zu einer unbeeinflussten Gasausbeute:

$$\Delta Gas_1(t) = -100 \cdot \Delta CSB_{VED}(t) / \Delta CSB_{FB} \quad (4)$$

$\Delta CSB_{VED}(t)$  läßt sich über die CSB-Fracht im Hydrolysat berechnen, die in die Biologie gelangt. Hierbei ist zu beachten, daß diese Fracht bei Hydrolysat-Einleitung ins Vorklärbecken nicht dieselbe ist wie jene, die sich bei direkter Hydrolysat-Einleitung in die Biologie ergibt!  $\Delta CSB_{FB}$  kann über die in den Faulbehälter eingetragene  $CSB_f$  und orgTS-Fracht bestimmt werden. Daraus ergibt sich:

$$\Delta Gas_1(t) = -100 \cdot f_{TS} \cdot q_h \cdot CSB_f(t) / (1,48 \cdot f_{FB(PS)} \cdot orgTS_0 + CSB_{f0}) \quad (5)$$

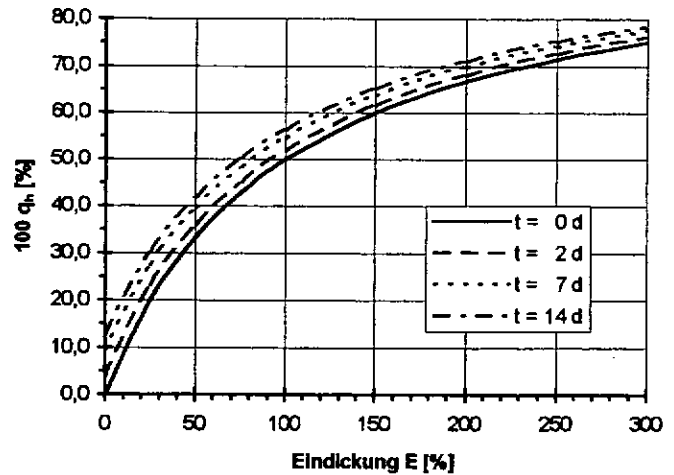


Bild 1. Auswaschrate  $q_h$  von Hydrolysat in einem Primärschlamm-Eindicker nach Gl. (10) als Funktion von Eindickung  $E$  und Schlamm-Aufenthaltszeit  $t$ , basierend auf dem orgTS-Abbau-Modell nach Gl. (3). ( $T = 15^\circ C$ ;  $orgTS_0 / TS_0 = 0,7$ ;  $CSB_{f0} = 0,077 \text{ orgTS}_0$ )

#### Zunahme des Gasanfalles $\Delta Gas_2(t)$ durch erhöhte Schlammproduktion

Die Schlammproduktion erhöht sich durch die Zusatzbelastung auf Grund zweierlei Aspekte:

1. Erhöhung der Gesamtbelastung und proportional dazu auch der biologischen Überschussschlammmenge
2. Erhöhung der spezifischen Überschussschlammmenge pro kg  $BSB_5$ .

Zur Erfassung von *Punkt 1.* wird die Verhältniszahl  $f_{\Delta BSB}$  zwischen der ursprünglichen  $BSB_5$ -Zulaufbelastung und der erhöhten  $BSB_5$ -Gesamtbelastung infolge der Hydrolysat-Einleitung bei Primärschlammversäuerung eingeführt:

$$f_{\Delta BSB} = f_{BSB} \cdot f_{TS} \cdot q_h \cdot CSB_f(t) / \text{orgTS}_0 \cdot \text{orgTS}_{spez} / CSB_{spez} \quad (6)$$

Zur Erfassung von *Punkt 2.* wurde in [2] eine Abschätzung vorgenommen, die ergab, daß bei Betrieb einer Primärschlammversäuerung im Schnitt eine Zunahme des spezifischen Schlammmanfalles [kg TS/kg  $BSB_5$ ] von nur ca. 1% zu erwarten ist.

Man kann somit die Zunahme des Gasanfalles  $\Delta Gas_2(t)$  durch erhöhte Schlammproduktion in der Biologie wie folgt abschätzen:

$$\Delta Gas_2(t) = 100 \cdot 1,01 \cdot f_{BSB} \cdot f_{TS} \cdot q_h \cdot CSB_f(t) / \text{orgTS}_0 \cdot \text{orgTS}_{spez} / CSB_{spez} \quad (7)$$

#### Gesamtbetrachtung des Gasanfalles $\Delta Gas(t)$

Im vorliegenden Artikel wird davon ausgegangen, daß organischer Schlamm aus der Vorklärung (=  $\dot{U}S_V$ ) und aus der Biologie (=  $\dot{U}S_B$ ) anfällt. Da üblicherweise beide Schlammfraktionen gemeinsam ( $\dot{U}S = \dot{U}S_V + \dot{U}S_B$ ) im Faulbehälter ausgefault werden, muß eine Gewichtung mit der jeweils zugehörigen mesophilen Abbauraten  $f_{FB}$  und dem jeweiligen Anteil an der organischen Gesamtschlammmenge erfolgen:

$$\Delta \text{Gas}(t) = \frac{f_{\text{FB(PS)}} \cdot \dot{U}_{\text{S}_V} / \dot{U}_{\text{S}} \cdot \Delta \text{Gas}_1(t) + f_{\text{FB(B)}} \cdot \dot{U}_{\text{S}_B} / \dot{U}_{\text{S}} \cdot \Delta \text{Gas}_2(t)}{f_{\text{FB(PS)}} \cdot \dot{U}_{\text{S}_V} / \dot{U}_{\text{S}} + f_{\text{FB(B)}} \cdot \dot{U}_{\text{S}_B} / \dot{U}_{\text{S}}} \quad (8)$$

gelösten Substanzen, da der Abbau der organischen Trockensubstanz auch einen wichtigen Einfluß ausübt. Der Abbau wiederum wird insbesondere von der Aufenthaltszeit und der

### 3.3 Einflußparameter auf das Rechenmodell

#### 3.3.1 Anmerkungen zu den einzelnen Einflußparametern

$CSB_f(t)$  und  $CSB_{f_0}$  können entsprechend den Angaben in Kapitel 2.2 abgeschätzt werden.

Zum Faktor  $f_{\text{TS}}$  ist anzumerken, daß eine gewisse Erhöhung des  $CSB_f$  wohl immer zu erwarten sein dürfte. Wird das Hydrolysat ins Vorklärbecken eingeleitet, so kann man  $f_{\text{TS}}$  näherungsweise über ein übliches Verhältnis von dekantiertem zu filtriertem CSB abschätzen: z. B.  $f_{\text{TS}} = 1,1$ . Wird das Hydrolysat dagegen ohne diese Absetzmöglichkeit direkt in die Biologie geleitet, so ist meist mit deutlich größeren Faktoren zu rechnen.

Die Abbauraten  $f_{\text{FB}}$  von orgTS in einem mesophilen Faulbehälter können nach [8; 9; 10] wie folgt angenommen werden:

Primärschlamm:  $f_{\text{FB(PS)}} = 0,6$  (Streuung: 0,4 – 0,7)

Belebtschlamm:  $f_{\text{FB(B)}} = 0,4$  (Streuung: 0,2 – 0,55)

Für den, im Frischschlamm gelöst vorliegenden  $CSB_{f_0}$  wird näherungsweise eine Abbaubarkeit von 100% angesetzt.

Mit dem Faktor  $f_{\text{BSB}}$  wird berücksichtigt, daß das Verhältnis von  $BSB_S/CSB$  im Hydrolysat nicht jenem im Biologie-Zulauf entspricht. Üblicherweise liegt dieses Verhältnis im ARA- bzw. Biologie-Zulauf zwischen 0,5 und 0,6, im Hydrolysat von Primärschlamm liegt es jedoch gemäß den Untersuchungen bei ca. 0,65. Daher beträgt  $f_{\text{BSB}} \approx 0,65/0,55 \approx 1,2$ .

$CSB_{\text{spez}}$  und  $orgTS_{\text{spez}}$  lassen sich auf Basis von Kennwerten laut ATV [11] abschätzen. Für den Glühverlust GV kann man 70% ansetzen.

#### Auswaschrates $q_h$ von gelösten Substanzen

Neben der Beurteilung der Bildung von gelösten Substanzen ist es natürlich auch von ganz entscheidender Wichtigkeit, in welchem Ausmaß diese Substanzen aus dem Eindicker abgeschieden werden können. Zur Quantifizierung dieses Aspektes wird die Auswaschrates  $q_h$  herangezogen, die wie folgt definiert ist:

$$q_h = Q_h / Q_0 \quad (9)$$

Um die Größenordnung der Auswaschrates bei einem Eindicker besser beurteilen zu können, wird mit Hilfe von Mengen- und TS-Bilanz sowie des orgTS-Abbaues laut Gl. (3) ein Bezug zur Eindickung  $E$  hergestellt:

$$q_h = 1 - \text{TS}(t) / (1 + E/100) / \text{TS}_0 \quad (10)$$

Wie Bild 1 zeigt, ist die Eindickung alleine kein universell ausreichendes Maß zur Beurteilung der Auswaschung von

Temperatur bestimmt. Bei höheren Temperaturen resultieren etwas höhere Auswaschrates, bei niedrigeren Temperaturen etwas niedrigere Auswaschrates (ohne Abbildung).

In Anbetracht der guten Eindickeigenschaften von Primärschlamm kann man rein durch Eindickung wohl mit Auswaschrates bis zu 60–80% rechnen. Dieser Effekt wird in der Praxis oft durch gezielte Auswaschmaßnahmen, wie Spülung im Gegenstrom, etc. noch verstärkt. Um einen besseren Einblick in großtechnische Auswaschrates von Versäuerungsreaktoren zu gewinnen, wurden verschiedene Literaturangaben mit den Modellen nachgerechnet. Dafür sind insbesondere Vergleiche zwischen den hier nicht vorgestellten Modellen für die leicht abbaubaren Substanzen [2] und großtechnischen Erfahrungen [12; 13; 14] geeignet, weil deren Messung nicht durch Feststoffe im Hydrolysat beeinträchtigt wird, wie dies beim CSB der Fall ist. Aus diesen Vergleichen ergibt sich die Schlussfolgerung, daß großtechnisch die Auswaschrates offensichtlich in den Bereich von 80–90% zu liegen kommen können. – Insgesamt gesehen scheint bei richtig konzipierten Primärschlamm-Versäuerungs-eindickern die vorsichtige Annahme von  $q_h = 0,8$  als erste Näherung angemessen.

#### 3.3.2 Sensitivitätsbetrachtungen

Zur Bewertung der vielfältigen Einflußparameter auf den Faulgasanfall wurde die Auswirkung aller, in den vorgestellten Rechenschemata erfaßten Parameter auf den Faulgasanfall untersucht [2]. Dabei ergab sich, daß von den insgesamt 15 Einflußparametern 8 relativ unsensitiv und die 7 nachfolgend aufgelisteten Parameter relativ sensitiv für das Ergebnis sind:

(1) Temperatur  $T$ , (2) Auswaschrates  $q_h$ , (3) Versäuerungszeit  $t$ , (4) TS im Hydrolysat (Berücksichtigung durch den Faktor  $f_{\text{TS}}$ ), (5) mesophile Abbaurates der org TS des biolog. Überschussschlammes  $f_{\text{FB(B)}}$ , (6) mesophile Abbaurates der org TS des Primärschlammes  $f_{\text{FB(PS)}}$ , (7) Verhältnis der organischen Schlammengen bei der Faulbehälterbeschickung  $\dot{U}_{\text{S}_V} / \dot{U}_{\text{S}}$  bzw.  $\dot{U}_{\text{S}_B} / \dot{U}_{\text{S}}$ .

#### 3.4 Vergleich der Modellberechnung mit Literaturangaben

In der Literatur finden sich nur sehr spärliche Angaben über die Auswirkung von Versäuerungsreaktoren auf den Faulgasanfall. Seyfried et al. [15] berichten von einer Verringerung der Methangasproduktion um ca. 15% nach Inbetriebnahme einer aktivierten Vorklärung (Primärschlamm-Kreislauf von im Vorklärbecken gestapeltem Primärschlamm in den Vorklärbecken-Zulauf zur Auswaschung gelöster Substanzen). Und Schlegel [14] berichtet von Versuchen mit einer Primärschlammversäuerung in einem Eindicker mit Schlamm-Kreislauführung und

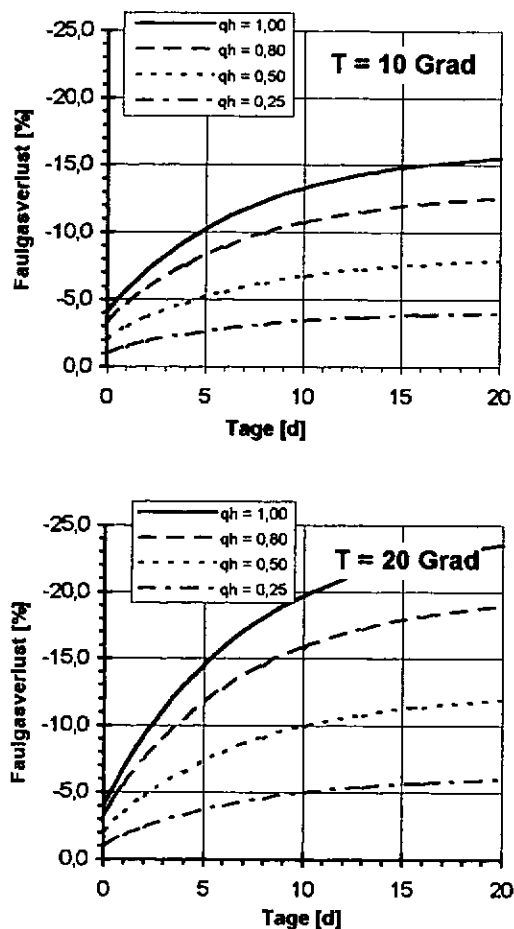


Bild 2. Faulgasverlust  $\Delta\text{Gas}(t)$  nach Gl. (8), (7) und (5) im Faulbehälter einer 1-stufigen Belebungsanlage mit Vorklärung bei Betrieb einer Primärschlammversäuerung bei  $T = 10$  bzw.  $20^\circ\text{C}$  (bezogen auf den gesamten, mesophilen Faulgasanfall).

(Annahmen für sensitive Parameter:  $f_{TS} = 1,1$ ;  $f_{FB(PS)} = 0,6$ ;  $f_{FB(B)} = 0,4$ ;  $\bar{US}_V / \bar{US} = \bar{US}_B / \bar{US} = 0,5$ ; Annahmen für unsensitive Parameter:  $f_{BSB} = 1,2$ ; Umrechnung von orgTS auf CSB mit dem Faktor 1,48; Erhöhung der spezifischen Überschussschlammmenge: +1%;  $\text{orgTS}_0 = 15 \text{ kg/m}^3$ ;  $\text{orgTS}_0 / \text{TS}_0 = 0,7$ ;  $\text{CSB}_{f0} = 0,077 \text{ orgTS}_0$ ;  $\text{orgTS}_{\text{spez}} = 25 \text{ g orgTS (EW} \cdot \text{d)}$ ;  $\text{CSB}_{\text{spez}} = 90 \text{ g CSB (EW} \cdot \text{d)}$ )

Schlamm-Aufenthaltszeiten von 10 Tagen bei Dosierung des Hydrolysates direkt ins Anaerobbecken. Dabei soll es sogar zu einem Anstieg der Faulgasproduktion gekommen sein!

Mangels detaillierter Daten ist eine „exakte“ Vergleichsrechnung dieser Fälle nicht möglich. Man kann aber mit dem vorgestellten Modell verschiedene Verhältnisse durchrechnen und vergleichen. Die Rechenergebnisse für durchschnittliche Verhältnisse sehen wie folgt aus (s. Bild 2).

Beim Vergleich mit den Literaturangaben muß noch folgendes beachtet werden: Der Vergleich beruht meist auf einer Ausgangslage, in der ein, wenn auch vielleicht kleinerer Voreindicker bereits vorhanden war. Die Verluste in diesem Voreindicker müssen bei der Faulgasbetrachtung berücksichtigt werden! Näherungsweise lassen sie sich entsprechend Bild 2 abschätzen, wenn man die so erhaltenen Werte noch etwas reduziert, weil in einem normalen Eindicker ja keine Auswaschung betrieben wird und dementsprechend weniger CSB in das Hydrolysat gelangt. Die

tatsächlichen Faulgasverluste zufolge der Inbetriebnahme eines Versäuerungseindickers ergeben sich dann als Differenz zur Ausgangslage.

Variiert man nun die sensitiven Parameter innerhalb eines realistischen Bereiches, so sieht man, daß sich eine Streubreite der tatsächlichen Faulgasverluste in einem Bereich von ca. 0–25% errechnen läßt.

Beim Vergleich mit den o. a. Literaturangaben zeigt sich, daß die von Seyfried et al. genannten Verluste von ca. 15% durchaus innerhalb der angeführten Streubreite liegen – allerdings scheinen in diesem Fall die Rahmenbedingungen auf der eher ungünstigen Seite zu liegen. Bei den Betriebsergebnissen von Schlegel überwiegen jedoch offensichtlich sehr günstige Randbedingungen. Wird so ein Fall noch von einer geringfügig veränderten Schlammcharakteristik bzw. Belastungssituation überlagert, so mag wohl sogar ein Gasanstieg zu registrieren sein.

Für die vorgestellte Modellrechnung kann man insgesamt folgern, daß die Resultate in ihrer Größenordnung durchaus realistisch sind.

#### 4. Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Veränderung des Faulgasanfalles durch einen Primärschlamm-Versäuerungseindicker stellt sich als Folge von 2 gegenläufigen Aspekten ein: Gasverluste durch die Ausspülung von CSB bzw. Gaszunahme durch erhöhte Schlammproduktion. Der erstere Einfluß überwiegt meist deutlich, trotzdem ist eine Vernachlässigung des zweiten Einflusses keinesfalls zu empfehlen.

Wie sich zeigt, sind für die Veränderung des Faulgasanfalles nur einige wenige Faktoren wirklich ausschlaggebend. Insbesondere sind dies die Temperatur, die Auswaschrate von gelösten Substanzen, die Versäuerungszeit, die TS-Auswaschung über Hydrolysat, die biologische Abbaubarkeit der Schlämme und das Verhältnis der organischen Schlammengen. Eine Variation dieser Parameter innerhalb eines üblichen Streubereiches kann sehr unterschiedliche Faulgasverluste bedingen, die zwischen Werten nahe Null und ca. 25% liegen. Bei durchschnittlichen, mitteleuropäischen Rahmenbedingungen ergibt die Modellrechnung Faulgasverluste, die üblicherweise zwischen ca. 5 und 15% zu liegen kommen.

Inwieweit diese Streubreite an Verlusten bewußt in Kauf genommen wird, um eine Optimierung von Bio-P über den Weg einer Primärschlammversäuerung zu erreichen, bleibt eine planerische Entscheidung. Hier kann die vorgestellte Arbeit wegen der schweren Prognostizierbarkeit diverser Randbedingungen nur Richtwerte, aber keine spezifisch zuverlässige Abschätzung bieten.

Anders ist die Situation im Fall einer bestehenden Anlage. Hier sollte es durchaus möglich sein, die wesentlichen Parameter für die Modellierung näherungsweise zu bestimmen. Und unter diesen Umständen kann die Anwendung einer Modellrechnung nach dem vorgestellten Schema eine zuverlässige Entscheidungshilfe sein.

**Danksagung**

Mein Dank gilt insbesondere der Vereinigung Österreichischer Industrieller, Landesgruppe Tirol, deren finanzielle Unterstützung die Arbeit an diesem Forschungsprojekt wesentlich erleichtert hat. Gedankt sei auch Herrn Univ.Prof. Dr. *Ingerle*, an dessen Institut ich diese Arbeit als Externer durchführen konnte sowie Herrn Dr. *Becker* für die organisatorische Unterstützung. Nicht zuletzt sei auch Herr *DI Bennat* erwähnt, der durch sein Entgegenkommen viel zum Fortschritt dieser Arbeit beigetragen hat.

**Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen**

anorgTS	-	anorganische Trockensubstanz
ARA	-	Abwasser Reinigungs Anlage
Bio-P	-	Verstärkte biologische Phosphorelimination
BSB <sub>5</sub>	mg/l	biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen bei 20 °C
CSB	mg/l	chemischer Sauerstoffbedarf
CSB <sub>f</sub>	mg/l	CSB nach Filtration durch einen Whatman-Glasfaserfilter
CSB <sub>f0</sub>	mg/l	CSB <sub>f</sub> einer frischen Primärschlammprobe (t = 0)
CSB <sub>f,max</sub>	mg/l	bei der Versäuerung von Primärschlamm maximal erreichbares CSB <sub>f</sub> (t = ∞)
CSB <sub>f</sub> (t)	mg/l	CSB <sub>f</sub> zu einem beliebigen Zeitpunkt t
CSB <sub>getöst</sub>	mg/l	gelöster CSB (< CSB <sub>f</sub> )
CSB <sub>h</sub>	mg/l	homogenisierter CSB
CSB <sub>spez</sub>	g CSB (EW · d)	spezifische CSB-Fracht im Ablauf einer Vorklärung (= Zulauf Biologie)
ΔCSB <sub>FB</sub>	%	abbaubarer CSB von Primärschlamm in einem mesophilen Faulbehälter
ΔCSB <sub>VED</sub> (t)	%	CSB-Verlust durch die Auswaschung von CSB aus einem Primärschlamm-Versäuerungseindicker in die Biologie
ΔGas(t)	%	Veränderung des mesophilen Faulgasanfalles durch einen Primärschlamm-Versäuerungseindicker
ΔGas <sub>1</sub> (t)	%	Gasverlust durch die Auswaschung von Hydrolysat aus einem Primärschlamm-Versäuerungseindicker (bezogen auf den möglichen, mesophilen Gasanfall allein durch Primärschlamm)
ΔGas <sub>2</sub> (t)	%	Zunahme des Gasanfalles zufolge der Schlammzunahme in der Biologie durch die Rückführung von Hydrolysat eines Primärschlamm-Versäuerungseindickers (bezogen auf den möglichen, mesophilen Gasanfall allein durch Belebtschlamm)
E	%	Eindickung
f <sub>BSB</sub>	-	Faktor zur Umrechnung des BSB <sub>5</sub> /CSB-Verhältnisses im Hydrolysat auf jenes im Biologie-Zulauf
f <sub>ΔBSB</sub>	-	Verhältniszahl zwischen der ursprünglichen BSB <sub>5</sub> -Zulaufbelastung und der erhöhten BSB <sub>5</sub> -Gesamtbelastung infolge der Hydrolysat-Einleitung bei Primärschlammversäuerung
f <sub>FB(B)</sub>	-	Abbaurate der orgTS von Belebtschlamm in einem mesophilen Faulbehälter

f <sub>FB(PS)</sub>	-	Abbaurate der orgTS von Primärschlamm in einem mesophilen Faulbehälter
f <sub>TS</sub>	-	Faktor zur Beschreibung der CSB-Erhöhung im Zulauf der Biologie durch TS im Hydrolysat (bezogen auf die Erhöhung durch CSB <sub>f</sub> (t))
GV	%	Glühverlust
k	1/d	Reaktionsgeschwindigkeit der CSB <sub>f</sub> -Bildung bei der Primärschlammhydrolyse
MÜSE	-	Maschinelle Überschuß Schlamm Entwässerung
orgTS	mg/l	organische Trockensubstanz
orgTS <sub>0</sub>	mg/l	org TS einer frischen Primärschlammprobe (t = 0)
orgTS <sub>spez</sub>	g orgTS (EW · d)	zur Versäuerung gelangende, spezifische, organische Primärschlammmenge
orgTS(t)	mg/l	orgTS von Primärschlamm zu einem beliebigen Zeitpunkt t
q <sub>h</sub>	-	Auswaschrates von gelösten Substanzen aus einem Versäuerungseindicker
Q <sub>h</sub>	m <sup>3</sup> /d	Menge an Hydrolysat im Überlauf eines Eindickers
Q <sub>0</sub>	m <sup>3</sup> /d	Primärschlamm-Beschickungsmenge eines Eindickers
t	d	beliebiger Zeitpunkt
T	°C	Temperatur
TS	mg/l	Trockensubstanz
TS <sub>0</sub>	mg/l	TS einer frischen Primärschlammprobe (t = 0)
TS(t)	mg/l	TS von Primärschlamm zu einem beliebigen Zeitpunkt t
ÜS	kg orgTS/d	gesamter organischer Beschickungsschlamm des Faulbehälters (= ÜS <sub>B</sub> + ÜS <sub>V</sub> )
ÜS <sub>B</sub>	kg orgTS/d	organischer Beschickungsschlamm des Faulbehälters, der aus der Biologie stammt
ÜS <sub>V</sub>	kg orgTS/d	organischer Beschickungsschlamm des Faulbehälters, der aus der Vorklärung stammt

**Literatur**

- [1] *Jarosch, H.*: Leicht abbaubare Substanzen im Kläranlagenzulauf. Diplomarbeit am Institut für Umwelttechnik der Univ. Innsbruck, 1995.
- [2] *Buchauer, K.*: Biologische Hydrolyse zur Optimierung von Bio-P. Dissertation am Institut für Umwelttechnik der Univ. Innsbruck, 1996.
- [3] *Jardin, N.*: 17. Zweijahrestagung der International Association on Water Quality (IAWQ), 24.-29. Juli 1994 in Budapest / Ungarn. Korrespondenz Abwasser (1994) Nr. 11, S.1928-1959.
- [4] *Bundgaard, E.; Petersen, G. und Henze, M.*: Wechselwirkungen bio-/physikochemischer Verfahren. Schriftenreihe des ISWW, Univ. Karlsruhe, Bd. 65, 1991, S. 169-188.
- [5] *Siegrist, H.*: Untersuchung der Versäuerung von Frischschlamm der Kläranlagen Werdhölzli und Glatt. Technischer Bericht der EAWAG im Auftrag des Tiefbauamtes Zürich, 1992.
- [6] *Jørgensen, P. E.*: Biological hydrolysis of sludge from primary precipitation. In: *H. H.Hahn und R. Klute*: Chemical Water and Wastewater Treatment, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1990, S. 499-510.

- [7] *Boll, R.*: Zur erhöhten biologischen Phosphorentfernung mit dem Belebungsverfahren. Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Heft 46, 1988, S. 1–195.
- [8] ATV Arbeitsgruppe 3.1.1: Arbeitsbericht: Stabilisierungskennwerte für biologische Stabilisierungsverfahren. Korrespondenz Abwasser (1994) Nr. 3, S. 455–460.
- [9] *Kapp, H.*: Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 86, 1984, R. Oldenbourg Verlag, München.
- [10] *Parkin, G. F. and Owen, W. F.*: Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. Journal of Environmental Engineering, Vol. 112 (1986) No. 5, S. 867–921.
- [11] ATV Arbeitsblatt A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), St. Augustin 1991.
- [12] *Brinch, P.; Rindel, K. and Kalb, K.*: Upgrading to nutrient removal by means of internal carbon from sludge hydrolysis. 2<sup>nd</sup> International specialized conference on „Upgrading of wastewater treatment plants“, Berlin 21.–24. Sept. 1993. S. 51–60.
- [13] *Nicholls, H. A.; Pitman A. R. and Osborn, D. W.*: The readily biodegradable fraction of sewage: its influence on phosphorus removal and measurement. Water Science and Technology Vol. 17, (1985) S. 73–87.
- [14] *Schlegel, S.*: Ergebnisse und Folgerungen aus der Behandlung von Abwässern in Anlagen mit weitergehender Abwasserreinigung. Korrespondenz Abwasser, (1994) Nr. 11, S. 2030–2041.
- [15] *Seyfried, C. F. und Hartwig, P.*: Großtechnische Betriebserfahrungen mit der biologischen Phosphorelimination in den Klärwerken Hildesheim und Husum. Korrespondenz Abwasser (1991) Nr. 2, S. 184–190.

(Manuskripteingang: 21.12.1995)