

## NACHGESCHALTETE DENITRIFIKATION IN SCHLAMMBETTREAKTOREN

S. Buß, J. Einfeldt, H.-O. Günter und I. Sekoulov

### **Abstract**

Bei der nachgeschalteten Denitrifikation werden häufig Methanol oder andere externe Substrate benötigt, um hinreichende Denitrifikationsgeschwindigkeiten zu erzielen. Alternativ kann bei geeigneter Verfahrensführung auch das im Zulauf bereits vorhandene und in einer Hochlaststufe an den Belebtschlamm adsorbierte Substrat einer nachgeschalteten Denitrifikationsstufe zur Verfügung gestellt werden. Dies wurde 1986/87 in Versuchen auf der KA Flensburg und im Vergleich zur Belebungs-kaskade mit vorgeschalteter Denitrifikation nachgewiesen.

Bei Umsetzung der nachgeschalteten Denitrifikation in einem Schlamm-bettreaktor kann u.U. auf eine Nachklärung oder eine Schlamm-Wasser-Trennung als Flotation verzichtet werden. In halbtechnischen Versuchen auf der KA Nürnberg und mit ersten Betriebserfahrungen auf der KA Ahrensburg in einem umgerüsteten Dortmundbrunnen wurde die Funktion dieser vielversprechenden Konzeption bestätigt. Auf diesen technischen Erfahrungen aufbauend wurde das vorgesehene Verfahren (nachgeschaltete Denitrifikation und Flotation) für die Kläranlage Flensburg überplant und ein Schlamm-bettreaktor im technischen Maßstab realisiert. Seit November 1999 wird diese Anlage versuchsweise betrieben und wissenschaftlich begleitet. Ohne Substratzugabe wurden Denitrifikationsraten von 0,7 bis 1 g(NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N)/(kgTS · h) bei 10 bis 12 °C erzielt. Nach Temperaturanstieg und bei Zugabe eines Brauerei-Reststoffes erhöhten sich die Denitrifikationsraten bis auf rd. 3 g(NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N)/(kgTS · h) bei 15 - 17 °C. Im Vortrag werden die bislang durchgeführten Versuche erläutert, erste Ergebnisse diskutiert und es wird auf die praktischen Betriebserfahrungen eingegangen.

### **Schlagwörter**

Schlamm-bettreaktor, nachgeschaltete Denitrifikation, Atmungsaktivität, mehrstufige Verfahren

## 1 Einleitung

Mit einstufigen Behandlungsverfahren sind erhöhte Anforderungen an die Stickstoff-elimination wie z.B. Grenzwerte für den Gesamtstickstoff unter  $10 \text{ mgN}_{\text{ges}}/\text{l}$  nur schwer und unter Einsatz großer Behandlungsvolumina einzuhalten, dafür fehlt gerade auf bestehenden Kläranlagen häufig der Platz. Um dennoch zu effektiven, flächensparenden und wirtschaftlichen Lösungen zu kommen, sind Überlegungen zum Einsatz von mehrstufigen Klärsystemen zur Nitrifikation / Denitrifikation interessant.

Auf der Kläranlage Flensburg wurde ein dreistufiges Klärsystem mit separaten Reaktoren für die Reinigungsschritte BSB-Abbau, Nitrifikation und nachgeschaltete Denitrifikation geplant. Dabei sollten die Verfahren der Nitrifikation in einem Tropfkörper und der nachgeschalteten Denitrifikation im Schlammbedtreaktor als kostengünstige Variante zur Stickstoffentfernung zum Einsatz kommen: Aus einer hochbelasteten ersten Belebungsstufe wird ständig Belebtschlamm mit gebundenen Kohlenstoffverbindungen als Überschussschlamm entnommen, und der nachgeschalteten Denitrifikation (3. Stufe) als Substratschlamm zugeführt (vgl. Abbildung 1). In der dritten Stufe stellen die zur Denitrifikation befähigten zugeführten Organismen unter Abwesenheit von gelöstem Sauerstoff ihren Stoffwechsel auf die anoxische Atmung um und denitrifizieren die oxidierten N-Verbindungen aus dem Ablauf des Nitrifikations-Tropfkörpers unter Nutzung der an die Belebtschlammflocke gebundenen Substrate, interner Reservestoffe oder zusätzlicher externer Substrate als Elektronendonator. Nach Durchlauf der dritten Stufe wird der zugeführte Schlamm in den Faulbehälter gefördert.

Das Tagungsbandskript beinhaltet insbesondere Aufbau, Inbetriebnahme und bisheriges Betriebsverhalten des Schlammbedtreaktors. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsphase befinden sich zur Drucklegung des Tagungsbandes noch in der Auswertung bzw. weitere Versuche sind derzeit in der Durchführung. Hierüber wird im Vortrag ergänzend aktuell berichtet werden bzw. muß hierzu auf spätere Veröffentlichungen verwiesen werden.

## 2 Aufbau des Schlammbedtreaktors

Der Schlammbedtreaktor SBtR wird über einen zylindrischen Mitteldom mit Abwasser und Überschussschlamm beschickt. Dieser mit einem Rührwerk versehene „Kontaktraum“ hat ein Volumen von  $170 \text{ m}^3$ . Danach strömt das Abwasser-Belebtschlammgemisch durch Schlitz-Öffnungen in der Mitteldomwand und dort anliegende Leitbleche in den Außenring des SBtR. Ziel ist ein möglichst flächiges Einströmen in Bodennähe, um dann das gebildete Schlammbedt gleichmäßig ohne große Toträume zu durchfließen. Das Wasser fließt durch getauchte Ablaufrohre und die Ablaufrinne aus dem SBtR ab. Der Schlammabzug erfolgt über eine um den Mitteldom verlaufende Schlammabzugsrinne.

In der Mitteldomwand befinden sich zusätzlich 4 Öffnungen mit 4 Rezirkulationspumpen, über die ein Teil des Schlammes in den Kontaktraum zurückgeführt werden kann.

KA Flensburg : Erweiterung des Zentralklärworks Kielseng

Verfahrensfließbild KA Flensburg , Stand 10/2000

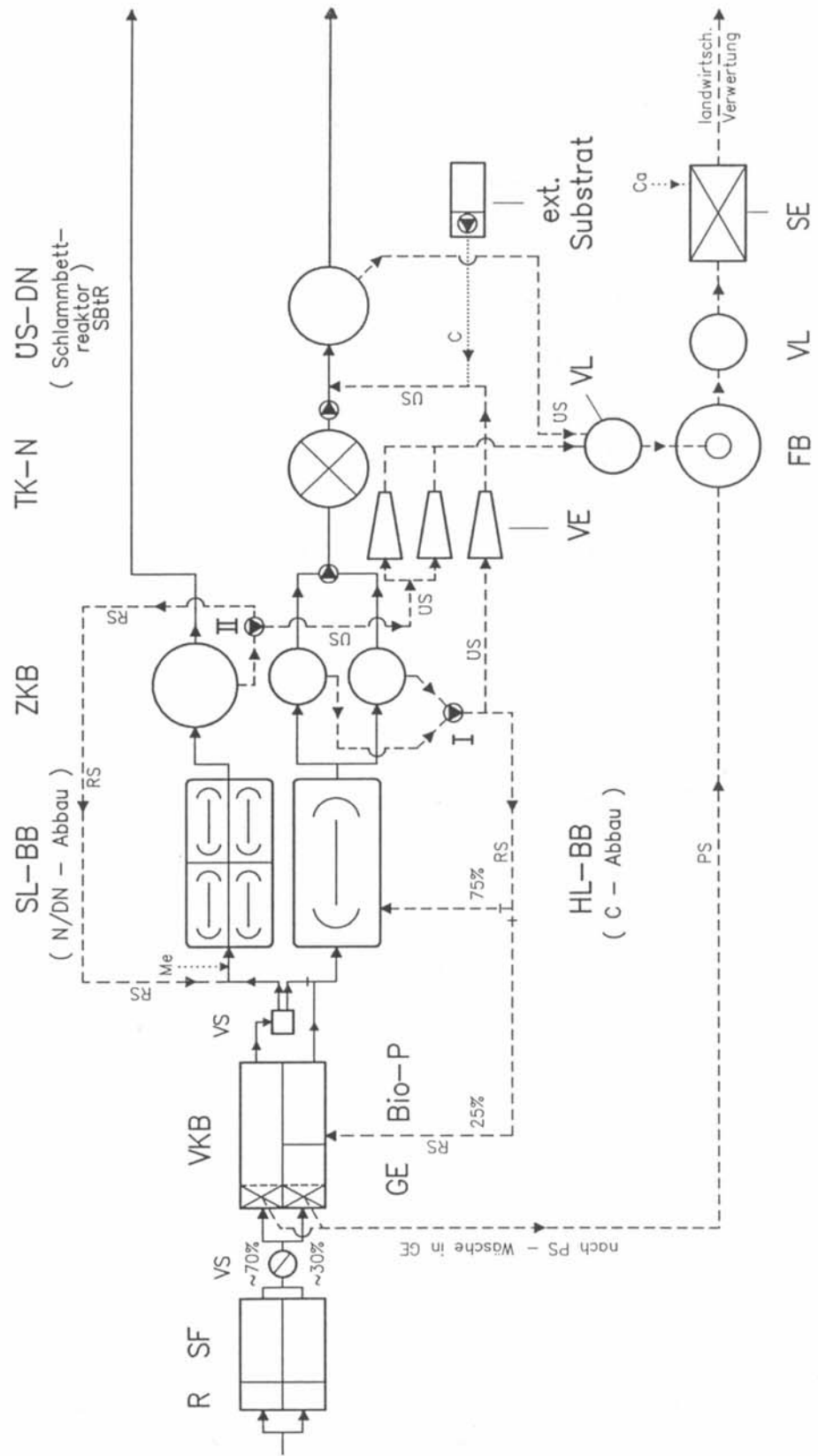


Abb. 1: Fließschema KA Flensburg

Der SBtR ist mit einer drehbaren Brücke ausgerüstet, an der eine Schwimmschlammräumung, eine Reinigungsbürste für die Ablaufrohre, 4 langsamlaufende Rührwerke für die Umwälzung des Schlammбетtes sowie ein Räumschild für die Schlammabzugsrinne des SBtR befestigt sind.

### **3 Erfahrungen bei der Inbetriebnahme**

Der Schlammбетtreaktor ist Ende November 1999 mit Abwasser befüllt worden, ab Mitte Dezember 1999 erfolgte die erste Schlammzugabe, zunächst „rückwärts“ über die Abzugsrinne mit maschinell voreingedicktem Überschußschlamm mit TS-Gehalten (eingedickt) von 3 bis 6 %. Rezirkulationspumpen und Vertikalrührwerke zur Schlammбетtumwälzung waren ab Ende Dezember in Betrieb. Das Schlammбетt in dem i.M. rd. 7 m hohen Reaktor bewegte sich in der ersten Versuchsphase bis Juni 2000 im Bereich von 4 bis 6 m Höhe, d.h. es ergibt sich eine Klarwasserzone von ca. 3 m bis minimal 1 m Höhe.

Ab Ende Januar 2000 wurde die Schlammbeschickung umgestellt auf eine Beschickung mit nicht eingedicktem Überschußschlamm. Bei einer Beschickung mit TS-Gehalten von 0,4 bis 0,7 %TS ergaben sich für den Bodenschlamm des SBtR zunächst noch ca. 15 bis 20 gTS/l, während der Feststoffgehalt in der darüberliegenden Schlammschichtung zwischen 7 und 3 gTS/l lag. Innerhalb von 8 Wochen sank der Bodenschlamm-TS kontinuierlich auf Werte um 2 bis 5 gTS/l am Boden und 1 bis 4 gTS/l in der darüberliegenden Schichtung.

In den ersten beiden Betriebsmonaten kam es immer wieder zu Schlammabtrieb durch Bodenschlammfäulung. Allein durch die vorhandenen Rührwerke, Rezirkulationspumpen und die hydraulische Beschickung der Größenordnung  $1 - 2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  waren anaerobe Vorgänge im SBtR nicht zu verhindern. Der abgesetzte Schlamm führte in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen von 7 - 10 Tagen zu starkem Schlammabtrieb, weshalb auf eine Beschickung mit nicht eingedicktem Überschußschlamm umgestellt wurde.

Schwierig gestaltete sich auch der Schlammabzug aus dem SBtR, da die Eigenschaften des eingedickten SBtR-Schlammes einen Abzug im Freigefälle nicht ermöglichte. Hier wurde schließlich eine Exzentrerschneckenpumpe für den Abzug eingesetzt.

Anfang März 2000 wurde ein provisorischer „Bodenschlammumwälzer“ in Betrieb genommen, dabei handelte es sich um ein Winkeleisen, welches an Stahlseilen an der Drehbrücke befestigt wurde. Hiermit konnte das periodische Bodenschlamm-Auftreiben vermieden werden, und es stellte sich ein wesentlich stabilerer Betriebszustand ein.

Die Betriebserfahrungen der ersten Versuchsphase führten ab Juli 2000 zu einer Nachrüstung mit einem Bodenschlamm-Umwälzräumer, die Änderung der Leitbleche am Mitteldom und der Rezirkulationsöffnungen im Mitteldom. Abbildung 2 zeigt den derzeitigen Zustand im Oktober 2000.



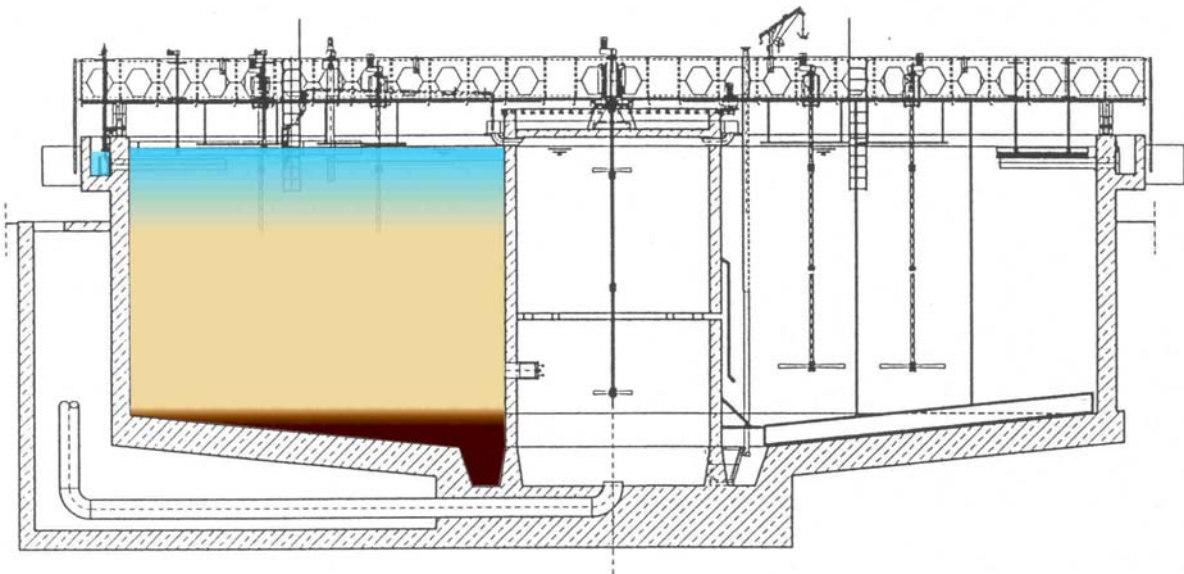


Abb. 2: Aufbau Schlammbedtrektor

#### 4 Betriebsverhalten

Nach Installation des provisorischen Bodenschlammräumers wurden weitergehende Untersuchungen möglich, deren Ergebnisse nicht mehr durch häufigen Feststoffabtrieb beeinflusst waren. Die Beschickung des SBtR erfolgte kontinuierlich mit nicht voreingedicktem Überschussschlamm, die Steuerung der Schlamm Spiegelhöhe erfolgte durch den Schlammabzug. Während der ersten Versuchsphase bis Ende Juni 2000 war die Trennung der Belebtschlammstufe in Hochlast / Schwachlast noch nicht gegeben. Daher wurde der Schlammbedtrektor hier noch mit einem Teilstrom des Überschussschlammes aus der Mischbiozönose mit einer Schlammbelastung im Bereich  $0,3 - 0,7 \text{ kgTS}/(\text{kgTS} \cdot \text{d})$  beschickt.

Ende März 2000 wurden hydraulische Versuche gefahren und die bislang kontinuierliche Beschickung von rd.  $1,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  auf  $1,8$  und  $2,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  erhöht. Dabei kam es zu einer Schlammbedexpansion und aufgrund der vorher eingestellten Schlammbedhöhe von ca.  $1,5 \text{ m}$  Klarwasserzone bereits nach  $2 - 4$  Stunden zu Schlammabtrieb. Außerdem stiegen angefaulte Schlammklumpen aus dem sonst durch die Strömung oder von dem provisorischen Umwälzräumer nicht erfaßten Zonen unter den Ablaufrohren auf. Die Versuche wurden abgebrochen.

Im Mai wurden die hydraulischen Versuche wiederholt, allerdings unter vorheriger Absenkung des Schlammbedtes, bis eine Klarwasserzone von ca.  $3,0$  bis  $3,5 \text{ m}$  erreicht wurde. Bei gleichen Flächenbeschickungen wie im März ergaben sich Schlammbedexpansionen von  $1,0$  bis  $1,5 \text{ m}$ , die über  $6$  bis  $8$  Stunden stabil gefahren wurden. Das Schlammbed hatte dabei allerdings TS-Gehalte im Bereich von lediglich

1 - 3 gTS/l. Ein Dauerversuch mit erhöhten Beschickungsmengen war aufgrund der noch fehlenden Steuerung für die Beschickungspumpen sowie geringer nächtlicher Abwasserzuläufe im Handbetrieb nicht möglich.

Ende Mai wurden erste Versuche mit Substratdosierung durchgeführt. Als Substrat wurde ein Abfallprodukt einer örtlichen Brauerei aus der Herstellung von alkoholfreiem Bier verwendet. Die Zugabemengen an Substrat waren begrenzt durch einsetzenden Feinstoffabtrieb, wenn die Dosiermenge zu hoch wurde. Auch die sonst eher geringen Schwimmschlammengen erhöhten sich beträchtlich, waren jedoch noch beherrschbar. Zwar konnte die Umsatzleistung mit Substrat gesteigert werden (vgl. Abschnitt 5), allerdings wurde schnell klar, daß aufgrund der geringen TS-Gehalte im SBtR und der begrenzten Substratzugabemengen keine ausreichende Nitratentfernung möglich werden würde.

Daher wurde angestrebt, die Schlammgehalte im SBtR durch Zugabe von voreingedicktem Schlamm wieder zu erhöhen. Es sollte eine Mischung aus nicht eingedicktem und voreingedicktem Schlamm zugegeben werden, was jedoch mit der vorhandenen Maschinenteknik nicht möglich war. Daraufhin wurde auf ausschließliche Beschickung mit voreingedicktem Schlamm über den Mitteldom umgestellt. Die erste Versuchsphase mußte jedoch Ende Juni 2000 abgebrochen werden, nachdem die Halteseile des provisorischen Umwälzräumers gerissen waren und die Vertikalrührwerke beschädigt wurden. Die erforderliche Außerbetriebnahme des SBtR wurde dann dafür genutzt, um die Nachrüstung des SBtR gemäß Abschnitt 3 und Abbildung 2 durchzuführen.

Seit Ende August 2000 ist der SBtR wieder in Betrieb und wird mit voreingedicktem Schlamm aus der nun in Schwachlast / Hochlast getrennten Belebungsstufe beschickt, vgl. Abb. 1. Bei einer Beschickung mit TS-Gehalten (eingedickt) von 4 bis 6 %TS ergeben sich für den Bodenschlamm des SBtR nunmehr ca. 20 gTS/l, während der Feststoffgehalt in der darüberliegenden Schlammschichtung zwischen 5 und 10 gTS/l liegt. Die im SBtR gehaltene Schlammmenge wurde um den Faktor 3 bis 4 erhöht, dabei kann eine Klarwasserzone von ca. 2,5 m bis 3 m eingestellt werden. Das Schlammbett ist stabil, es gibt keinen anfaulenden Bodenschlamm mehr. Die Beschickungsmengen schwanken im Tagesverlauf zwischen 1,2 und 2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), das Expansionsverhalten des Schlammbettes ist dabei vernachlässigbar.

## **5 Bisherige Meßergebnisse**

Die gute Ausstattung des Labors der KA Flensburg ermöglicht eine umfassende analytische Begleitung des Versuchsbetriebes. Die Überwachung erfolgt seit ca. Mai 2000 in Form von zeitproportionalen 24 Std.-Mischproben für den Zulauf und Ablauf des SBtR. Im Oktober 2000 werden kontinuierliche Nitratmessungen im Zulauf und Ablauf des SBtR in Betrieb genommen. Daneben werden Zulauf Schwachlastbelegung und Zulauf

Hochlastbelebungen kontinuierlich beprobt. Zusätzliche Atmungsaktivitätsmessungen werden am Hochlastschlamm und dem Schlamm aus dem SBtR durchgeführt.

Außerdem erfolgten bislang 5 Intensivbeprobungen über einen Zeitraum von jeweils 30 Stunden mit jeweils 2-Std.-Mischproben.

Die ersten beiden Intensivbeprobungen erfolgten im Februar, als es immer noch zu zeitweisem Auftrieb von angefaultem Schlamm kam. Es ergaben sich Umsatzraten der Größenordnung  $0,5 - 0,7 \text{ g}_{\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}}/(\text{kgTS} \cdot \text{h})$  bei  $10$  bis  $12^\circ\text{C}$  Wassertemperatur. Schwierig ist die genaue Feststellung der jeweils im Reaktor vorhandenen und geschichteten Feststofftrockenmasse, diese kann nach Analytik von Schlammprofilmessungen in  $1\text{-m}$ -Abständen nur mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 20\%$  abgeschätzt werden. Außerdem sind die Werte noch nicht korrigiert um die bei der Analytik miterfaßten Salzgehalte von  $400$  bis  $700 \text{ mg/l}$ .

Im Mai erfolgten zwei weitere Intensivbeprobungen unter Zugabe von Substrat aus einer Brauerei mit  $\beta = \text{ca. } 0,5 \text{ g}$  dosierter CSB / Nitrat im Zulauf. Es ergaben sich Umsatzraten der Größenordnung  $< 2 \text{ g}_{\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}}/(\text{kgTS} \cdot \text{h})$  bei  $15$  bis  $17^\circ\text{C}$  Wassertemperatur.

Die fünfte Intensivbeprobung erfolgte Ende September ohne Substratzugabe bei wesentlich erhöhten Schlammgehalten im SBtR. Damit war eine Elimination der zulaufenden Nitratfrachten in der Größenordnung von  $50\%$  bei hydraulisch stark schwankenden Bedingungen und stabilem Betriebsverhalten zu verzeichnen.

## **6 Ausblick**

Das nach der Ergänzung der maschinentechnischen Ausrüstung des Schlammbettreaktors vorliegende Betriebsverhalten ist hinsichtlich der Stabilität gegenüber hydraulischen Belastungsschwankungen sowie hinsichtlich der im Reaktor gehaltenen Biomasse erheblich verbessert und läßt nunmehr die erwarteten Eliminationsleistungen möglich erscheinen. Die Rückkopplungen mit der Belebungsstufe und dort abfließenden Feststofffrachten zum SBtR (die im SBtR nicht immer zurückgehalten werden können) werden derzeit untersucht. Es sind weitere Versuche, insbesondere zur Stabilisierung des Verhaltens bei geringen Zuflüssen in der Nacht und maximaler hydraulischer Belastung am Tage sowie bei Zugabe von externem Substrat erforderlich. Die Versuche sollen zum Ende des Jahres 2000 soweit abgeschlossen sein, daß die Fragen zum möglichen hydraulischen Betriebsbereich, den erzielbaren biologischen Umsatzraten und die sich dabei ergebenden Suspensagehalte im Ablauf des SBtR beantwortet werden können, um die grundlegende Entscheidung für den weiteren Ausbau der KA Flensburg treffen zu können. Im Anschluß werden weitere Versuche zur Optimierung des Verfahrens im Betrieb durchgeführt.

## **Danksagung**

Dank gebührt der Betriebsleitung und dem Betriebspersonal der KA Flensburg für die sehr engagierte Durchführung und gemeinsame Betreuung der Versuche, insbesondere Herrn Drews, Herrn Koll, Herrn Thomsen und Herrn Sönnichsen sowie der Laborleitung Frau Wüstenhagen.

## LITERATUR

Ing.-Büro Buß und Hempel (1997): Ausbau des Zentralkläwerks Kielseng der Stadt Flensburg, Ausführungsentwurf 1997, unveröffentlicht

Malchow, Thorsten (1995): Beitrag zur nachgeschalteten Denitrifikation mit Belebtschlamm als H-Donator: Auslegungsmethoden, Betriebsstrategien und Optimierung des Verfahrens, Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 16

## ANSCHRIFT DER AUTOREN

- Dipl.-Ing. S. Buß  
Ingenieurbüro Buß und Hempel, Botterstieg 3, 23611 Bad Schwartau
- Dipl.-Ing. J. Einfeldt, Dr.-Ing. H.-O. Günter  
Privatinstitut für Klärtechnik, Botterstieg 1, 23611 Bad Schwartau
- Prof.-Dr.-Ing. I. Sekoulov  
Sekoulov, Rohbrecht + Partner, Nartenstraße 4a, 21039 Hamburg