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

Ergebnisse von Versuchen der EAWAG mit dem Tauchtropfkörper

Von E. MÄRKI, EAWAG, Zürich

1. Beschreibung der Tauchtropfkörperversuchsanlage

1.1 *Der Tauchtropfkörper*

Der von HARTMANN [1] entwickelte Tauchtropfkörper besteht aus mehreren kreisförmigen Scheiben, die langsam rotieren und dabei in eine von vorgeklärtem Abwasser durchflossene Wanne eintauchen. Die Oberfläche dieser Scheiben erhält nach einigen Tagen Einarbeitungszeit einen Bewuchs, den sogenannten biologischen Rasen, der die Adsorption der Schmutzstoffe und damit deren Eliminierung aus dem Abwasser besorgt. Nach einer gewissen Entwicklungszeit werden Flocken dieses Rasens abgestossen und gelangen mit dem gereinigten Abwasser als Schlamm zum Abfluss ins Nachklärbecken.

Die Maschinenfabrik J. Conrad Stengelin in Tuttlingen (Deutschland) hat die Herstellung und den Vertrieb dieser Tauchtropfkörper übernommen. Die einzelnen Scheiben werden aus dem Leichtkunststoff Styropor in handelsüblichen Durchmessern von 1,0, 2,0 und 3,0 m hergestellt. Den Antrieb besorgt in den meisten Fällen ein Elektromotor.

Die von der Firma Stengelin im Jahre 1960 gelieferte Tauchtropfkörperanlage (Abb. 1) in der Versuchsstation Tüffenwies der EAWAG besteht aus 40 Scheiben von je 1,0 m Durchmesser, von denen je 10 zu einer Gruppe zusammengeschlossen sind. Die einzelnen Scheibengruppen, alle auf einer Achse montiert, werden durch spezielle Anordnung der Verbindungsrippen hintereinander durchflossen. Im Prinzip handelt es sich um eine vierstufige Reinigungsanlage. Probenahmestellen nach jeder Scheibengruppe ermöglichen es, die Abwasserreinigung stufenweise zu verfolgen. Die Scheiben sind 15 mm dick und besitzen eine Lichtweite (ohne Bewuchs) von 20 mm. Die Bruttooberfläche sämtlicher Scheiben beträgt $62,5 \text{ m}^2$, die effektive Bewuchsfläche bei 37 cm Eintauchtiefe der Scheiben rund

Abbildung 1

Tauchtropfkörperversuchsanlage in der Tüffenwies; Längsschnitt und Grundriss mit Abmessungen.

58 m². Die Umdrehungszahl wurde bei allen Versuchen konstant, bei 3 Umdrehungen pro Minute gehalten. Die Scheiben drehen, entsprechend den Angaben von HARTMANN [1], in der Fliessrichtung des Wassers.

Die vom Abwasser durchflossene Wanne besitzt einen kreisförmigen Querschnitt und einen Nutzinhalt von rund 360 l. Die Tauchtropfkörperanlage wurde zuerst ohne Überdachung im Freien aufgestellt. Ein Gewitterregen wusch jedoch den biologischen Rasen von den Scheiben weg, so dass die Anlage überdacht werden musste.

1.2 Nachklärbecken

Als Nachklärbecken diente ein kreisrundes Spitztrichterbecken von 1,28 m lichtigem Durchmesser und rd. 1,4 m³ Nutzinhalt. Die Beschickung erfolgte zentral in einem konzentrischen Zylinder. Über eine polygonale Überfallrinne mit einer Überfallkante von 6 m Länge floss das Abwasser weg. Der starre Beckeninhalt hatte je nach Beschickungsmenge variable Nachklärzeiten zur Folge (0,78; 1,54; 3,9 und 7,8 Stunden).

2. Betrieb der Anlage

Zum Betrieb der Anlage wurde grob vorgeklärtes Abwasser der Stadt Zürich verwendet. Die Beschickungsmenge blieb jeweils für den Einzelversuch konstant. Die täglichen Schwankungen der Abwassermenge sind so-

mit nicht berücksichtigt worden. Hingegen erfolgten die Schwankungen der Abwasserkonzentration entsprechend dem städtischen Abwasser.

Es wurde versucht, Beschickungsmengen von 0,05, 0,10, 0,20 und 0,50 l/s einzuhalten. Bei den kleinen Abwassermengen traten in der Schlauchzu-
leitung Verstopfungen auf, weshalb die Zugabe mittels Magnetventil-
steuerung schubweise erfolgen musste.

Bei den Versuchsserien I und II wurde die Anlage ohne Reinigung der Scheiben beim Übergang auf eine neue Belastungsstufe betrieben. Bei der Versuchsserie III hingegen sind die Scheiben jeweils gereinigt und neu eingefahren worden.

3. Untersuchungsprogramm und Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsserien

Die Untersuchungen dienten vor allem dazu, festzustellen, wie sich die Reinigung des Abwassers der Stadt Zürich im speziellen mit Tauchtropfkörpern durchführen lässt, und zwar bei verschiedenen Beschickungsmengen, sowie um Vergleichszahlen mit anderen Verfahren zu bekommen, nach denen ebenfalls in der Tüffenwies mit Abwasser der Stadt Zürich gearbeitet wird. Wir waren uns bewusst, dass das dünne Abwasser der Stadt Zürich nicht immer optimale Bedingungen für den Betrieb eines Tauchtropfkörpers mit sich bringen kann.

Eine Versuchsserie I vermittelt die Ergebnisse bei höheren Abwassertemperaturen (über 13°C, mit Ausnahme einiger Versuche vom 3. bis 12. November 1960). Anschliessend daran wurden am 13. November 1960 Versuche mit Zudosierung von Zucker (Versuchsserie II mit 58 mg Saccharose pro Liter Abwasser) begonnen, um die Konzentration des vorgeklärten Abwassers zu erhöhen. Eine weitere Versuchsserie III wurde mit Abwassertemperaturen unter 13°C vorgenommen.

3.2 Probenahme

Um korrespondierende Proben erheben zu können, wurden mit Kochsalzversuchen die Durchflusszeiten durch alle vier Scheibengruppen, bzw. Stufen, ermittelt und dabei folgende Werte erhalten:

Tabelle 1

Wassermenge	Einlauf	Stufe 1 min s	Stufe 2 min s	Stufe 3 min s	Stufe 4 min s
0,50 l/s	0	0 30	5 30	10 30	15 30
0,20 l/s	0	0 45	8 45	16 45	24 45
0,10 l/s	0	1 30	18 30	35 30	52 30
0,05 l/s	0	3 00	28 10	53 70	78 30

An den einzelnen Probenahmestellen wurden die Proben jeweils unter Berücksichtigung obiger Durchflusszeiten erhoben. Im Versuchsabschnitt I begnügte man sich mit Einzelproben, in den Abschnitten II und III hingegen wurden Sammelp Proben während einer Stunde (alle 5 min 100 ml) geschöpft, mit Beginn beim Einlauf jeweils um 10 Uhr.

3.3 Physikalische Erhebungen

Bei allen Versuchen wurden gemessen: Durchflussmenge, Luft- und Abwassertemperaturen sowie die absetzbaren Stoffe nach 30 min Absetzzeit.

3.4 Chemische Analysen

Bestimmt wurden in der Regel:

Kaliumpermanganatverbrauch	mg KMnO_4/l	Nitrite	mg N/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB_5)	mg O_2/l	Nitrate	mg N/l
Sauerstoffgehalt	mg O_2/l	Phosphate	mg P/l

und in erweiterten Untersuchungen zusätzlich:

Gesamtstickstoff	mg N/l	Gesamtphosphor	mg P/l
Ammoniak	mg N/l	Chloride	mg Cl/l

4. Versuchsergebnisse

In den nachstehenden Ausführungen sind von den vorliegenden Versuchsergebnissen lediglich die Sauerstoff-, Stickstoff- und Phosphorverhältnisse behandelt und die Beobachtungen über die Schlammproduktion dargestellt.

4.1 Die Sauerstoff- und BSB_5 -Bilanz

HARTMANN [1] hat die Sauerstoffaufnahmebedingungen durch den biologischen Rasen auf den Scheiben sehr eingehend diskutiert und insbesondere die Diffusionsvorgänge beschrieben. Wir beschränken uns daher auf die Bekanntgabe der Sauerstoffveränderungen bei verschiedenen Durchflussmengen der Versuchsanlage.

In Tab. 2 sind die hydraulischen Daten veranschaulicht.

Tabelle 2

l/s	m^3/Tag	$\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ Tag}$ $J = 360 \text{ l}$	$\text{l}/\text{m}^2 \text{ F Tag}$ 58 m^2	TS *) Rasen (2,5 mm) pro m^2 Abwasser und Tag in g	Notwendige Fläche pro Einwohner in m^2 120 l/ET 300 l/ET (deutsch) **) (schweiz.)	
0,05	4,32	12	74,5	840	1,62	4,02
0,1	8,64	24	149	420	0,81	2,01
0,2	17,28	48	298	210	0,40	1,00
0,5	43,2	120	745	84	0,16	0,40

*) TS = Trockensubstanz **) Lit. [1]

Wird die Versuchsanlage mit mehr als 500 l Abwasser pro Quadratmeter Fläche belastet, so sinkt der Sauerstoffgehalt bis zur 4. Stufe auf weniger als 0,5 mg/l (Tab. 9) ab. Der Sauerstoffeintrag genügt eben noch, um die Veratmung der Schmutzstoffe zu unterhalten, aber eine Anreicherung des Abwassers an Sauerstoff kommt nicht mehr zustande.

Mit etwa 300 l/m² Fläche nimmt der Sauerstoffgehalt bis zur zweiten und dritten Stufe ständig ab, während der Sauerstoffbedarf der 4. Stufe geringer ist als die Anreicherung. Bei der Belastung mit 150 l/m² Fläche weist die 1. Stufe erwartungsgemäss von allen Stufen die geringste Sauerstoffspannung auf. Das gleiche gilt (Abb. 2) auch noch für kleinere Belastungen.

Der Abbau der organischen Verunreinigung des Abwassers kann mit Hilfe der biochemischen Sauerstoffverhältnisse und des Kaliumpermanganatverbrauchs verfolgt werden (Tab. 7 und 8).

Abbildung 2

Verlauf der Sauerstoffkonzentration in den verschiedenen Stufen der Tauchtropfkörperanlage.

Die erste Stufe der Anlage ist befähigt, bei kleinen Durchflussmengen über 60% der BSB_5 -Menge abzubauen. Mit der zweiten Stufe zusammen ergeben sich Abbauraten von über 70%. Belastungen von 300 l und mehr pro Quadratmeter Scheibenfläche haben drei und mehr Stufen nötig, damit ein guter Abbaueffekt erreicht werden kann. Von allen Abbaukurven weist diejenige, die den Abbau des Abwassers mit Saccharosezusatz darstellt, den regelmässigsten Verlauf auf.

Die Kurvenschar zeigt aber auch, dass in der 4. Stufe noch ein merklicher Abbau erfolgt, und zwar bei allen Durchflussmengen. Merkwürdigerweise verläuft bei der grössten Belastung die Kurve in der 4. Stufe am flachsten, was vermutlich auf die quantitative Begrenzung des belebten Rasens auf den Scheibenoberflächen und den wegen der Mehrbelastung der Stufe bedingten Sauerstoffmangel zurückzuführen ist. (Abb. 3 und 4).

Abbildung 3

Verlauf des BSB_5 -Abbaues in den verschiedenen Stufen des Tauchtropfkörpers.

Die Versuche in der Tüffenwies am Abwasser der Stadt Zürich ergaben Abbauleistungen, die denjenigen mit dem Abwasser von Stuttgart und Grünstadt [5] sehr ähnlich sind.

Die Schmutzstoffe im Abwasser werden durch den biologischen Rasen auf den 58 m² grossen Scheibenflächen adsorbiert. Ein Teil des Rasens wird

Abbildung 4

Abbauleistung in Abhängigkeit der Belastung der 4stufigen Tauchtropfkörperanlage ($g \text{ BSB}_5$ pro m^2 Fläche).

abgestossen und gelangt im Nachklärbecken zum Austrag. Man kann diesen abgestossenen Rasen auch als Überschußschlamm bezeichnen. Der Schlamm, der noch einige Zeit in den Wannen der Tauchkörper zirkuliert, ist noch biologisch aktiv. Diese Restmenge beträgt aber im Maximum 10% der Trockensubstanz der auf den Scheiben haftenden Massen.

Pro Kilogramm BSB_5 -Zufuhr entsteht lediglich eine Überschußschlammmenge von etwa 350–400 g Trockensubstanz, im Gegensatz zu den Belebtschlammverfahren (WUHRMANN [6]), bei denen sich eine mittlere Schlammmenge von 0,93–1,0 kg Trockensubstanz pro Kilogramm BSB_5 -Zufluss entwickelt.

Vergleichen wir nun die Menge belebte Substanz, die für die Abwasserreinigung bei eingearbeiteten Tauchtropfkörpern im Maximum zur Verfügung steht, mit den Belebungsverfahren, so stellen wir fest, dass bei 2,5 mm Rasendicke auf den Scheiben und 98,6% Wassergehalt eine Schlammmenge von 145 l mit 2 kg Trockengewicht zur Verfügung steht.

Bei 600 mg Trockensubstanz (TS) pro Liter im Belebungsverfahren ergeben sich bei den gewählten Durchflussmengen und bei zweistündiger Belüftungszeit folgende Belebtschlammengen für den biologischen Abbau:

Tabelle 3

l/s	m ³ /Tag	kg TS/Tag	kg TS/2 h
0,5	43,2	25,92	2,16
0,2	17,28	10,368	0,864
0,1	8,64	5,184	0,432
0,05	4,32	2,592	0,216

Im Tauchtropfkörper sind zur gleichen Zeit 2 kg TS vorhanden, ob nun 0,05 oder 0,5 l/s Abwasser durchfliessen. Diese 2 kg Substanz stehen aber nicht ständig in Kontakt mit dem Abwasser, da nur immer 21,4 m² oder 37% der Rasenfläche ins Abwasser eintauchen. Der Kontakt zwischen Abwasser und belebtem Rasen ist bedeutend weniger intensiv als beim Belüungsverfahren. Zur Erzielung eines gleichen Abbaueffektes werden daher bedeutend grössere Rasenmassen vorrätig sein müssen.

Wenn man nun mit einem Tauchtropfkörper bei einer Durchflussmenge von 0,05 l/s einen Reinigungseffekt von 80–85% erreicht, so ist dies gemäss Untersuchungen von WUHRMANN [6] mit 600 mg TS/l und 2,4 Stunden Belüfungszeit ebenfalls erreichbar. Bei 0,05 l/s verbleibt das Abwasser gemäss den Salzungsversuchen etwa 1½ Stunden in der Tauchtropfkörperanlage.

Auf Grund dieser Überlegungen kann man über die belebte Substanz die beiden Reinigungsverfahren einigermaßen miteinander vergleichen und feststellen, dass die Abbauleistungen auch in ähnlichen Grössenordnungen liegen.

Im Belüungsverfahren kann je nach Abwasserbelastung die Konzentration des Belebtschlammes entsprechend dem Belüftungssystem gesteigert werden, während bei der Tauchtropfkörperanlage in der Tüffenwies die Rasendicke auf den Scheiben kaum über 3 mm hinaus erhöht werden kann, ohne dass sich der Rasen abstösst.

4.2 Diskussion einiger weiterer im Abwasser bestimmten Komponenten

Der Kaliumpermanganatverbrauch (Oxydierbarkeit). In Tab. 8 sind die zum BSB₅ korrespondierenden Werte der Oxydierbarkeit zusammengefasst. Der mit dieser Bestimmung errechnete Reinigungseffekt ist erwartungsgemäss etwas niedriger als der mit dem BSB₅-Wert errechnete Prozentsatz. Die Ergebnisse bestätigen aber die mit Hilfe des biologischen Tests ermittelten Reinigungsleistungen.

Gesamtstickstoff (Tab. 10). Die Gesamtstickstoffbestimmung wurde erst in den Versuchsserien II und III aufgenommen. Im vorgeklärten Abwasser

der Stadt Zürich sind 30–40 mg N/l vorhanden. Die Elimination des Stickstoffs im Tauchtropfkörper unterlag während der Versuche sehr grossen Schwankungen. Im Versuchsabschnitt II mit den ausgeglichensten BSB₅-Abbauverhältnissen wurden 45,6% N-Verbindungen eliminiert, bei mittleren Belastungen von 0,1–0,2 l/s etwas über 50% und merkwürdigerweise bei 0,05 l/s nur noch etwa ein Viertel der Gesamtmenge. Die Ursachen dieser Erscheinung sind nicht weiter untersucht worden.

Bei der Belastung 0,05 l/s trat in den Stufen 2 bis 4 eine Nitrifikation der Stickstoffverbindungen auf, die aber nur zu maximalen NO₃-Stickstoffwerten von 5–6 mg/l führte.

Gesamtphosphor (Tab. II). Überraschenderweise wurden beim Versuch II («Zuckerversuch») die Phosphorverbindungen mit dem gleichen Prozentsatz aus dem Abwasser eliminiert wie die Stickstoffverbindungen. Im weiteren erfahren die Eliminationseffekte, gemessen am Gesamtphosphor, grosse Streuungen und erreichen bei den niedersten Belastungen im allgemeinen Werte von über 40%.

4.3 Die Schlammproduktion (Tab. I2)

Die Versuchsserien 1961 vermitteln einige Angaben für die Überschussschlammproduktion des Tauchtropfkörpers. Bei einer Belastung mit 8,64 m³ Abwasser pro Tag erzeugen diese eine Schlammmenge von 300 g TS oder, umgerechnet auf 1 kg BSB₅-Zufuhr, 290 g TS. Die doppelte Abwasserlast dagegen steigert den Schlammausstoss lediglich um 1/3 auf 400 g/Tag, und die fünffache Abwasserlast erzeugt noch 500 g TS/Tag. Mit zunehmender Belastung der Anlage nimmt die spezifische Schlammproduktion sehr stark ab (Abb. 5).

Tabelle 4

l/s	m ³ /Tag	BSB ₅ /Tag g	Schlammmenge g TS/Tag	Spez. Schlammmenge in g pro kg BSB ₅ -Zufuhr
0,05	4,32	518	200	386
0,1	8,64	1036	300	290
0,2	17,28	2072	400	193
0,5	43,2	5180	500	96

Betrachten wir aber den Gesamteliminationseffekt, dann entstehen folgende Beziehungen:

Abbildung 5

Die Schlammproduktion der Tauchtropfkörperanlage in Funktion der hydraulischen Belastung.

Tabelle 5

Durchflussmenge l/s	Faktor	Schlammmenge g TS/Tag	Spez. Schlammmenge g TS/kg BSB ₅	Schlammproduktion g TS
0,05	1	200	396	396
0,1	2	300	290	590
0,2	4	400	193	788
0,5	10	500	96	960

Die Mehrbelastung einer eingespielten Tauchtropfkörperanlage bewirkt eine Mehrproduktion an Schlamm, die zur Durchflussmenge nicht linear verläuft. Die 10fache Belastung des gleichen Rasens bringt immerhin noch eine 2,5fache Schlammmenge hervor, während erwartungsgemäss gleichzeitig der prozentuale Reinigungseffekt zurückfällt.

Diese Beobachtungen führten dazu, dass die Tauchtropfkörperanlage in der Tüffenwies im Hinblick auf die Abklärung verschiedener Fragen einer weiteren Versuchsserie unterworfen wurde.

4.4 Verhalten des Tauchtropfkörpers bei stossweiser Belastung

In Kurorten, bei Berggasthäusern, Waffenplätzen, Kasernen, Schulhäusern, Pflegeheimen usw. ist stets mit einem stark wechselnden Abwasseranfall zu rechnen. So ist es z. B. bei Berggasthäusern möglich, dass an schönen Sonntagen mit dem Zehn- und Mehrfachen des werktäglichen Abwasseranfalls gerechnet werden muss, besonders wenn letzterer in eine Schlechtwetterperiode fällt.

Diesem jähen Wechsel in der Beanspruchung wird wohl der mechanische Teil einer Kläranlage folgen können. Wie rasch sich jedoch der biologische Teil der Mehrbelastung anpasst, ist fraglich und dürfte von mehreren Faktoren abhängen: Schlammmenge und Zustand des Schlammes, Wirksamkeit der Belüftungseinrichtung, Abwassertemperatur, Belüftungszeit usw.

In einer Versuchsserie von etwa 12 Wochen wurden die Abwassermengen jeweils am Mittwoch plötzlich über 8 Stunden Dauer verzehnfacht und die Abbauleistung der Tauchtropfkörperanlage während und nach der Mehrbelastung untersucht.

Aus der nachstehenden Tabelle sind die Ergebnisse der BSB₅-Bestimmungen zusammengefasst.

a) Durchflussmenge 0,05/0,50 l/s.

	Tag vorher	Hochbelastung	Tag nachher
l/s	0,05	0,05/0,50/0,05	0,05
Reinigungseffekt in % :	92,5	46,9	85,2
(Mittelwert aus 6 Versuchen)			

b) Durchflussmenge 0,02/0,20 l/s.

	Tag vorher	Hochbelastung	Tag nachher
l/s	0,02	0,02/0,20/0,02	0,02
Reinigungseffekt in % :	94,6	65,0	77,6
(Mittelwert aus 6 Versuchen)			

Eine Mehrbelastung eines Tauchtropfkörpers auf das Zehnfache kann dieser relativ gut auffangen. Zwar sinkt die prozentuale Abbaurate erwartungsgemäss für die Zeit der Mehrbelastung stark ab. Nach weiteren 24 Stunden ist derselbe Rasen wiederum in der Lage, die reduzierte Abwassermenge zu einem befriedigenden Prozentsatz zu reinigen. Die vorübergehende kurzfristige Verschlechterung der Abflussverhältnisse äussert sich in einer Reduktion des Gesamtreinigungseffektes von etwa 10–15%. In der gleichen Zeit sind aber aus dem Abwasser, dank der Anpassungsfähigkeit und des Speichervermögens des Rasens, 2,4–2,7mal höhere Schmutzstoff-

mengen eliminiert worden als bei einem Betrieb mit durchgehend kleiner Durchflussmenge (0,05, bzw. 0,02 l/s).

Diese Versuche beweisen, dass eine Tauchtropfkörperanlage durch einen stossweisen Betrieb im erwähnten Ausmass nicht Schaden leidet, und dass der biologische Rasen nach kurzer Zeit wieder seine volle Wirksamkeit entfalten kann.

Das bedeutet für die eingangs erwähnten Institutionen, dass ein zur Abwasserreinigung eines Betriebes eingebauter Tauchtropfkörper auch Abwasserspitzen, wie sie zu gewissen Tageszeiten auftreten können, überwinden wird, ohne Schaden zu nehmen.

Eine 10fache Belastung der Anlage äussert sich in einer vergrösserten Schlammabgabe, die mehr als das Zehnfache des Normalanfalls beträgt. Dies scheint irgendwie im Widerspruch zu den früheren Versuchen zu sein (4.3), die mit konstanter Wassermenge durchgeführt wurden. Man kann sich diese Mehrabschwemmung von Schlamm aber damit erklären, dass durch die Steigerung der Durchflussmenge und der damit verstärkten Strömung labil haftende Flocken von den Scheiben abgerissen und Schlammablagerungen in den Wannen des Tauchtropfkörpers ausgespült werden und zum Abfluss gelangen.

4.5 *Summarische Ergebnisse von Tauchtropfkörperanlagen, die in den letzten Jahren in der Schweiz in Betrieb gesetzt wurden*

Jede Versuchsstation wählt bei der Prüfung von Reinigungsverfahren idealisierte Bedingungen. Im vorliegenden Falle wurden innerhalb einer Versuchsserie die Wassermengen konstant gehalten. Diese Vorteile im Versuchswesen kommen in der Praxis kaum vor, weshalb die Leistungsfähigkeit eines Verfahrens im Dauerbetrieb erst abschliessend beurteilt werden kann, wenn Ergebnisse über Anlagen vorliegen, die den Härten und Unregelmässigkeiten der natürlichen «Abwasserproduktion» ausgesetzt sind.

Die in der Schweiz in Betrieb genommenen Anlagen haben noch eine recht kurze Laufzeit. Bis zum Abschluss dieser Publikation war es möglich, vier Anlagen je 2mal über 12–16 Stunden Dauer zu untersuchen. Eine zweimalige Kontrolle ergibt noch kein abgerundetes Leistungsbild, und wir sind uns bewusst, dass dazu noch mindestens 2 weitere ergänzende Aufnahmen notwendig sein werden (Tab. 13, 14 und 15).

Alle diese Anlagen arbeiten mit einer Rezirkulation des gereinigten Abwassers, indem z. T. mittels Schöpfräder ein Teil des Abwasserschlammmisches aus dem Nachklärbecken dem Zufluss des Emscherbrunnens zuge-

mischt wird. Durch diese Manipulation wird das Rohwasser mit belebtem Schlamm geimpft und unterliegt in der zweistündigen Vorklärung gewissen Adsorptionsvorgängen. Unter günstigen Umständen kann dies zu einem verbesserten Reinigungseffekt in dieser Stufe führen. Ähnliche Erscheinungen treten auch im Nachklärbecken der Belebtschlammanlagen auf.

Alle vier Anlagen sind hydraulisch unterbelastet, sofern man von der Rezirkulation absieht. Drei Anlagen sind mit je zwei Tauchtropfkörpern von 2 m Durchmesser ausgerüstet, und eine Anlage enthält 2 Körper mit 3 m Durchmesser. Die Drehzahl der 2-m-Tauchtropfkörper liegt einheitlich bei 2 Umdrehungen pro Minute, bei den 3-m-Tauchtropfkörpern bei 0,8/min. Der Wanneninhalt schwankt zwischen 1,5 und 9 m³, die Totalscheibenzahl zwischen 50 und 140, die Oberfläche von 314–2000 m². Mit diesen Anlagen werden in den Abläufen BSB₅-Werte von 10,8–107 mg/l erreicht. Bei Belastungen von 0,03–0,71 g BSB₅/m² h kann nur ein Abbau von 0,013–0,51 g BSB₅/m² h erzielt werden. Alle diese Werte sind an der unteren Grenze der Erfassbarkeit und beweisen, dass die Anlagen merklich unterbelastet sind. Nur in drei Anlagen konnte zwischen dem Zulauf und nach der zweiten Stufe eine wesentliche Reduktion des BSB₅-Wertes registriert werden. Eine dritte Anlage wies eine derart geringe BSB₅-Konzentration nach dem Emscherbrunnen auf, dass durch den Tauchtropfkörper nur noch ein minimaler zusätzlicher Reinigungseffekt resultierte. Infolge einer Betriebsstörung (Stromunterbruch) wurde die vierte Anlage am 21. 1. 64 noch in der Phase des Einfahrens kontrolliert. Die Ergebnisse sind daher für eine Beurteilung nicht schlüssig.

Wie wichtig es ist, die Anlageteile einzeln zu prüfen, zeigt die folgende Erfahrung: Es kommt vor, dass der Ablauf der zweiten Stufe einer Tauchtropfkörperanlage einen günstigeren Aspekt aufweist als der Ablauf des Nachklärbeckens. Störungen treten im Nachklärbecken recht häufig durch Kurzschlusserscheinungen auf, die durch Abwasserstöße verursacht werden. Wird nun aber nur der Ablauf des Nachklärbeckens mit demjenigen des Vorklärbeckens verglichen, so kann man jeweils nicht beurteilen, welcher Anlagenteil, der Belüftungs- oder der Nachklärteil, unbefriedigend arbeitet. Ein ungenügendes Nachklärbecken kann gute Effekte des biologischen Teils zunichte machen.

Die an den Tauchkörpern beobachtete Rasendicke schwankt zwischen etwa 0,5 und 2 mm. Im allgemeinen kann man im Tauchtropfkörper eine sehr starke Nitrifizierung der Stickstoffverbindungen im Sinne der Fliessrichtung feststellen, obschon noch lange nicht alle Kohlenstoffquellen durch die Veratmung aufgebraucht sind.

Die Gesamtanlagen (Emscherbrunnen, Tauchtropfkörper und Nachklärbecken) erreichen einen Reinigungseffekt von 70,5–96,8%, was als gute Teilreinigung bewertet werden darf, da im Abfluss der BSB₅ zum Teil nicht unter Werte von 40 mg/l absinkt.

Stromverbrauch (provisorische Angaben). Die Anlage in der Tüffenwies benötigt pro Stunde 0,157 kW. Dies ergäbe für die unterschiedlichen Belastungen die in Tab. 6 aufgeführten Strombezüge pro Kilogramm abgebauten BSB₅. Die Werte dürfen aber nicht mit Anlagen in der Praxis verglichen werden, da der Antriebsmotor der vierstufigen Versuchsanlage überdimensioniert ist.

Tabelle 6

l/s	kgBSB ₅	kW
0,02	0,016	9,8
0,05	0,034	4,6
0,2	0,10	1,57
0,5	0,135	1,16

Aus einem Diagramm der Firma Stengelin können folgende Angaben aus der Praxis entnommen werden, die für ein häusliches Abwasser von 250 mg/l BSB₅ gelten:

bei 95% Reinigung 0,4 kW pro kg abgebauten BSB₅
 bei 90% Reinigung 0,25 kW pro kg abgebauten BSB₅
 bei 80% Reinigung 0,17 kW pro kg abgebauten BSB₅

Anlagen für 120–200 Personen sind mit Motoren ausgerüstet, die 70–180 W Strom verbrauchen.

Anlagen für 800–2500 Einwohner: Motoren für 0,24–0,56 kW

Anlagen für 1200–10000 Einwohner: Motoren für 0,46–2,3 kW

Diese Zahlen werden deshalb bekanntgegeben, damit sich Projektverfasser ein Bild über die Differenzen machen können, die entstehen, wenn Angaben aus Versuchsanlagen direkt in die Praxis übertragen werden. Nur genaue Untersuchungen bei Anlagen, an denen die Antriebsmotoren dem Bedarf angepasst sind, geben für die Praxis vergleichbare Resultate.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1. Die vierstufige Tauchtropfkörperanlage in der Tüffenwies gestattete der EAWAG, gewisse Erfahrungen mit dem Betrieb einer solchen Einrichtung zu sammeln.
2. Aus der Anlage können mit Durchflussmengen von etwa 0,2–0,1 l/s Teilreinigungen (75–90%) für das städtische Abwasser erzielt werden, und mit 0,05 l/s und weniger Wasser gelang es, Vollreinigung (über 90%) des Abwassers zu erreichen.
3. Bei geringer Belastung (unter 0,5 l/s) reichert sich das gereinigte Abwasser in den höheren Stufen mit Sauerstoff an; gleichzeitig findet eine Teilnitrifikation statt.
4. Die spezifische Schlammproduktion nimmt mit zunehmender Durchflussmenge ab.
5. Die Anlage lässt sich ohne wesentliche Einbusse der Abbauleistung kurzfristig stossweise mindestens 10fach belasten und erlangt nach einigen Stunden wieder ihre volle Wirksamkeit zurück.
6. Die Kleinheit der Versuchsanlage erlaubt keinen direkten Vergleich des Stromverbrauchs pro Kilogramm abgebauten BSB₅ (überdimensionierter Antriebsmotor).
7. Die in der Schweiz gebauten Tauchtropfkörperanlagen weisen unterschiedliche Effekte auf. Alle sind aber noch stark unterbelastet und somit noch nicht mit ausgelasteten Anlagen vergleichbar.

Die gesamten Versuche in der Tüffenwies sind in enger Zusammenarbeit der technischen mit der chemischen Abteilung der EAWAG geplant und durchgeführt worden. Ich möchte Herrn Prof. A. HÖRLER für die technische Durchführung der Versuche und den Herren Dr. HEGI und H. U. BRETSCHER sowie deren Mitarbeitern für die chemischen Untersuchungen bestens danken.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] HARTMANN, H., *Untersuchungen über die biologische Reinigung von Abwasser mit Hilfe von Tauchtropfkörpern*, Diss. Techn. Hochschule, Stuttgart, 1960.
- [2] HARTMANN, H., *Die Anwendung von Tauchtropfkörpern bei der biologischen Abwasserreinigung*, Verband Schweiz. Abwasserfachleute, Verb.-Ber. Nr. 71/2 (1961).
- [3] HÖRLER, A., *Der Stand der Abwasserreinigungstechnik*, Verband Schweiz. Abwasserfachleute, Verb.-Ber. Nr. 69/8 (1960).
- [4] PÖPEL, F., *Aufbau, Abbauleistung und Bemessung von Tauchtropfkörpern*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2 (1964).
- [5] STENGELIN, J. C., *Sammlung von Untersuchungsberichten über Tauchtropfkörper*.
- [6] WUHRMANN, K., *Hauptwirkungen und Wechselwirkungen einiger Betriebsparameter im Belebtschlammssystem; Ergebnisse mehrjähriger Grossversuche*, Schweiz. Z. Hydrol. 26, Fasc. 2 (1964).

6. Versuchsergebnisse

Versuchsserie I–III: Abwassertemperatur über 13°C: 9.6.–30.9.1960
unter 13°C: 25.10.60–8.4.61.

Tabelle 7

Biochemischer Sauerstoffbedarf (Mittelwerte) mg O₂/l

Serie	Datum			Durchfluss- menge l/s	Roh- wasser	Stufe				Reinigungs- effekt in %
						1	2	3	4	
I	9.	–27.	6.1960	0,5	167	126	111	86	78	54
	7.	–14.	7.1960	0,2	146	114	96	77	63	57
	19.	–26.	7.1960	0,068	124	78	47	39	27	80
	12.	–29.	8.1960	0,085	115	66	58	52	43	61
	10.	–30.	9.1960	0,05	174	64	48	42	24	86
II	23.11.–	2.12.	1960	0,09	179	103	61	53	39	78
III	16.	2.–	3.3.1961	0,5	120	102	90	86	85	29
	1.	11.–	4.11.1960	0,2	114	94	66	53	46	60
	16.	3.–24.	3.1961	0,2	176	138	111	82	62	65
	25.10.–	27.10.	1960	0,1	113	65	40	34	32	72
	4.	4.–	8.4.1961	0,1	146	96	58	43	30	80
	9.11.–	12.11.	1960	0,05	96	37	19	20	14	85

Tabelle 8

Kaliumpermanganatverbrauch (Mittelwerte) mg KMnO₄/l

Serie	Datum			Durchfluss- menge l/s	Roh- wasser	Stufe				Reinigungs- effekt in %
						1	2	3	4	
I	9.	–27.	6.1960	0,5	365	306	273	249	231	37
	7.	–14.	7.1960	0,2	376	329	277	229	300	47
	19.	–26.	7.1960	0,068	310	229	191	154	114	64
	12.	–29.	8.1960	0,085	217	144	124	118	83	62
	10.	–14.	9.1960	0,05	393	156	119	74	65	83
II	23.11.–	2.12.	1960	0,09	513	335	220	156	118	77
III	16.	2.–	3.3.1961	0,5	364	311	307	288	279	23
	1.	11.–	4.11.1960	0,2	439	330	235	200	181	59
	16.	3.–24.	3.1961	0,2	502	396	316	270	209	58
	25.10.–	27.10.	1960	0,1	440	246	167	145	123	72
	4.	4.–	8.4.1961	0,1	495	343	261	215	181	63
	9.11.–	12.11.	1960	0,05	374	220	130	118	85	77

Tabelle 9

Sauerstoffgehalt [mg O₂/l]; Versuchsserie I-III (Mittelwerte)

Serie	Datum			Durchfluss- menge l/s	Roh- wasser	Stufe				Reinigungs- effekt in %
						1	2	3	4	
I	9.	-27.	6. 1960	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	
	7.	-14.	7. 1960	0,2	1,8	0,9	0,5	0,3	0,7	
	19.	-26.	7. 1960	0,068	3,6	2,5	1,3	1,6	3,0	
	12.	-29.	8. 1960	0,085	5,3	2,5	2,0	2,5	4,0	
	10.	-30.	9. 1960	0,05	Keine Bestimmungen					
II	23. 11.-	2. 12.	1960	0,09	5,5	1,8	1,9	2,3	4,1	
III	16.	2.-	3. 3. 1961	0,5	4,6	1,4	0,8	0,6	0,3	
	1.	11.-	4. 11. 1960	0,2	4,3	1,7	1,7	2,0	2,6	
	16.	3.-24.	3. 1961	0,2	4,4	2,7	1,8	1,9	3,6	
	25. 10.-	27. 10.	1960	0,1	5,8	2,2	2,8	3,1	4,5	
	4.	4.-	8. 4. 1961	0,1	2,8	1,2	1,0	1,3	3,1	
	9. 11.-	12. 11.	1960	0,05	4,4	1,3	3,8	3,4	4,8	

Tabelle 10

Gesamtstickstoff [mg N/l]

Serie	Datum			Durchfluss- menge l/s	Roh- wasser	Stufe				Reinigungs- effekt in %
						1	2	3	4	
II	23. 11.-	2. 12.	1960	0,09	33,98	27,37	24,29	21,46	18,46	45,6
III	2.	3.	1961	0,5	34,58	32,3	28,8	28,38	26,82	22,5
	3.	3.	1961	0,5	35,1	32,6	30,1	29,6	28,2	19,6
	23.	3.	1961	0,2	40,24	34,18	29,66	25,28	19,2	54,7
	24.	3.	1961	0,2	35,04	29,1	26,2	21,16	16,91	51,7
	7.	4.	1961	0,1	39,45	31,93	27,69	21,25	18,15	54,0
	8.	4.	1961	0,1	38,44	32,87	28,55	22,86	17,4	54,8
	20.	4.	1961	0,05	36,26	31,4	28,2	26,24	25,34	28,1
	21.	4.	1961	0,05	29,72	25,14	25,2	23,00	21,84	26,4

Tabelle 11

Gesamtphosphor [mg P/l]

Serie	Datum	Durchfluss- menge l/s	Roh- wasser	Stufe				Reinigungs- effekt in %
				1	2	3	4	
II	23. 11.– 2. 12. 1960	0,09	4,68	3,43	3,12	2,73	2,51	45,2
III	2. 3. 1961	0,5	4,86	4,06	3,76	3,20	2,76	43,2
	3. 3. 1961	0,5	4,88	4,30	3,80	3,76	3,40	30,5
	23. 3. 1961	0,2	4,60	3,90	3,00	2,90	2,50	45,6
	24. 3. 1961	0,2	3,98	3,60	3,20	3,00	2,70	32,2
	7. 4. 1961	0,1	4,92	4,06	4,00	4,24	3,94	19,8
	8. 4. 1961	0,1	5,14	4,55	4,03	2,90	2,96	42,3
	20. 4. 1961	0,05	5,02	2,94	3,00	2,24	2,30	54,2
	21. 4. 1961	0,05	4,62	3,04	2,96	2,62	2,54	45,1

Tabelle 12

Beziehung zwischen Reinigungseffekt und Schlammproduktion

	Wassermenge l/s			
	0,02	0,05	0,20	0,50
Schlammproduktion g TS/Tag	115	205	395	490
Reinigungseffekt gemessen BSB ₅ %	95,0	88,5	66,0	43,5
Rohwasserwerte BSB ₅ mg/l	238	217	210	178
Wassermenge m ³ /Tag	1,728	4,32	17,28	43,20
BSB ₅ , kg/Tag	0,411	0,940	3,63	7,7
BSB ₅ Abbau, kg/Tag	0,39	0,83	2,4	3,27
Schlammproduktion pro abgebaute kg BSB ₅	0,295	0,245	0,165	0,150
bzw. bei Annahme von n = 14 h				
Faktor n = 14/24 = 0,583, bzw. 1/n 1,715	0,505	0,42	0,283	0,258
Einwohnerbelastung aus BSB ₅				
pro Tag 24 h (50 g = 1 ET) E	8	19	72	154
14 h E	5	11	42	90

Tabelle 13

Technische Daten der 4 Tauchtropfkörperanlagen in der Schweiz

Anlagebezeichnung	A	B	C	D
Einwohner heute	300	110	120	142
Ausbau	800			150
Wassermenge l/s (TWA 14, 15, -, 16)	5,56	0,611	0,11	0,3
Anzahl Scheibenkörper	2	2	2	2
Durchmesser der Scheiben m	3	2	2	2
Anzahl Scheiben	140	90	50	70
Effektive Fläche m ²	2000	564	314	440
Umdrehung der Scheiben pro Minute	0,8	2	2	2
Inhalt der Wannen m ³	9	3,5	2	1,5
Inhalt Vorklärbecken m ³	40	6,3	3,3	3,3
Inhalt Nachklärbecken m ³	40	9,2	4	4
Inhalt Emscherbrunnen m ³	108	25		
Rezirkulation l/s	0,4	0,4		
Rasendicke an den Untersuchungstagen in mm etwa	1,5	2	0,1	2

Tabelle 14

Zusammenstellung der Ergebnisse der Untersuchung von 4 Tauchtropfkörperanlagen in der Schweiz

<i>Anlage A</i>	21. 1. 1964 *)			16. 7. 1964		
	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe
Wassermenge (q) m ³ /h	3,29	—	—	2,2	—	—
Scheibenfläche (F) m ²	—	1000	2000	—	1000	2000
F/q -Wert m ² /m ³ h	—	304	608	—	454	908
BSB ₅ mg O ₂ /l	64	64	66	55	18	21
BSB ₅ -Abnahme %	—	0	0	—	67	62
Gesamtbelastung g/m ² h	—	0,21	0,105	—	0,12	0,06
Gesamtabbau g/m ² h	—	0	0	—	0,080	0,037
* Neu-Inbetriebnahme						

<i>Anlage B</i>	17. 12. 1963			13. 5. 1964		
	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe
Wassermenge (q) m ³ /h	1,67	—	—	0,72	—	—
Scheibenfläche (F) m ²	—	282	564	—	282	564
F/q -Wert m ² /m ³ h	—	169	338	—	390	780
BSB ₅ mg O ₂ /l	110	43	43	230	188	107
BSB ₅ -Abnahme %	—	61	61	—	18,3	53,4
Gesamtbelastung g/m ² h	—	0,65	0,32	—	0,59	0,30
Gesamtabbau g/m ² h	—	0,40	0,20	—	0,11	0,16

<i>Anlage C</i>	3. 12. 1963			26. 5. 1964		
	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe
Wassermenge (q) m ³ /h	0,405	—	—	0,18	—	—
Scheibenfläche (F) m ²	—	157	314	—	157	314
F/q -Wert m ² /m ³ h	—	388	776	—	870	1740
BSB ₅ mg O ₂ /l	23	16	13	8,5!	11,3	10,8
BSB ₅ -Abnahme %	—	30	13	—	—	—
Gesamtbelastung g/m ² h	—	0,06	0,03	—	0,01	0,005
Gesamtabbau g/m ² h	—	0,018	0,013	—	—	—

<i>Anlage D</i>	6. 2. 1964			10. 6. 1964		
	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe	Zulauf	1. Stufe	2. Stufe
Wassermenge (q) m ³ /h	0,71	—	—	0,71	—	—
Scheibenfläche (F) m ²	—	220	440	—	220	440
F/q -Wert m ² /m ³ h	—	310	620	—	310	620
BSB ₅ mg O ₂ /l	118	100	53	220	51	14
BSB ₅ -Abnahme %	—	15,2	55	—	77	94
Gesamtbelastung g/m ² h	—	0,38	0,16	—	0,71	0,35
Gesamtabbau g/m ² h	—	0,058	0,089	—	0,51	0,33

Tabelle 15

Reinigungsleistung der Gesamtanlagen

Anlage	BSB ₅ des Rohwassers mg/l	BSB ₅ des Abflusses des NKB, mg/l	Reinigungseffekt in %
A 21. 1. 1964	168	71	57,7
16. 7. 1964	142	26	81,7
B 17. 12. 1963	501	56	88,8
13. 5. 1964	313	84	73,2
C 3. 12. 1963	305	10	96,8
26. 5. 1964	44	13	70,5
D 6. 2. 1964	913	61	93,3
10. 6. 1964	251	43	82,9
<i>Untersuchungen der Firma Stengelin</i>			
A 17. 9. 1963	280	19	93,2
23. 7. 1964	128	16	78,5
B 18. 9. 1963	510	48	90,5