Eidg. Technische Hochschule, Zürich—Fortbildungskurs der EAWAG, 1964

Die Konsequenzen aus den Ergebnissen der Belebtschlammversuche der EAWAG für die Abwassertechnik

Von A. HÖRLER, EAWAG, Zürich

A. Folgerungen aus den Belebtschlammversuchen für die Wahl der Betriebsparameter und die Dimensionierung der Belüftungsbecken

1. Vorbemerkungen

Die mit grösstem Einsatz der biologischen und chemischen Abteilung der EAWAG und des Personals der Versuchsstation Tüffenwies unter der Versuchsleitung von K. WUHRMANN durchgeführten Versuche bezweckten, den Einfluss von vier Betriebsparametern auf die Reinigungsleistung einer Belebtschlammanlage klarzustellen. Diese Parameter sind

1. die hydraulische Raumbelastung, bzw. die Belüftungszeit,
2. die Belebtschlammkonzentration im Belüftungsbecken,
3. der Sauerstoffgehalt im Becken,
4. die Abwassertemperatur (Sommer- und Winterwerte).

Daneben wurde die Überschußschlammproduktion bei den verschiedenen Betriebsarten ermittelt.

Es muss betont werden, dass sämtliche Versuche mit dem relativ dünnen Abwasser der Stadt Zürich durchgeführt wurden mit einem mittleren BSB₅-Wert der einzelnen Versuchsabschnitte von 90–150 mg/l. Die erhaltenen Beziehungen der einzelnen Parameter zum Reinigungseffekt gelten somit strenggenommen nur für städtische Abwässer ähnlicher Konzentration und Zusammensetzung.

Im folgenden soll überlegt und abgeklärt werden, mit welchen Betriebsparametern eine biologische Reinigungsanlage gefahren werden kann, um einen bestimmten Reinigungseffekt auf wirtschaftlich günstige Weise zu erzielen. Dabei wurde angenommen, dass wie üblich der Reinigungseffekt, gemessen am BSB₅, für die Dimensionierung der Anlagen massgebend sei.

2. Der Einfluss des Sauerstoffgehalts in den Belüftungsbecken auf die Reinigungsleistung einer biologischen Anlage

Die von WUHRMANN [I] durchgeführte, statistische Auswertung der mehrjährigen Grossversuche hat ergeben, dass der Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken für den normalerweise in der Praxis durchgeführten Betrieb von untergeordnetem Einfluss sein muss, wenigstens beim Winterbetrieb, der – wie anschliessend gezeigt wird – in der Regel für die Dimensionierung der Abwasserreinigungsanlagen massgebend ist. Da die Betriebskosten einer Belebtschlammanlage bei Einhaltung höherer Sauerstoffkonzentrationen im Belüftungsbecken rasch zunehmen, wird man aus wirtschaftlichen Gründen bestrebt sein, die Anlagen mit einem nur geringen Sauerstoffgehalt von etwa 1–2 mg/l zu betreiben. Wesentlich ist, dass bei hohen Schlammbelastungen im Belüftungsbecken eine leistungsfähige Belüftungseinrichtung installiert wird, die eine starke Turbulenz erzeugt.

3. Der Einfluss der Abwassertemperatur auf die Reinigungsleistung der biologischen Anlagen

Die Versuche [I] ergaben für Belüftungszeiten über 2 Stunden, bei Schlammkonzentrationen im Belüftungsbecken über 3000 mg/l Trockensubstanz, praktisch keinen Unterschied zwischen den Reinigungseffekten der Sommer- und Winterperioden. Bei kleineren Belüftungszeiten und bei niedrigeren Schlammkonzentrationen hingegen wurden im Sommer bei Abwassertemperaturen über 13 °C bessere Reinigungseffekte erzielt als im Winter bei Abwassertemperaturen unter 11 °C. Die Unterschiede in den Reinigungseffekten zwischen den Sommer- und Winterwerten nehmen mit zunehmender Schlammbelastung rasch zu (Abb. 2 [I]).

Da im Winter ungünstigere Reinigungseffekte erzielt werden und da in der Schweiz die Vorfluter zudem im Winter Niederwasser führen, so werden in der Regel die Winterverhältnisse der Dimensionierung von Belebtschlammanlagen zugrunde gelegt werden müssen.

4. Der Einfluss der Raumbelastung und der Schlammkonzentration im Belüftungsbecken auf die Reinigungsleistung der Anlagen

a) *Begriffe.* Die Raumbelastung einer Belebtschlammanlage kann als hydraulische Raumbelastung R_h in m³ Abwasser pro m³ Belüftungsraum und Tag ausgedrückt werden oder als sog. biochemische Raumbelastung R_B in kg BSB₅ pro m³ Belüftungsraum und Tag. Bezeichnet man mit s_R die Konzentration des geklärten Rohwassers, in kg BSB₅ pro m³ Abwasser ausgedrückt, so gilt die Beziehung $R_B = s_R R_h$.

Die Belüftungszeit T in Stunden errechnet sich aus der hydraulischen Raumbelastung $T = 24/R_h$.

Als Schlammbelastung S_B bezeichnet man den Quotienten $R_B:S$, wobei S die Schlammkonzentration im Belüftungsbecken in kg Trockensubstanz pro m³ Beckeninhalt bedeutet. Die Schlammbelastung wird gemessen in kg BSB₅ pro kg Schlamm Trockensubstanz und Tag.

b) *Berechnung der Grösse der Belüftungsbecken aus vorgeschriebenen Reinigungseffekten.* Die für den projektierenden Ingenieur heute noch wichtigste Beziehung zwischen dem Reinigungseffekt einer Abwasserreinigungsanlage, gemessen am BSB₅, und der Raumbelastung, bzw. der Schlammbelastung, gibt WUHRMANN [1] in den Abb. 1 und 2 wieder. Daraus ist ersichtlich, dass sich mit Schlammbelastungen von 0,30 Reinigungseffekte von 90%, gemessen am BSB₅, und darüber erzielen lassen, bei Schlammbelastungen von rund 1,0 etwa 85%. Bei höheren Schlammbelastungen ist bereits ein erheblicher Unterschied zwischen den Sommer- und Winterwerten vorhanden. So darf z.B. bei einer Schlammbelastung von 3,0 im Sommer ein Reinigungseffekt von 80% erwartet werden, im Winter nur noch etwas über 70%. In Abb. 1 sind die nämlichen Kurven wiedergegeben, ergänzt durch Werte bei kleinsten Schlammbelastungen [4].

Abbildung 1

Beziehung zwischen Reinigungseffekt η_B und Schlammbelastung S_B nach WUHRMANN [1], ergänzt bis zu $S_B = 0,035$ aus den Kombibeckenversuchen [4].

Der Zusammenhang zwischen der Schlammbelastung im Belüftungsbecken und dem Reinigungseffekt einer Abwasserreinigungsanlage, gemessen am BSB₅, sei an zwei Beispielen erläutert. Vorweg sei betont, dass es

sich um Vergleichsberechnungen handelt, wobei die Tagesmittelwerte zur Dimensionierung verwendet wurden. Die Resultate dürfen somit nicht unbesehen zur Bemessung von Anlagen übernommen werden.

Aus der Tab. 1 geht hervor, dass die Vorschrift eines bestimmten Reinigungseffektes noch keineswegs den Inhalt des Belüftungsbeckens festlegt. Hingegen ergibt die Wahl von Schlammkonzentrationen im Belüftungsbecken, die nicht unter 1 kg Trockensubstanz pro m³ Becken und praktisch kaum über 5 kg/m³ liegen werden – konventionelle Betriebsweise vorausgesetzt – eine Begrenzung der Beckengrösse. Um einen 80prozentigen Reinigungseffekt zu erreichen, genügen somit Becken mit 1/2 bis 1 Stunde Belüftungszeit. Bei vorgeschriebenen Reinigungseffekten von 90% müsste bei 1/2 Stunde Belüftungszeit eine Schlammkonzentration von 17,6 kg/m³ zur Verfügung stehen, was sich praktisch nicht erreichen lässt. Auch eine Schlammkonzentration von 8,8 kg/m³, wie sie bei einer Stunde Belüftungszeit erforderlich wäre, wird nur in ausserordentlichen Fällen erreicht werden können. Becken mit nur einer Stunde Belüftungszeit oder weniger scheiden deshalb für die Erzielung höherer Reinigungseffekte in der Regel aus.

Tabelle 1

Annahmen: geklärtes Abwasser. Tagesanfall pro Einwohner: Abwassermenge 450 l/E Tag, Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB₅ 50 g/E Tag, Abwasserkonzentration (BSB₅) = 50000:450 = 110 mg/l

Fall I: Vorgeschriebener Reinigungseffekt im Tagesmittel = 80% (Winterwert)

Belüftungszeit T (gewählt)	1/2	1	1 1/2	2	Stunden
Hydr. Raumbelastung R _h	48	24	16	12	m ³ /m ³ Tag
Einw. pro m ³ Becken					
= R _h : 0,450 m ³ /E Tag	107	53	36	27	E/m ³
Biochem. Raumbelastung R _B					
= R _h · 0,110 kg/m ³	5,28	2,64	1,76	1,32	kg BSB ₅ /m ³ Tag
Schlammbelastung für η _B					
= 80% (aus Diagramm 1)	1,4	1,4	1,4	1,4	kg BSB ₅ /kg TS Tag
Erf. Schlammkonzentration					
S = R _B :S _B , wobei TS = Trockensubstanz	3,78	1,89	1,26	0,94	kg TS/m ³

Fall II: Vorgeschriebener Reinigungseffekt im Tagesmittel = 90% (Winterwert)

Belüftungszeit T (gewählt)	1/2	1	1 1/2	2	3	Stunden
Hydr. Raumbelastung R _h	48	24	16	12	8	m ³ /m ³ Tag
Einw. pro m ³ Becken	107	53	36	27	18	E/m ³
Biochem. Raumbelastung R _B						
= R _h · 0,110 kg/m ³	5,28	2,64	1,76	1,32	0,88	kg BSB ₅ /m ³ Tag
Schlammbelastung für η _B = 90%	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	kg BSB ₅ /kg TS Tag
Erf. Schlammkonzentration S	(17,6)	(8,80)	5,86	4,40	2,93	kg TS/m ³

Für eine Stadt von 100000 Einwohnern würden sich somit bei Verwendung von Tagesmittelwerten unter den gemachten Voraussetzungen folgende Nutzinhalte $\mathcal{F}$ der Belüftungsbecken ergeben:

(Für $T = 1$ Std.: $\mathcal{F} = 100000 \text{ E} \cdot 0,45 \text{ m}^3/\text{E Tag} : 24 = 1880 \text{ m}^3$).

Fall I: Reinigungseffekt im Tagesmittel 80%.

$\mathcal{F}$: 940 m³ bei einer Belebtschlammkonzentration von 3780 g/m³,

bzw. $\mathcal{F}$: 1880 m³ bei einer Belebtschlammkonzentration von 1890 g/m³.

Fall II: Reinigungseffekt im Tagesmittel 90%.

$\mathcal{F}$: 2820 m³ bei einer Belebtschlammkonzentration von 5860 g/m³,

bzw. $\mathcal{F}$: 3760 m³ bei einer Belebtschlammkonzentration von 4400 g/m³,

bzw. $\mathcal{F}$: 5640 m³ bei einer Belebtschlammkonzentration von 2930 g/m³.

Selbstverständlich sind auch alle Zwischenwerte möglich.

Aus Abb. 2 geht die Beziehung zwischen der Belüftungszeit, der Schlammkonzentration und dem Reinigungseffekt, gemessen am BSB₅, für die Winterwerte des Zürcher Abwassers klar hervor. Wir stellen somit fest, dass bei vorgeschriebenem Reinigungseffekt die Wahl der Grösse des Belüftungsbeckens in gewissen, allerdings ziemlich weiten Grenzen noch frei bleibt. Je grösser die Belebtschlammkonzentration bei gegebener Beckengrösse, um so höher ist der erzielbare Reinigungseffekt. Je konzentrierter der Belebtschlamm im Becken ist, um so grösser ist jedoch auch der Sauerstoffverbrauch pro m³ Belüftungsbecken. Im nächsten Abschnitt soll deshalb untersucht werden, ob die Wirtschaftlichkeit des Betriebes die eindeutige Wahl der Belüftungszeit, bzw. der Beckengrösse bestimmt oder wenigstens nahelegt.

Abbildung 2

Beziehung zwischen Belüftungszeit T , Schlammkonzentration S und Reinigungseffekt η_B (Zürcher Abwasser; Winterwerte).

Um einen weiteren Einblick in die Verhältnisse, namentlich hinsichtlich der Schlussfolgerungen für die Praxis zu gewinnen, wurden die von WUHRMANN [1] beschriebenen Versuchsergebnisse noch nach einem andern Gesichtspunkt aufgetragen. HUNKEN [2] hat in seiner Dissertation darauf hingewiesen, dass die Abwasserreinigung um so rascher vor sich geht, je mehr Organismenmasse pro Raumeinheit im Belüftungsbecken vorhanden ist und je länger diese Masse mit dem Abwasser in Berührung bleibt. Als Masszahl für die Organismenmasse schlagen HUNKEN und KLAUS IMHOFF [3] die Schlamm Trockensubstanz vor. Mit andern Worten: die Reinigungswirkung einer Belebtschlamanlage ist vom Produkt ST abhängig, wobei S die Trockensubstanz des Belebtschlammes in kg/m^3 Belüftungsbecken und T die Belüftungszeit in Stunden darstellt. Zwischen dem Ausdruck ST und der Schlammbelastung besteht die Gleichung

$$ST = 24 s_R / S_B \quad \text{Einheit: kg h/m}^3. \quad (1)$$

Das Produkt ST bedeutet Masse mal die Zeit, in der diese Masse ihre Arbeit verrichtet. Es soll deshalb im folgenden kurz als *Schlammarbeit* bezeichnet werden.

Die Schlammarbeit ist eine Funktion des Reinigungseffektes und der Abwassertemperatur. Sie dürfte zudem noch von der Abwasserkonzentration abhängig sein. Abb. 3 gilt somit für mittlere Abwasserkonzentrationen von etwa 100–125 mg/l BSB_5 (Zürcher Abwasser). In Abb. 3 ist der Reini-

Abbildung 3

Beziehung zwischen Reinigungseffekt η_B und Schlammarbeit ST .

gungseffekt der Schlammarbeit gegenübergestellt. Infolge der Gleichung ist unter der Voraussetzung konstanter Abwasserkonzentration die Schlammarbeit der reziproken Schlammbelastung proportional. Der Verlauf der Beziehungsbereiche zwischen diesen Variablen ist deshalb den entsprechenden Kurven in Abb. 2 in [1] ähnlich. Der Bereich wurde noch ergänzt durch die ebenfalls mit dem Abwasser der Stadt Zürich durchgeführten Kombibeckenversuche [4]. Diese sind bei mittleren Abwassertemperaturen von 12,5–17,0°C durchgeführt worden. Die drei Werte stellen Mittel aus je 15 24stündigen Mischproben dar, mit Standardabweichungen von etwas über $\pm 2\%$.

Aus Abb. 3 ist ersichtlich, dass z. B. im Sommer ein Reinigungseffekt von 86% erzielt werden kann, sowohl mit einer Schlammkonzentration von 600 mg/l als auch von 3300 mg/l. Im ersten Fall ist dazu eine Belüftungszeit T von $1,5:0,6 \text{ kg/m}^3 = 2,5$ Stunden erforderlich, im zweiten Fall genügen $1,5:3,3 \text{ kg/m}^3 = 0,45$ Stunden oder 27 min. Wir können somit im vorliegenden Fall gleiche Reinigungseffekte erzielen mit Belüftungsbecken, deren Grösse zwischen 1 und über 5 schwanken kann. Wir stellen fest, dass die Schlammkonzentration im Belüftungsbecken der Belüftungszeit als gleichwertige Grösse zugeordnet ist.

5. Erforderlicher Sauerstoffeintrag und notwendige Luftmenge für das Belüftungsbecken; Energiebedarf

Der erforderliche Sauerstoffeintrag W_c beträgt nach WUHRMANN [5]

$$W_c = \frac{c_s}{c_s - c} [Q_{O_e} S + 0,11 \frac{R_h}{r_q} (1 - Y_S)(s_{RC} - s_C) + 0,14 R_h (s_{RN} - s_N)], \quad (2)$$

wobei W_c erforderlicher Sauerstoffeintrag bei einer bestimmten Temperatur in g O_2 /m³ Becken und Std.,

c_s Sauerstoffsättigung des Abwassers bei der gewählten Temperatur und
 c Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken bei derselben Temperatur, beide Werte in g O_2 /m³ Abwasser,

Q_{O_e} Endogene Atmung (Grundatmung) des Belebtschlammes bei der gewählten Temperatur in g O_2 /kg TS h,

S Schlammkonzentration in kg Trockensubstanz (TS)/m³ Becken,

R_h hydraulische Raumbelastung in m³ Abwasser/m³ Becken Tag,

r_q Respirationskoeffizient,

Y_S Ausnützungsfaktor für das Substrat, soweit er zur Überschusschlamm-bildung führt, in g Überschusschlamm pro g eliminiertes Substrat.

s_{RC} bzw. s_C Konzentration an organischem Kohlenstoff im geklärten Rohwasser, bzw. im gereinigten Abwasser in g/m³ Abwasser,

s_{RN} bzw. s_N Ammoniumkonzentration im geklärten Rohwasser, bzw. im gereinigten Abwasser (Nitrifikation) in g/m³ Abwasser.

Die Berechnung des erforderlichen Sauerstoffeintrags und des Luftbedarfs für die beiden Fälle I und II geht aus der Tab. 2 hervor. Unter der Annahme, dass pro m Einblastiefe der Luft mit etwa 4% Sauerstoffausnützung gerechnet werden darf, dass somit rund 11 g Sauerstoff pro m³ Luft in Lösung gehen, erhält man die in der Tab. 3 aufgeführten Luftmengen. Bei grösseren Einblastiefen verringern sich die erforderlichen Luftmengen etwa umgekehrt proportional zur Einblastiefe. Da der Energiebedarf vom Produkt Luftmenge mal Einblastiefe abhängt, so ist dieser in erster Annäherung von der Tiefe des Luftertrags unabhängig. Als spezifischer Energiebedarf wurde mit 5,5 Wh/m³ eingebrachter Luft und pro m Einblastiefe gerechnet [6]. Die erhaltenen Werte für den Energiebedarf gehen aus der Tab. 3 hervor.

Tabelle 2

Erforderlicher Sauerstoffeintrag = Sauerstoffbedarf bei 10 °C (Winterwerte, Zürcher Abwasser)

T Std.	Q _o	S	q _e	R _h	s _{RC}	s _C	s _{RC} -s _C	q _c	s _{RN}	s _N	s _{RN} -s _N	q _N	q _e +q _c +q _N	W _c
<i>Fall I: Reinigungseffekt = 80% (siehe Abb. 4)</i>														
1/2	5,4	3,78	20	48	70	26	44	109	10	10	0	0	129	158
1	6,3	1,89	12	24	70	26	44	54	10	10	0	0	66	81
1 1/2	6,7	1,26	8	16	70	26	44	36	10	10	0	0	44	55
2	6,8	0,94	6	12	70	26	44	27	10	10	0	0	33	41
<i>Fall II: Reinigungseffekt = 90% (siehe Abb. 5)</i>														
1	2,9	(8,80)	26	24	70	17	53	65	10	1	9	30	121	147
1 1/2	4,4	5,86	26	16	70	17	53	44	10	1	9	20	90	109
2	5,1	4,40	22	12	70	17	53	33	10	1	9	15	70	86
3	5,8	2,93	17	8	70	17	53	22	10	1	9	10	49	60
	1)	2)		2)				4)			5)			6)

Bemerkungen:

$$W_c = \frac{c_s}{c_s - c} (q_e + q_c + q_N)$$

1) Siehe [5], Abb. 2 (auf 10 °C umgerechnet).

2) Siehe Tab. 1.

3) Effekt = 63% (Fall I), bzw. 75% (Fall II aus Abb. 2 [1]).

$$4) 0,11 \frac{(1-Y_s)}{r_q} = \frac{0,11 \cdot (1-0,65)}{0,75} = 0,0514.$$

5) Abfluss = 10 g/m³ ohne Nitrifikation, bzw. 1 g/m³ mit Nitrifikation.

$$6) \frac{c_s}{c_s - c} = \frac{11}{11 - 2} = 1,22.$$

Abbildung 4

Sauerstoffbedarf pro m³ Belüftungsbecken und Stunde bei 2 mg/l O₂-Gehalt im Mischwasser (Abwasser + Belebtschlamm) bei 10 °C und 730 mm Hg. – Reinigungseffekt = 80%.

Abbildung 5

Sauerstoffbedarf pro m³ Belüftungsbecken und Stunde bei 2 mg/l O₂-Gehalt im Mischwasser bei 10 °C und 730 mm Hg. – Reinigungseffekt = 90%.

Aus der Tab. 3 und der zugehörigen Abb. 6 geht hervor, dass bei 80prozentigem Reinigungseffekt der Energiebedarf bei den üblichen Belüftungszeiten ($T \sim 1$ Stunde) praktisch unabhängig von der Belüftungszeit und damit auch von der Beckengrösse ist. Bei Reinigungseffekten von 90% hingegen ergeben sich mit zunehmender Belüftungszeit nicht nur teurere Becken, sondern auch höhere Energiekosten.

Tabelle 3

Belüftungszeit T in Stunden	Erforderliche Luftmenge in $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ BB h}$ $10^\circ\text{C}, 730 \text{ mm Hg}$	Energiebedarf in $\text{Wh}/\text{m}^3 \text{ BB h}$	Für 100 000 Einwohner:	
			Beckeninhalt m^3	Energiebedarf in $\text{kWh}/\text{h} = \text{kW}$
<i>Fall I: Reinigungseffekt 80%</i>				
$1\frac{1}{2}$	14,4	79,2	940	74
1	7,4	40,7	1880	76
$1\frac{1}{2}$	5,0	27,5	2820	77
2	3,7	20,4	3760	77
<i>Fall II: Reinigungseffekt 90%</i>				
1	13,4	73,8	1880	139
$1\frac{1}{2}$	9,9	54,4	2820	153
2	7,7	42,4	3760	159
3	5,45	30,0	5640	169

BB = Belüftungsbecken

Abbildung 6
Energiebedarf für die Belüftung des Abwassers für eine Stadt von 100 000 Einwohnern (Tagesmittelwerte; Abwasser der Stadt Zürich).

6. Der Rücklaufschlamm

Aus Abschnitt 4 geht hervor, dass der Reinigungseffekt einer Belebtschlammanlage gemessen am BSB_5 um so grösser ist, je länger die Belüftungszeit und je höher die Belebtschlammkonzentration gewählt wird. Wir haben somit alles Interesse daran, mit hohen Schlammgehalten im Belüftungsbecken zu fahren. Offenbar stehen zwei Mittel zur Verfügung, um diesen Schlammgehalt zu vergrössern: Erhöhung der Rücklaufschlammmenge und Erhöhung der Konzentration des Rücklaufschlammes.

Sofern wir den Schwebestoffgehalt des vorgeklärten Abwassers vernachlässigen, ist der Schlammgehalt im Belüftungsbecken (die Eigenproduktion im Belüftungsbecken während der Belüftungszeit wird im folgenden ausser acht gelassen) nur abhängig vom Rücklaufschlammverhältnis und der im Nachklärbecken erreichbaren Schlammkonzentration. Bezeichnen wir mit Q_T den der Dimensionierung zugrunde gelegten Trockenwetteranfall und mit Q_{RS} die Rücklaufschlammmenge, so wird mit $Q_{RS}:Q_T = m$ bei Anwendung der Mischungsrechnung die Schlammkonzentration S im Belüftungsbecken $S = m \cdot S_{RS} / (1 + m)$, wenn mit S_{RS} die Konzentration des Rücklaufschlammes bezeichnet wird. Wird Q_{RS} konstant gehalten, während der Trockenwetteranfall den normalen Tagesschwankungen unterworfen ist, dann verändert sich m , und damit die Schlammkonzentration. Mit diesen Schwankungen wollen wir uns jedoch im folgenden nicht befassen, auch

Tabelle 4

Erforderliche Rücklaufschlammmenge in % des Trockenwetteranfalls zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Schlammkonzentration S im Belüftungsbecken

		$S=2000$	3000	4000	5000 mg/l
S_{RS}		Rücklaufschlammmenge m			
		$= \frac{S}{S_{RS} - S} \cdot 100 [\%]$			
in mg/l	in % WG				
2000	99,8	∞			
3000	99,7	200%	∞		
4000	99,6	100	300%	∞	
5000	99,5	67	150	400%	∞
6000	99,4	50	100	200	500%
7000	99,3	40	75	133	250
8000	99,2	33	60	100	167
9000	99,1	28,5	50	80	125
10000	99,0	25	43	67	100
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
20000	98,0	11	18	25	33

WG = Wassergehalt

nicht mit den Verhältnissen bei Regenwetter, sondern annehmen, dass der rechnerische Trockenwetteranfall vorhanden sei. Nach der Mischungsrechnung ergeben sich dann folgende, in der Tab. 4 aufgeführte Rücklaufschlammengen in % des Trockenwetteranfalls bei gewünschten Schlammgehalten S im Belüftungsbecken und vorhandenen Rücklaufschlammkonzentrationen S_{RS} .

Aus Tab. 4 ist ersichtlich, dass eine wirkungsvolle Eindickung des Rücklaufschlammes im Nachklärbecken unbedingt erforderlich ist, sobald mit höheren Schlammkonzentrationen S im Belüftungsbecken gefahren werden muss und abnormal grosse Rücklaufschlammumpwerke vermieden werden sollen. Sonst dürften die Energie- und Betriebskosten dieser Pumpwerke geringer Förderhöhen nicht mehr vernachlässigt werden.

7. Überschussschlammproduktion

Nach A. L. DOWNING und A. P. HOPWOOD [7] ist die Überschussschlammproduktion von der Belüftungszeit abhängig: je länger die Belüftungszeit, um so geringer der Anfall an Überschussschlamm. Als Beziehung zwischen der Überschussschlammproduktion und der Belüftungszeit wird, unabhängig von der Schlammkonzentration im Belüftungsbecken, angegeben:

$$\frac{\text{Produzierte Belebtschlammmasse}}{\text{Zugeführte BSB}_5\text{-Menge}} = 0,1 + \frac{0,9}{\sqrt{T}},$$

wobei T = Belüftungszeit in Stunden (Bereich $1 < T < 7$).

Da der Überschussschlamm die Kosten der Schlammbehandlung beeinflusst und somit die Wirtschaftlichkeit der Anlage, wurde von Dr. WUHRMANN ebenfalls die Beziehung zwischen Belüftungszeit und Überschussschlammmenge mit der Varianzanalyse statistisch untersucht. Dabei zeigte sich, dass bei den für die Versuche gewählten Belüftungszeiten (25 min, 50 min, 2,4 Stunden) keine gesicherte Beziehung zwischen der Belüftungszeit, der Schlammkonzentration und der Überschussschlammmenge gefunden werden konnte. Die Überschussschlammproduktion wird deshalb für den Untersuchungsbereich als konstant angenommen.

B. Wahl der Höhenlage und der Länge der Überfallkanten bei Belüftungsbecken

1. Vorbemerkungen

Bei der Durchsicht von Projekten von Belebtschlammanlagen stellt man immer wieder fest, dass eine gewisse Unsicherheit besteht bezüglich der Wahl der Überfallkantenlängen und auch deren Kronenhöhen. Bei den im

Betrieb befindlichen Anlagen hat man ebenfalls das Empfinden, dass der Klärmeister die Erhöhung oder Erniedrigung der Überfallkanten willkürlich vornimmt mangels Instruktionen. Wir stellen uns deshalb die Frage, ob Höhenlage und Überfallkantenlänge wirklich frei gewählt werden können oder ob diese bestimmten Bedingungen unterworfen sind. Dabei sollen Becken mit gesteuerten Überfällen in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration im Belüftungsbecken aus unsern Betrachtungen ausgeschieden werden.

2. Die Schwankungen des Tagesanfalls

Der Abwasseranfall auf einer Abwasserreinigungsanlage ist ständigen Schwankungen unterworfen. Die Abwassermengen können an einzelnen Tagesstunden das 1,5fache des Tagesmittels übersteigen, um während der Nacht auf die Hälfte des mittleren Tagesanfalls herunterzusinken. Die Konzentration des Abwassers, gemessen in mg/l BSB_5 , ist während der einzelnen Tagesstunden ähnlichen Schwankungen unterworfen. Die Differenzen in den Stoffmengen, also des Produktes Wassermenge mal Konzentration, sind deshalb noch erheblich grösser. Diese Verhältnisse wurden für drei Untersuchungstage (Stadt Winterthur) in Abb. 7 graphisch dargestellt.

Abbildung 7

Schwankungen der Abwassermenge Q in m^3/h , bzw. des BSB_5 in $\text{kg O}_2/\text{h}$ während n ununterbrochenen Stunden. Abwasser der Stadt Winterthur.

Die Mittelwerte der Abwassermenge und des BSB_5 über die 24 Tagesstunden wurden = 100% gesetzt. Aus Abb. 7 gehen die grössten Abweichungen während 1, 2, ... n ununterbrochenen Stunden zur Tages- und Nachtzeit gegenüber dem Tagesmittel hervor. Es stellt sich nun die Frage, wie sich die einzelnen Belüftungssysteme bezüglich des Sauerstoffeintrags zum jeweiligen Sauerstoffbedarf während des Tagesverlaufs verhalten.

3. Becken mit Druckluftbelüftung

Da die Gebläse, die die Druckluft liefern, im stabilen Bereich ihrer Kennlinien mit steigendem Druck die Luftmenge reduzieren, wird die gelieferte Luftmenge bei starrer Überfallkante während der Tagesstunden sinken und während der Nachtstunden ansteigen. Die Sauerstoffversorgung erfolgt somit gegenläufig zum Bedarf. Eine Regelung durch Hinzuschalten von Gebläseeinheiten während der Tagesstunden drängt sich auf. Wird dies unterlassen, dann wird man bestrebt sein müssen, den Einfluss dieser gegenläufigen Schwankungen möglichst klein zu halten. Dies kann bei starren Überfallkanten nur dadurch, und zwar nur in beschränktem Masse, erreicht werden, indem die Überfallkante der Belüftungsbecken möglichst lang gewählt wird, so lange, als dies betriebstechnisch verantwortbar ist.

4. Becken mit Bürsten- und Stabwalzenbelüftung

Bei Becken mit Oberflächenbelüftung in Form von Bürsten- oder Stabwalzen liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Mit der erhöhten Wassermenge um die Mittagszeit steigt die Überfallhöhe beim Beckenauslauf an und damit auch die Eintauchtiefe der Walze. Dadurch wird der Sauerstoffeintrag vermehrt, was erwünscht ist. Da durch geeignete Wahl der Höhenlage der Überfallkante und der Überfalllänge die Eintauchtiefe der Bürste oder Walze variiert werden kann, so stellt sich die Aufgabe, diese beiden Grössen so zu wählen, dass der Sauerstoffbedarf während der Tages- und Nachtstunden mit dem Sauerstoffeintrag der Walze übereinstimmt. Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt schrittweise:

1. Dimensionierung der Belüftungsbecken nach den im Abschnitt A dargelegten Gesichtspunkten.
2. Ermittlung der täglichen Schwankungen des Abwasseranfalls und der Konzentration (Q_{max} , Q_{min} , Q_{mittel} , $BSB_{5\ max, min, mittel}$).
3. Errechnung des O_2 -Bedarfs für die zwei Tagesextremwerte und für das Tagesmittel.
4. Wahl der Belüftungseinrichtung und damit auch der Querschnittsfläche des Belüftungsbeckens.

5. Aus der Beziehung zwischen der Eintauchtiefe und dem O_2 -Eintrag der Bürste oder Walze bei konstanter Tourenzahl ergibt sich die erforderliche Eintauchtiefe für die drei Betriebszustände zur Deckung des O_2 -Bedarfs. Dadurch sind die Eintauchtiefen der Walze h_{max} , h_{min} und h_{mittel} festgelegt. Die Überfallhöhen beim Beckenauslauf ergeben sich zu $y + h_{max}$, $y + h_{min}$ und $y + h_{mittel}$, wobei die Differenz y zwischen Überfallkrone und Unterkante Walze vorerst noch unbekannt ist.

6. Diese Überfallhöhen lassen sich durch geeignete Wahl der Überfalllänge x steuern. Die zwei Unbekannten y und x können durch zwei Gleichungen ermittelt werden.

Dazu dienen z.B. die Überfallformeln für die beiden extremen Werte Q_{max} und Q_{min} .

7. Es ist zu kontrollieren, ob bei den errechneten Werten y und x für Q_{mittel} der durch die Walze gelieferte Sauerstoffeintrag genügt oder ob eventuell eine Korrektur vorgenommen werden muss.

Der Rechnungsgang soll an einem Beispiel unter der Annahme der Vollbelastung der Anlage erläutert werden. Gewählt wird Fall II mit einem erforderlichen Reinigungseffekt von 90%, gemessen am BSB_5 (s. Abschnitt A 4). Es sollen für dieses Beispiel der Übersichtlichkeit wegen wieder die Tagesmittelwerte der Dimensionierung zugrunde gelegt werden, gemäss den Gepflogenheiten in den USA. Die Bezeichnungen gehen aus dem Abschnitt A 4 hervor (Winterwerte).

1. Annahmen:

Belüftungszeit	= 2 Stunden
R_h	= $12 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ Tag}$
BSB_5	= 50 g/E Tag
Q_E	= 450 l/E Tag
BSB_5	= 110 mg/l
Einwohner pro m^3 Becken	= $12 \text{ m}^3 : 0,45 = 26,7$
R_B	= $12 \text{ m}^3 \cdot 110 \text{ g/m}^3 = 1,32 \text{ kg/m}^3 \text{ Tag}$
$S(\text{Tab. 1})$	= $4,4 \text{ kg/m}^3$

2. Abwassermenge:

Q_{mittel}	= $12 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ Tag}$	= $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ h}$
Q_{max}	= $170\% \cdot 0,5$	= $0,85 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ h}$
Q_{min}	= $50\% \cdot 0,5$	= $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ h}$
BSB_5 : BSB_{mittel}	= $1,32 \text{ kg/m}^3 \text{ Tag}$	= $55 \text{ g/m}^3 \text{ h}$
BSB_{max}	= $230\% \cdot 55$	= $126 \text{ g/m}^3 \text{ h}$
BSB_{min}	= $20\% \cdot 55$	= $11 \text{ g/m}^3 \text{ h}$

3. Erforderlicher Sauerstoffeintrag (nach Tab. 2):

	Max.	Mittel	Min.
Endogene Atmung	22	22	$22 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h}$
Substratatmung:			
– Organische Verbindungen	76	33	$6,6 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h}$
– Ammonium	35	15	$3,0 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h}$
Total	133	70	$32 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h}$
× Faktor 1,22 (2 mg/l O_2)	162	86	$39 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h}$
Verhältniszahlen	188% :	100% :	45%

4. Wahl der Walze:

Aluminiumguss, $\varnothing$ 42 cm gemäss Versuchsbecken (Versuchsstation Tüffenwies der EAWAG).

Zulässige Belastung pro m^1 Walze (brutto) = rd. 12 kg BSB₅/Tag.

$$\text{Beckenquerschnitt} = \frac{12 \text{ kg/m}^1 \text{ Tag}}{1,32 \text{ kg/m}^3 \text{ Tag}} = 9,1 \text{ m}^3/\text{m}^1 = 9,1 \text{ m}^2.$$

$$\text{Belastung} = \frac{12 \text{ kg/m}^1 \text{ Tag}}{0,050 \text{ kg/E Tag}} = 240 \text{ Einwohner/m}^1 \text{ Walze}.$$

Tourenzahl gewählt entsprechend erforderlichem Sauerstoffeintrag = 120 U/min. Beziehung zwischen Eintauchtiefe und Sauerstoffeintrag aus Belüftungsversuchen bekannt.

Werte 2. auf 1 m Beckenlänge (pro m^1 Walze) umrechnen:

Abwassermenge (9,1 m^3/m^1 Walze):

$$Q_{\text{mittel}} = 0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ h} \cdot 9,1 \text{ m}^3/\text{m}^1 : 3600 \text{ s} = 1,26 \text{ l/s m}^1$$

$$Q_{\text{max}} = 170\% Q_{\text{mittel}} = 2,14 \text{ l/s m}^1$$

$$Q_{\text{min}} = 50\% Q_{\text{mittel}} = 0,63 \text{ l/s m}^1$$

5. O₂-Bedarf pro m Walze: (siehe 3.)

$$\text{Max.: } 162 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h} \cdot 9,1 \text{ m}^3/\text{m}^1 = 1470 \text{ g O}_2/\text{m}^1 \text{ h}$$

$$\text{Mittel: } 86 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h} \cdot 9,1 \text{ m}^3/\text{m}^1 = 780 \text{ g O}_2/\text{m}^1 \text{ h}$$

$$\text{Min.: } 39 \text{ g O}_2/\text{m}^3 \text{ h} \cdot 9,1 \text{ m}^3/\text{m}^1 = 355 \text{ g O}_2/\text{m}^1 \text{ h}$$

Der entsprechende Sauerstoffeintrag wird von der Bürstenwalze bei 120 Touren/min geliefert bei folgenden Eintauchtiefen b :

$$b_{\text{max}} = 13 \text{ cm}; b_{\text{mittel}} = 8 \text{ cm}; b_{\text{min}} = 4 \text{ cm}.$$

6. Pro m^1 Beckenlänge bzw. Walzenlänge ergeben sich folgende Überfallmengen Q_u (Q_{max} und Q_{min}):

$$Q_{\text{max}} = x \cdot 1,85 (y + b_{\text{max}})^{3/2}; \quad 0,00214 \text{ m}^3/\text{s} = x \cdot 1,85 (y + 0,13)^{3/2}$$

$$Q_{\text{min}} = x \cdot 1,85 (y + b_{\text{min}})^{3/2}; \quad 0,00063 \text{ m}^3/\text{s} = x \cdot 1,85 (y + 0,04)^{3/2}$$

Daraus errechnen sich die Werte y und x , wie in Bild 8 a und 8 b dargestellt zu:

Kronenhöhe der Überfallkante unterhalb Unterkante Walze $y = 3,2 \text{ cm}$.

Länge der Überfallkante pro m^1 Beckenlänge = 1,8 cm,

bzw. Länge der Überfallkante pro 1000 angeschlossene Einwohner

$$= 1,8 \text{ cm} \cdot 1000 \text{ E}/240 \text{ E} = 7,5 \text{ cm}.$$

7. Kontrolle der Verhältnisse beim mittleren Tagesanfall:

Vorhandene Eintauchtiefe der Walze:

$$Q_{\text{mittel}} = 0,00126 \text{ m}^3/\text{s} = 0,018 \text{ m} \cdot 1,85 (y + b_{\text{mittel}})^{3/2}$$

$$(y + b_{\text{mittel}})^{3/2} = 0,0378; \quad y + b = 0,113 \text{ m} = 11,3 \text{ cm}$$

$$- y = \quad - 3,2 \text{ cm}$$

$$b = \quad 8,1 \text{ cm}$$

Bei der gewählten Kronenhöhe der Überfallkante und der Überfalllänge beträgt die Eintauchtiefe der Walze im Tagesmittel = 8,1 cm. Erforderlich wäre nach 5 eine Eintauchtiefe von 8 cm.

Abbildung 8

a Schnitt durch Belüftungsbecken mit Bürstenwalze $\varnothing$ 42 cm bei Vollbelastung der Anlage
(Reinigungseffekt = 90%)

b Diagramm zu Abb. 8 a).

Die gleiche Berechnung wurde ebenfalls für den Fall I, Reinigungseffekt = 80%, durchgeführt. Dabei ergab sich ein Wert y als Höhendifferenz zwischen Überfallkante und Unterkante Walze von 1,8 cm und eine erforderliche Überfallkantenlänge von 3,6 cm pro m¹ Beckenlänge, bzw. von 15 cm pro 1000 angeschlossene Einwohner. Der Wert y hat sich gegenüber den Verhältnissen bei 90% Reinigungseffekt beinahe um die Hälfte reduziert, die Überfalllänge verdoppelt.

C. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Praxis

Die auf Versuchen der EAWAG fussende Veröffentlichung von WUHRMANN [I] und die darauf aufbauenden Berechnungen lassen folgende Schlussfolgerung zu:

1. Die Untersuchungsergebnisse wurden erzielt mit dem relativ dünnen Zürcher Abwasser ($BSB_5 = 90-150 \text{ mg/l}$). Die Schlussfolgerungen sind deshalb gültig für Anlagen mit städtischem Abwasser ähnlicher Konzentration und Zusammensetzung.

2. Der Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken ist von untergeordnetem Einfluss auf den Reinigungseffekt einer Belebtschlammanlage, gemessen am BSB_5 . Wesentlich ist jedoch eine hohe Turbulenz im Belüftungsbecken, namentlich bei hohen Schlammbelastungen.

Eine Beziehung zwischen dem Reinigungseffekt, gemessen am BSB_5 , und der Schlammbelastung ist feststellbar. Je grösser die Schlammbelastung, um so kleiner ist der Reinigungseffekt. Für Schlammbelastungen über $0,30 \text{ kg } BSB_5 \text{ pro kg Trockensubstanz und Tag}$ sinkt mit zunehmender Belastung der Reinigungseffekt in der kalten Jahreszeit rascher ab als im Sommer. Daraus geht hervor, dass namentlich für Ortschaften mit niedrigen Abwassertemperaturen nur Anlagen mit kleinen Schlammbelastungen projektiert werden sollten. Dieser Schluss dürfte namentlich für die Winterkurorte von Bedeutung sein. Dabei ist zu beachten, dass die angegebenen Winterwerte für eine mittlere Abwassertemperatur von 10°C gelten, die Sommerwerte für $16,3^\circ\text{C}$ im Mittel. Versuchsergebnisse bei niedrigeren Abwassertemperaturen sind noch zu erheben.

4. Da sich in der kalten Jahreszeit schlechtere Reinigungseffekte ergaben als im Sommer und in der Schweiz die Vorfluter in der Regel im Winter die geringste Wasserführung aufweisen, so sind bei der Beurteilung der Belastbarkeit eines Vorfluters und bei der Festlegung des erforderlichen Reinigungseffektes, bzw. der Schlammbelastung von Abwasserreinigungsanlagen, die Winterverhältnisse zu berücksichtigen.

5. Für Abwässer gleicher Konzentration ist der reziproke Wert der Schlammbelastung S_B proportional zur Schlammarbeit ST . Der Reinigungseffekt eines Belüftungsbeckens hängt somit nicht nur von der Belüftungszeit T ab, sondern in gleichem Masse von der Schlammkonzentration S , mit der die Anlage gefahren wird. Wir können deshalb bessere Reinigungsleistungen erzielen entweder durch längere Belüftungszeiten oder ebensogut mit konzentrierteren Belebtschlämmen. Diese grösseren Schlammkonzentrationen können durch grössere Rücklaufschlammengen oder durch Rückpumpen konzentrierterer Schlämme erreicht werden. Da nur die Schlammsubstanz für die Reinigungswirkung wesentlich ist, wird man bestrebt sein müssen, nicht grosse Wassermengen zurückzupumpen, sondern möglichst viel Schlammsubstanz. Das Rückpumpen grosser Wassermengen kann nur dort u. U. erwünscht sein, wo das Abwasser praktisch sauerstofffrei anfällt.

Der Grad der möglichen Schlammkonzentration ist bedingt durch die Eigenschaften des Schlammes (Mohlman-Index oder besser die Sackungsgeschwindigkeit) und durch die Konstruktion und Betriebsweise des Nachklärbeckens. Es sollte deshalb zukünftig in Praxis und Forschung den Nachklärbecken vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

6. Die bisherigen Berechnungen des Sauerstoffbedarfs bei Teilreinigung, bzw. bei Vollreinigung, waren unbefriedigend. Sie ergaben Unstimmigkeiten gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen. Die neue Formel (WUHRMANN [5]) berücksichtigt die auftretenden Reaktionen und entspricht deshalb den Bedürfnissen. Zu ihrer Handhabung ist jedoch die Kenntnis einer Reihe von Faktoren notwendig, die heute offenbar nur für wenige Abwässer bekannt sind. Die allgemeine Einführung der Formel wird dann möglich sein, wenn vermehrte Angaben über die C- und N-Verhältnisse im Abwasser vorliegen.

7. Die Berechnung der Beckengrößen von Belebungsanlagen und des Energiebedarfs für den Lufteintrag ergab, dass bei einem Reinigungseffekt von 80%, gemessen am BSB₅, der Energiebedarf für alle in der Praxis gebräuchlichen Beckengrößen nahezu konstant ist. Bei einem Reinigungseffekt von 90% hingegen nimmt der Energiebedarf bei grösseren Becken, bzw. bei längeren Belüftungszeiten, zu. Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus betrachtet sind somit kleine Becken am günstigsten. Da jedoch mit abnehmender Beckengröße, die zur Aufrechterhaltung des gewünschten Reinigungseffektes erforderliche Schlammkonzentration im Belüftungsbecken zunimmt, verhindert der praktisch erreichbare Schlammgehalt im Becken von selbst die Wahl zu kleiner Belüftungsbecken, namentlich bei hohen Reinigungseffekten.

8. Wir sind der Auffassung, dass die von einigen kantonalen Gewässerschutzämtern empfohlenen Beckengrößen von einer Stunde Belüftungszeit bei Teilreinigung und von zwei Stunden bei Vollreinigung als Richtschnur angenommen werden dürfen, wobei diese Belüftungszeiten für die Belastung während der Tagesstunden angenommen werden. Rechnet man mit Mittelwerten des Tagesanfalls, so ergibt sich für das Abwasser der Stadt Zürich bei einer Stunde Belüftungszeit und 80prozentigem Reinigungseffekt eine erforderliche Schlammkonzentration im Belüftungsbecken von rund 2000 g Trockensubstanz pro m³ Beckeninhalt. Bei zwei Stunden Belüftungszeit und einem 90prozentigen Reinigungseffekt ist hingegen eine Schlammkonzentration von 4400 g/m³ erforderlich. Beide Schlammkonzentrationen können in der Regel in der Praxis gut erreicht werden. Auf Grund der Versuche würde bei einer Schlammkonzentration von 3000 g/m³ bei

80% Reinigungseffekt eine Belüftungszeit von knapp 40 min ausreichen, während ein 90prozentiger Effekt eine Behandlung mit drei Stunden Belüftungszeit erfordert.

9. Ein Zusammenhang zwischen der Betriebsweise der Belebtschlamm-anlage und der Überschussschlammproduktion konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Man wird deshalb vorerst noch, wenigstens für Anlagen mit Belüftungszeiten von $\frac{1}{2}$ bis $2\frac{1}{2}$ Stunden, und für relativ dünnes Rohwasser, mit gleich grossen Überschussschlammengen rechnen müssen. Als Überschussschlammproduktion ergab sich 0,62 kg Trockensubstanz pro kg BSB₅-Zufluss im Winter, bzw. 0,68 kg TS/kg BSB₅-Zufluss im Sommer ohne die Schwebestoffe im Anlagenabfluss. Dabei betrugen die Vertrauensgrenzen für $P = 0,1$ rd. $\pm 0,10$ [1].

10. Für die Wahl der Höhenlage und der Länge der Überfallkanten von Belüftungsbecken ergeben sich folgende Richtlinien:

Bei Druckluftbelüftung ist die Überfallkante möglichst lang auszubilden, um die täglichen Schwankungen des Wasserspiegels im Belüftungsbecken zu begrenzen. Der Luftdurchsatz soll für den maximalen Wasserspiegel im Becken bemessen werden. Namentlich Systeme mit hochliegenden Belüftungsrosten sind auf Wasserspiegelschwankungen empfindlich und müssen den Tagesschwankungen im Abwasseranfall besonders sorgfältig angepasst werden.

Bei Walzenbelüftung ist die feste Überfallkante der Überfallkrone beim Beckenauslauf mindestens 5 cm unterhalb Unterkante der Belüftungswalze anzuordnen. Die Überfallkante ist in Felder aufzuteilen, deren Überfallhöhe einzeln durch «Dambalken» reguliert werden kann. Zwei dieser Felder sind so lang auszubilden, dass jedes für sich eine selbständige Steuerung der Eintauchtiefe der Walze bewirkt, so dass der Sauerstoffeintrag stets zur Deckung des Sauerstoffbedarfs bei einem 90prozentigen Reinigungseffekt genügt. Hierfür dürfte eine Überfallkantenlänge von weniger als 10 cm pro 1000 angeschlossene Einwohner in den meisten Fällen ausreichen.

11. Zum Schluss möchte ich PD Dr.K.WUHRMANN (Versuchsleiter) und Dr.E.MÄRKI und seinen Mitarbeitern danken für die grosse Arbeit, die bei der Durchführung und Auswertung der Grossversuche geleistet wurde, sowie dem Werkstattechef E.FRIEDERICH und seinen Mitarbeitern, die während Jahren bei jeder Witterung, Sommer und Winter, die Versuchsanlagen zur vollen Zufriedenheit betrieben haben. «Last not least» gebührt unser Dank auch Prof.Dr.O.JAAG, welcher uns in der Gestaltung und Durchführung der Versuche die notwendige Freiheit lässt und die Finanzierung der Versuchsobjekte ermöglicht.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] K. WUHRMANN, *Hauptwirkungen und Wechselwirkungen einiger Betriebsparameter im Belebtschlammssystem; Ergebnisse mehrjähriger Grossversuche*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2, S. 218 (1964).
- [2] K.H. HUNKEN, *Untersuchungen über den Reinigungsverlauf und den Sauerstoffverbrauch bei der Abwasserreinigung durch das Belebtschlammverfahren*, Stuttg. Ber. zur Siedlungswasserwirtschaft H. 4, (Verlag R. Oldenbourg, München 1960).
- [3] KLAUS R. IMHOFF, *Zur Berechnung der Belebungsbecken* GWF 104, H. 52, 1494-1498 (1963).
- [4] A. HÖRLER, *Ergebnisse von Versuchen der EAWAG mit dem Kombibecken*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2, S. 428 (1964).
- [5] K. WUHRMANN, *Grundlagen für die Dimensionierung der Belüftung bei Belebtschlamm-anlagen*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2, S. 310 (1964).
- [6] W. VON DER EMDE, *Die Technik der Belüftung in Belebtschlamm-anlagen*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2, S. 388 (1964).
- [7] A.L. DOWNING, und A.P. HOPWOOD, *Some Observations on the Kinetics of Nitrifying Activated-Sludge Plants*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2, S. 271 (1964).