

# Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung in der Elbe – Untersuchungsmethoden und erste Ergebnisse\*

Von NORBERT GREISER

## Zusammenfassung

Im Rahmen des KFKI-Projekts „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ werden seit Januar 1984 biologische Untersuchungen zur Entstehung und Umbildung von Schwebstoffpartikeln in der Elbe durchgeführt. Zur Analyse des Schwebstoffmaterials werden chemische und biochemische Summenparameter (Trockengewicht, Glühverlust, Protein, Gesamtadenylat, Adenosin-triphosphat und Energy Charge) herangezogen. Parallel dazu werden mikroskopische Analysen (Fluoreszenzmikroskopie mit der FITC-Technik) vorgenommen.

Die Probennahme und zusätzliche Messung von hydrologischen, physikalischen und chemischen Begleitparametern erfolgt weitgehend automatisiert mit Hilfe einer Schwebstoffmeßstation oberhalb Hamburgs bei Oortkaten.

Die ersten Ergebnisse zeigen, daß die Schwebstoffdynamik entscheidend von der lebenden Biomasse mitbestimmt wird. So besteht volumenmäßig das Schwebstoffmaterial zu 80–90 % aus lebender Biomasse. Weiterhin besteht eine enge Beziehung zwischen dem mineralischen und dem Anteil der lebenden Biomasse am Schwebstoffmaterial.

Es wird diskutiert, inwieweit aufgrund dieser Ergebnisse zahlreiche Schlußfolgerungen im Zusammenhang mit der Schwebstoffproblematik neu überdacht werden müssen.

## Summary

*Investigations on the biological aspects of the formation and degradation of suspended matter in the Elbe Estuary have been conducted since January 1984 as part of the KFKI research program "Mud and Suspended Matter in Estuaries". The dry weight, ash free dry weight, protein, total adenylates, ATP and energy charge were determined. The particulate matter was separated by fractional centrifugation and examined under a microscope using fluorescein isothiocyanate (FITC) as a stain in order to analyse the components of the suspended particles.*

*This yields a quantitative picture of the microorganisms present on or within the particles. Most of the samples were taken from an investigation platform constructed especially to continuously collect suspended matter and to measure hydrological, physical and chemical parameters throughout the year. The platform is located in the Elbe Estuary near Oortkaten upstream of Hamburg Harbor.*

*First results show the important role of microorganisms in the seasonal dynamics of the suspended matter. On a volume basis, 80–90 % of the suspended material consisted of living biomass. The microorganisms seem to build up a fluffy texture around mineral particles. There is a good correlation between the amount of living biomass and the mineral fraction of suspended matter during the year.*

*These results imply that earlier conclusions on suspended matter and mud dynamics in the Elbe Estuary have to be revised.*

---

\*) Dieser Beitrag ist eine vom Promotionsausschuß des Fachbereichs Biologie der Universität Hamburg genehmigte Vorabveröffentlichung von Teilergebnissen einer Dissertation.

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	136
2. Material und Methoden . . . . .	138
2.1 Probennahme und -aufarbeitung . . . . .	138
2.2 Laboranalysen . . . . .	138
2.2.1 Trockengewicht und Glühverlust . . . . .	138
2.2.2 Proteinbestimmung . . . . .	138
2.2.3 ATP, Gesamtadenylat, Energy Charge (EC) . . . . .	139
2.2.4 Chlorophyll und Phaeopigmente . . . . .	140
2.2.5 Ammonium (NH <sub>4</sub> ), Nitrit (NO <sub>2</sub> ), Nitrat (NO <sub>3</sub> ) . . . . .	140
2.2.6 Mikroskopische Analyse . . . . .	141
3. Ergebnisse . . . . .	141
3.1 Schwebstoffstruktur und -zusammensetzung . . . . .	141
3.2 Jahreszeitliche Veränderungen . . . . .	145
4. Diskussion . . . . .	146
4.1 Allgemeine Wertung . . . . .	146
4.2 Wertung der Ergebnisse . . . . .	147
5. Schriftenverzeichnis . . . . .	148

## 1. Einleitung

Die Elbe transportiert im Jahreslauf erhebliche Mengen partikulären Materials. Dieses Material (Schwebstoffe) gilt zum einen als Sedimentationspotential für die Schlickbildung und zum anderen als Transportvehikel für zahllose organische und anorganische Stoffe, von denen wiederum die toxischen Bestandteile wie z. B. Chlorkohlenwasserstoffe und Schwermetalle Probleme aufwerfen. Ein Beispiel dafür ist die Belastung des Baggerguts mit derartigen Schadstoffen im Zusammenhang mit der Entsorgungsnotwendigkeit. Weiterhin führt eine starke Aufschlickung zu häufigen Baggerungen und somit hohen Kosten.

Es wäre daher wichtig, zu wissen, welche Faktoren für die Bildung und Sedimentation der Schwebstoffe und ihre Belastung mit Schadstoffen in erster Linie verantwortlich sind. Nur die Kenntnis dieser Faktoren bietet die Möglichkeit, langfristig regulierend in die Dynamik dieser Prozesse einzugreifen mit dem Ziel, den Schlickanfall und die Schadstoffbelastung zu vermindern.

In diesem Zusammenhang muß berücksichtigt werden, inwieweit neben physikalischen, hydrologischen und chemischen Faktoren biologische Prozesse beteiligt sind. Ist dieser Einfluß bedeutsam, so muß z. B. die Schwebstoffbildung als ein dynamischer Prozeß betrachtet werden, der vor allem durch die Bioaktivität von Mikroorganismen gesteuert wird. Wichtige Kontrollparameter wären dann die Nährstoffversorgung (Kläranlagen!) sowie abiotische Faktoren wie Temperatur und Sauerstoffgehalt des Wassers.

Weiterhin erklärt sich, ausgehend vom biologischen Aspekt, die Schadstoffbelastung der Schwebstoffe als ein *a k t i v e r* Anreicherungsprozeß, der notwendig zu einem Herausfiltern der Schadstoffe aus dem Wasser und zu einer potenzierten Konzentration im Schwebstoffmaterial führt! Dies wiederum könnte eine Erklärung für die hohe Schadstoffbelastung des Schlicks liefern.

Vor diesem Hintergrund wurde seit Januar 1984 ein zusätzliches Untersuchungsprogramm in das KFKI-Projekt „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ aufgenommen, das die biologischen Komponenten der Schwebstoffe in der Elbe erfassen soll. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeit sollten zunächst chemische und biochemische Summenparameter auf ihre Anwendbarkeit bei dem weitgehend automatisierten Meß- und Probennahmeprogramm

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Probennahme und -aufarbeitung

Aus dem Sammel-tank der Automatischen Meßstation Oortkaten (AMO) werden jeweils 5 l Elbewasser abgefüllt und zur weiteren Bearbeitung auf direktem Wege zum Labor transportiert. Der Probennahmezeitpunkt ist jeweils kurz vor Beendigung einer Ebbe-Phase. Parallel zur Tankprobe wird eine Schöpfprobe aus der Elbe gewonnen. Dieses Probenmaterial dient zur Bestimmung der Bioaktivität. Da durch die Tankkühlung (4 °C) eine Veränderung der Bioaktivität eintritt, würden die gemessenen Werte aus einer Tankprobe nicht den in-situ- (vor Ort vorhandenen) Werten der Elbe entsprechen.

Ein wesentlicher Vorteil der Probennahmetechnik besteht darin, daß der Tank der AMO bereits eine halbtide-integrierte Probe enthält, die durch ein Rührwerk gleichmäßig durchmischt wird, so daß die 5-l-Teilprobe im hohen Maße repräsentativ für den Wasserkörper der Elbe ist.

Im Labor wird das Probenmaterial zunächst in mehrere Fraktionen aufgeteilt, die darüber Aufschluß geben, welcher Anteil der Biomasse und -aktivität an größere Partikel gebunden ist. Dazu wird die Probe durch Zentrifugieren in drei Sedimentationsklassen fraktioniert. Aus Vorversuchen ging hervor, daß bei 200 U/Min., 400 U/Min. und 1000 U/Min. mit einer oberen Grenze von 4000 U/Min. jeweils ein wesentlicher Anteil des suspendierten Materials sedimentiert. Diese drei Sedimentationsklassen wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum beibehalten. Die Zentrifugationszeit beträgt einheitlich 20 Minuten. Die Gewinnung der Proben für die Trockengewicht- und Glühverlustbestimmung erfolgt durch Vakuumfiltration. Eine Übersicht über die Laboranalysen wird in Abb. 2 gegeben.

### 2.2 Laboranalysen

#### 2.2.1 Trockengewicht und Glühverlust

Die Vakuumfiltration erfolgt über Glasfaserfilter der Fa. SARTORIUS, die zuvor in Aqua dest. gespült, bei 500 °C zwei Stunden geglüht und anschließend gewogen werden. Mit diesem Filtertyp werden Partikel größer als 0,5 µm erfaßt. Der Vorteil bei der Verwendung von Glasfaserfiltern liegt vor allem darin, daß diese nicht hygroskopisch sind und daher dementsprechende Wägefehler nicht auftreten. Zur verlässlichen Bestimmung des Trockengewichts und Glühverlusts der Schwebstoffe genügt bei guter Durchmischung der Probe (Magnetrührer!) ein Filtrationsvolumen von 0,5 l bei drei Parallelproben. Das Trocknen der Filter erfolgt bei 60 °C über 12 Stunden, das Glühen der Filter bei einer Temperatur von 500 °C über eine Zeitdauer von zwei Stunden. Zur Wägung wird eine auf 0,01 mg genaue Analysenwaage der Fa. SARTORIUS benutzt.

#### 2.2.2 Proteinbestimmung

Die Bestimmung erfolgt photometrisch nach BRADFORD (1976). Einer Proteinlösung wird dazu der Farbstoff „Coomassie Brilliant Blue“ zugesetzt. Bei der Bildung des Farbstoffkomplexes Coomassie Brilliant Blue-Protein tritt proportional zur eingesetzten Proteinmenge eine Blaufärbung mit einem Absorptionsmaximum bei 595 nm auf. Diese Bestimmungsmethode ist über einen weiten Konzentrationsbereich von 1–1400 µg Protein/ml anwendbar und

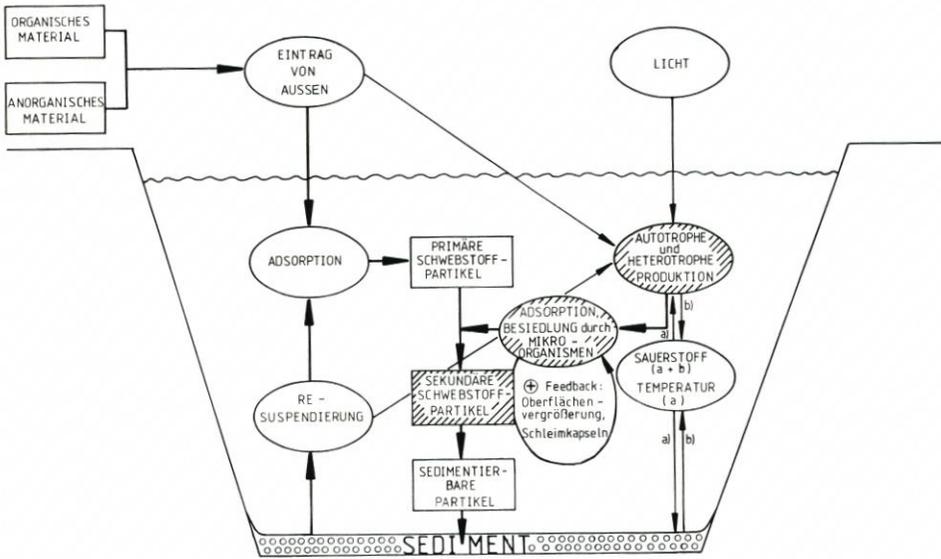


Abb. 1. Eingliederung der biologischen Faktoren (schraffiert) in das System der Schwebstoffbildung

getestet werden, denn die Aussagekraft biologischer Parameter hängt allgemein entscheidend von den Randbedingungen der jeweiligen Probennahme ab. Abhängigkeiten bestehen von der Probennahmetechnik, mit der entschieden wird, wie groß der Untersuchungsausschnitt ist, mit dem die Komplexität eines Fließgewässers erfasst werden soll. Die richtige Wahl dieses Ausschnitts ist besonders dann bedeutsam, wenn Meßwerte quantitativ auf das Gesamtsystem hochgerechnet werden sollen. Zur Erfassung derartiger Meßwerte sind kontinuierliche und ortsgebundene Probennahmen erforderlich, wie sie mit der Automatischen Meßstation Ortkaten möglich sind (NEUMANN, 1985).

Die zu messenden biologischen Parameter sind daraufhin nach folgenden Kriterien ausgewählt worden:

- Sie sollen als Summenparameter für eine Bilanzierung biologischer Daten geeignet und auf möglichst viele Fragestellungen anwendbar sein,
- der Material-, Zeit- und Kostenaufwand für die Analysenverfahren soll gering sein.

Als übergeordneter Gesichtspunkt bei der Auswahl der zu erfassenden Parameter galt jedoch ihre Aussagefähigkeit für die Aufklärung des vom Verfasser postulierten Gesamtzusammenhangs für die Schwebstoffbildung (s. Abb. 1). Hierbei sind von besonderer Wichtigkeit Parameter zur Erfassung der qualitativen Zusammensetzung der Schwebstoffe, wie des organischen und anorganischen Anteils, dem Anteil der lebenden Biomasse und der Bestimmung der Aktivität der Biomasse im Zusammenhang mit den sich jahreszeitlich ändernden abiotischen Faktoren.

Zum Abschluß des Untersuchungsprogramms sollen die biologischen Phänomene in ihrer Bedeutung im Vergleich zu den parallel erfaßten hydrologischen und physikalischen Faktoren in einem Gesamtmodell über die Schwebstoff- und Schlickdynamik dargestellt werden. Das KFKI-Projekt „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ bietet somit die Möglichkeit, alle wesentlichen Komponenten der Schwebstoffdynamik parallel zu erfassen. Die bereits vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß hierbei die Biologie eine bedeutsame Rolle spielt.

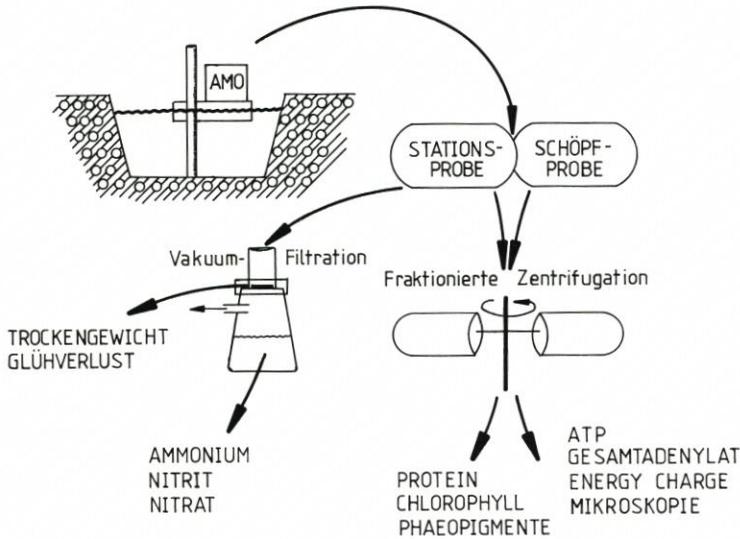


Abb. 2. Übersicht über die Probenahme und Laboranalysen

als Standardmethode mit entsprechenden Reagenziensätzen entwickelt (BIO RAD LABORATORIES, 1976). Modifikationen der Methode zur Steigerung der Nachweisempfindlichkeit sind möglich (BEARDEN, 1978; SPECTOR, 1978).

Zur Gewinnung der Proteine wird das Pellet einer zentrifugierten Teilprobe (s. Abschn. 2.1) von 50 ml mit 1 ml 0,5 n NaOH zwei Stunden bei 60 °C extrahiert. Nach dem Abzentrifugieren der Partikelreste werden je Probe (4 Parallelen) 0,5 ml des Überstandes (Proteinlösung) mit 2 ml der Farbstofflösung versetzt. Nach fünf Minuten Inkubationszeit wird die Extinktion im Photometer ( $\lambda = 595 \text{ nm}$ ) gegen die reine Farbstofflösung gemessen.

Diese Proteinbestimmungsmethode liefert gut reproduzierbare Ergebnisse, ist einfach zu handhaben, zeitsparend und weitgehend automatisierbar. Sie ist ebenfalls für Sedimentproben geeignet (FRAUENHEIM, 1984).

### 2.2.3 ATP, Gesamtadenylat, Energy Charge (EC)

Diese Parameter dienen häufig bei Freilanduntersuchungen zur Bestimmung der Biomasse und -aktivität in Sediment- und Planktonproben (BREZONIK et al., 1973; GRAF et al., 1982; WITZEL, 1979). Die Interpretation der erhaltenen Werte ist aufgrund zahlreicher Faktoren, die in der Probenahme- und Analysentechnik begründet liegen, schwierig und kann daher nur bei genauer Kenntnis der möglichen Störquellen sinnvoll erfolgen (GREISER, 1982).

Die Vorteile der Bestimmungsmethode, ihre hohe Nachweisempfindlichkeit und relativ einfache Handhabung rechtfertigen jedoch ihren Einsatz bei biologischen Untersuchungsprogrammen.

Grundlage des Verfahrens ist die Möglichkeit, mit Hilfe von Biolumineszenz-Enzymsystemen Adenosintriphosphat (ATP) quantitativ zu bestimmen (STREHLER, 1968). Am häufigsten wird für derartige Messungen ein Enzymextrakt (Luciferin-Luciferase-Enzymsystem) aus den Leuchtorganen des Leuchtkäfers *Photinus pyralis* verwendet. Das hier einge-

setzte Präparat (FLE-50, Firefly-Lantern-Extract) stammt von der Fa. SIGMA Chemie. Die Messung der Biolumineszenz erfolgt in einem Luminometer der Fa. LKB.

Zur Gewinnung des Adenylatextraktes wird das Pellet einer zentrifugierten Probe (s. Abschn. 2.1) von 10 ml (4 Parallelen) mit 3 ml Glycinpuffer 15 Min. bei 90°C extrahiert (KALBHEN und KOCH, 1967). ATP kann dann direkt gemessen werden, während die übrigen Adenylate, Adenosindiphosphat (ADP) und Adenosinmonophosphat (AMP) zunächst enzymatisch in ATP umgewandelt werden müssen. Dies geschieht nach der Methode von PRADET (1967), modifiziert nach EIGENER (1973) und SUNDERMEYER (1979). Zur reproduzierbaren ATP-Messung genügt ein Probenextraktvolumen von 0,1 ml. Diese Menge wird in die mit 1 ml Arsenatpuffer gefüllten Meßküvetten gegeben und 15 Sek. nach der anschließenden Firefly-Enzym-Zugabe gemessen.

Der EC-Wert (ATKINSON und WALTON, 1967; ATKINSON, 1968) errechnet sich aus den erhaltenen Mengen von ATP, ADP und AMP wie folgt:

$$EC = \frac{ATP + \frac{1}{2} ADP}{ATP + ADP + AMP}$$

Der Gesamtadenylatwert ist die Summe aus ATP + ADP + AMP.

## 2.2.4 Chlorophyll und Phaeopigmente

Die Extraktion der Proben-Pellets erfolgt mit 5 ml 90 % Aceton bei 5°C über zwei Stunden. Da diese Werte für die Schwebstoffanalyse in erster Linie Begleitparameter darstellen, erfolgt eine Differenzierung des Probenmaterials hier nur nach zwei Sedimentationsklassen, der 200–400-U/Min.-Fraktion und der 4000-U/Min.-Fraktion.

Die Messung der Probenextrakte wird mit einem TURNER Fluorometer durchgeführt. Die fluorometrische Bestimmung hat im Vergleich zur photometrischen Bestimmung den Vorteil, daß bereits kleine Mengen Probenmaterial, in diesem Fall eine Teilprobe von 10 ml (4 Parallelen), genügen, um reproduzierbare Meßergebnisse zu erhalten.

Der Chlorophyllgehalt wird direkt aus dem Acetonextrakt nach dem Abzentrifugieren des extrahierten suspendierten Materials gemessen, der Phaeopigmentgehalt aus dem gleichen Extrakt nach Zugabe von einem Tropfen 1 n HCl. Bei hohen Chlorophyllgehalten muß der Extrakt zuvor mit 90 % Aceton verdünnt werden.

## 2.2.5 Ammonium (NH<sub>4</sub>), Nitrit (NO<sub>2</sub>), Nitrat (NO<sub>3</sub>)

Die Bestimmung erfolgt jeweils photometrisch. Zum NH<sub>4</sub>-Nachweis werden 0,1 ml Nessler's Reagenz + 0,1 ml K-Na-tartrat-Lösung (50 g in 100 ml Aqua dest. + 0,5 ml Nessler's Reagenz) mit 5 ml filtriertem Elbwasser versetzt und die Extinktion bei 425 nm gemessen. Der NO<sub>2</sub>-Nachweis erfolgt ebenfalls nach einem Standardverfahren (mit Sulfanilamid- und N-[Naphthyl]-ethylendiamin-dihydrochlorid-Lösung) bei einer Wellenlänge von 540 nm (DREWS, 1983). NO<sub>3</sub> wird mit einem Diphenylamin-Schwefelsäure-Reagenz (DREWS, 1983) nachgewiesen und bei 324 nm gemessen.

Die Umrechnung der Extinktionswerte erfolgt über Eichkurven. Die Standardkurven für NH<sub>4</sub> und NO<sub>2</sub> sollten jeweils nach dem Neuansetzen der Nachweisreagenzien neu bestimmt werden. Für den störanfälligeren NO<sub>3</sub>-Nachweis empfiehlt es sich parallel zur Probe einen Eichstandard mitzumessen.

### 2.2.6 Mikroskopische Analyse

Zur differenzierten Analyse der Schwebstoffpartikel-Morphologie und -Zusammensetzung wurde zunächst ein fluoreszenzmikroskopisches Verfahren ausgewählt. Als Färbereagenz wird Fluorescein-Isothiocyanat (FITC) verwendet. Der Farbstoff bindet an Proteine und macht somit direkt die biologisch-organische Substanz sichtbar. Anorganische Partikel werden nicht gefärbt (BABIUK und PAUL, 1969). Mit der FITC-Technik können die quantifizierten Proteine (s. Abschn. 2.2.2) definierten Strukturen zugeordnet werden.

Präparate von den fraktionierten Schwebstoffproben werden wie folgt hergestellt: Ein Tropfen der Partikelsuspension wird auf einem Objektträger luftgetrocknet und anschließend vorsichtig über einer Bunsenbrennerflamme hitzefixiert. Der eigentliche Färbevorgang mit FITC dauert zwei Minuten, dann wird der überschüssige Farbstoff mit Pufferlösungen ausgewaschen und das Präparat in einem für die Epifluoreszenz-Technik ausgerüsteten Mikroskop der Fa. ZEISS betrachtet und fotografiert. Im mikroskopischen Bild lassen sich deutlich die Schwebstofftextur und die Zellen der verschiedenen Gruppen von Mikroorganismen identifizieren. Weiterhin können tote und lebende Zellen voneinander unterschieden werden. Um ein möglichst unverfälschtes Bild von den Schwebstoffpartikeln zu erhalten, wird nur Schöpfprobenmaterial analysiert.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Schwebstoffstruktur und -zusammensetzung

Allgemein zeigen die Partikel eine sehr unregelmäßige Gestalt aus größtenteils amorphem Material (Abb. 3). Betrachtet man im Mikroskop nacheinander mehrere Schärfenebenen, so wird deutlich, daß aufgrund der komplexen dreidimensionalen Struktur eine Angabe definierter Partikelgrößen im Sinne einer Korngrößenanalyse nicht möglich ist (Abb. 4).

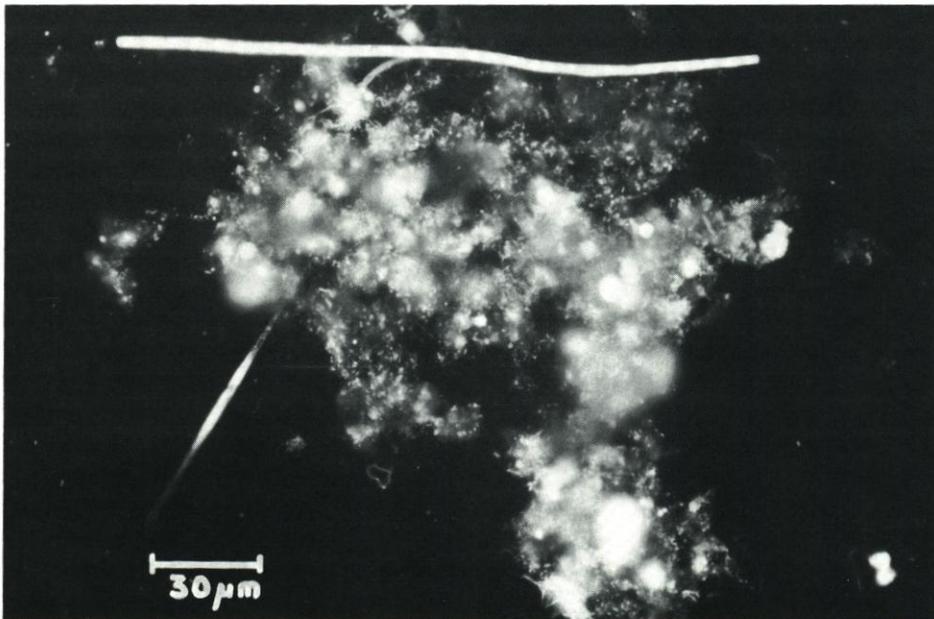


Abb. 3. Schwebstoffpartikel der 200-U/Min.-Fraktion

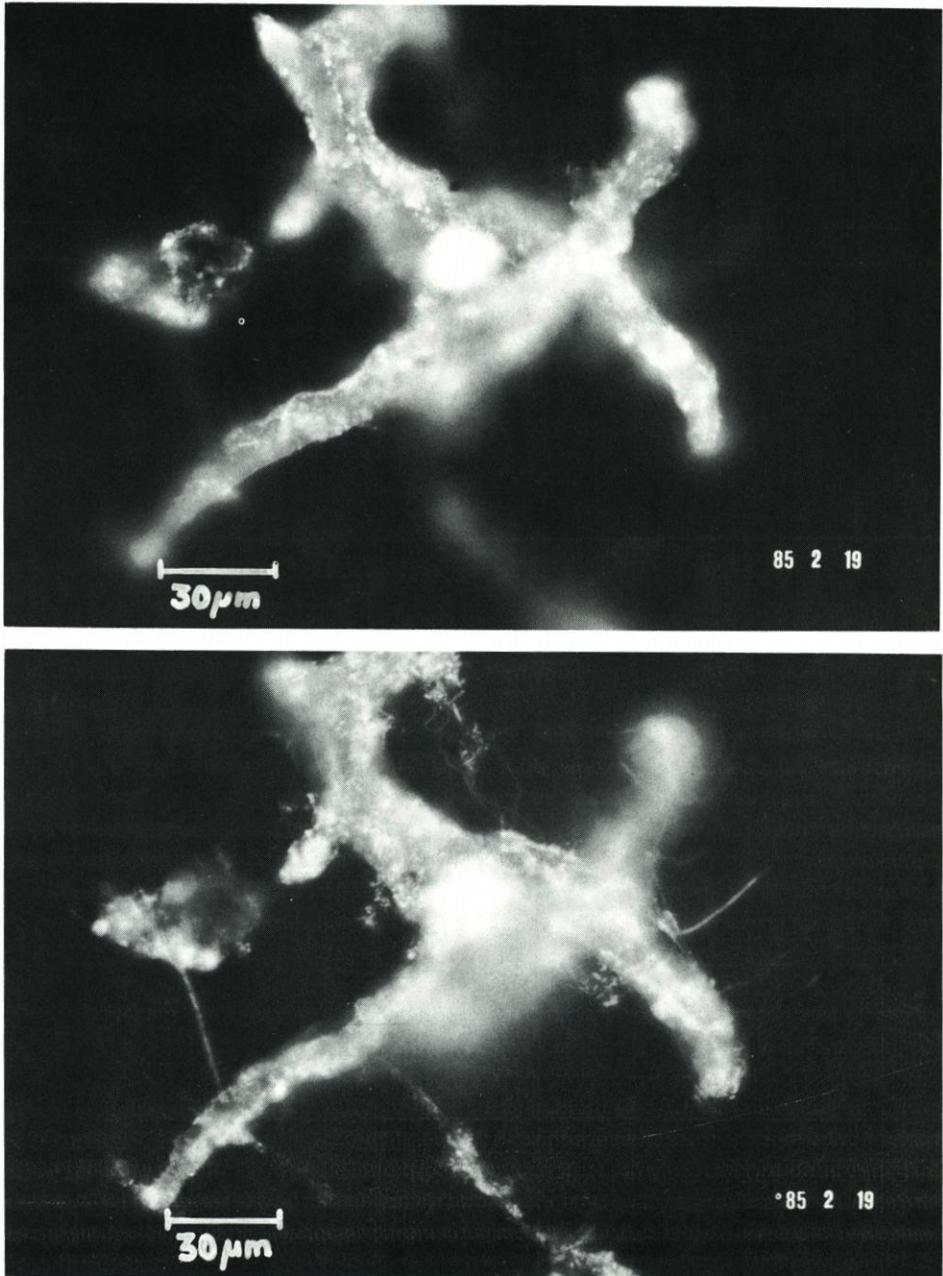


Abb. 4. Schwebstoffpartikel. Fotografiert in 2 unterschiedlichen Schärfenebenen

Eine eingehende Betrachtung zeigt, daß anorganische Partikel zumeist volumenmäßig kaum ins Gewicht fallen. Sie sind fast vollständig in eine biologisch-organische Matrix eingebettet (Abb. 5). Diese Matrix besteht vor allem aus Bakterienzellen mit ihren Schleimabsonderungen. Aus den Fotos wird deutlich, daß der biologisch-organische Anteil volumenmäßig bis zu 90 % betragen kann.

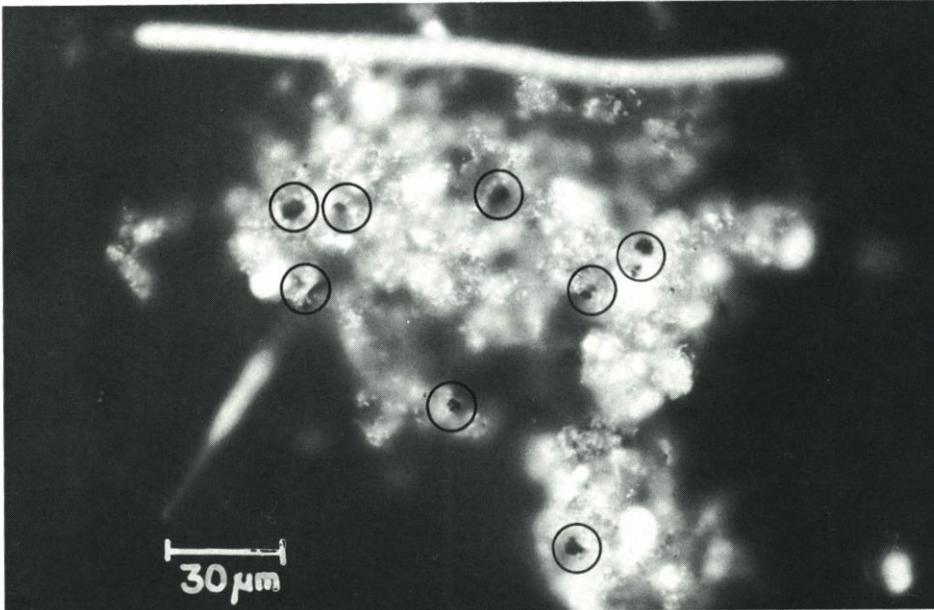


Abb. 5. Schwebstoffpartikel mit gekennzeichneten anorganischen Teilchen

Differenziert man nach Sedimentationsklassen, so ist in der 200- und 400-U/Min.-Fraktion zwar der Anteil von großen Partikeln am höchsten, jedoch scheinen auch andere Faktoren das Sedimentationsverhalten mit zu beeinflussen:

- Der Anteil der anorganischen Partikel in den Schwebstoffen beschleunigt vermutlich durch das höhere spezifische Gewicht die Sedimentation. So findet sich vor allem in der 200-U/Min.-Fraktion ein hoher Anteil anorganischer Bestandteile.
- Fädige Strukturen (z. B. Zellfäden von *Cyanobakterien*, Pilzen u. a.) vergrößern das Oberflächen/Volumen-Verhältnis und halten entsprechende Schwebstoffteilchen leichter in der Schwebel (Abb. 6). Vermutlich zeigt daher die 4000-U/Min.-Fraktion bei größeren Partikeln eine Dominanz fädiger Strukturen.

Mit Hilfe der mikroskopischen Analyse läßt sich schon jetzt feststellen, daß die Schwebstoffe erhebliche Mengen von Biomasse transportieren und daß zumindest während des bisher dokumentierten Untersuchungszeitraums nur ein geringer Teil der Mikroorganismen nicht an Partikel gebunden ist.

Die mikroskopische Analyse wird durch die Parameter Protein und Glühverlust voll bestätigt. Der Glühverlust beträgt im Mittel 40 bis 50 % des Schwebstofftrockengewichts. Nimmt man einen mittleren Proteingehalt von 50 % pro Bakterienzelle an (SCHLEGEL, 1976), so errechnet sich aus den Schwebstoffproteinwerten ein mittlerer gewichtsmäßiger Anteil der lebenden Biomasse von 80 bis 90 % am Glühverlust). In Tabelle 1 sind die bisher ermittelten Trockengewicht-, Glühverlust- und Proteinwerte zusammengestellt.

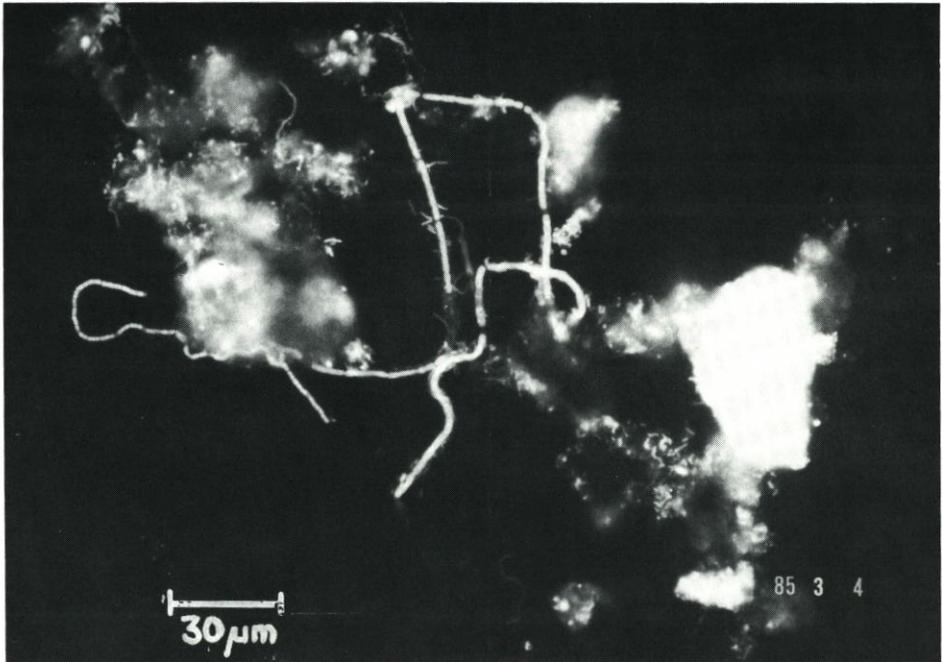


Abb. 6. Schwebstoffpartikel mit Zellfäden von Bakterien

Tabelle 1

Trockengewicht-, Glühverlust- und Proteinwerte von Juli 1984 bis März 1985. Die Proteinwerte sind die Proteingehalte der 200- + 400-U/Min.-Fraktion. Die Angaben sind in mg/l

Zeit	Trockengewicht	Glühverlust	Protein
18.07.	36,2 ± 1,1	12,6 ± 1,1	6,7 ± 0,3
23.07.	29,7 ± 0,3	11,1 ± 0,3	4,8 ± 0,4
01.08.	32,6 ± 0,3	14,4 ± 0,1	4,9 ± 0,2
08.08.	29,4 ± 0,3	11,9 ± 0,4	5,3 ± 0,4
03.10.	12,6 ± 0,1	6,3 ± 0,2	2,4 ± 0,6
24.10.	11,7 ± 1,4	5,5 ± 0,9	2,1 ± 0,1
28.11.	19,4 ± 0,7	8,2 ± 0,2	5,3 ± 1,0
05.12.	23,6 ± 0,3	9,4 ± 0,2	4,5 ± 0,6
12.12.	21,3 ± 0,3	9,2 ± 0,1	4,2 ± 0,1
18.12.	17,2 ± 0,3	8,1 ± 0,3	3,1 ± 0,1
10.01.	11,3 ± 0,4	4,8 ± 0,3	2,4 ± 0,2
07.02.	28,7 ± 0,5	10,3 ± 0,3	5,5 ± 0,5
13.02.	17,2 ± 1,8	6,0 ± 0,5	0,9 ± 0,2
19.02.	11,7 ± 0,3	4,9 ± 0,1	1,2 ± 0,4
27.02.	14,9 ± 0	7,4 ± 0,1	0,7 ± 0,1
07.03.	18,0 ± 1,0	10,4 ± 0,9	1,0 ± 0,1

## 3.2 Jahreszeitliche Veränderungen

Aus Tab. 1 geht hervor, daß besonders hohe Schwebstoffkonzentrationen in den Sommermonaten auftreten. Sie liegen im Vergleich zu den Herbst- und Wintermonaten im Mittel doppelt so hoch. Betrachtet man die qualitative Zusammensetzung des Schwebstoffmaterials im Jahresverlauf, so weist der organische Anteil, ausgedrückt als Glühverlust in % vom Trockengewicht, keine erkennbar jahreszeitlich bedingten Maxima oder Minima auf. Die Werte liegen zwischen 35 und 50 %, sieht man einmal von dem hohen März-Wert ab. Betrachtet man dazu parallel den Proteinanteil am Glühverlust, so scheint der Anteil der lebenden Biomasse am Schwebstoffmaterial stärkeren Schwankungen zu unterliegen. Diese sind besonders intensiv im Herbst und Winter bei niedrigen Wassertemperaturen (Abb. 7).

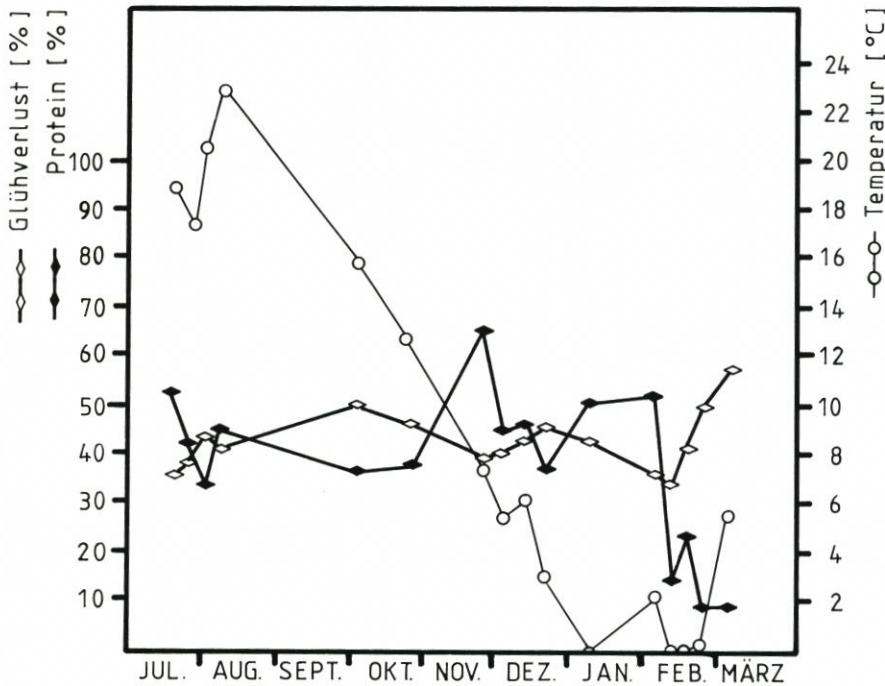


Abb. 7. Entwicklung des gesamtorganischen Anteils und der lebenden Biomasse im Jahreslauf

Abb. 8 bestätigt diesen jahreszeitlich bedingten verstärkten Ab- und Aufbau der lebenden Biomasse: Betrachtet man den Verlauf der Ammoniumkonzentrationen im Wasser als Parameter für den Proteinabbau im Zusammenhang mit den Proteinwerten, so entspricht einem niedrigen Proteinwert ein hoher Ammoniumwert und umgekehrt.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum scheint eine enge Beziehung zwischen dem mineralischen Anteil der Schwebstoffe (Aschegehalt) und dem Anteil der lebenden Biomasse (Protein) zu bestehen (Abb. 8). Beide Kurven zeigen einen auffallend parallelen Verlauf. Dies legt die Vermutung nahe, daß vor allem die lebende Biomasse die mineralischen Partikel in der Schwebe hält. Umweltbedingungen, die günstige Lebensumstände für die Mikroorganismen darstellen, wie z. B. höhere Wassertemperaturen, zahlreich vorhandene Nährstoffe und ausreichende Sauerstoffkonzentrationen, sollten sich daher im Jahresverlauf auch in den Schwebstoffkonzentrationen widerspiegeln. In diesem Sinne sind daher vermutlich auch die hohen Schwebstoffwerte in den Sommermonaten zu interpretieren.

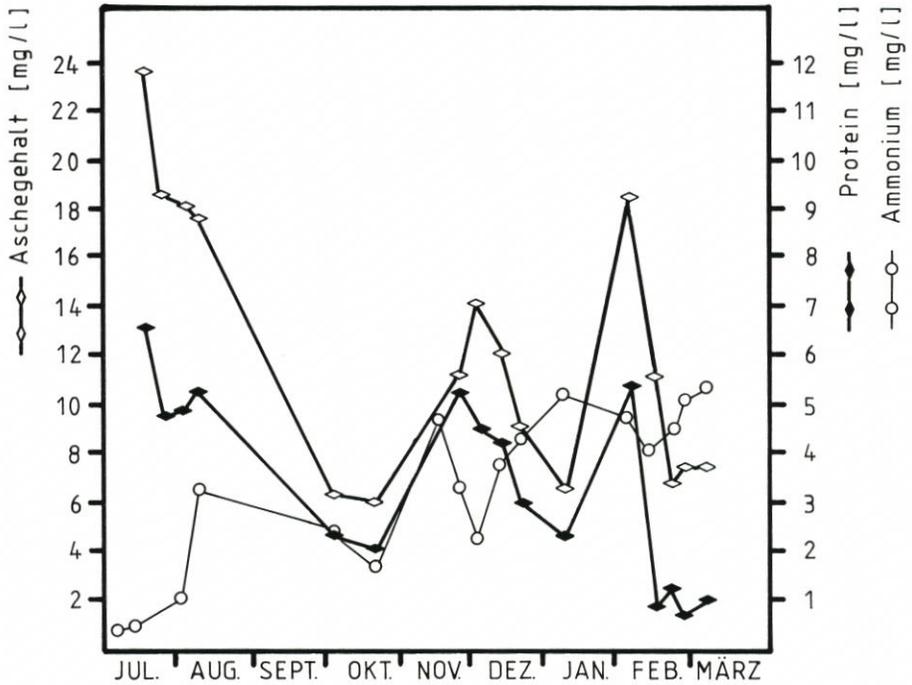


Abb. 8. Mineralischer Anteil, lebende Biomasse und Ammoniumwerte im Jahreslauf

## 4. Diskussion

### 4.1 Allgemeine Wertung

Bisherige biologische Untersuchungen beschränken sich lediglich auf Einzelaspekte. So wurden z. B. die Besiedlung von Schwebstoffpartikeln mit Mikroorganismen untersucht (JANNASCH, 1972; JOINT und POMROY, 1982; KANNE, 1981; LINLEY und FIELD, 1982; PEDRÓS-ALIÓ und BROCK, 1983), jahreszeitliche Veränderungen der Biomasse und -aktivität festgestellt (LEIGHTON, 1981; MANUELS und POSTMA, 1973), Veränderungen der Bioaktivität unter definierten Laborbedingungen (FARRAH und BITTON, 1983) sowie derartige Veränderungen in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung (HANSON, 1982). Quantifizierende Aussagen in bezug auf die Inhaltsstoffe von Schwebstoffmaterial gibt es über den Anteil der lebenden Biomasse im Belebtschlamm (KANNE, 1981), über die Mengen an organisch-gebundenem Kohlenstoff (HAMILTON-GALAT und GALAT, 1983; OGURA et al., 1981; WASSMANN, 1983), organisch gebundenen Stickstoff (HANSON, 1982; WASSMANN, 1983), Kohlenhydrate (JANNASCH, 1972; OTSUKI et al., 1983), Aminosäuren (OTSUKI et al., 1983) und ATP (HAMILTON-GALAT und GALAT, 1983; KANNE, 1981; MANUELS und POSTMA, 1973; POSTMA, 1982).

Allen Untersuchungsergebnissen liegen jedoch nur punktuelle Probennahmen zugrunde; weiterhin wurden wichtige physikalische und chemische Begleitparameter nicht mitgemessen, da dies i. d. R. zur Verfügung stehende zeitliche und personelle Kapazitäten übersteigt. Dies führt bei den erhaltenen Meßergebnissen zu allgemein bekannten Interpretationsschwierigkeiten, die bei dem vorliegenden Untersuchungsprogramm aufgrund des weitgehend automati-

sierten Probennahme- und Meßverfahrens vermieden werden. So geben auch die bereits vorliegenden Ergebnisse schon jetzt einen Einblick in die möglichen Kausalzusammenhänge, die die Schwebstoffdynamik bestimmen.

#### 4.2 Wertung der Ergebnisse

Angaben in der Literatur bezüglich der Besiedlungsdichte von Schwebstoffen mit Mikroorganismen, speziell Bakterien, sind sehr unterschiedlich und aufgrund der verschiedenen Probennahmeorte und Aufarbeitungstechniken nur schlecht vergleichbar. JOINT und POMROY (1982) sowie REUTER (1979) berichten übereinstimmend, daß in Ästuaren mehr als 50 % der Bakterien an Partikel gebunden sind. LINLEY und FIELD (1982) geben für marine Proben entsprechende Werte von 34 % an und PEDRÓS-ALIÓ und BROCK (1983) für den Lake Mendota (Wisconsin, USA) Werte von 1 bis 30 %. Die eigenen Untersuchungen zeigen, daß im Jahresmittel mindestens 80 % der Biomasse an größere Partikel gebunden ist.

Das Auftreten besonders hoher Schwebstoffmengen im Sommer wird von HINRICH (1975) für die Elbe bestätigt und ebenfalls für die Weser und Ems angegeben. Die These, daß dafür vor allem die lebende Biomasse verantwortlich sein könnte (über die Stabilisierung der Schwebstoffpartikel durch die Verklebung mineralischer und organischer Substanz), wird indirekt durch OGURA et al. (1981) bestätigt. Bei ihren Untersuchungen von suspendiertem Material in Süßwasserproben fand sich besonders in der grob-partikulären Fraktion ein hoher relativer Anteil an organisch gebundenem Kohlenstoff im Vergleich zur feinputikulären Fraktion. Weiterhin zeigen Laborexperimente (ROBERTSON et al., 1982), daß Bakterien in der Lage sind, gelöste organische Substanzen zu Aggregaten umzuformen. OGURA et al. (1981) konnten zeigen, daß im Sommer bei günstigen Bedingungen für die Mikroorganismen der Gehalt an biologisch-organischen Bestandteilen im partikulären Material drastisch zunimmt. Ähnliche Indizien für eine starke Beteiligung der Biologie an der jahreszeitlichen Schwebstoffdynamik findet man bei CHRISTIANSEN (1985) durch einen Vergleich der Schwebstoffkonzentrationen in der Elbe im Zusammenhang mit den jährlichen Wassertemperaturen.

Dies alles sind Hinweise auf eine zentrale Rolle der Mikroorganismen bei der Bildung und Umbildung von Schwebstoffmaterial. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, daß herkömmliche Parameter, wie Trockengewicht und Glühverlust, allein diese Phänomene nicht beschreiben können, ja vermutlich sogar zu gravierenden Fehleinschätzungen bei verschiedenen mit den Schwebstoffen zusammenhängenden Problemen führen. So werden z. B. in den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern Berechnungen über den jährlichen Abtrag in  $t/km^3$  durch das Wassereinzugsgebiet der Elbe angeführt. Diesen Berechnungen liegen Schwebstoff-Trockengewichtsmessungen bei Hitzacker zugrunde. Da aber nachgewiesenermaßen ein großer Teil des Schwebstoffmaterials aus lebender Biomasse besteht, die sich aufgrund der Charakteristik der Schwebstofftextur erst in der Elbe gebildet haben kann, liegen diese Werte wesentlich zu hoch. Weitere Fehleinschätzungen gibt es vermutlich bei gleichen falschen Grundannahmen über die Natur der Schwebstoffe für die Akkumulation und mögliche Herkunft von Schadstoffen im Schwebstoffmaterial. Auf diese Problematik wurde schon in der Einleitung hingewiesen.

Es zeigt sich, daß der biologische Aspekt nicht den bestehenden Interpretationsschwierigkeiten neue hinzufügt, sondern, im Gegenteil, bedeutsame Ansätze für ein Erklärungsmodell der Schwebstoffdynamik liefert.

## 5. Schriftenverzeichnis

- ATKINSON, D. E. u. WALTON, M.: Adenosine triphosphate conservation in metabolic regulation – Rat liver cleavage enzyme. *J. Biol. Chem.*, 242, 1967.
- ATKINSON, D. E.: The energy charge of the adenylate pool as a regulatory parameter. Interaction with feedback modifiers. *Biochemistry*, 7, 1968.
- BABIUK, L. A. u. PAUL, E. A.: The use of fluorescein isothiocyanate in the determination of the bacterial biomass of grassland soil. *Can. J. Microbiol.*, 16, 1969.
- BEARDEN, J.: Quantitation of sub-microgram quantities of protein by an improved protein-dye binding assay. *Biochem. Biophys. Acta*, 533, 1978.
- BIO RAD LABORATORIES: Bio-Rad protein assay. Bulletin 1069 EG, 1979.
- BRADFORD, M.: A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72, 1976.
- BREZONIK, P. L., BROWNE, F. X. u. FOX, J. L.: Application of ATP to plankton biomass and bioassay studies. *Water Research*, 9, 1973.
- CHRISTIANSEN, H.: Erste Ergebnisse an Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- DREWS, G.: Mikrobiologisches Praktikum. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 4. Aufl. ISBN 3-540-11836-5, 1983.
- EIGENER, U.: Adenine nucleotide pool variations in intact *Nitrobacter winogradskyi* cells. *Arch. Mikrobiol.*, 102, 1975.
- FARRAH, S. R. u. BITTON, G.: Bacterial survival and association with sludgeflocs during aerobic and anaerobic digestion of waste-water sludge under laboratory conditions. *Appl. Env. Microbiol.*, 45, 1983.
- FRAUENHEIM, K.: Gesamtprotein im Sediment als Biomasse-Indikator – Untersuchungen im Auftriebsgebiet vor Nordwestafrika. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft, 1984.
- GRAF, G., BENGTSSON, W., DIESNER, U., SCHULZ, R. u. THEEDE, H.: Benthic response to sedimentation of a spring phytoplankton bloom: process and budget. *Mar. Biol.*, 66, 1982.
- GREISER, N.: Methodische Untersuchungen zur quantitativen Bestimmung von Adenosintriphosphat und Energy Charge in Prokaryonten und Eukaryonten. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft, 1982.
- HAMILTON-GALAT, K. u. GALAT, D. L.: Seasonal variation of nutrients, organic carbon, ATP, and microbial standing crops in a vertical profile of Pyramid Lake, Nevada. *Hydrobiologica*, 105, 1983.
- HANSON, R. B.: Organic nitrogen and caloric content of detritus. II Microbial biomass and activity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 14, 1982.
- HINRICH, H.: Die Schwebstoffbelastung der Weser und der Vergleich mit Elbe und Ems. *Dt. Gewässerkd. Mit.*, 19, Sonderheft, 1975.
- JANNASCH, H. W.: Bacterial content of particulate matter in offshore surface waters. *Limnol. Oceanogr.*, 18, 1972.
- JOINT, I. R. u. POMROY, A. J.: Aspects of microbial heterotrophic production in a highly turbid estuary. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 58, 1982.
- KALBHEN, D. A. u. KOCH, H. J.: Methodische Untersuchungen zur quantitativen Mikrobestimmung von ATP in biologischem Material mit dem Firefly-Enzymsystem. *Z. Klin. Chem. u. Klin. Biochem.*, 5, 1967.
- KANNE, R.: Die quantitative Bestimmung von ATP als Parameter für die physiologische Aktivität von Belebtschlamm. *Vom Wasser*, 57, 1981.
- LEIGHTON, G.: Biomass relationships between phytoplankton, zooplankton and heterotrophic aerobic bacteria in a reservoir. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21, 1981.
- LINLEY, E. A. S. u. FIELD, J. G.: The nature and ecological significance of bacterial aggregation in a nearshore upwelling ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 14, 1982.
- MANUELS, M. W. u. POSTMA, H.: Measurements of ATP and organic carbon in suspended matter of the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 8, 1973.
- NEUMANN, L. J. R.: a) AMO – die Automatische Meßstation Oortkaten: Meßsystem zur Sammlung von Schwebstoffproben und Messung von Begleitparametern. *Die Küste*, H. 42, 1985. b) MOSTRA – ein neues Verfahren zur strömungs- und morphologieadäqua-

- ten Bilanzierung von suspendierten Feststoffen und Begleitparametern in geschichteten Ästuaren. Die Küste, H. 42, 1985.
- OGURA, K., YAMAMOTO, K., NAITOH, Y. u. FUKUSHIMA, K.: The role of clay minerals and humic substances on the behaviour of organic and inorganic compounds in fresh water. Verh. Internat. Verein. Limnol., 21, 1981.
- OTSUKI, A., MIYOSHI, T., UNNO, T. u. SEKI, H.: Biochemical constituents of particulate matter in a mesotrophic irrigation pond. Arch. Hydrobiol., 98, 1983.
- PEDRÓS-ALIÓ, C. u. BROCK, T. D.: The importance of attachment to particles for planktonic bacteria. Arch. Hydrobiol., 98, 1983.
- POSTMA, H. u. DIJKEMA, K. S.: Hydrography of the Wadden Sea: movements and properties of water and particulate matter. Report 2 of the Wadden Sea Working Group ISBN 90 6191 0528, 1982.
- REUTER, J. H.: Chemical interactions involving the biosphere and fluxes of organic material in estuaries. River Inputs to Ocean Systems, Proceedings of a Review Workshop, Rome, Italy, 1979.
- ROBERTSON, M. L., MILLS, A. L. u. ZIEMAN, J. C.: Microbial synthesis of detritus-like particulates from dissolved organic carbon released by tropical seagrasses. Mar. Ecol. Prog. Ser., 7, 1982.
- SCHLEGEL, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, ISBN 3 13 444604 9, 1975.
- SPECTOR, T.: Refinement of Coomassie Blue method of protein quantitation - Simple and linear spectrophotometric assay for less-than-or-equal-to 0,5 to 50 microgram of protein. Anal. Biochem., 86, 1978.
- STREHLER, B. L.: Bioluminescence assay: principles and practise. Meth. of Biochem. Anal., 18, 1968.
- SUNDERMEYER, H.: Vergleichende Untersuchungen am Energie-Stoffwechsel von unterschiedlich angezogenen *Nitrobacter*-Zellen. Dissertation, Universität Hamburg, Institut für Allgemeine Botanik, 1979.
- WASSMANN, P.: Sedimentation of organic and inorganic particulate material in Lindaspollene, a stratified, land-locked fjord in Western Norway. Mar. Ecol. Prog. Ser., 13, 1983.
- WITZEL, K. P.: The adenylate energy charge as a measure of microbial activities in aquatic habitats. Arch. Hydrobiol. Beih., Ergebn. Limnol., 12, 1979.