Ökologische Untersuchungen an Modellfliessgewässern

II. Jahreszeitliche Veränderungen der Biomassebildung bei verschiedenen Abwasserbelastungen

Von E. EICHENBERGER

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz an der
Eidg. Technischen Hochschule, Zürich, Direktion: Prof. Dr. O. Jaag

1. Einleitung

Die Mehrzahl der quantitativen Studien über die Biomassebildung in Fließgewässern behandelt nicht oder wenig verunreinigte Gewässer (ODUM [8], KOBAYASI [5], EDWARDS und OWENS [2], OWENS und EDWARDS [9], EDWARDS [1]). Untersuchungen über stärker mit Abwasser belastete Abschnitte (WUHRMANN [11]) zeigen, dass die Biomassebildung durch die Zunahme des Nährstoffangebotes stark gefördert werden kann, dass aber auch andere Faktoren, wie die Veränderung der Belichtungsintensität durch die abwasserbedingte Trübung, die Verwendung des Nährstoffangebotes beeinflussen (EDWARDS [1]). Die Beobachtungen über die jahreszeitlichen Veränderungen der Besiedlung in Modellfließgewässern (EICHENBERGER [3]) weisen auf jahreszeitliche Veränderungen in der Bildungsgeschwindigkeit der Biomasse hin, die in einem früheren Bericht (EICHENBERGER und WUHRMANN [4]) kurz zusammengefasst wurden. In der vorliegenden Arbeit soll die Beziehung zwischen der Biomassebildung in den Vorflutermodellen der Versuchsstation Tüffenwies und der Jahreszeit ausführlicher untersucht werden.

2. Methodik

2.1 VERSUCHSBEDINGUNGEN

Aufbau der Anlage und experimentelle Bedingungen sind in einer früheren Arbeit zusammengefasst worden (EICHENBERGER [3]). Den vier 200 m langen Kanälen wurde auch in dieser Beobachtungsserie bei einer Wasserführung von 8 l/sec 0, 2, 4 und 10 % mechanisch vorgeklärtes städtisches Abwasser zudosiert. Die Wassertiefe betrug 15–20 cm, die mittlere Fließgeschwindigkeit lag zwischen 15 und 25 cm/sec. Die tiefsten Wassertemperaturen von 5–6 °C wurden im April, die höchsten von 16–18 °C im September und Oktober festgestellt. Die BSB₅-Werte des mechanisch vorgeklärten Abwassers vor der Verdünnung bewegten sich zwischen 90 und 150 mg O/l und zeigten keine systematischen jahreszeitlichen Schwankungen.

2.2 QUANTITATIVE UNTERSUCHUNGEN DER BIOMASSE

Als Biomasse bezeichnen wir hier das gesamte Material, das an einer gegebenen Stelle geerntet werden kann. Sie umfasst daher ausser den lebenden Organismen auch die Rückstände von zerfallenen Organismen, die sich stellenweise zu Schlammschichten anhäufen. Die Einfuhr von sedimentierendem Material in die Kanäle mit dem mechanisch vorgeklärten Abwasser und dem Grundwasser ist gering und wird nicht abgetrennt.

Probenerhebung für Biomasse: Bei abgestellter Wasserzufuhr wurde der gesamte Bewuchs von 1 m langen Rinnenabschnitten quantitativ abgeerntet (ca. $\frac{1}{2}$ m² Bewuchsoberfläche auf ca. 0,3 m² Wasseroberfläche). Ein Gittereinsatz verhinderte den Abtrieb von Material mit dem Restwasser.

Frischgewicht: Das gesamte Erntegut wurde für 5 Minuten bei etwa 1000 g (2000 RPM, bei ca. 25 cm Schleuderradius) abzentrifugiert.

Trockengewicht: Das gesamte Erntegut wurde bei 105 °C für 1–2 Tage in einem Ventilator-trockenschrank mit Lufterneuerung bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Glühverlust: Gut durchmischte Proben des Trockengutes wurden bei 650 °C 4 Stunden geglüht. Vorversuche zeigten, dass bei dieser Temperatur die völlige Verbrennung von organischen Stoffen gewährleistet und die Zersetzung von reinem Calciumcarbonat gering ist. Wiederholtes Glühen bei 650 ° und 750 °C ergab bei verschiedenen Kontrollen Gewichtskonstanz. Der *Glühverlust* wird in dieser Untersuchung der organischen Masse gleichgesetzt und erscheint zahlenmässig als *Biomasse*. Wie verschiedene Bestimmungen ergaben, beträgt der C-Gehalt der organischen Masse im Mittel etwa 50%.

Chlorophyllgehalt: Je zwei Proben von 1 g Frischgewicht des gesamten Erntegutes wurden mit 50 ml heissem Methanol extrahiert und wenn nötig zermörsert. Die Extinktion des entsprechend verdünnten Extraktes wurde bei 665 m μ in einem Leitz-Elko-II-Colorimeter bestimmt. Die auf 50 ml Methanolextrakte umgerechneten Extinktionswerte werden als relative Chlorophyllkonzentration bezeichnet. Auf das gesamte Erntegut bezogen ergeben sie den relativen Chlorophyllgehalt pro Rinnenmeter, ein relatives Mass für die gesamte Phototrophenmenge. Um ein Mass zu gewinnen für das Verhältnis von Phototrophen zu Heterotrophen, wurde der Quotient des Chlorophyllgehaltes/Rinnenmeter zum Glühverlust/Rinnenmeter gebildet und als P/H-Index (Phototroph/Heterotroph) bezeichnet.

Da wir vorderhand nichts wissen über die photosynthetische Aktivität der verschiedenen Phototrophen in den vorliegenden Biotopen komplexer Struktur, und der

Tabelle 1

Die P/H-Indizes einiger Rinnenorganismen in relativ reiner Ausbildung

Art	Extinktion 665 m μ g FG/50 ml Methanol	P/H-Index
<i>Sphaerotilus natans</i>	0,02	0,6
<i>Amblystegium riparium</i>	2,42	30,6
<i>Cladophora glomerata</i>	3,20	49,4
<i>Tribonema viride</i>	3,54	78,4
<i>Ulothrix zonata</i>	1,92	63,9
<i>Diatoma vulgare</i>	2,41	55,3
<i>Melosira arenaria</i>	1,06	23,4

Chlorophyllgehalt daher nicht quantitativ stoffwechselfysiologisch interpretiert werden kann, haben wir bewusst darauf verzichtet, die Daten auf absoluten Chlorophyllgehalt umzurechnen. Der P/H-Index beschreibt daher – mit gewissen Einschränkungen – das relative Verhältnis von Phototrophen zu Heterotrophen. P/H-Indizes phototropher Rinnenorganismen sind verschieden und einige Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Schätzungen der Bewuchsdichte einzelner Organismen: Sie erfolgte nach der in EICHENBERGER [3] festgelegten vierstufigen Dichteskala.

3. Die stehende Biomasse

Eines der auffälligsten Merkmale im Aufbau der Rinnenbiozönosen ist die ausgeprägte Zonierung über kurze Fließstrecken. Um einen Einblick in die Verteilung der stehenden Biomasse zu geben, soll der Zustand der Rinnen Ende Januar 1965 beschrieben werden (Abbildung 1).

Grundwasserrinne: Moose *Amblystegium riparium* bilden im Oberlauf den auffallendsten Bestandteil des Bewuchses. Sie sind in den ersten 60 m von einer *Batrachospermum*-Schicht überlagert, an die sich eine kurze Zone von Fadenalgen (*Rhizoclonium hieroglyphicum*) anschliesst. Dann erfolgt rinnenabwärts über wenige Meter ein drastischer Wechsel des Aspektes, der durch eine Massenentwicklung von *Melosira arenaria* verursacht wird. Die abgestorbenen Diatomeen bleiben zum Teil am Grunde liegen und bilden eine dichte Schlammschicht, unter der die Moose im Unterlauf zum grössten Teil abgestorben sind. In Abbildung 1 ist auch die Biomasse des Bewuchses für den Januar 1963 vor der Invasion durch *Melosira arenaria* wiedergegeben. Sie zeigt, wie die Moosdichte im unteren Rinnenteil rasch abnimmt.

Rinne 2% Abwasser: Besonders in den ersten Rinnenmetern verändert sich der Aspekt der Biozönosen über sehr kurze Strecken. In den ersten 2 bis 3 m sind Moose mit recht dichtem *Sphaerotilus*-aufwuchs gut entwickelt, nach 5 m Fließdistanz lockert sich der Moosbewuchs auf und die Sohle wird von dichten *Vaucheria*-Polstern überzogen. In den Lücken zwischen den *Vaucherialagern* und an der Rinnenwand wächst *Cladophora*, die bei etwa 80 m gegen das Ende der *Vaucheria*-zone ihre grösste Dichte erreicht. Weiter stromabwärts wird die Biozönose von *Amblystegium riparium* beherrscht. Diatomeen fallen nur im kurzen Abschnitt zwischen 50 und 80 m stark auf.

Rinne 4% Abwasser: Der Aufbau der Biozönosen stimmt in grossen Zügen mit demjenigen von Rinne 2% AW überein, zeigt aber im Einzelnen charakteristische Unterschiede. *Vaucheria* ist im Oberlauf nur auf eine kurze Strecke hin bestandesbildend. Sie dringt aber auch in den allerobersten Rinnenabschnitt vor, so dass hier trotz der stärkeren Entwicklung von *Sphaerotilus* der Anteil der Phototrophen grösser ist als in 2% AW (Abbildung 2). *Cladophora* wächst in dieser Rinne besser. Auffallend sind die *Spirogyra*-watten, die in 2% AW erst später auftreten. *Amblystegium* ist weniger gut ausgebildet und fehlt im Mittellauf über eine weite Strecke. Dadurch ergibt sich für den mittleren und unteren Teil der Rinne 4% ein geringerer Chlorophyllgehalt als in 2% AW.

Rinne 10% Abwasser: Die ersten 60 m sind von einem mehr oder weniger reinen *Sphaerotilus*-bewuchs überzogen. Darauf folgt eine Zone mit sehr starker Schlamman-

Abbildung 1

Aufbau der Biozönosen Ende Januar 1965. Ba: *Batrachospermum moniliiforme*, Cla: *Cladophora glomerata*, Dia: Diatomeen, Me. ar: *Melosira arenaria*, Mo: *Amblystegium riparium*, Rhi: *Rhizoclonium hieroglyphicum*, Sphae: *Sphaerotilus natans*, Spi: *Spirogyra* spec., Vau: *Vaucheria* spec.

Abbildung 2

Dichte der Phototrophen in der stehenden Biomasse (Januar 1965).

häufung. Die Fixierung des Schlammes an Ort und Stelle ist eng an die Tätigkeit von *Chironomus thummi* gebunden. Über dem Schlamm liegt ein lockerer Vaucheriabewuchs mit vereinzelt *Cladophora*-Fäden. Die starke Schlammanhäufung im mittleren Unterlauf drückt sich deutlich in der sehr hohen Biomasse aus und bedingt hier trotz deutlichem grünem Aufwuchs geringe P/H-Indizes.

Auch die Fauna weist eine deutliche Zonierung auf (Tabelle 2). Die 4stufige Skala, die ähnlich wie die Algenskala gehandhabt wurde, soll trotz ihrer Subjektivität ein Bild über die relative Häufigkeit der wichtigsten Organismen geben. Das Vorkommen eines Tieres hängt nicht nur vom Wasserchemismus ab, sondern von vielen zusätzlichen, hier nicht näher untersuchten Faktoren wie Nahrungsangebot, Prädation, verfügbarer Wohnraum (MACAN [6]), so dass es wenig sinnvoll erscheint, vorderhand aus den Daten allgemeine Verteilungsregeln abzuleiten, die über die Feststellungen der Bevorzugung einzelner Rinnenbiotope hinausgehen.

Der grössere Teil der Chironomiden hat bis zum Spätherbst seine Entwicklung abgeschlossen, so dass ihre Besiedlungsdichte im Januar gering ist. Die Orthocladinen sind am häufigsten in den Rinnen 2 und 4% AW, *Chironomus* im Mittel- und Unterlauf von Rinne 10% AW. Besonders auffallend ist *Asellus*, der in 2 und 4% AW den Oberlauf der Kanäle bevorzugt und in 10% den Unterlauf. Von den beiden Egeln bevorzugt *Helobdella stagnalis* 2% AW und *Herpobdella octoculata* findet sich nur im Mittellauf von 4% AW. Unter den Trikladen zeigt *Dendrocoelum lacteum* die weiteste Verbreitung, *Planaria gonocephala* besiedelt vorwiegend den Moosbewuchs im unteren Teil der Rinnen 2 und 4% AW, mit grösster Dichte in 2% AW, und *Planaria lugubris* zieht die Mittelzone von Rinne 4% AW vor. Die Ciliaten finden sich vor allem in 4 und 10% AW, wobei sich im Rinnenlängsverlauf ausgeprägte Veränderungen in der Zusammensetzung der Populationen ergeben.

Tabelle 2

Verteilung einiger Tiere in den Rinnen

Ende Januar 1965. Wassertemperatur ca. 12 °C.

Abwasserkonzentration %	0			2			4			10		
Fließdistanz m	5	100	200	5	100	200	5	100	200	5	100	200
Ciliaten (ohne Peritriche)	+	+	+	+	—	+	2	+	+	3	3-4	3
<i>Carchesium, Vorticella</i>	—	—	—	—	—	—	2	2-3	2-3	1	1-2	2-3
<i>Dendrocoelum lacteum</i>	—	+	—	2	1-2	1	+	2	1	—	—	—
<i>Planaria gonocephala</i>	—	+	—	—	2-3	2	—	1-2	2	—	—	—
<i>Planaria lugubris</i>	—	+	+	+	+	—	+	2-3	+	—	—	—
Nematoden	—	—	—	—	+	—	—	—	+	+	2	1-2
Rotatorien	—	—	—	—	+	—	+	—	+	+	—	2
<i>Nais</i> sp.	—	—	—	+	—	1	—	+	—	—	3	3
<i>Stylaria</i> sp.	—	—	—	+	—	2	1	+	+	—	—	—
<i>Chaetogaster</i> sp.	—	—	—	+	+	1-2	1	—	—	—	3	2-3
rote Oligochaeten	+	+	—	2	—	—	2	—	—	1	1-2	—
<i>Helobdella stagnalis</i>	—	—	—	—	2	+	—	+	+	—	—	—
<i>Herpobdella octoculata</i>	—	—	—	—	—	—	—	1-2	—	—	—	—
<i>Asellus aquaticus</i>	1-2	1	1	3-4	3	1-2	3-4	3	1-2	+	1-2	2
Copepoden	—	+	+	+	—	—	+	1-2	—	—	—	—
Orthocladinen	—	+	+	—	+	2	—	1	2	—	—	1-2
<i>Chironomus thummi</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	2	1-2
Wassermilben	—	+	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—

4. Aufbaugeschwindigkeit der Biozönosen

4.1 REPRODUZIERBARKEIT DER BIOMASSEBESTIMMUNGEN

Trotz der recht auffälligen Veränderungen der stehenden Biomasse im Längsprofil ist die Bewuchsbildungsgeschwindigkeit in einer einigermassen homogenen Biozönose über Strecken von einigen Metern Länge ziemlich konstant und resultiert in einer recht guten Reproduzierbarkeit von gleichzeitig bestimmten Biomassewerten (Tabelle 3).

4.2 AUSBILDUNG DER ALGENVEGETATION IM OBERLAUF BEI 2 UND 4% ABWASSERBELASTUNG

4.21 Besiedlung mit *Ulothrichaceen*

1. *Versuch:* (Abbildung 3) Am 1. Mai 1963 wurde die mit *Ulothrichaceen* besiedelte Rinne mit 4% AW von 22 m bis 33 m ausgeräumt. Die Neubesiedlung erfolgte vorerst durch *Hormidium*, das in der ersten Hälfte Juni weitgehend durch *Ulothrix* abgelöst wurde. Ende Juni waren die beiden *Ulothrichaceen* im Absterben und Ablösen begriffen. *Cladophora*, die bisher nur vereinzelt im Wandbewuchs angetroffen wurde, breitete sich anschliessend rasch aus. Die mittlere Zuwachsgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 33 Tagen betrug für die *Ulothrichaceen* 3,3 g Glühverlust je Tag m² und lag damit etwas tiefer als die zu Beginn der Vegetationszeit gemessenen Werte (Tabelle 3). Der höchste Zuwachs vom 10. bis 20. Besiedlungstag lag bei 6,5 g Glühverlust je Tag m².

2. *Versuch:* (Abbildung 4) Im Oberlauf der Rinne mit 2% AW wurde im Februar 1965 ein etwa 20 m langer vorwiegend mit *Vaucheria* bewachsener Abschnitt ausgeräumt. Der freigelegte Raum wurde rasch von *Hormidium* besiedelt, das vorher in diesem Abschnitt nicht angetroffen worden war. Der grösste Biomassenzuwachs vom 18. bis 21. Besiedlungstag betrug etwa 10 g Glühverlust je Tag m². Nach Erreichen einer stehenden Biomasse von etwa 125 g Glühverlust je m² zerfiel der Bewuchs schnell. Die Biomasse blieb hernach für ca. 20 Tage unter 40 g Glühverlust je m².

Tabelle 3

Vergleich der Biomassezuwachsraten auf längere Wiederbesiedlungsstrecken

Dominierende Algen-	Ulothrichaceen					Cladophora	
Zeit	18.2.– 15.3.65	21.3.–26.4.63	1.5.–3.6.63			18.6.– 27.7.63	Juni– Juli 1963
% Abwasser	2	4	4	4	2	2	2
Sohle mit Schotter- auflage	+	+	—	—	—	—	—
Besiedlungsdauer (Tage)	25	35	35	33	33	37	37–51
Anzahl Proben.	1	3	1	2	3	2	6
Trockengewicht g/Rinnenmeter.	—	122±22	116	91±2	91±11	159±25	151±16
Glühverlust g/m ²	142,4	147	140	109	109	191	181
Mittlerer Zuwachs g/Tag m ²	5,7	4,2	4,0	3,3	3,3	5,2	—

Besiedelte Fläche pro Rinnenmeter: 0,5 m²

Abbildung 3

Verlauf der Wiederbesiedlung im Oberlauf der Rinne 4% Abwasser (Mai bis Juli 1963).

(ca. $\frac{1}{3}$ der Maximaldichte). Ende April setzte dann die volle Entwicklung von *Ulothrix* ein. Der Ablauf der Besiedlung zeigt damit ein Bild, das den früheren Beobachtungen sehr gleicht, mit dem Unterschied allerdings, dass der Spontanzerfall des Bewuchses viel ausgeprägter ist. Die maximale Biomasse liegt in einem Bereich, der mit den bisher für Ulothrichaceenbesiedlung bestimmten Werten (110–130 g Glühverlust je m^2) übereinstimmt.

Die Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Entwicklung einer Ulothrichaceenbesiedlung kurzfristig abläuft und kein längerer Beharrungszustand der Biomasse beibehalten wird. Massenentwicklungen von Ulothrichaceen in nicht verunreinigtem Wasser (Grundwasserrinne) laufen mit noch grösserer Geschwindigkeit ab, wobei die nachfolgende Abtragung der Vegetation nur wenige Tage beansprucht. Analoge Beobachtungen wurden in gleichem Milieu auch mit *Tribonema viride* und *Diatoma vulgare* gemacht.

Abbildung 4

Verlauf der Wiederbesiedlung im Oberlauf der Rinnen 2 und 10% Abwasser und im Unterlauf der Rinne 2% Abwasser (Februar bis Mai 1965).

In der ersten Phase der beiden erwähnten Versuche treten Heterotrophe als Erstbesiedler auf, was sich in einem anfänglich geringeren P/H-Index ausdrückt. Diese Erscheinung wird auch unmittelbar unterhalb eines schon besiedelten Abschnittes festgestellt, so dass sie nicht allein auf eine zunehmende Elimination von organischen Stoffen zurückzuführen ist. Vielmehr scheint sie dadurch bedingt zu sein, dass die Heterotrophen neuen Besiedlungsraum rascher kolonisieren, was an Objektträgern, die über einem bestehenden Biozönose suspendiert werden, gut beobachtet werden kann.

4.22 Besiedlung mit *Cladophora glomerata*

Für die Besiedlung mit *Cladophora* fehlen vorderhand regelmässige quantitative Messungen. Die Bewuchsdichte von *Cladophora* ist im Gegensatz zu derjenigen der Ulothrichaceen weniger Fluktuationen unterworfen. Neubildung und Verlust durch Abtragung stehen für einige Zeit in einem gewissen Gleichgewicht. Driftmessungen im Oktober 1963 ergaben für eine *Cladophora*-reiche Strecke (erste 100 m der Rinne 4% AW) einen Abtrieb von 3 g Glühverlust je Tag m² (Tabelle 4). Dieser Biomasseverlust entspricht etwa 70% der mittleren monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse des untersuchten Abschnittes. In 2% AW, wo eine grössere Fläche von *Vaucheria* besetzt ist als in 4% und *Cladophora* weniger dicht wächst, ist der Antrieb bedeutend geringer.

Auf Grund des Vergleiches von monatlicher Wiederbesiedlungsbiomasse auf neu-besiedelten Flächen und des gemessenen Abtriebes ergibt sich eine mittlere Zunahme

Tabelle 4

Die Bewuchsdrift Ende Oktober 1963

Abwasser- belastung %	Drift		Wiederbesied- lungsbiomasse	Abtrieb in % der Wieder- besiedlungs- biomasse
	Frischgewicht je Tag m	Glühverlust je Tag m ²	Glühverlust je Tag m ²	
0	0,1	< 0,1	0,48	sehr klein
2	7,1	0,6	2,34	25,6
4	36,3	3,0	4,30	70,0
10	79,0	5,9	7,84 (6,0)*	75,3 (98,5)*

Driftmessungen: Abtreibender Bewuchs während 50 Minuten mit Gittern in 110 m Fließdistanz aufgefangen.

Wiederbesiedlungsbiomasse: Mittel der Messungen der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse in 5 und 100 m vom 15. 9 und 1. 11. 1963.

* Wiederbesiedlungsbiomasse von 5 m allein berücksichtigt.

der stehenden Biomasse für die ersten 100 m der Fließstrecke von 1,3 g Glühverlust je Tag m² oder etwa 40 g Glühverlust je Monat m². Die Erfahrung zeigt, dass bei einer Algenbiomasse von etwa 120–160 g Glühverlust je m² die Rinnen überlaufen. Um dieses Überlaufen zu verhindern, wurden die Rinnen zur *Cladophora*-zeit monatlich etwa 1 bis 2 mal gereinigt, wobei schätzungsweise etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der Biomasse entfernt wurde, das heisst in der Grössenordnung von 30 bis 50 g Glühverlust je m². Folglich ergeben Abtrieb und geschätzter Zuwachs der Biomasse in ungestörten Abschnitten für eine *Cladophora*-biozönose Zuwachsraten von etwa 4–5 g Glühverlust je Tag m², was im wesentlichen der Grössenordnung der mittleren Zuwachsrate über einen Monat bei Neukolonisation entspricht. Diese Werte legen nahe, dass die Biomassebildung bei *Cladophora*-bewuchs in ungestörten Abschnitten in der gleichen Grössenordnung liegen wie die mittlere Kolonisationsgeschwindigkeit, die sich auf dem Grund der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse errechnen lässt.

4.3 AUSBILDUNG EINES SPHAEROTILUSBEWUCHSES IN 10% ABWASSER

In Abbildung 4 ist die Entwicklung der Biomasse bei einem praktisch reinen *Sphaerotilus*-bewuchs wiedergegeben. Der maximale Biomassezuwachs liegt bei 7 g Glühverlust je Tag m². Ähnlich wie bei den Ulothrichaceen nimmt hier die Biomasse nach einem Maximum durch kontinuierliche Ablösung von Bewuchsteilen wieder ab. Im Gegensatz zum Algenbewuchs wird *Sphaerotilus* besonders im Frühjahr an seiner Basis durch Blaualgen und Diatomeen unterwachsen, so dass sich gelegentlich nicht nur individuelle Zotten, sondern ganze Bewuchsstücke von der Basis loslösen. Ist einmal die Bewuchsbasis von ihrer Unterlage abgehoben, so kann es durch die Strömung zur plötzlichen Abschälung grosser Flächen kommen.

Die in der Darstellung (Abbildung 4) erreichte Bewuchsdichte für reinen *Sphaerotilus* stellt für die Rinnen ein Maximum dar. Normalerweise erfolgt schon nach 35–40 Tagen Besiedlung Ablösung, so dass maximale stehende Biomassen von reinem *Sphaerotilus* 200 g Glühverlust je m² kaum überschreiten.

Wenn eine *Sphaerotilus*-biozönose etabliert ist und Basisablösungen selten vorkommen, wie im Herbst und Frühwinter, so bleibt das Wasserniveau in den Rinnen über

mehrere Wochen auffallend konstant, was darauf hindeutet, dass Neubildung und Abtrieb einander ungefähr die Waage halten. Aus den Driftmessungen im Oktober 1963 (Tabelle 4) scheint hervorzugehen, dass die Abtriebswerte in einer ähnlichen Grössenordnung liegen wie die mittlere Kolonisationsgeschwindigkeit, und dass damit die Biomasseproduktion nach Erreichen der Biotosättigung nicht drastisch abfällt.

4.4 AUSBILDUNG DES BEWUCHSES IM UNTERLAUF VON RINNE 2% ABWASSER

Die für das Ende der Rinne 2% AW festgestellten Zuwachsraten (Abbildung 4) stammen aus einem Abschnitt, der normalerweise von Moosen bestanden ist, die zur *Cladophora*-zeit von dieser Alge überwachsen sind. Nach völliger Entfernung der Vegetation Mitte Februar 1965 erfolgte ein lockerer Aufwuchs von *Ulothrix* und *Hormidium* mit hoher Diatomeendichte (vor allem *Diatoma vulgare* mit wenig *Synedra ulna*) und nur langsamem Anstieg der Biomasse. Da die Beobachtungen nach 93 Tagen nicht mehr weitergeführt werden konnten, war es nicht möglich, die Ausbildung der Moos-, *Cladophora*- und *Vaucheria*-besiedlung des Herbstes quantitativ zu verfolgen.

Der Versuch im Oberlauf der Rinne 2% AW im Februar 1965 war ursprünglich angesetzt worden, um die Besiedlungsgeschwindigkeit von *Vaucheria* zu ermitteln und war dementsprechend in einen Rinnenabschnitt gelegt worden, wo diese Alge in dichter Entwicklung stand. Wider Erwarten siedelten sich die *Ulothrichaceen* an. In den ober- und unterliegenden ungestörten Rinnenteilen, wo *Vaucheria* stehen blieb, breitete sich *Hormidium* erst etwa einen Monat später aus. In ähnlicher Weise trat im Juni 1963 *Cladophora* in ausgeräumten Abschnitten der *Ulothrix*-zone 2–3 Wochen früher auf als im ungestörten Rinnenabschnitt. Während das plötzliche Verschwinden einer Art wie *Hormidium* und *Ulothrix* und auch das langsame Zurückgehen von *Cladophora* nicht auf Konkurrenz zurückzuführen ist, scheint aber der Wettbewerb eine Rolle zu spielen bei der *Neubesiedlung* eines Biotopes unter Bedingungen, die offenbar nur suboptimal sind. *Es ist damit zu erwarten, dass unter gleichen klimatischen und chemischen Bedingungen Biozönosen verschieden zusammengesetzt sind, je nachdem wie häufig mechanische Störungen die Bewuchsdichte herabsetzen.*

5. Die monatliche Wiederbesiedlungsbiomasse

Wie aus dem vorhergehenden Kapitel hervorgeht, stösst die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Bildungsgeschwindigkeit der Biomasse auf grosse technische Schwierigkeiten. Sie erfordert einerseits die laufende Bestimmung der stehenden Biomasse, andererseits eine Messung der Drift. Die regelmässige Messung dieser Grössen für verschiedene Abschnitte der Rinnen liess sich leider nicht durchführen.

Von besonderem Interesse erschien die Frage, wie dicht ein neugeschaffenes Biotop bei verschiedenen Abwasserbelastungen im Laufe eines Monats kolonisiert wird. Dieser Zeitabschnitt von einem Monat umfasst sogar bei produktiven Biotopen im wesentlichen nur die Besiedlungsphase und ist durch Abtrieb wenig gestört, das heisst Verluste durch Abschwemmung dürfen noch vernachlässigt werden (Abbildung 3 und 4).

Für den Versuch wurden daher in regelmässigen Abständen an Rinnenanfang, -mitte und -ende 2 m lange Abschnitte von Bewuchs befreit und die im Laufe eines Monats auf einem 1 m langen Rinnenstück gebildete Biomasse bestimmt. Gemessen

wird damit die Kolonisationsgeschwindigkeit in einem anfänglich bewuchsfreien Biotop. Die geerntete Biomasse wird als monatliche Wiederbesiedlungsbiomasse, die Bildungsgeschwindigkeit des Bewuchses als mittlere Kolonisationsgeschwindigkeit bezeichnet.

Die Neubesiedlung der ausgeräumten Abschnitte erfolgt unter optimalen Kolonisationsbedingungen. Von den oberliegenden Biozönosen erfolgt eine dauernde Beimpfung und bei einer Besiedlung mit rasch wachsenden Fadenalgen dringen diese strömungsabwärts in die Teststrecken ein.

5.1 JAHRESZEITLICHE VERÄNDERUNGEN DER MONATLICHEN WIEDERBESIEDLUNGSBIOMASSE AM RINNENANFANG

Die Besiedlung der Teststrecken im Laufe eines Monates stimmt arten- und dichtenmässig in Bezug auf die schnellwachsenden Arten mit den benachbarten ungestörten Abschnitten überein. Drastische Unterschiede in der Besiedlung, wie sie bei der Ausräumung langer Rinnenstücke in den vorher erwähnten Versuchen beobachtet werden, lassen sich bei diesen kurzen Teststrecken nicht beobachten. Hingegen fehlen Moose, und die langsam wachsende *Vaucheria* ist weniger mächtig ausgebildet. Die Biozönosen der neu kolonisierten Abschnitte werden daher weitgehend von *Sphaerotilus*, Fadenalgen und Diatomeen beherrscht, denen sich stellenweise im Winterhalbjahr *Vaucheria* in mässiger Entwicklung beigesellt.

Die Ausbildung der pflanzlichen Biozönosen in den verschiedenen Rinnen lässt sich folgendermassen charakterisieren (Abbildung 5):

0% Abwasser: Eine nennenswerte Besiedlung freier Flächen findet zweimal im Jahr statt, im Frühsommer durch Diatomeen (vor allem *Diatoma vulgare* und *Meridion circulare*) und Ulothrichaceen und im Herbst durch *Batrachospermum*. Das Maximum für die Ulothrichaceen erfolgt erst nach dem Zerfall von *Batrachospermum* und ist daher 1 bis 2 Monate später als in 2 und 4% AW.

2% Abwasser: Die monatliche Wiederbesiedlungsbiomasse zeigt deutlich 2 Maxima. Ein erstes, höheres, erfolgt im Frühjahr zur Zeit rascher und dichter Entwicklung der Ulothrichaceen *Hormidium* und *Ulothrix* (Wassertemperaturen während des Maximums unter 9 °C). Vor ihrem Verschwinden bleichen die Ulothrichaceen aus, ohne sich aber sogleich abzulösen, und die chlorophyllärmeren Diatomeen breiten sich stärker aus, so dass das Ende der Ulothrichaceenzeit durch einen Abfall des P/H-Indexes gekennzeichnet ist. Ein zweites Maximum der Kolonisationsgeschwindigkeit erfolgt im Herbst zur Zeit des kräftigsten *Cladophorawachstums* (Wassertemperaturen während des Maximums über 15 °C). Zu dieser Zeit wächst *Vaucheria* in Zotten als Aufwuchs auf den flutenden *Cladophora*büscheln und besiedeln als kleine Polster die Rinnensohle. Die Anhäufung von zerfallenden Organismen in den *Vaucherialagern* und das Wiederauftreten von *Sphaerotilus* führt im Spätherbst zu einem scharfen Abfallen des P/H-Indexes. Im Januar tritt in den ersten Rinnenmetern *Cladophora* zurück. *Vaucheria*, die in den ungestörten Abschnitten grosse Polster bildet, dringt nicht in grosser Dichte in die Teststrecken ein. Dagegen erreicht dann *Sphaerotilus* seine grösste Dichte, ohne aber den Biomasseverlust durch den Phototrophenrückgang aufzuwiegen.

4% Abwasser: Das Verteilungsbild ist ähnlich wie in Rinne 2% AW, wobei aber die Wiederbesiedlungsbiomasse im Frühjahr und Sommer bei 4% AW durchwegs

Abbildung 5

Jahreszeitliche Veränderungen der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse. *Batra*: *Batrachospermum moniliforme*, *Clado*: *Cladophora glomerata*, *Dia*: Diatomeen, *Sphae*: *Sphaerotilus natans*, *Stigeo*: *Stigeoclonium tenue*, *Tribo*: *Tribonema viride*, *Ulo/Ho*: *Ulothrix zonata*, *Hormidium rivulare*, *Vau*: *Vaucheria spec.*

höher ist. Die Ulothrichaceen halten sich länger als in 2% AW, *Sphaerotilus* ist vom Oktober bis Mai ein wichtiger Bestandteil der Biozönose. Das Herbstmaximum ist nicht so ausgeprägt und erfolgt etwas früher als in 2% AW. Die im Winter gesteigerte Entwicklung von *Sphaerotilus* ist auch in 4% AW nicht stark genug, um den winterlichen Rückgang der Phototrophen gewichtsmässig zu kompensieren.

10% Abwasser: Die Wiederbesiedlungsbiomasse wird hier im wesentlichen von *Sphaerotilus* bestimmt und weist ein ausgesprochenes Wintermaximum auf. Die Entwicklung der Phototrophen drückt sich deutlich im Gang der Biomassekurve und des P/H-Indexes aus.

5.2 VERÄNDERUNGEN DER MONATLICHEN WIEDERBESIEDLUNGSBIOMASSE IM LÄNGSVERLAUF DER RINNEN

Die Entwicklung der Biomasse an den Teststellen von Rinnenmitte und -ende hängt von den Vorgängen in den ungestörten Rinnenabschnitten ab, die über 95% der gesamten Rinnenbiomasse ausmachen. Da weder die stehende Biomasse noch die Zuwachsrate in den ungestörten Abschnitten direkt bestimmt werden konnte, besteht keine Möglichkeit die Gesamtbiomassebildung in den Rinnen mit Sicherheit abzuleiten. Wir dürfen aber annehmen, dass der Zuwachs in den ungestörten Biotopen kaum stark von demjenigen der Wiederbesiedlungsstrecken abweicht, sofern die Biozönosen einen ähnlichen Aufbau aufweisen (Seite 41 und 42). Unterschiede in der Besiedlung bestehen vor allem dort, wo Moose dominieren und die Teststrecken nur spärlich besiedelt werden. Da die Moose aber langsam wachsen, ist zu erwarten, dass die Zuwachsraten der Wiederbesiedlungsstrecken die Biomassebildung auch für moosreiche Abschnitte in grossen Zügen charakterisieren.

Bei 2 und 4% Abwasserbelastung nimmt die monatliche Wiederbesiedlungsbiomasse in der Regel rinnenabwärts ab (Abbildung 6). Zu gewissen Zeiten, besonders dann, wenn eine einzelne Art im gesamten Rinnenverlauf vorherrscht, scheint die Abnahme der Kolonisationsgeschwindigkeit einer exponentiellen Funktion zu folgen (EICHENBERGER und WUHRMANN [4]). Meistens aber verändert sich die artliche Zusammensetzung der Biozönosen im Längsverlauf der Rinnen stark. Die Abnahme der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse in der Fliessrichtung ist dann unregelmässig.

Bei einer Zugabe von 10% AW wird nur zur Zeit, da *Sphaerotilus* schlecht gedeiht, eine Verminderung des Bewuchses im Längsprofil festgestellt. Zu andern Zeiten, besonders im Winterhalbjahr, erfolgt eine Zunahme der Biomasse. Sie setzt sich vom Mittellauf an aus 2 Anteilen zusammen, dem Schlamm und dem lebenden Bewuchs. Als Unterlage der Biozönosen bildet sich aus autochthonen und zum Teil auch aus durch Abtrieb zugeführten Heterotrophen eine Schlammschicht, die besonders dann dick wird, wenn ihr die *Chironomus*-Larven durch ihren Röhrenbau einen erhöhten Zusammenhalt geben. Als Bestandteil der lebenden Biomasse werden die Phototrophen rinnenabwärts dichter; das Ausmass ihrer Zunahme hängt von der Selbstreinigung und von klimatischen Bedingungen ab. Durch dieselben Faktoren, aber in verschiedener Stärke, wird der Rückgang der Heterotrophen beeinflusst. Je nachdem wie sich diese beiden gegenläufigen Veränderungen zueinander verhalten, nimmt die Kolonisationsgeschwindigkeit im Längsverlauf des Kanales zu oder ab.

Abbildung 6

Veränderungen der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomassen im Längsverlauf der Rinnen.

In der Grundwasserrinne ist die monatliche Wiederbesiedlungsgeschwindigkeit meist so klein, dass sie sich nicht messen lässt. Zur Zeit des Zerfalls von Massenentwicklung kann die Biomassebildung rinnenabwärts zunehmen (zum Beispiel durch einen Anstieg der Dichte von *Diatoma vulgare*, was möglicherweise auf einem Freiwerden von wachstumsfördernden Stoffen, das heisst auf sekundären Verunreinigungsprozessen, beruht).

5.3 ABHÄNGIGKEIT DER MONATLICHEN WIEDERBESIEDLUNGSBIOMASSE VON DER ABWASSERBELASTUNG. (Abbildung 7)

Die ersten Abschnitte der Kanäle stellen eine durch Selbstreinigung noch unbeeinflusste Abwasserverdünnungsreihe dar. Die optimale Abwasserkonzentration für das Phototrophenwachstum liegt bei 2 bis 4% AW. Die Heterotrophen erreichen ihre grösste Dichte in 10% AW. Als Folge der verschiedenen und im Laufe ihres Vorkommens auch wechselnden Reaktion der Bestandesbildner auf die herrschenden ökologischen Bedingungen (EICHENBERGER [3]), ergibt sich eine jahreszeitlich veränderliche Abhängigkeit der Kolonisationsgeschwindigkeit von der Abwasserbelastung.

Generell lässt sich feststellen, dass die Zugabe einer bestimmten Abwassermenge zu reinem Grundwasser zu einer bedeutend grösseren Steigerung der Biomassebildung führt, als wenn dieselbe Abwassermenge zu einem schon verunreinigten Wasser zudosiert wird.

Abbildung 7

Abhängigkeit der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomassen in 5 m Fließsdistanz von der Abwasserbelastung.

Im Herbst, wenn *Sphaerotilus* besonders gut wächst und die dominierende Alge *Cladophora* im frischen Abwasser der ersten Rinnenmeter nur suboptimale Bedingungen vorfindet, ergibt sich ein deutliches Maximum der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse in 10% AW. Im Frühjahr hingegen dringen die Ulothrichaceen weiter ins frische Abwasser vor als *Cladophora*, so dass trotz guter *Sphaerotilus*-ausbildung das Maximum der Kolonisationsgeschwindigkeit in 4% AW liegt. Wenn im

Frühsommer *Sphaerotilus* weniger dicht wächst, vermag das in 10% AW vermehrte Phototrophenwachstum zum Teil den Biomasseverlust durch den Rückgang der Heterotrophen zu kompensieren.

6. Diskussion

Stehende Biomasse und Biomassebildungsgeschwindigkeit: Für Makrophytenbestände englischer Flüsse, die nicht durch Abwässer verunreinigt sind, geben OWENS und EDWARDS [9] stehende Biomassen (standing crops) bis zu 180 g organischer C/m² an. Die mit der Erntemethode bestimmte Nettoproduktion für die Hauptzeit der Vegetationsperiode betrug 1,4 bis 2,3 g organischen C/Tag m². In den kleinen Vorflutermodellen der Versuchsstation Tüffenwies, die mit Mikrophyten besiedelt waren, erhielt WUHRMANN [11] im Winter bei Erreichung der Sättigung des Biotopes nach 33 Besiedlungstagen stehende Biomassen von 91 g Glühverlust je m² in Flusswasser (aus der Limmat) und 195 g Glühverlust je m² für stark abwasserbelastete Abschnitte.

In den Vorflutermodellen von maximal 20 cm Wassertiefe erreichen Moosbiozönosen in reinem Grundwasser (nach 2 Jahren ungestörten Wachstums) eine *stehende Biomasse* von 120 g Glühverlust m², Fadenalgenbiozönosen etwa 110 bis 180 g Glühverlust je m² und *Sphaerotilus*bewuchs (ohne Schlamm) etwa 200 g Glühverlust je m².

Der *Biomassezuwachs* von Fadenalgen in heterotrophenarmen oberen Abschnitten der Rinnen 2 und 4% Abwasser liegt mit Mittelwerten von 3–5 g Glühverlust je Tag m² und Höchstwerten von ca. 10 g Glühverlust je Tag m² in Grössenordnungen, die Makrophytenbeständen entsprechen (OWENS und EDWARDS [9]) und zum Teil sogar grösser sind. Wenn auch ein Teil dieser Biomasse heterotroph ist, so erreichen die Werte etwa die Grössenordnung von 4,6 g C/Tag m². Dies entspricht der maximalen Biomasseproduktion auf Grund theoretischer Überlegungen über die Verwertung der Lichtenergie (STEEMAN-NIELSEN [10]).

Im Abschnitt mit der grössten Belastung durch Abwasser, im Oberlauf von Rinne 10% AW, erreicht der Zuwachs von *Sphaerotilus* 6–7 g Glühverlust je Tag m², was mit den Werten von WUHRMANN [11] für ähnliche Bedingungen (195 g in 33 Tagen) gut übereinstimmt. Dieser Wert ist etwa das Dreifache der täglichen Zunahme von *Sphaerotilus*, die bei einer Verunreinigung von Gerinnen mit Zuckerrübenmelasse gemessen worden ist (WUHRMANN und Mitarbeiter [13]).

Bedeutend geringer ist der Biomassezuwachs in der Regel in reinem Grundwasser; er beträgt nur einige g Glühverlust je Monat m² (im Mittel etwa 5 bis 10).

Die Extreme der stehenden Biomassen am Anfang der 4 Kanäle verhalten sich ungefähr wie 1:2 (sofern nicht stärkere Schlammanhäufungen stattgefunden haben). Das Verhältnis der grössten zur kleinsten Bildungsgeschwindigkeit der Biomassen liegt dagegen etwa zwischen 1:8 bis 1:10, zeitweise bestehen sogar grössere Unterschiede. In Biotopen mit guter Wachstumsleistung erfolgt im Laufe von 4 bis 6 Wochen eine volle Besetzung des besiedelbaren Raumes. Bei geringer Wachstumsleistung wird dieser Zustand erst nach mehreren Monaten erreicht (in reinem Grundwasser nach etwa 1½ Jahren Besiedlungsdauer). In Biozönosen, die vor allem von *Sphaerotilus* oder *Cladophora* aufgebaut werden, halten hohe Zuwachsraten auch bei einer dichten Besiedlung an. Ein bedeutender Anteil des Bewuchses geht dann laufend als Abtrieb verloren. Die stehende Biomasse bleibt über längere Zeit angenähert

konstant oder verändert sich nur langsam. Abschnitte mit Ulothrichaceenbewuchs hingegen sind durch einen raschen Rückgang der Vegetationsdichte gekennzeichnet, der in der Regel kurz nach der vollen Besetzung des Biotopes erfolgt.

Die pflanzliche Drift kann also auch unter hydraulisch ausgeglichenen Verhältnissen hohe Werte annehmen. Bei einer dichten Besiedlung spielt sie in verschiedener Hinsicht eine wichtige Rolle in der Stoffbilanz eines Fliessgewässers. Sie verbessert die Wachstumsbedingungen an ihrer Ablösungsstelle (zum Beispiel durch Verminderung der Beschattung und der Anhäufung von sauerstoffzehrenden Zerfallsprodukten, durch Erhöhung der Turbulenz wegen der Auflockerung der Bewuchses), kann aber andererseits zur sekundären Verunreinigung von unterliegenden Strecken beitragen, besonders dann, wenn die hydraulischen Bedingungen die Sedimentation begünstigen.

Biomassebildungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Abwasserbelastungen: Die unterschiedliche Wirkung verschiedener Abwassermengen auf die Entwicklung von Biozönosen kann nur dann auf Konzentrationsdifferenzen zurückgeführt werden, wenn die chemische Zusammensetzung des Wassers gleichartig ist (WUHRMANN [11], EICHENBERGER [3]). Diese Voraussetzung ist am Anfang der Rinnen erfüllt, wo eine Verdünnungsreihe vorliegt, die noch nicht durch Selbstreinigungsprozesse beeinflusst worden ist.

Die Zugabe von zwei Volumenprozenten Abwasser zu reinem Grundwasser löst starkes Algenwachstum aus. Je nach der Jahreszeit tritt auch *Sphaerotilus* auf. Weil die verschiedenen Algenarten sich in ihrer Fähigkeit in die frische Abwasserzone vorzudringen unterscheiden und zum Teil auch verschieden rasch wachsen, hängt die Geschwindigkeit des Phototrophenwachstums davon ab, welche Art jeweils die ihr zusagenden klimatischen Bedingungen vorfindet. Auch die Ausbildung von *Sphaerotilus* unterliegt einem jahreszeitlichen Wechsel. Daraus ergeben sich für einen bestimmten Standort Verschiebungen im Verhältnis von Phototrophen zu Heterotrophen und Veränderungen in der Bildungsgeschwindigkeit der Biomasse, die klimatischen Einflüssen unterworfen sind (Abbildung 5).

Bei einer Steigerung der Abwasserbelastung von 2 auf 4 Volumenprozent erfolgt eine Zunahme des heterotrophen Bewuchses. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Phototrophen wird durch diese zusätzliche Abwasserzugabe in der Regel nur noch wenig gefördert; es ist aber auch möglich, dass bei einer Abwasserkonzentration von 4% das Algenwachstum schon eingeschränkt wird. Die weitere Erhöhung der Abwasserbelastung auf 10 Volumenprozent führt schliesslich zu einem starken Rückgang der Algen, bietet hingegen ein besonders günstiges Milieu zur Entwicklung von *Sphaerotilus*. Je nachdem, ob die klimatischen Bedingungen für das Wachstum von *Sphaerotilus* zuträglich sind, und wie rasch die jeweils vorherrschenden Algen im frischen Abwasser wachsen, erfolgt die grösste Biomassebildungsgeschwindigkeit bei 4 oder 10% Abwasser (Abbildung 7).

Die Förderung der Biomassebildung durch eine Abwasserzugabe von 2 Volumenprozenten ist besonders gross, wenn sie zu reinem Grundwasser erfolgt. Dieselbe zusätzliche Zugabe zu schon mit 2% Abwasser verunreinigtem Wasser führt zu einer geringeren Zunahme des Bewuchses und kann bei noch stärker vorbelastetem Wasser zu einer Abnahme der Biomassebildung führen. *Die Auswirkung einer bestimmten Abwasserzugabe auf die quantitative Entwicklung der Besiedlung an der Stelle ihrer Einleitung ist daher davon abhängig, wie stark der Vorfluter schon belastet ist.*

Biomassebildung und Selbstreinigung stehen in einer Wechselwirkung (WUHRMANN und Mitarbeiter [13]). Veränderungen in der Geschwindigkeit der Biomassebildung an der Einmündungsstelle einer gegebenen Abwassermenge werden sich daher in der Ausbildung und in der Länge der Selbstreinigungszone strömungsabwärts auswirken.

Biomassebildung im Längsverlauf der Rinnen: Die Elimination von gelösten Stoffen aus der Wasserwelle beeinflusst die Wachstumsgeschwindigkeit im Längsverlauf der Rinnen je nach der Anfangskonzentration des Abwassers verschieden:

- a) *bei einer hohen Anfangsbelastung*, die das Wachstum der Phototrophen unterdrückt, schafft erst die Selbstreinigung die Vorbedingungen für das Auftreten von grünen Pflanzen. Der Dichterückgang der Heterotrophen und die Dichtezunahme der Phototrophen im Längsverlauf der Kanäle erfolgt je nach den klimatischen Bedingungen mit verschiedener Geschwindigkeit. Diese beiden innerhalb gewisser Grenzen voneinander unabhängigen Veränderungen im Aufbau des Bewuchses bestimmen das jeweilige Verhältnis von Heterotrophen zu Phototrophen und die Geschwindigkeit der Biomassebildung. Die Selbstreinigung kann die Phototrophen stärker fördern als sie die Heterotrophen einschränkt; dann nimmt die Gesamtbio-massebildung rinnenabwärts zu. In der Regel wirkt sich die Selbstreinigung in der Rinne 10% so aus, dass im Längsverlauf die monatliche Wiederbesiedlungs-biomasse entweder gleich bleibt oder grösser wird. (Abbildung 6). Auch im Oberlauf der Rinne 4% AW wird zur Zeit des *Sphaerotilusmaximums* beobachtet, dass die Selbstreinigung zu einer Förderung der Biomassebildung führt.
- b) *bei einer geringen Anfangsbelastung* begrenzt das Nährstoffangebot das Wachstum der Heterotrophen wie auch der Phototrophen. Die Elimination von Nährstoffen führt daher rinnenabwärts zu einer Verminderung der Kolonisationsgeschwindigkeit. Eine derartige Abnahme lässt sich in der Regel in 4% (ausser im Oberlauf zur Zeit des *Sphaerotilusmaximums*) und immer in 2% AW beobachten.

Die Geschwindigkeit des Abfalls der monatlichen Wiederbesiedlungsbiomasse im Längsverlauf eines Kanals hängt davon ab, wie die vorhandenen Organismen das Nährstoffangebot ausschöpfen und damit zur Elimination von Substraten aus der Wasserwelle beitragen. Es bestehen gute Gründe zur Annahme (EICHENBERGER und WUHRMANN [4]), dass sich verschiedene Grünalgen in dieser Hinsicht unterschiedlich verhalten.

7. Zusammenfassung

1. In einem Modellfliessgewässer wurde die Biomassebildung auf frei kolonisierbaren Flächen in Abhängigkeit von Jahreszeit und Abwasserbelastung untersucht.

2. Während die *stehende Biomasse* sich bei verschiedenen Belastungen innerhalb relativ enger Grenzen bewegt, ergeben sich grössere Differenzen in der *Kolonisationsgeschwindigkeit* freier Flächen an Standorten unterschiedlicher Belastung.

3. Maximale monatliche Wiederbesiedlungsbiomassen werden bei hoher Abwasserbelastung (10% AW) im Winter erreicht zur Zeit optimaler *Sphaerotilus*entwicklung. Bei mittlerer Belastung (2 und 4% AW) ergeben sich 2 Maxima, ein erstes im Frühjahr bei tiefen Wassertemperaturen, wenn *Hormidium rivulare* und *Ulothrix zonata* beste Bedingungen vorfinden, und ein zweites im Herbst bei höheren Wassertemperaturen, wenn *Cladophora glomerata* und *Vaucheria* spec. ihr Optimum errei-

chen. In reinem Wasser (Grundwasser) erfolgt eine Kolonisation freier Flächen nur im Frühjahr durch Ulothrichaceen und Diatomeen und im Herbst durch *Batrachospermum moniliforme*. Zu andern Jahreszeiten werden im Laufe eines Monates freie Flächen der Grundwasserrinne nicht besiedelt.

4. Veränderungen der Wiederbesiedlungsbiomasse im Längsverlauf der Kanäle hängen von der Abwasserbelastung ab. Bei hoher Anfangsbelastung erfolgt oft eine Zunahme, bei geringer Verunreinigung eine Abnahme der Biomassebildung.

5. Die Beziehung zwischen Kolonisationsgeschwindigkeit und Abwasserbelastung ist davon abhängig, welche Organismengruppe optimale klimatische Entwicklungsbedingungen vorfindet. Zur Zeit des *Sphaerotilus*maximums im Spätherbst und Winter wird in 10% Abwasser die grösste Biomassebildung erreicht, im Frühjahr dagegen in 4% Abwasser.

6. Eine Abwasserzugabe von 2 Volumenprozenten fördert die Biomassebildung am stärksten, wenn sie zu reinem Wasser (Grundwasser) erfolgt.

SUMMARY

1. The seasonal changes in the formation of biomass during colonization of bare surfaces in river models have been investigated. The channels of a length of 200 m were polluted with 0, 2, 4 and 10% settled sewage from the main sewer of the city of Zürich.

2. The standing crops at various pollution loads are rather similar. The corresponding rates of colonization of bare surfaces, however, differ widely.

3. In 10% sewage the monthly biomass formation reaches a maximum in winter, i. e. in the period of best growth of *Sphaerotilus*. At intermediate pollution (2 and 4% sewage) two maxima of biomass formation occur, one at low water temperature with *Hormidium rivulare* and *Ulothrix zonata* and one at higher water temperatures with *Cladophora glomerata* and *Vaucheria spec.* In pure water (groundwater) bare surfaces are negligibly colonized, except in spring (with *Ulothrichaceae* and diatoms) and in fall (with *Batrachospermum*).

4. The changes in biomass formation along the channels depend on the pollution load. At a high initial load (10% sewage) biomass formation increases downstream, at a low load (2% sewage), however, it decreases.

5. Climatic conditions determine the relative growth of the main groups of organisms (phototrophs and heterotrophs). Thus the dependence of the colonization rates on pollution load shifts according to season. In fall and winter the highest monthly biomass formation occurs in 10% sewage (optimum conditions for *Sphaerotilus* growth), in spring, however, in 4% sewage (optimum conditions for the *Ulothrichaceae*).

6. 2% sewage, added to clean water, increases the biomass formation to a higher extent than the same addition to an already polluted dilution water.

Die vorliegende Arbeit ist in entscheidender Weise durch die Anregungen von Herrn Prof. Dr. K. Wuhrmann gefördert worden, und ich möchte ihm für seine Unterstützung bei der Ausführung und Bearbeitung der Untersuchungen herzlich danken. An unser technisches Personal (vor allem die Herren E. Friedrich, E. Höhn und J. Stäheli) geht meine dankbare Anerkennung für die zuverlässige Wartung der Versuchsanlage.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] EDWARDS, R. W., *Some Effects of Plants and Animals on the Conditions in Fresh-Water Streams with Particular Reference to Their Oxygen Balance. Advances in Water Pollution Research*, 1, 319–334 (Pergamon Press, London, 1964).
- [2] EDWARDS, R. W. und OWENS, M., *The Effects of Plants on River Conditions. IV. The Oxygen Balance of a Chalk Stream*, J. Ecol. 50, 207–220 (1962).

- [3] EICHENBERGER, E. *Ökologische Untersuchungen an Modellfliessgewässern. I. Die jahreszeitliche Verteilung der bestandesbildenden pflanzlichen Organismen bei verschiedener Abwasserbelastung*, Schweiz. Z. Hydrol. 29 (1967).
- [4] EICHENBERGER, E. und WUHRMANN, K., *Jahreszeitliche Veränderungen des Pflanzenbewuchses in Modellfliessgewässern mit verschiedener Abwasserbelastung*, Verh. int. Ver. ein. theor. angew. Limnol. 16, 888-896 (1966).
- [5] KOBAYASI, H.: *Productivity in Sessile Algal Community of Japanese Mountain River*, Bot. Mag., Tokyo 74, 331-341 (1961).
- [6] MACAN, T. T. (ed.), *Factors that Regulate the Size of Matural Populations in Fresh Water*, Mitt. int. Verein. theor. angew. Limnol., No. 13 (1965).
- [7] ODUM, E. P., *Fundamentals of Ecology*, (Saunders, Philadelphia 1963).
- [8] ODUM, i. T., *Trophic Structure and Productivity of Silver Springs, Florida*, Ecol. Monogr. 27, 55-112 (1957).
- [9] OWENS, M. und EDWARDS, R. W., *The Effects of Plants on River Conditions. III. Crop Studies and Estimates of Net Productivity of Macrophytes in Four Streams in Southern England*, J. Ecol. 50, 157-162 (1962).
- [10] STEEMAN-NIELSEN, E., *On the Maximum Quantity of Plankton Chlorophyll per Surface Unit of a Lake or the Sea*, Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr. 47, 333-338 (1962).
- [11] WUHRMANN, R., *Über die biologische Prüfung von Abwasserreinigungsanlagen*, Gesundheits-Ingenieur, 72, 1-9 (1951).
- [12] WUHRMANN, K., EICHENBERGER, E., KRÄHENBÜHL, H. und RUCHTI, J., *Modelluntersuchungen über die Selbstreinigung in Fliessgewässern*, Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol. 16, 897-905 (1966).
- [13] WUHRMANN, K., RUCHTI, J. und EICHENBERGER, E., *Quantitative Experiments on Self Purification with Pure Organic Compounds*, Third International Conference on Water Pollution Research (1966).