

Erhöhung der Kläranlagenkapazität durch Kaskadendenitrifikation

NORBERT MEYER

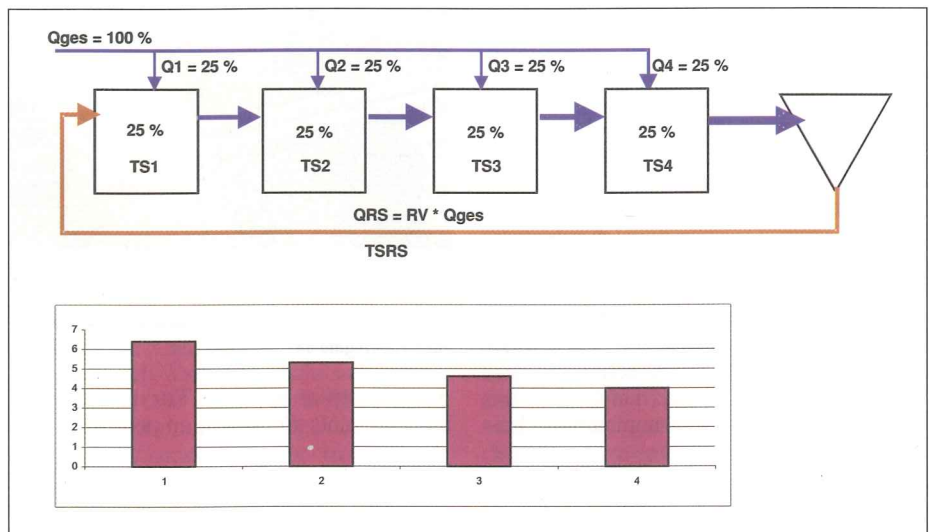
Nachdem in Deutschland ein sehr hoher Anschlussgrad erreicht ist, tritt der Neubau von Kläranlagen in den Hintergrund. Ins Blickfeld gerät nun zunehmend die Betriebsoptimierung sowie die Sanierung und Erweiterung vorhandener Kläranlagen und Anlagentechnik. Hier lohnt es sich, auch die Potenziale der Kaskadendenitrifikation zu berücksichtigen. Bei diesem Verfahren durchlaufen Abwasser und Belebtschlamm nacheinander mehrere Becken, also eine Beckenkaskade. Auch bei kleinen und mittleren mehrstraßigen Anlagen und Kombibecken bietet die Kaskadendenitrifikation die Möglichkeit, mit geringen Kosten und einfachen baulichen Maßnahmen eine deutliche Kapazitätssteigerung zu erreichen. Weitergehende Informationen gibt es über die Kennziffer 313 (Aqua Office).

Grundlagen der Kaskadendenitrifikation

Bei der Kaskadendenitrifikation durchlaufen Abwasser und Belebtschlamm nacheinander mehrere Becken. Die verfahrenstechnischen Vorteile der Kaskadendenitrifikation ergeben sich nicht unmittelbar aus der Kaskadierung, sondern aus der Art und Weise, wie man den Abwasserzulauf auf die Kaskaden verteilt.

In der einfachsten Form wird der Rücklaufschlamm der ersten Kaskade zugeführt, der Zulauf wird gleichmäßig auf alle Kaskaden verteilt. **Bild 1** zeigt eine vierstufige Kaskade. Der Zulauf wird zu je 25 % auf die Kaskaden verteilt. Das Rücklaufverhältnis wird für die folgenden Erläuterungen mit $RV = 1$ angenommen.

Die Kaskadendenitrifikation bietet zwei Vorteile, die den höheren verfahrenstechnischen Aufwand unter bestimmten Bedingungen rechtfertigen.



1: Verteilung und TS für $RV = 1$ bzw. $QRS = Q_{ges}$

Trockensubstanzkonzentration

Indem der Abwasserzulauf Q_{ges} verteilt zugegeben wird, stellt sich erst in der letzten Kaskade das Mischungsverhältnis zwischen Zulauf und Rücklaufschlamm ein, das demjenigen einer unkaskadierten Biologie entspricht. Das bedeutet auch, dass sich erst im letzten Kaskadenbecken die dazugehörige Trockensubstanzkonzentration einstellt.

Wird das Abwasser zu gleichen Teilen den einzelnen Becken der Kaskade zugegeben, ergibt sich aus dem Mischungsverhältnis zwischen zugegebener Abwassermenge und zulaufendem Abwasser/Schlamm-Gemisch die Trockensubstanzkonzentration. Für jede Stufe der Kaskade gilt die in **Bild 2** dargestellte Bilanz, wobei

Q_{i-1} : Zulauf zum Kaskadenbecken Nr. i aus dem vorhergehenden Kaskadenbecken

$Q_{zu,i}$: Abwasserzulauf zum Kaskadenbecken Nr. i

nK : Anzahl der Kaskadenbecken

Q_{RS} : Rücklaufschlammmenge

K_m : Kaskadenbecken Nr. i

TS_m : Trockensubstanzkonzentration in Becken Nr. i

TS_{i-1} : Trockensubstanzkonzentration im vorhergehenden Kaskadenbecken

$$Q_{i-1} \times TS_{i-1} + Q_{zu,i} \times TS_{zu,i} = Q_i \times TS_i \quad \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{RS} + (i-1) \times Q_{zu,ges}/nK \times TS_i + Q_{zu,ges}/nK \times 0 =$$

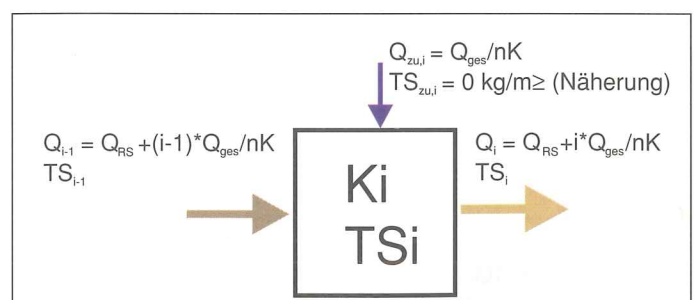
$$(Q_{RS} + i \times Q_{zu,ges}/nK) \times TS_i \quad \frac{kg}{h}$$

$$TS_i = \frac{(Q_{RS} + (i-1) \times Q_{zu,ges}/nK) \times TS_{i-1}}{Q_{RS} + i \times Q_{zu,ges}/nK} \quad \frac{kg}{m^3}$$

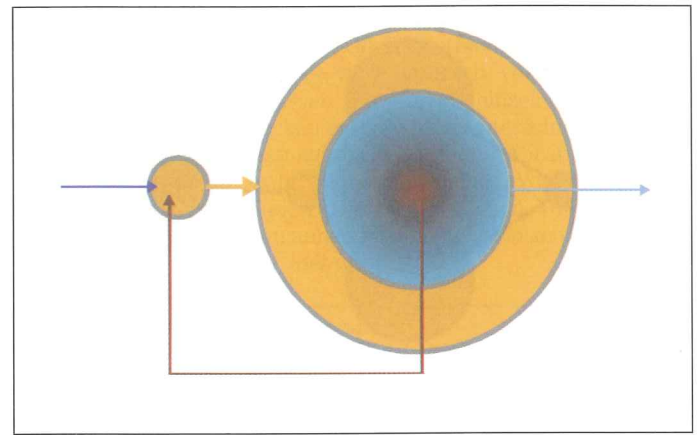
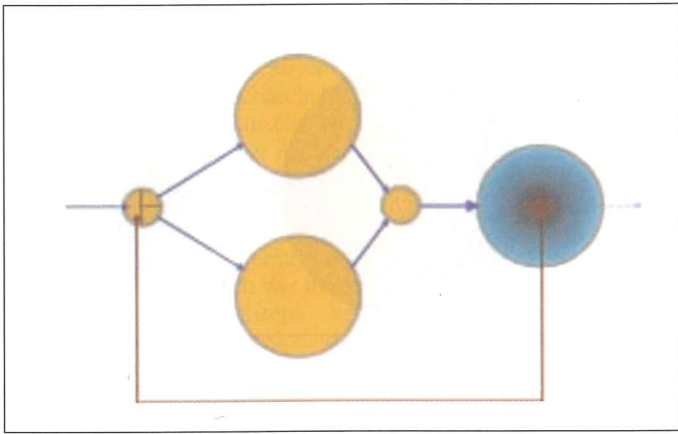
Im konkreten Beispiel nach Bild 1 für eine Kaskade, bestehend aus vier Becken mit gleicher Abwasserbeschickung und einem TS im Rücklaufschlamm von 8 kg/m^3 ergibt sich daraus:

TS-Konzentration im ersten Becken:

$$TS_1 = \frac{Q_{RS} \times TS_{RS}}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,25} = \frac{1}{1,25} \times TS_{RS} = 6,40 \quad \frac{kg}{m^3}$$



2: Bilanz um einen Reaktor



3: Getrennte Becken

4: Kombibecken

TS-Konzentration im zweiten Becken:

$$TS_2 = \frac{(Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,25) \times TS_1}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,5} = \frac{1,25}{1,5} \times 6,5 = 5,33 \frac{kg}{m^3}$$

TS-Konzentration im dritten Becken:

$$TS_3 = \frac{(Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,5) \times TS_2}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,75} = \frac{1,5}{1,75} \times 5,33 = 4,56 \frac{kg}{m^3}$$

TS-Konzentration im vierten Becken:

$$TS_4 = \frac{(Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,75) \times TS_3}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 1} = \frac{1,75}{2,0} \times 4,56 = 4,0 \frac{kg}{m^3}$$

durchschnittliche TS-Konzentration bei gleicher Aufteilung und gleich großen Becken:

$$\overline{TS} = \frac{6,4 + 5,3 + 4,6 + 4}{4} = 5,1 \frac{kg}{m^3}$$

Die TS-Konzentration erhöht sich im Durchschnitt von 4,0 auf 5,1 kg/m³. Die Erhöhung der TS-Konzentration und damit der Kapazität der Biologie beträgt ca. 28 %.

Vorgeschaltete Denitrifikation

Meist wird die Kaskadendenitrifikation mit vorgeschalteter Denitrifikation verknüpft. Dies war nach der Literatur auch die ursprüngliche Motivation zur Entwicklung dieses Verfahrens. Wird die vorgeschaltete Denitrifikation in mehreren Kaskaden hintereinander geschaltet, kann das in der n-ten Stufe gebildete Nitrat in der nachfolgenden n+1-ten Denitrifikationsstufe denitrifiziert werden. Da dieser Denitrifikationsstufe frisches Abwasser zugeführt wird, steht für die Denitrifikation das gleiche Verhältnis von Nitrat zu BSB₅ zur Verfügung wie bei herkömmlicher vorgeschalteter Denitrifikation.

Legt man wie bei der Bilanzierung zur vorgeschalteten Denitrifikation vollständige Nitrifikation und Denitrifikation in den einzelnen Becken zugrunde, lässt sich für die Kaskadendenitrifikation ein Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen ermitteln.

$$\frac{Q}{n} \times NH_4 - NNit = Q \times (1 + RV) \times NO_3 - Ne$$

$$\eta_D = \frac{NO_3 - ND}{NO_3 - ND + NO_3 - Ne} = 1 - \frac{1}{n \times (1 + RV)}$$

Q: Zufluss [m³/h]

n: Anzahl der Stufen

NH₄-NNit: NH₄-N nitrifiziert [mg/l]

RV: Rücklaufverhältnis

NO₃-Ne: NO₃-N Ablauf [mg/l]

η_D: Denitrifikationswirkungsgrad

NO₃-ND: NO₃-N denitrifiziert [mg/l]

Intermittierende, simultane Denitrifikation

Bei intermittierender Denitrifikation ist der erreichbare Nitratabbau nicht durch die Massenbilanzen in festen Zonen beschränkt. Die theoretische Rezirkulationsrate ist im Vergleich zur vorgeschalteten Denitrifikation sehr hoch. Der erreichbare Nitratabbau wird also durch die Denitrifikationskapazität bestimmt.

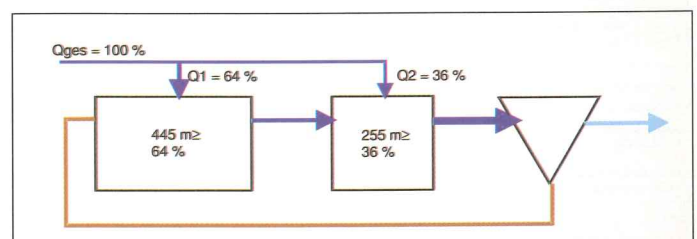
Unter Vorgabe der Ablaufwerte für Ammonium und Nitrat ergibt sich die erforderliche Denitrifikationskapazität und das Denitrifikationsverhältnis. Betrachtet man die Bilanzen um die einzelnen Kaskadenbecken so erkennt man, dass die Massenbilanzen für jedes Becken gleich sind.

Dies gilt unter der Annahme, dass die BSB₅-Konzentration im Rücklaufschlamm 0 mg/l beträgt. Selbst wenn man einen BSB₅-Ablaufwert ansetzt, ändern sich die erforderliche Denitrifikationskapazität und das resultierende Denitrifikationsverhältnis nur geringfügig. Mit diesen Vorgaben ist demnach das Denitrifikationsverhältnis in jedem Kaskadenbecken gleich, wenn man intermittierende Denitrifikation gewählt hat. Gleiches gilt für die simultane Denitrifikation.

Weitere betriebliche Vorteile

Eine Umstellung auf Kaskadenbiologie kann weitere günstige Auswirkungen auf den Betrieb haben. So zeigen Betriebs Erfahrungen, dass die Bläschlamm-Bildung durch Kaskadierung vermindert wird. Frachtspitzen und Schwankungen im Zufluss werden durch Kaskaden besser ausgeglichen.

5: Verteilung bei verschiedenen großen Becken für RV = 1 bzw. Q_{RS} = Q_{ges}



Erweiterungskonzepte

Vorhandene kleine und mittlere kontinuierlich durchflossene Belebungsanlagen weisen in den meisten Fällen getrennte Becken (Bild 3) oder Kombibecken (Bild 4) auf. Auch für solche Anlagen wird eine Umstellung auf Kaskadendenitrifikation auf einfache Art und Weise eine Kapazitätssteigerung bewirken.

Getrennte Becken

Bei getrennten Becken (Bild 3) teilt man den Rücklaufschlammstrom nicht gleichmäßig auf beide Becken auf, sondern führt den gesamten Rücklaufschlamm einem Belebungsbecken zu. Der Abwasserzufluss wird weiterhin auf beide Becken aufgeteilt. Aufgrund des Mischungsverhältnisses stellt sich nun im ersten Becken ein höherer Trockensubstanzgehalt ein.

TS-Konzentration im ersten Becken:

$$TS_1 = \frac{Q_{RS} \times TS_{RS}}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,5} = \frac{1}{1,5} \times TS_{RS} = 5,33 \frac{kg}{m^3}$$

TS-Konzentration im zweiten Becken:

$$TS_2 = \frac{(Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,5) \times TS_1}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,5} = \frac{1,5}{2} \times 5,33 = 4,0 \frac{kg}{m^3}$$

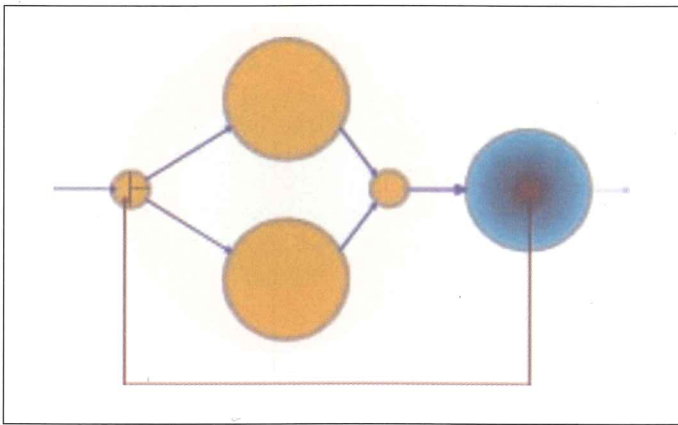
durchschnittliche TS-Konzentration bei gleicher Aufteilung und gleich großen Becken:

$$\overline{TS} = \frac{5,33 + 4}{2} = 4,65 \frac{kg}{m^3}$$

Durch die Änderung der Leitungsführung für Rücklaufschlamm wird hier also eine Erhöhung der Trockensubstanzkonzentration von mehr als 15 % erreicht.

Kombibecken

Bei Kombibecken ist es oftmals erforderlich, ein neues Nachklärbecken zu errichten, da die vorhandene Hydraulik vom



6: Kaskadierung bei getrennten Becken

Nachklärbecken nicht mehr verkraftet wird. Es steht dann das Gesamtvolumen des Kombibeckens für Erweiterungskonzepte zur Verfügung. Auch hier erreicht man eine Kapazitätserhöhung, indem wie in obigem Beispiel der Rücklaufschlamm beide Becken nacheinander durchströmt, der Zulauf jedoch auf beide Becken aufgeteilt wird. Hier ist zu beachten, dass die beiden Volumina des Kombibeckens in der Regel unterschiedlich sind (Bild 5). Es ist also sowohl eine unterschiedliche Aufteilung des Zulaufes, als auch eine unterschiedliche Gewichtung der TS-Konzentrationen für den durchschnittlichen TS zu berücksichtigen.

TS-Konzentration im ersten Becken:

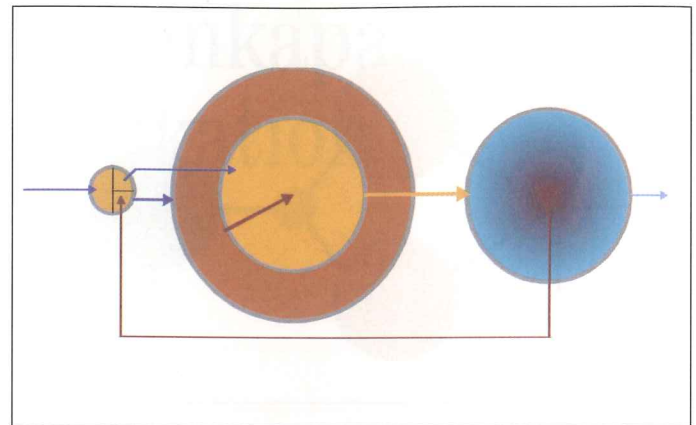
$$TS_{BB1} = \frac{Q_{RS} \times TS_{RS}}{Q_{RS} + Q_{ges} \times 0,64} = \frac{1}{1,64} \times TS_{RS} = 4,89 = \frac{kg}{m^3}$$

TS-Konzentration im zweiten Becken:

$$TS_{BB2} = \frac{Q_{RS} \times TS_{RS}}{Q_{RS} + Q_{ges}} = \frac{1}{2} \times TS_{RS} = 4 \frac{kg}{m^3}$$

durchschnittliche TS-Konzentration:

$$TS_{BB} = \frac{445 \times 4,89 + 255 \times 4,0}{700} = 4,57 \frac{kg}{m^3}$$



7: Kaskadierung bei Kombibecken

Schema der geänderten Verfahrensführung

Schemata der geänderten Verfahrensführung zeigen die Bilder 6 (Kaskadierung bei getrennten Becken) und 7 (Kaskadierung bei Kombibecken).

Simultan aerobe Schlammstabilisierung

Zur simultan aeroben Schlammstabilisierung sei noch ein Gedanke zur Diskussion gestellt. Hinsichtlich der Reinigungsleistung bieten Anlagen mit simultan aerobem Schlammstabilisierung große Reserven, da das Volumen auf die Schlammstabilisierung und damit ein Gesamtschlammalter von 20 bis 25 Tagen bemessen wird. Da das Gesamtschlammalter aus der durchschnittlichen TS-Konzentration resultiert, wäre es denkbar, die erste Stufe mit sehr wenig Abwasser zu beschicken.

Die zweite Stufe wird maximal mit soviel Abwasser beschickt, dass die sich dort einstellende Schlammbelastung die geforderte Reinigungsleistung sicherstellt. Dies führt zu einer weiteren Steigerung der durchschnittlichen Trockensubstanzkonzentration und damit der Kapazität der biologischen Stufe. Bevor ein Neubau aufgrund unzureichender Anlagenkapazität erwogen wird, kann die vorhandene Substanz durch solche Konzepte weiter ausgereizt werden.

Da bei einer Bemessung auf Grundlage des Arbeitsblattes ATV-DVWK A131 Schlammbelastung und Schlammalter unmittelbar zusammenhängen, resultiert das für die aerob simultane Schlammstabilisierung maßgebliche Schlammalter aus einer Gesamtbetrachtung der biologischen Stufe und damit aus der erhöhten durchschnittlichen Trockensubstanzkonzentration.

Das Berechnungsformular (Bild 8) aus der Bemessungssoftware „Aqua Designer“ zeigt die Größen und Bilanzen für das gewählte Beispiel. Wird eine Anlage auf die Ablaufanforderungen bemessen, kann z. B. ein Schlammalter von ca. 12 Tagen ausreichend sein. Bei simultan aerobem Schlammstabilisierung ist ein Gesamtschlammalter von 25 d gefordert. In einem Berechnungsbeispiel wird die erste Stufe einer zweistufigen Kaskade mit 35 % des Zulaufes beschickt. Die zweite Stufe wird mit den restlichen 65 % beschickt. Es stellt sich dann in der ersten Stufe eine Schlammbelastung von 0,022 und in der zweiten von 0,074 kgBSB₅/kg/d ein. Die durchschnittliche Schlammbelastung beträgt 0,04 kgBSB₅/kg/d und das Gesamtschlammalter 25 d.

Durch die ungleiche Aufteilung steigt die durchschnittliche TS-Konzentration von 5,07 auf 5,63 kg/m³. Gegenüber unkaskadiertem Betrieb steigt die durchschnittliche Trockensubstanzkonzentration gar von 4,0 auf 5,63 kg/m³. Man erkennt, dass besonders in biologischen Stufen mit simultan aerobem Schlammstabilisierung bei intelligenter Verfahrensführung große Reserven schlummern.

Man erkennt, dass besonders in biologischen Stufen mit simultan aerobem Schlammstabilisierung bei intelligenter Verfahrensführung große Reserven schlummern.

Man erkennt, dass besonders in biologischen Stufen mit simultan aerobem Schlammstabilisierung bei intelligenter Verfahrensführung große Reserven schlummern.

Diskussion der Kosten

Bauliche Änderungen sind immer mit hohen Kosten verbunden. Daher ist es sinnvoll zu prüfen, ob das Sanierungsziel auch mit Investitionen in eine aufwändige Mess- und Regelungstechnik bei Änderung der Verfahrensführung erreicht werden kann. Die Überlegungen zur Kaskadendenitrifikation basieren auf der gleichen Motivation.

Zulaufkonzentrationen
 BSB5 277,78 mg/l
 TKN 50,93 mg/l
 NO3-N 0,00 mg/l

Anzahl der Kaskaden 2

Zulassung 35,00 %
 Q1zu
 Q2zu

Volumen (m³) 1314,00 1314,00

Qrück
 TS-BB (kg/m³) 7,22 4,03
 Schlammbel. (kg/kg/d) 0,022 0,074
 Raumbel. (kg/m³*d) 0,160 0,297
 VD / VBB 0,310 0,310
 Densi-Kapazität (kg/kg) 0,093 0,093
 NO3-N-Konz. (Abb.) (mg/l) 10,00 10,00

Becken 1 Becken 2

Q1ab Q2ab

RV 0,47
 TS-RS 12,60 kg/m³

	Qrück	Q1zu	Beck. 1	Q1ab	Q2zu	Beck. 2	Q2ab
BSB5-Fracht (kg/d)	0	210,00	0	0	390,00	0	0
TKN-Fracht (kg/d)	0	38,50	0	0	71,51	0	0
NO3-N-Fracht (kg/d)	10,15	0	0	17,71	0	0	31,75
org. N-Fracht (kg/d)	2,03	0	0	3,54	0	0	6,35
NH4-N-Fracht (kg/d)	2,03	0	0	3,54	0	0	6,35
Inkorp. N-Fracht (kg/d)	-	-	8,40	-	-	15,60	-
Denitrif. N-Fracht (kg/d)	-	-	19,52	-	-	36,25	-

Gesamtbetrachtung
 TS-Belastungsbecken 5,62 kg/m³ VD / VBB 0,310
 Schlammbelastung 0,041 kg/kg Densi-Kapazität 0,093 kg/kg
 Raumbelastung 0,228 kg/m³*d Volumen 2628,00 m³
 Erf. Schlammalter (aerob) 9,21 d Max. BSB5-Fracht 600,40 kg/d
 Erf. Schlammalter (ges.) 25,00 d Gew. BSB5-Fracht 600,00 kg/d

Wie Eingabewerte Gleiche Volumina und gleiche Schlammbelastung
 Gleiche Volumina Gleiche Beschick., gleiche Vol u. VD/VBB gleich
 Gl. Beschick. u. gl. Vol

Berechnen Abbrechen OK

8: Bilanzen und Ergebnisse einer zweistufigen Kaskade bei ungleicher Aufteilung

Eine Umstellung auf Kaskadendenitrifikation ist mit einem etwas höheren Aufwand für die Aufteilung der Ströme und die Regelung der unterschiedlichen Belastungszustände in den einzelnen Kaskadenbecken verbunden. Dieser Aufwand wird in den allermeisten Fällen jedoch nur einen Bruchteil der Kosten verursachen, den der Neubau von Bauwerken zur Folge hätte.

Die vorgeschlagene Verfahrensänderung wird oftmals auch durch das in der Anlage umgesetzte Störfallkonzept erleichtert. Sind Leitungen so dimensioniert, dass die Hydraulik auch bei Außerbetriebnahme einzelner Becken funktioniert, können größere Ströme in einzelnen Leitungen im günstigen Fall ohne bauliche Änderungen verkraftet werden.

Schlussfolgerungen

Die Kaskadendenitrifikation wird bisher nur bei großen Kläranlagen in Betracht gezogen. Jedoch auch bei kleinen und mittleren mehrstrahligen Anlagen und Kombi-

becken bietet die Kaskadendenitrifikation die Möglichkeit, mit geringen Kosten und einfachen baulichen Maßnahmen eine deutliche Kapazitätssteigerung zu erreichen. Dabei sind eine Reihe von Verfahrensvarianten möglich, die in der Planungsphase stets mit durchdacht werden sollten. Die etwas kompliziertere Verfahrensführung und aufwändigere Messtechnik ist durch moderne Regelungswerkzeuge gut zu handhaben und zu automatisieren, sodass hier kein höherer personeller Aufwand zu erwarten ist.

Die Bilanzen und detaillierte Informationen finden interessierte wlb-LeserInnen unter www.aquaoffice.de in der Rubrik „Aktuelles“.

Anmerkung:

In den hier beschriebenen Betrachtungen wird aufgrund von Massenbilanzen dargestellt, wie die Leistungsfähigkeit eines Systems erhöht werden kann. Die Herleitung der resultierenden Anlagenparameter ba-

siert auf einer nach ATV-DVWK A131 zulässigen Gesamtbetrachtung der Anlage. Hierbei wird natürlich völlig außer Acht gelassen, dass in den einzelnen Kaskadenbecken aufgrund der unterschiedlichen Belastungszustände und Abbauraten sehr wohl unterschiedliche Vorgänge stattfinden. Die biokinetischen Vorgänge können anhand von Simulationsmodellen nachgebildet werden.

Literaturhinweise:

[1] ATV-DVWK-Arbeitsblatt A131: „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V. (GfA), Hennef 2000.

[2] Werner, T.: „Beitrag zur Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen mit Kaskadendenitrifikation“, Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 9, TU Berlin, FG Siedlungswasserwirtschaft, 1998.

[3] Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band IV: „Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung“, Abwassertechnische Vereinigung e. V., Bad Hennef, Ernst & Sohn, Berlin 1985.

[4] Braha, A.: „Über die Abbaukinetik von komplexen Substraten in Mischbeckenkaskaden“, wlb Wasser, Luft und Betrieb 30, Nr. 6/1986, S. 24–28.

Hydraulische Membranpumpe HM

Merkmale

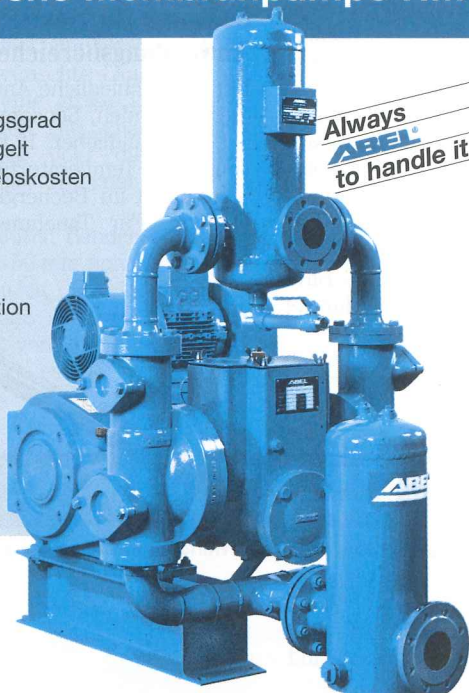
- Hoher Wirkungsgrad
- Frequenzgeregelt
- niedrige Betriebskosten

Einsatzgebiete

- Filterpressenbeschickung
- Prozeßintegration
- Dosierpumpe
- Autoklavenschickung

Leistung

- bis 116 m³/h
- bis 10,0 MPa



Seit 1991
DIN ISO 9001
zertifiziert

ABEL®

Pump Technology

Abel GmbH & Co. KG
Abel-Twiete 1 · D-21514 Büchen
Tel.: 0 41 55 / 818-0 · Fax: 0 41 55 / 818-499
mail@abel.de · www.abel.de

Haben Sie Abwasserprobleme?

Wir lösen viele!

- Mit innovativen Abwasserreinigungsanlagen – geprüft und zugelassen
- Mit hoher Effizienz, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit
- Mit einem Leistungsspektrum, direkt auf den Kunden zugeschnitten
- Mit Erfahrungen aus tausendfacher Anwendung in Industrie und Gewerbe

LK-Abwassertechnik

Seit 20 Jahren Partner für Industrie und Gewerbe

vom Abscheider ...

... bis zur Mikrofiltration

ALLES AUS EINER HAND

- Planung
- Herstellung
- Montage
- Service

LK Metallwaren GmbH · 9126 Schwabach
Am Falbenholzweg 36 · Tel. 091 22 699-138
FACHBEREICH ABWASSERTECHNIK

► Fordern Sie bitte diesen Prospekt an.
Bei detailliert geschilderten Fällen erhalten Sie zusätzlich technische Informationen.

**Erfolgreich mit
Membran-Filtration**
Wirtschaftliche Mikrofiltrationsanlagen
und Abscheider in vielen Größen



LK Metallwaren GmbH
Am Falbenholzweg 36 · 9126 Schwabach
Telefon 091 22/699-138

FAX
0 91 22 /
699-149

wlb