

Optimaler Betrieb von Nachklärbecken unter besonderer Berücksichtigung der Schlammräumung

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

ROLAND HOLLENSTEIN

Dipl. Ing. ETH

geboren am 29. März 1970

von Mosnang SG

Angenommen auf Antrag von

Referent Prof. Dr. H.-E. Minor

Korreferent Prof. Dr. W. Gujer

Korreferent Dr. P. Volkart

2005

Zusammenfassung

Die Funktionsweise des Nachklärbeckens (NKB) als Absetzbecken im Belebtschlammverfahren von Kläranlagen steht in engem Zusammenhang mit dem hydromechanischen Verhalten, das im NKB von Dichteströmungen dominiert ist. Jeglicher Energieeintrag ins Becken führt zu einer Störung des Absetzprozesses und damit zu einer Verlängerung der Schlammaufenthaltszeit. Zentrale Energiequellen sind dabei der Zufluss und die Räumerbewegung unter Berücksichtigung der Schlammmzusammensetzung, bzw. der Dichteverhältnisse des Schlamm-Wasser Gemischs.

Das Strömungs- und Absetzverhalten im NKB ist entsprechend der Beckengeometrie und den verfahrenstechnischen Randbedingungen individuell und damit bei jedem Becken verschieden. Mit der vorliegenden Untersuchung wird das grundsätzliche Verhalten des Zulaufstrahls und des Räumerbetriebs aufgezeigt, woraus sich für den konkreten Fall die entsprechenden Schlüsse ableiten lassen. Die Modellierung erfolgte zur Hauptsache mit einem physikalischen Modell, welches im halbtechnischen Massstab mit echtem Belebtschlamm betrieben wurde. Ergänzend wurden vor allem für die Beurteilung des Zulaufstrahls analytische und numerische Modellierungen einbezogen.

Der Energieeintrag ins NKB wurde durch eine systematische Variation des Räumerbetriebs und der Zulaufbedingungen, bzw. der hydraulischen Beckenbelastung untersucht. Dabei galt es für verschiedene Schlammmzusammensetzungen, definiert durch den Schlammvolumenindex SVI, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Dichteverhältnisse zu erfassen. Der Schlammvolumenindex variierte dabei zwischen $SVI = 55$ bis 200 ml/g und die Feststoffkonzentration lag in der Regel im Bereich $X_{BB} = 2.5$ bis 3.5 kg/m^3 . Unterschiedliche hydraulische Belastungen resultierten aus der Kombination der gewählten Oberflächenbelastungen $q_A = 1$ und 2 m/h mit den Rücklaufverhältnissen $RV = 0.5$ und 1.0 . Mittels Ultraschallsensoren und Feststoffkonzentrationssonden wurden die Zustandsgrößen im Nahbereich der Räumebalken, aber auch global im gesamten NKB mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst. Basierend auf diesen Messungen konnten das hydromechanische Verhalten im NKB weitestgehend bestimmt und daraus optimale Betriebseinstellungen abgeleitet werden. Des Weiteren wurde durch ein kombiniertes Verfahren mit einem kleinen und einem grossen Absetzzyylinder zum ersten Mal die Absetzgeschwindigkeiten für die gesamte Bandbreite der im NKB vorhandenen Feststoffkonzentrationen von $X = 0.02$ bis 30 kg/m^3 erfasst. Die daraus entwickelte neue Absetzfunktion erlaubt dabei insbesondere für die numerische Modellierung eine fortgeschrittene Beschreibung des Absetzprozesses.

Grundlage für die Optimierung des NKB-Betriebs bilden die klassischen Funktionen des NKB, wie die Absetz-, die Speicher- und die Eindickfunktion, welche durch eine minimale mittlere Schlammбетhöhe H_S mit minimaler Schlammmasse M_S optimal erfüllt werden. Die mittlere Schlammбетhöhe H_S ist denn auch der zentrale Zustandsparameter, welcher für eine gegebene Schlammmzusammensetzung (SVI) den Energieeintrag vom Zufluss und vom Räumerbetrieb als charakteristische Grösse wiedergibt.

Sowohl die analytische, als auch die physikalische Modellierung zeigen, dass für einen minimalen Energieeintrag des Zuflusses der Zulaufstrahl in diejenige Schicht des Schlammбетts eingeleitet werden muss, welche die gleiche Dichte wie der Zulaufstrahl aufweist. Bei einer üblichen Feststoffkonzentration im Einlauf von $X = 3$ bis 3.5 kg/m^3 entspricht dies mit guter Näherung dem Niveau des Schlammspiegels, d.h. ohne Schlammüberdeckung Δh des Zulaufstrahls. Ein minimaler Zuflussenergieeintrag ist aber nur dann gewährleistet, wenn zusätzlich zu $\Delta h = 0$, eine optimale Einlaufhöhe h_0

bei einer densimetrische Froudezahl $Fr_{d0} = 0.7$ vorhanden ist. Eine Abweichung vom minimalen Zuflussenergieeintrag führt zu einer erhöhten Einmischung von Umgebungsfluid in den Zulaufstrahl und damit zu grösseren Schlammбетhöhen, längeren Schlammaufenthaltszeiten und einem verstärkten Eintrag von fein suspendierten Belebtschlammflocken in den Absetzbereich, bzw. in den Ablauf.

Um einer ausreichenden Schlammräumung und einer minimalen Aufwirbelung des Schlammбетts gerecht zu werden muss der vom Räumler geräumte Schlammtransport f_r dem Schlammtransport f_{RS} in den Rücklauf entsprechen ($f_r/f_{RS} = 1.0$). Abweichungen vom optimalen Verhältnis $f_r/f_{RS} = 1.0$ bewirken entweder einen zu kleinen Schlammtransport ($f_r/f_{RS} < 1.0$) oder interne, reflektierende Wellen ($f_r/f_{RS} > 1.0$), was in beiden Fällen zu einer Vergrößerung der Schlammбетhöhe H_S und der Schlammmasse M_S führt. Der Räumerschammtransport f_r ist dabei eine Funktion des Räumlerbetriebs und der Feststoffkonzentration am Boden. Es zeigt sich, dass bei einem schlecht absetzbaren Schlamm mit einem Schlammvolumenindex $SVI > 150$ ml/g der Räumlerbetrieb nur noch eine untergeordnete Rolle für die Schlammбетhöhe spielt, während bei einem gut absetzbaren Schlamm mit $SVI < 90$ ml/g die Transportprozesse im NKB und damit die Schlammбетhöhe durch den Räumlerbetrieb massgeblich beeinflusst werden.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung erlauben eine Ergänzung der bestehenden NKB-Bemessung hinsichtlich des Energieeintrags aus dem Räumlerbetrieb und dem Zufluss. Basierend auf der mittleren Schlammбетhöhe H_S als charakteristische Grösse für den Energieeintrag ins NKB lässt sich für eine maximal erlaubte Feststoffkonzentration X_E im Ablauf die erforderliche Beckenhöhe H bestimmen. Je grösser die Höhe zwischen Schlamm Spiegel und Ablauf und je optimaler der Energieeintrag, desto kleiner ist die Feststoffkonzentration X_E im Ablauf. Als konstruktive Massnahmen werden für eine Optimierung des Energieeintrags eine mobile Einlaufgeometrie oder ein flexibler NKB-Betrieb empfohlen.

Auf Grund der vorliegenden Untersuchung zeigt sich, dass das hydromechanische Verhalten seiner Bedeutung entsprechend in den Bemessungsvorgaben für NKB zu berücksichtigen ist.

Abstract

The performance of final settling tanks (NKB) as a sedimentation basin in the activated sludge process of waste water treatment plants are in close relation with the hydromechanical behavior, which is dominated by density currents. Any energy input in the tank leads to a disturbance of the settling process and thus to a longer sludge residence time. Main energy sources are thereby the inflow and the scraper movement with consideration of the sludge composition and the density of the sludge-water mixture respectively.

With this investigation the fundamental behavior of the inlet jet and the scraper operation in NKB is evaluated. The main part of the modeling consisted of physical model tests in a pilot plant, which was operated with real activated sludge. Additionally analytic and numeric modelling was included for the description of the inflow.

The energy input in the NKB was investigated by a systematic variation of the scraper operation and the inlet conditions, and accordingly the hydraulic load for the tank. Therefore it was necessary to evaluate the flow velocities and the density distribution for different sludge composition, defined by the sludge volume index SVI. The sludge volume index varied between $SVI = 55$ to 200 ml/g and the total solid concentration usually lay in the range $X_{BB} = 2.5$ to 3.5 kg/m³. Different hydraulic loads resulted from

the combination of the selected surface overflow rate $q_A = 1$ and 2 m/h with the underflow recycle ratio $RV = 0.5$ and 1.0 . By ultrasonic sensors and total solid concentration probes the state variables close to the scraper bars as well as globally for the entire NKB were measured with high spatial and temporal resolution. Based on these measurements the hydromechanical behavior could be defined and optimum operation conditions for the NKB could be derived. Furthermore the settling velocity for the whole range of the total solid concentrations $X = 0.02$ to 30 kg/m³ prevailing in the NKB were measured for the first time by a combined procedure with a small and a large settling cylinder. The new settling function then permits an advanced description of the settling process for the numeric modelling.

The base for the optimization of the operation in NKB are the classical functions of the NKB, like the sedimentation, the storage and the thickening function, which were fulfilled by a minimum average sludge bed height H_S with a minimum sludge mass M_S . The minimum average sludge bed height H_S is therefore the central state variable, which shows the energy input of the inflow and of the scraper operation for a given sludge composition (SVI).

Both the analytical, and the physical modelling show that for a minimum energy input of the inflow, the inlet jet must be injected into a layer with the same density as the inflow jet. With a typical total solid concentration for the inflow of $X = 3$ to 3.5 kg/m³ this layer would be the sludge bed level, whereas for the inflow jet no sludge cover Δh occurs. A minimum inflow energy input is only given if additionally to $\Delta h = 0$ an ideal inflow height of h_0 prevails, defined by a densimetric Froude number $Fr_{d0} = 0.7$. A deviation from the minimum energy input for the inflow jet leads to a higher mixing of ambient fluid into the inlet jet and thus to larger sludge bed heights, longer sludge residence times and an intensified entry of activated sludge particles into the settling zone and into the effluent.

To achieve sufficient sludge transport and small dispersion of the sludge bed by the scraper movement, the specific sludge transport f_r of the scraper has to be equal to the specific return sludge transport f_{RS} into the return sludge port ($f_r/f_{RS} = 1.0$). Deviations from this optimal relationship $f_r/f_{RS} = 1.0$ cause an enlargement of the sludge bed height H_S and the sludge mass M_S in the NKB. The specific sludge transport f_r is a function of the scraper operation and the total solid concentration at the bottom. It is shown that with a slowly settling sludge (SVI > 150 ml/g) the scraper operation is negligible for the sludge bed height, whereas for a faster settling sludge with SVI < 90 ml/g the transport processes in the NKB and thus the sludge bed height are considerably affected by the scraper operation.

The findings of this investigation on the influence of the scraper operation and the inflow permit more sophisticated dimensioning for NKB. With the minimum average sludge bed height H_S as a characteristic parameter for the energy input into NKB the required tank height H can be defined for a tolerated total solid concentration X_E in the effluent. The larger the height between the sludge level and the effluent and the better the energy input, the smaller the total solid concentration X_E is in the effluent. For an optimization of the energy input a mobile inflow geometry or flexible operation is recommended.

Accordingly to the present investigation the hydromechanical behavior must be considered in the design of NKB.