

Verfahrensoptimierung mehrstufiger Abwasserreinigungssysteme am Beispiel der Kläranlage Flensburg

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

Zusammenfassung

Auf der Kläranlage Flensburg wird zur Einhaltung von Grenzwerten für den Gesamtstickstoff von $10 \text{ mgN}_{\text{ges}}/\text{l}$ und sehr beengten Platzverhältnissen am Ufer der Flensburger Förde ein mehrstufiges Klärsystem mit separaten Reaktoren für die Reinigungsschritte Kohlenstoff-Abbau in einer Hochlastbelebung, Nitrifikation in Tropfkörpern, nachgeschalteter Denitrifikation in Schlammbedtreaktoren und einer abschließenden zweistufigen Filtration zur Suspensaentnahme und Phosphorelimination sowie der Möglichkeit der Restnitrifikation und Restdenitrifikation gebaut. Durch den Einsatz einer mehrstufigen Stickstoffelimination läßt sich ein höherer Wirkungsgrad erzielen, außerdem zeigt sich eine hohe Flexibilität des Betriebes und die Möglichkeit des stufenweisen Ausbaus der Kläranlage. Mit dem bereits fertiggestellten Teil der Gesamtanlage bestehend aus Hochlastbelebung, Tropfkörper 1 und Schlammbedreaktor 1 werden seit Ende 1999 Versuche durchgeführt. Die erste Versuchsphase bis Anfang 2001 diente insbesondere der Untersuchung des Betriebsverhaltens des neuartigen Schlammbedreaktors und der Festlegung von Bemessungsparametern für die endgültige Dimensionierung von Tropfkörper- und Schlammbedreaktorstufe sowie der Filtration. In einer weiteren Versuchsphase ab Sommer 2002 werden nun die Abhängigkeiten der einzelnen Verfahrensparameter (z.B. Flächenbeschickungen und Rezirkulation, Schlammbedhöhe und -expansion, Nutzung interner und externer Substrate) untersucht und im großtechnischen Maßstab das Steuer- und Regelverhalten des Gesamtsystems erprobt. Durch die intensive Einbeziehung des Betriebspersonals in den Versuchsbetrieb zusammen mit der externen wissenschaftlichen Begleitung wird ein ständiger Erfahrungstransfer und die Mitarbeiterschulung gewährleistet. Im Vortrag wird auf betriebliche Erfahrungen mit dem mehrstufigen System eingegangen. Aktuelle Betriebsergebnisse und Leistungsdaten, aber auch Besonderheiten wie Schneckenbefall des Tropfkörpers und deren Beseitigung unter Betriebsbedingungen oder Versuche zur Nitrifikationshemmung durch Methanolsubstrat werden vorgestellt.

1 Einleitung

Mehrstufige Klärsysteme zur Nitrifikation / Denitrifikation bieten besondere Vorteile, wenn sehr niedrige Ablaufwerte für den Gesamtstickstoff gefordert sind und beengte Platzverhältnisse für den Ausbau einer Kläranlage vorliegen. Auf der Kläranlage Flensburg wird derzeit bei Grenzwerten für den Gesamtstickstoff von $10 \text{ mgN}_{\text{ges}}/\text{l}$ ein dreistufiges Klärsystem mit separaten Reaktoren für die Reinigungsschritte BSB-Abbau, Nitrifikation und nachgeschaltete Denitrifikation realisiert. Das vom Ingenieurbüro Buß und Hempel und Prof. Dr.-Ing. I. Sekoulov stammende Konzept setzte sich in einem 1984 durchgeführten Ingenieurwettbewerb durch. Die Basis für die Dimensionierung der großtechnischen Anlage bildeten halbtechnische Versuche aus den Jahren 1986/1987, eine Überprüfung der Bemessungsgrundlagen 1996/1997, halbtechnische Versuche auf der Kläranlage Nürnberg zur nachgeschalteten Denitrifikation [Malchow 1995] sowie die seit 1999 laufenden großtechnischen Versuche auf der KA Flensburg [Buß et al. 2000]. Über das Verfahrenskonzept, die Bemessung der Kläranlage Flensburg und erste Betriebsergebnisse wurde bereits in [Buß et al. 2001] berichtet. Mittlerweile liegen weitere Erkenntnisse zum Betriebsverhalten des Nitrifikations-Tropfkörpers und zur nachgeschalteten Denitrifikation in Schlammbedreaktoren vor. Die verfahrenstechnisch letzte Reinigungsstufe der Filtration befindet sich derzeit in der Ausführungsplanung und Ausschreibung.

Vereinfacht besteht der biologische Teil des Klärsystems aus 2 Belebungsbecken (Hochlast und Schwachlast), zwei Nitrifikations-Tropfkörpern und einer nachgeschalteten Denitrifikation. Der Überschussschlamm aus der Hochlastbelebung dient als Elektronendonator für die Denitrifikation.

2 Tropfkörperstufe

Die aktuellen Leistungsdaten des Tropfkörpers TK 1 sind Tabelle 1 zu entnehmen. Es ergaben sich zuletzt Abbauleistungen in der Größenordnung einer Nitrifikation von 21 bis $26 \text{ mgNO}_3\text{-N}/(\text{m}^2\text{h})$ bei 17°C , entsprechend einem Raumumsatz von rd. $120\text{-}150 \text{ gN}/(\text{m}^3\text{d})$. Dies liegt innerhalb des in [ATV 2001] genannten Bereiches von rd. $100 \text{ gN}/(\text{m}^3\text{d})$ bei brockengefüllten Tropfkörpern und bis zu $200 \text{ gN}/(\text{m}^3\text{d})$ bei Kunststoff-Füllmaterial.

Tabelle 1: Ammoniumabbau und Nitratbildung von TK 1 der KA Flensburg

Zeitraum der Beprobung	Temperaturbereich [°C]	NH ₄ -N Abbau [mgNH ₄ -N/(m ² *h)]	NO ₃ -N Bildung [mgNH ₄ -N/(m ² *h)]
12. bis 15.02.01	10,5 bis 11,9	13 bis 26	13 bis 15
09. bis 12.07.01	16,5 bis 18,4	13 bis 28	13 bis 20
04.06.02	17	21 bis 26	21 bis 26

2.1 Schneckenbefall des Tropfkörpers TK 1

Die geringeren Leistungen in der Zeit von Januar-Oktober 2001 sind auf einen Schneckenbefall des Tropfkörpers zurückzuführen, die explosionsartige Vermehrung Ende Juli 2001 führte schließlich zu einem Rückgang der Umsatzleistung um mehr als 80 %. Die Schnecken wurden identifiziert als Blasenschnecke *Physella heterostropha*. Diese Art ist in Deutschland nicht heimisch und wahrscheinlich über Aquarienwasser eingeschleppt worden. Sie bevorzugt nährstoffreiche, warme Gewässer und erträgt auch leichtes Brackwasser. Bekämpfungsmaßnahmen wie in [ATV 1997], z.B. Aufstau oder Abkühlung und Austrocknung, sind in Flensburg nicht möglich. Schnecken-tötende Pflanzenschutzmittel (Molluskizide) in den erforderlichen Konzentrationen sind wahrscheinlich auch für die Nitrifikanten des TK toxisch [Wiese, 2001]. Als erfolgreich erwies sich im Oktober 2001 ein von [Albertson 2001] vorgeschlagenes Verfahren:

Eine pH-Wert-Erhöhung in den Bereich 9,5 bis 9,8 für ca. 4 Stunden hat bei Tropfkörperanlagen in den USA Abhilfe geschaffen. Unterhalb pH 10 bleiben die Nitrifikanten erhalten. Wirksam ist das durch die pH-Verschiebung aus dem Ammonium entstehende Ammoniak. Der Versuch muß zwei bis dreimal wiederholt werden, da der Laich der Schnecken durch diese Maßnahme nicht erfaßt wird. Es wurde im Durchlaufbetrieb gearbeitet, damit im Tropfkörper ständig ein nicht umgesetzter NH_4 -Anteil vorhanden ist. Zur vollständigen Abtötung haben sich in Flensburg Ammonium-Konzentrationen der Größenordnung von mehr als 5 mg bis max. 35 mgNH_3/l für ca. 6 Stunden als erfolgreich gezeigt. Die Schnecken wurden zu 100 % abgetötet, der Laich blieb jedoch wie erwartet erhalten.

2.2 Schneckenbekämpfung unter Betriebsbedingungen

Bei einem ersten Wiederholungsversuch Anfang 2002 stellte sich heraus, daß der NaOH-Bedarf zur pH-Erhöhung bei wieder vorhandenem Mikroorganismen-Bewuchs etwa 3 bis 4 mal höher war als kurz nach dem Zusammenbruch der Nitrifikation im Juli 2001. Aufgrund zu niedriger pH-Werte wurde keine ausreichende Wirkung erzielt. Ein Teil dieses Mehrbedarfes an Natronlauge war auf die inzwischen wieder weitgehende Nitrifikation im Tropfkörper zurückzuführen. Um diesen Mehrbedarf zu verringern, bot sich die gezielte Nitrifikationshemmung mit dem auf der Kläranlage vorhandenen Substrat Methanol an. Verschiedene Autoren, zitiert in [Rheinheimer et al. 1988], geben als erforderliche Konzentration 116 bis 160 mgMethanol/l für eine vollständige Nitrifikations-Hemmung an.

Im großtechnischen Versuch wurde am 14.02.02 und 06.04.02 Methanol in die Rezirkulationsleitung des TK 1 dosiert. Die sich im TK 1 ergebende Methanolkonzentration wurde über die Messung des membranfiltrierten CSB im Zu- und Ablauf abgeschätzt. Es zeigte sich, daß bei Konzentrationen von ca. 70 bis 90 mgMethanol/l keine Hemmung eintrat. Bei Dosiermengen von rd. 90 kg Methanol/h, entsprechend einer Konzentration von ca. 300 bis 330 mgMe/l im TK 1, ist für die im Tropfkörper gebildeten $\text{NO}_x\text{-N}$ -Frachten ein Rückgang auf rd. 4 $\text{mgNO}_x\text{-N}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ zu erkennen, vgl. Diagramm 1. Das bedeutet gegenüber den am 18.12.01 und 04.06.02 durchgeführten Leistungsmessungen des Tropfkörpers eine Hemmung von rd. 80 %. Überschlüssig ergab sich, daß bei 80%iger

Hemmung durch den Einsatz von rd. 900 kg Methanol eine Menge von 1.500 kg NaOH_{45%} eingespart werden könnte.

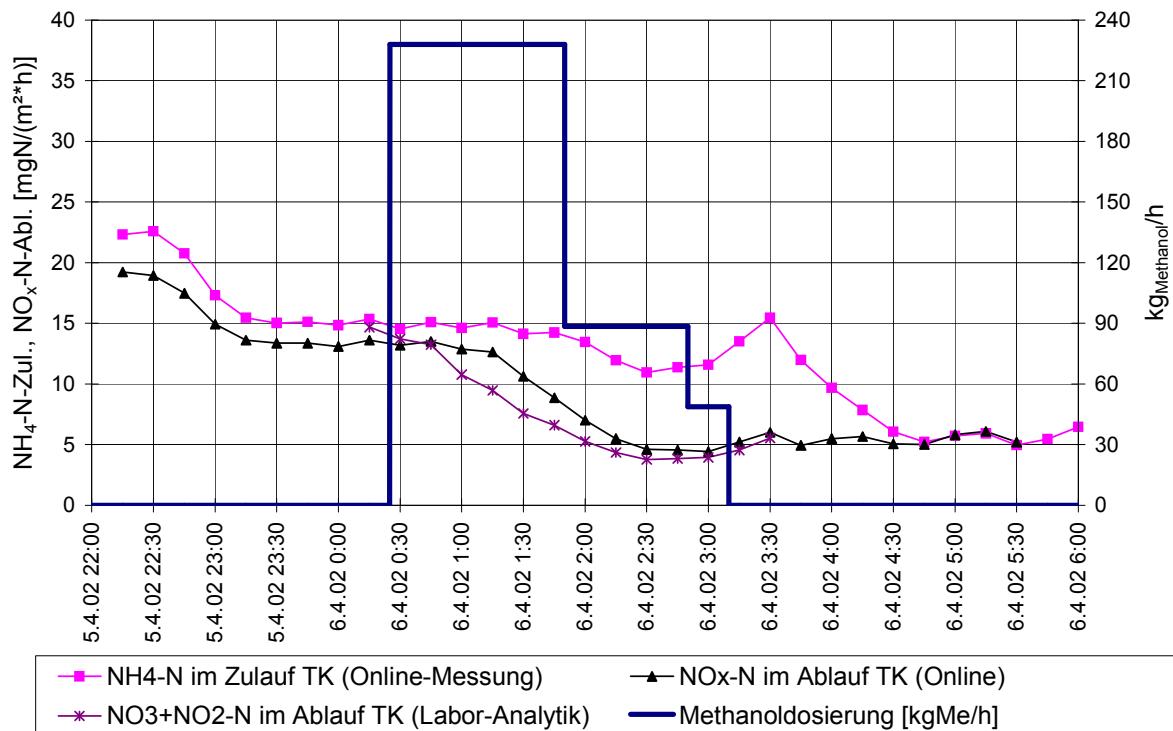


Abb. 1: Methanoldosierung in den TK 1 am 06.04.02 sowie NH₄-N im Zulauf, NO_x-N im Ablauf, NO_x-N im Zulauf < 0,4 mgN/(m²·h)

Allerdings ließ sich der erhöhte Natronlaugebedarf zur Einstellung von pH-Werten > pH 9,5 nicht allein durch die gegenüber Herbst 2001 gestiegene Nitrifikationsleistung des TK erklären. In Laborversuchen zeigte sich, daß bei Abwasser-Belebtschlammgemischen der Natronlaugebedarf zur Einstellung von pH-Werten im Bereich 9,5 bis 9,8 gegenüber Abwasser um den Faktor 3 erhöht sein kann.

Ein weiterer Versuch im Juni 2002 unter der Nutzung der Hemmwirkung von Methanol und unter Berücksichtigung des durch die pH-puffernde Biomasse verursachten Mehrbedarfes an NaOH schlug fehl. Zwar wurde die Größenordnung des NaOH-Mehrbedarfes um den Faktor 2-3 im großtechnischen Versuch bestätigt, durch eine Überdosierung an NaOH bis zu einem Wert von pH 12 am Ende des Versuches wurden jedoch nicht nur Schnecken und Schneckenlaich, sondern auch der gesamte nitrifizierende Tropfkörperbiofilm abgetötet. Den Verlauf des Wiederanfahrbetriebs zeigt Diagramm 2. Die Wiederherstellung der ursprünglichen Nitrifikationsleistung benötigte etwa 3 Wochen.

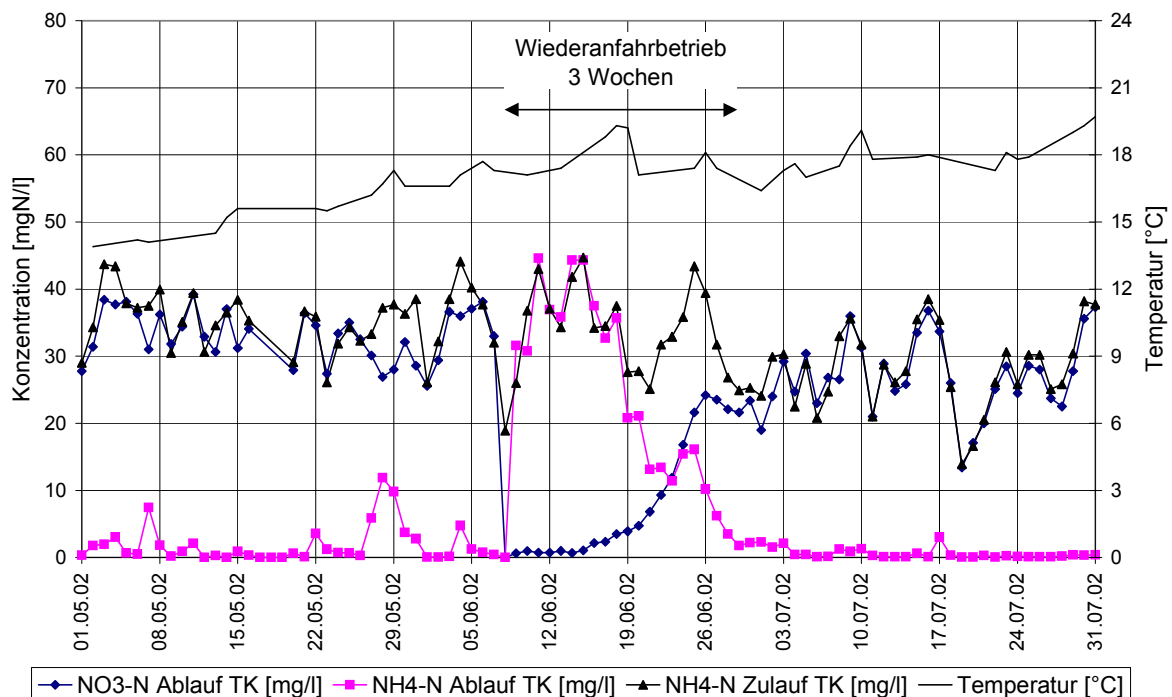


Abb. 2: Wiederanfahrbetrieb des TK 1

Falls zukünftig wieder Maßnahmen zur Schneckenentfernung erforderlich werden, soll das beschriebene Verfahren modifiziert angewendet werden. Die gezielte Nitrifikationshemmung durch Methanol ermöglicht den Übergang vom Durchlaufverfahren zu einem quasi Batch-Betrieb mit konstanter, aber mengenmäßig geringer Zugabe von ammoniumreichem Trübwasser. Diese Variante ist betrieblich einfacher zu kontrollieren. Geeignete Dosierstellen für zukünftige Maßnahmen werden daher vorsorglich eingerichtet.

3 Nachgeschaltete Denitrifikation im Schlammbettreaktor

Die mit dem großtechnisch realisierten Schlammbettreaktor 1 (SBtR 1) der Kläranlage Flensburg erzielbaren Denitrifikationsleistungen wurden bereits in 2001 ermittelt, bildeten die Grundlage für die Ausführungsplanung der zweiten Straße bestehend aus TK 2 / SBtR 2 und sind in [Buß et al. 2001] beschrieben. Als Betriebserfahrung hat sich gezeigt, daß die Art der Einlaufgestaltung im SBtR von großer Bedeutung ist. Durch Nachrüstung mit Blechschürzen wurde der Einlauf tief in die Nähe des Reaktorbodens heruntergezogen. Es ist anzustreben, das Abwasser unter dem Schlammspiegel möglichst gleichmäßig zu verteilen. Die Geometrie des Reaktors und dessen Tiefe sind bestimmend für das maximal mögliche Denitrifikationsvermögen des SBtR im Einzelfall.

Seit August 2002 ist über eine zusätzliche externe Rezirkulationsleitung der Betrieb des SBtR 1 bei konstanten Flächenbeschickungen möglich. Um die zukünftig günstigsten hydraulischen Betriebsbereiche im Hinblick auf die Feststoffbelastung der nachgeschalteten Filtration zu ermitteln, werden derzeit Versuche zum Expansionsverhalten des Schlammbettes unter verschiedenen hydraulischen und Stickstoff-Belastungen durchgeführt.

Die bisherigen Betriebserfahrungen mit dem SBtR ließen für eine Expansion des Schlammbedtes um mehr als 1 m und gleichzeitiger Substratdosierung die kurzzeitig erhöhte Freisetzung von abfiltrierbaren Stoffen bis zu 200 mgAFS/l erwarten. Unter den Randbedingungen einer vorherigen konstant hohen Flächenbeschickung von $2,7 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ während des Schlammbedtaufbaues und zunächst ohne Dosierung von externem Substrat wurde die Flächenbeschickung für jeweils 4 Stunden auf $2,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, $1,7 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ und $1,3 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ reduziert und anschließend wieder auf den Ausgangswert angehoben. Das Schlammbed hatte einen Expansionsbereich von 0,5 bis 1,0 m. Bei dem im Diagramm 3 dargestellten Zusammensinken und dem anschließenden Expandieren wurden Ablaufwerte der Größenordnung von 15 bis 45 mgAFS/l festgestellt.

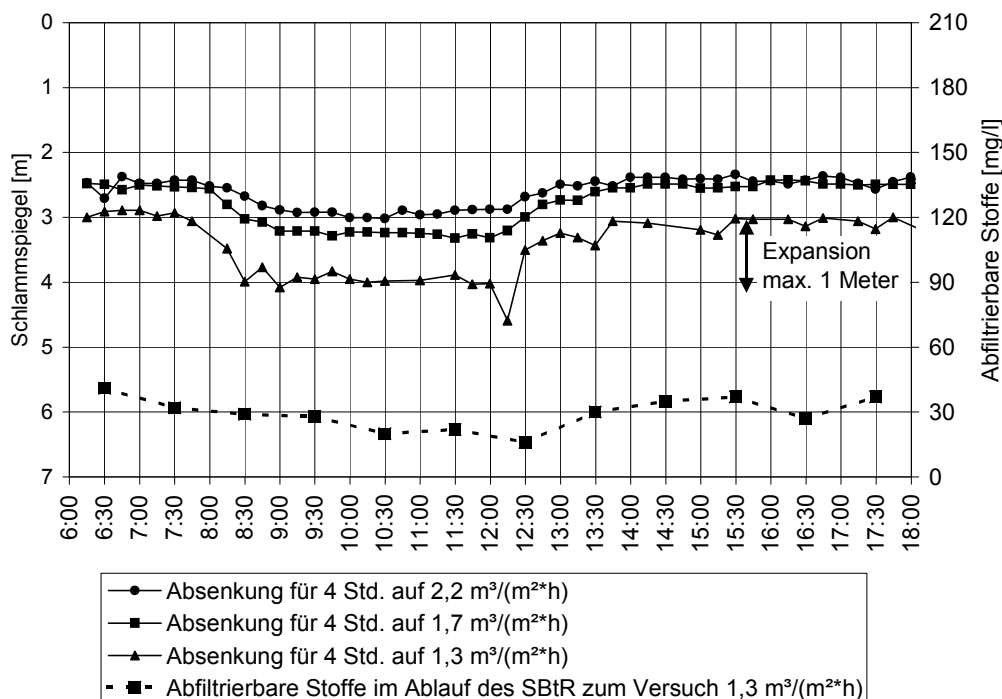


Abb. 3: Verlauf des Schlammspiegels bei verschiedenen hydraulischen Belastungsversuchen und Feststoffe im Ablauf des SBtR

Weitere Versuche mit Dosierung von externem Ethanol-Substrat aus einer Brauerei und technischem Methanol werden z.Zt. durchgeführt. Ebenso ist eine Anpassung des Betriebs der maschinentechnischen Einrichtungen wie Bodenschlammräumer und Vertikalrührwerke im Schlammbed an die von der mittleren Flächenbeschickung abhängigen Schlammbedeigenschaften erforderlich.

Für den späteren Betrieb der Filtration sind die Versuche zum Schlammbedverhalten bei gleichzeitiger Dosierung von externem Substrat entscheidend. Diese Versuche waren zum Zeitpunkt der Drucklegung des Manuskriptes noch nicht abgeschlossen, hierauf wird im Vortrag mit aktuellen Ergebnissen eingegangen. Ziel ist es, den Betrieb des SBtR in Kombination mit der derzeit im Bau befindlichen Filtration der Kläranlage Flensburg bei

prozeßstabilen Ablaufwerten wirtschaftlich optimal zu betreiben. Die entscheidenden sich gegenseitig beeinflussenden Parameter sind hierbei externer Substratbedarf im SBtR, Reststickstoffabbau und externer Substratbedarf in der Filtration sowie erforderlicher Feststoffrückhalt und damit notwendige Spülintervalle in der zweistufigen Filtration.

4 Ausblick

Das Rückhaltevermögen für abfiltrierbare Stoffe von Schlammspiegeln ist seit langem bekannt und wird auf Kläranlagen technisch in Form von Nachklärbecken genutzt. Darüberhinaus werden Schlamm Spiegel zusätzlich für die Durchführung von biologischen Reinigungsprozessen wie z.B. die Denitrifikation oder die anaerobe Abwasserreinigung eingesetzt. Dies ist auch Thema eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU, Osnabrück, unterstützten Forschungsvorhabens. Beteiligt sind die RWTH Aachen (Verfahrenstechnische Grundlagen der SBtR), die TU Hannover (anaerobe Prozesse) und die TUTECH-Hamburg (Denitrifikation). Anfang 2003 werden im Rahmen eines Kolloquiums die ersten Ergebnisse vorgestellt. Nach dem Forschungsprogramm werden hauptsächlich die Zusammenhänge zwischen der Betttiefe, dem Schlammgehalt, Schlammindex, der Durchflußgeschwindigkeit, den Denitrifikationsraten bzw. der anaeroben Gasbildung, der Reaktorhöhe usw. untersucht. Die Versuche auf der KA Flensburg mit dem SBtR sind von besonderer Bedeutung für den praktischen Betrieb und später für die Verifizierung theoretisch gewonnener Erkenntnisse aus der Forschung.

Danksagung

Die Autoren danken der Betriebsleitung und dem Betriebspersonal der KA Flensburg für die sehr engagierte Durchführung und gemeinsame Betreuung der Versuche, insbesondere Herrn Drews und Herrn Thomsen sowie der Laborleitung Frau Wüstenhagen.

QUELLENVERZEICHNIS

Albertson, Orris (2001): Persönliche Mitteilungen

ATV (1997): ATV-Handbuch „Biologische und weitergehende Abwasserreinigung“, 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn Berlin, S. 181-182

ATV (2001): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 281 Bemessung von Tropfkörpern und Rotations-tauchkörpern, September 2001

Buß S., Einfeldt J., Günter H., Sekoulov I. (2000): Nachgeschaltete Denitrifikation in Schlammbettreaktoren, 13. Fachtagung „Weitergehende Abwasserreinigung als Beitrag zum Schutz von Nord- und Ostsee“, Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 31, S.235-242

Buß S., Einfeldt J., Günter H., Sekoulov I. (2001): Schlammbettreaktoren zur Denitrifikation mit Überschußschlamm auf der KA Flensburg: Verfahrenskonzept, Bemessung, Betriebsergebnisse; 14. Fachtagung „Weitergehende Abwasserreinigung als Beitrag zum Schutz von Nord- und Ostsee“, Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 33, S.99-108

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

Rheinheimer G., Hegemann W., Raff J. und Sekoulov I. (Hrsg, 1988): Stickstoffkreislauf im Wasser, R. Oldenbourg Verlag München Wien 1988, S.115-117

Wiese, Vollrath (2001): Persönliche Mitteilungen

ANSCHRIFT DER AUTOREN

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