

Berichte  
aus dem  
Institut für Meereskunde  
an der  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Nr. 193

ABBAU UND AKKUMULATION VON ORGANISCHER SUBSTANZ  
IN DEN SEDIMENTEN DER KIELER BUCHT

DEGRADATION AND ACCUMULATION OF ORGANIC MATTER  
IN THE SEDIMENTS OF KIEL BIGHT

von  
Ulf Eversberg

1990

DOI 10.3289/IFM\_BER\_193

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:  
Institut für Meereskunde  
Abt. Meeresbotanik  
Düsternbrooker Weg 20  
2300 Kiel

ISSN 0341-8561

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

1989

# Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Material und Methoden.....	3
2.1. Zeit und Ort der Probennahme.....	3
2.2. Art der Probennahme.....	5
2.3. Analysenmethodik.....	6
2.4. Datenverarbeitung und Trendanalysen.....	9
3. Ergebnisse.....	11
3.1. Umweltparameter.....	11
3.1.1. Windgeschwindigkeit.....	11
3.1.2. Eisgang während der Untersuchung.....	12
3.1.3. Temperatur, Salzgehalt und Dichte in der Wassersäule.....	13
3.2. Chlorophyll_a Äquivalente in der Sinkstofffalle.....	19
3.3. Ergebnisse der im Sediment gemessenen Parameter.....	20
3.3.1. Sedimenttemperatur.....	20
3.3.2. Wassergehalt.....	23
3.3.3. Redoxpotential.....	25
3.3.4. Chlorophyll_a Gehalt.....	27
3.3.5. Gehalt an organischer Substanz bzw. org. Kohlenstoff.....	31
3.3.6. "Proteinkonzentration bezogen auf das Trockengewicht.....	35
3.3.7. "Proteinmengen" bezogen auf Sedimentflächen..	42
3.3.8. ATP (Adenosintriphosphat).....	45
3.3.9. Sauerstoffzehrung.....	49
3.3.10. Wärmeproduktion.....	50
3.3.11. Wärmeproduktion auf vier Profilen.....	53
3.4. Abgeleitete Ergebnisse.....	53
3.4.1. Anteil von "Protein" an der organischen Substanz.....	53
3.4.2. Abbau der organischen Substanz.....	57
4. Diskussion.....	61
4.1. Beschreibung der einzelnen Stationen.....	61
4.1.1. 12m Station.....	61
4.1.2. 17m Station.....	62
4.1.3. 19m Station.....	65

4.1.4. 28m Station.....	66
4.2. Zuordnung von Ereignissen in der Wassersäule und im Benthal.....	67
4.3. Bilanzierungen.....	71
4.3.1. Bilanz des org. Materials im Sediment der 17m Station.....	71
4.3.2. Flächendeckende Bilanzierung.....	74
4.4. Transport von organischem Material.....	84
4.5. Schlußbetrachtungen.....	89
5. Literaturverzeichnis.....	93

## Zusammenfassung

Von Mai 1985 bis Juni 1987 wurden etwa alle 14 Tage Sedimentproben von vier Stationen in der westlichen Kieler Bucht (in 12m, 17m, 19m und 28m Wassertiefe) auf ihren Gehalt an organischen Substanzen untersucht. Die Zusammensetzung der Sedimente reichte vom mittelgroben Sand mit relativ geringem Gehalt an organischem Material (12m Station) bis zum an organischen Verbindungen reichen sandigen Schlick (28m Station).

Die oberen 4cm des Sedimentes der flachsten beprobten Station in 12m Wassertiefe verloren während der Untersuchung jährlich mehr als 3% ihres gesamten Gehaltes an organischem Material. Der Gehalt an organischer Substanz an der Station 17m fiel um etwa 2.5% und stieg an der 19m Station um etwa 3%.

Die obere, 4cm dicke Schicht des Sedimentes in 12m Tiefe verlor pro Jahr etwa 19% an schwerabbaubaren stickstoffhaltigen Verbindungen (Folinpositive Substanzen), dagegen stiegen an den unterhalb der sommerlichen Pycnokline gelegenen Stationen in 17m, 19m und 28m Wassertiefe die Konzentrationen an Folinpositiver Substanz an. Die jährlichen Anstiege betrugen etwa 15%, 23% bzw. 17%.

Auf die gesamte Kieler Bucht (2571km<sup>2</sup>) bezogen war eine jährliche Akkumulation von 73000 t an stickstoffhaltigen Verbindungen meßbar (ein Anstieg von etwa 15% pro Jahr). Dieses Material enthält mehr als 12000 t Stickstoff.

Die Elimination durch Denitrifikation beträgt etwa 3500 t N y<sup>-1</sup> und die dauerhafte Festlegung im Sediment unterhalb von 10cm etwa 1400 t N y<sup>-1</sup>. Zusammen macht das 16900 t N y<sup>-1</sup>.

Der Eintrag an Stickstoff in die Kieler Bucht über die Luft und durch Landabfluß beträgt nach Literaturangaben zusammen etwa 17800 t y<sup>-1</sup>.

Der Eintrag durch die Luft und von Land zusammen hat in etwa die gleiche Größenordnung wie die Summe von Akkumulation von Stickstoff im Sediment und Elimination von Stickstoff durch Denitrifikation. Nach dieser groben Abschätzung sollten in der Kieler Bucht Import und Export von Stickstoff aus den umliegenden Meeresgebieten etwa gleich groß sein.

Der mit Hilfe der Wärmeproduktion bestimmte benthische Abbau von organischer Substanz war sehr viel höher als die nach Literaturangaben sedimentierenden Mengen an organischem Material. Die laterale Verdriftung von Phytoplanktondetritus aus flacheren Gebieten kann die Differenz zwischen Phytoplanktonproduktion und Sedimentation einerseits und der benthischen Remineralisierung bzw. Akkumulation im Sediment andererseits nicht erklären.

Eine Umverteilung von Material durch Resuspension aus dem tieferen Rinnensystem hin zu den flacheren Stationen konnte indirekt nachgewiesen werden. Dieser Prozeß wurde in beiden Wintern jeweils einmal während der Untersuchung beobachtet.

## Summary

Sediment samples were taken in the western Kiel Bight on four stations at different depths, i.e. 12m, 17m, 19m and 28m, in time intervalls of appr. 14 days. The content of organic matter was measured during the period May 1985 to June 1987. With increasing depth, the sediments changed their composition from medium-coarse sand with relatively low contents of organic matter to sandy mud with a high content of organic material.

The 0-4cm sediment layer of the shallowest station at 12m depth lost more than 3% per year of its total content of organic material within the period of investigation. At the 17m station the content of organic substances decreased about 2.5%, but increased about 3% at the station in 19m depth.

The upper 4cm of the sediment at the 12m station lost about 19% per year of their content of hardly degradable nitrogen-containing substances (Folin positive reacting substances), while at the stations situated below the summerpycnocline in 17m, 19m and 28m water depth the content of Folin positive reacting material increased. The increase was about 15%, 23% and 17% respectively.

For the total Kiel Bight (2571km<sup>2</sup>) the accumulation of Folin positive nitrogenous material was estimated to be 73,000 t per year which is an overall increase of about 15%. This material contains more than 12,000 t of nitrogen.

The elimination through denitrifikation is about 3500 t of nitrogen per year, and the deposition in the sediment below 10cm is estimated to be 1400 t N per year. Together 16,900 t N y<sup>-1</sup> are eliminated.

The combined import of nitrogen into the Kiel Bight via air and land-runoff has been estimated to be 17,800 t per year.

The combined input through air and from land is in the same order of magnitude as the sum of accumulation in the sediment plus elimination by denitrifikation. If the rough estimation holds true, the export of nitrogen out of the Kiel Bight into the surrounding sea-areas would be in the same order of magnitude as the import.

The benthic degradation of organic matter, measured as heat production in the sediment, was estimated to be much higher than the sedimentation according to published data. The discrepancy between production of phytoplankton and sedimentation on one hand and the benthic remineralisation and accumulation on the other side cannot be explained by lateral advection of phytoplankton detritus from shallower areas of Kiel Bight.

A transport of material out of the deep channel system of the Kiel Bight to the shallower stations by resuspension could be proved indirectly. This process occurred once in each of the both winters investigated.

## Danksagung

Herr Dr. G. Graf regte das Thema an, leitete das Teilprojekt und stand bei Durchführung und Auswertung der praktischen Arbeit und bei Erstellung des Manuskriptes helfend zur Seite. Ihm und meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. S. A. Gerlach, dem Leiter des UBA-Projektes "Eutrophierung der Nord- und Ostsee", danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Ohne den großen persönlichen Einsatz von Wolfgang Queisser wären weder die Ausfahrten so effektiv noch die Laborarbeit so erfolgreich gewesen. Kapitän Ohl und allen Besatzungsmitgliedern des FK "Littorina" schulde ich Dank für ihre Mitarbeit und Initiative. Sie haben das Projekt auch zu dem ihren gemacht. Für die Hilfe bei den Ausfahrten und für seine Unterstützung beim Schreiben der Arbeit möchte ich mich bei Michael Teucher bedanken. Bei Annette Scheltz möchte ich mich für ihre Hilfe im Labor bedanken. Fritz Köster hat mit großer Geduld die Arbeit gelesen und bei der Korrektur geholfen.

Von den vielen, die mich außerdem unterstützt haben, möchte ich zumindest einige nennen: Sigrid Podewski und Helmut Beese Dank für Frühstück und Diskussion, Christine und Jochen Rethwisch für ihre Ermunterungen, Claudia Wohlert hat sich um die deutsche Sprache verdient gemacht und last not least mein Dank an Eva Bronsert, Ute Zeller, Markos Sommer, Preben Jensen und die Leute vom SFB-Flur.

Die Arbeit wurde finanziert vom Umweltbundesamt (Berlin) im Projekt "Eutrophierung der Nord- und Ostsee" ( Wasser 102 04 215/16 ) mit dem Teilprojekt-Thema "Bilanz der organischen Substanz in den Sedimenten der Kieler Bucht"

## 1. Einleitung

In den Jahren 1981 und 1983 waren große Gebiete der Kieler Bucht fast völlig sauerstofffrei (Ehrhardt und Wenck, 1984; Gerlach, 1984; Weigelt, 1985; 1988). In weitaus größerem Rahmen, als bisher beobachtet, wurden die Populationen der Makrofauna und der demersalen Fischarten geschädigt. Zur Untersuchung der auslösenden Faktoren wurde daraufhin vom Umweltbundesamt ein Projekt mit dem Titel "Eutrophierung der Nord- und Ostsee" unter der Leitung von Prof. S.A. Gerlach in Auftrag gegeben.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Teilprojektes unter dem Titel "Bilanz der organischen Substanz in den Sedimenten der Kieler Bucht" (Nr. 102 04 215/16; unter der Leitung von Dr. G. Graf).

Bei ungenügender Sauerstoffzufuhr sollten die Folgen einer Überdüngung als zunehmende Verschlickung der Sedimente der Kieler Bucht sichtbar werden, denn durch die dadurch erhöhte Primärproduktion gelangen größere Mengen an organischer Substanz zum Meeresboden. Zwar werden auch unter Sauerstoffmangel organische Stoffe abgebaut, dieser Prozeß läuft allerdings langsamer und häufig nicht bis zur vollständigen Remineralisierung ab (z.B. Meyer-Reil, 1984). Als Folge können schwerer abbaubare Verbindungen im Sediment akkumulieren. Es bestände ein Ungleichgewicht zwischen Zufuhr von organischen Verbindungen zum Meeresboden und deren Abbau im und am Sediment.

Ziel der vorliegenden Studie ist der Nachweis dieses Ungleichgewichtes durch Erstellung einer Bilanz des organischen Materials und die Feststellung einer eventuellen Verschlickung der Sedimente.

Durch die Topographie der Kieler Bucht sind deren Sedimente sehr heterogen zusammengesetzt. In den flachen Gebieten besteht der Boden fast völlig aus reinem Sand mit mehr oder weniger vielen Einlagerungen von Geröllen verschiedener Größe. Mit zunehmender Wassertiefe wird das Sediment immer feinkörniger, um dann in den tieferen Rinnen in fast reinen Schlick überzugehen. Die Wassersäule der Kieler Bucht ist bis auf wenige Monate während des Winters

deutlich geschichtet. Die Menge an Sauerstoff, die dem Boden zugeführt wird, ist damit stark tiefenabhängig. Um diese Abhängigkeit berücksichtigen zu können, wurden für diese Studie Stationen zur Probennahme in verschiedenen Tiefen ausgewählt. Bereits vorliegende Arbeiten zeigen die starke zeitliche Variabilität sowohl der Zufuhr von Kohlenstoff als auch der Abbauprozesse im Benthos (z.B. Smetacek, 1985; Graf, 1988). Da die Reaktion des Benthos auf Sedimentationsereignisse bekanntermaßen schnell ist (z.B. Graf et al., 1983), war ein zeitlich dichtes Netz an Probennahmen unbedingte Voraussetzung für eine Abschätzung des Gesamtumsatzes der organischen Substanz im Sediment.

Es wurden vier Stationen mit möglichst unterschiedlicher Sedimentzusammensetzung ausgewählt, an denen von Mai 1985 bis Juni 1987 in 7 bis 14tägigem Abstand Proben gewonnen wurden. Die wesentlichen Parameter zur Erstellung der Bilanz waren die Messungen von Kohlenstoff und Protein zur Bestimmung des Gehaltes an organischem Material im Sediment. Die Messung der Sauerstoffzehrung und der Wärmeproduktion lieferte Informationen über die Aktivität und damit über die Abbauleistung des Benthos. Die Zufuhr von Material zum Sediment sollte durch die Bestimmung der Sedimentationsraten mit Hilfe von Sinkstofffallen abgeschätzt werden.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Zeit und Ort der Probennahme

Zwischen Mai 1985 und Juni 1987 wurden in einem durchschnittlichen Intervall von 14 Tagen insgesamt 54 Ausfahrten zu vier Stationen in der Kieler Bucht durchgeführt. Durch lange Eisbedeckung in den Wintermonaten und im Vorfrühling 1986 konnte diese Frequenz nicht durchgängig beibehalten werden. Während der Hauptsedimentationsphasen im Frühjahr und Herbst wurden wöchentlich Ausfahrten unternommen.

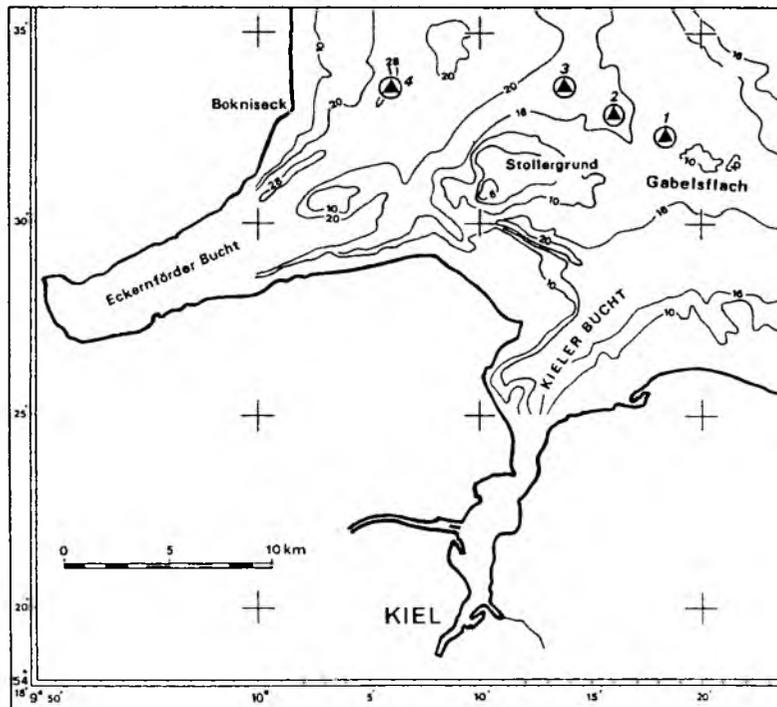


Abb.1 Ausschnitt aus einer Karte der Kieler Bucht mit einigen Tiefenlinien und den Stationen (1=12m, 2=17m, 3=19m, 4=28m)

Nach einer Voruntersuchung auf einem Profil vom Gabelsflach bis Boknisack wurden vier Stationen ausgewählt (Abb.1), die die wichtigsten Sedimenttypen der Kieler Bucht repräsentieren:

- 1) Gabelsfloch West ( $54^{\circ}32.0' \text{ N}$ ,  $10^{\circ}18.5' \text{ E}$ )  
Wassertiefe 12m, mittlerer bis grober Sand
- 2) Gabelsfloch West ( $54^{\circ}32.7' \text{ N}$ ,  $10^{\circ}16.6' \text{ E}$ )  
Wassertiefe 17m, feiner Sand
- 3) Gabelsfloch West ( $54^{\circ}33.39' \text{ N}$ ,  $10^{\circ}13.94' \text{ E}$ )  
Wassertiefe 19m, feiner Sand bis schlickiger Sand
- 4) Bokniseck ( $54^{\circ}33.3' \text{ N}$ ,  $10^{\circ}5.7' \text{ E}$ )  
Wassertiefe 28m, Schlick

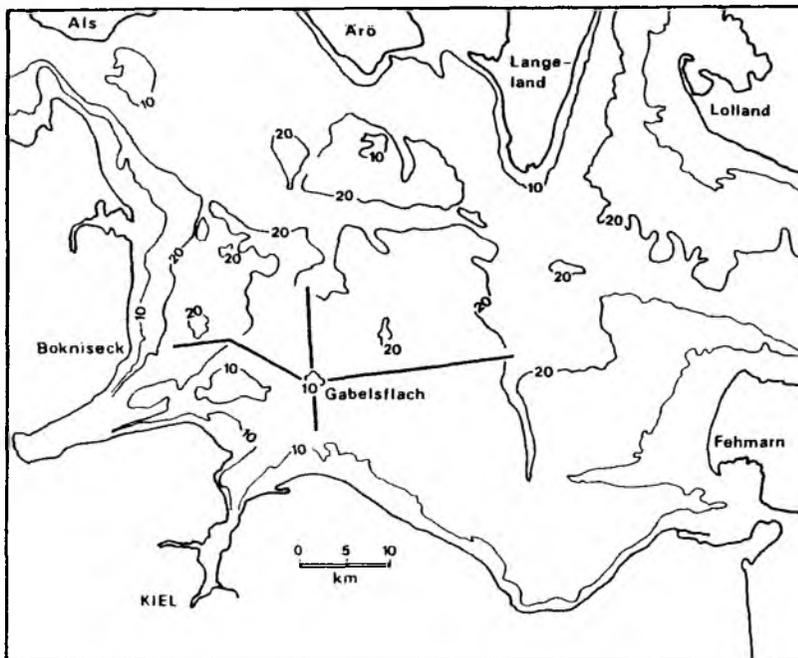


Abb.2 Karte der Kieler Bucht mit einigen Tiefenlinien und den vier im Juni 1987 beprobten Profilen (das Westprofil verläuft entlang den 4 Dauerstationen; Graf, 1988)

Die Station mit 17m Wassertiefe liegt in einem Tiefenbereich, der als der arten- und biomassereichste der Kieler Bucht gilt (Arntz, 1977). Die 28m Station bei Bokniseck befindet sich in dem die Kieler Bucht durchziehenden Rinnensystem und ist ein Sedimentationsgebiet im geologischen Sinn (Healy und Werner, 1987). Diese beiden Stationen wurden besonders intensiv beprobt (Tab. 1).

Im Juni 1987 wurden zusätzlich ausgehend vom Zentrum des Gabelsflaches (10m) auf vier Profilen (Abb.2) und 20 Stationen Proben gewonnen und analysiert. Auf dem Profil in westlicher Richtung liegen die vier Dauerstationen.

## 2.2.Art der Probennahme

Tab.1

Tabelle der im Sediment gemessenen Parameter

(Proben für die mit <sup>a</sup> gekennzeichneten Parameter wurden mit dem Backengreifer und für die mit <sup>b</sup> gekennzeichneten mit dem Kastengreifer gewonnen.)

<u>Parameter</u>	<u>Stationen</u>			
	12m	17m	19m	28m
1)Wassergehalt <sup>a</sup>	x	x	x	
2)Trockengewicht <sup>a</sup>	x	x	x	
3)Gehalt an C <sub>org</sub> <sup>a</sup>	x	x	x	
4)"Protein" <sup>a</sup>	x	x	x	x
5)Chlorophyll <sub>a</sub> <sup>a</sup>	x	x	x	x
6)ATP <sup>b</sup>		x		x
7)Wärmeproduktion <sup>b</sup>		x		x
8)Sauerstoffzehrung <sup>b</sup>		x		x
9)Redoxpotential <sup>b</sup>		x		x
10)Sed. Temperatur <sup>a</sup>	x	x	x	x

Zur Messung der Parameter 1-5 (Tab.1) wurden mit einem Van-Veen Backengreifer (0.1m<sup>2</sup>) Sedimentproben gewonnen. Bei jeder Greiferprobe wurde mit einem Kunststoffrohr ein Sedimentkern mit einem Durchmesser von 5cm aus dem Backengreifer gestochen und horizontal in Schichten geschnitten. Parallelproben stammen aus verschiedenen Greiferproben. Jede Sedimentschicht wurde einzeln

luftdicht in einer Kunststoffdose verpackt und bis zur Aufarbeitung im Labor in einem wärmeisolierenden Behälter gelagert. Die Backengreiferproben auf den Stationen in 12m, 19m und 28m Tiefe wurden in zwei Schichten geteilt: 0-1cm und 1-4cm, die Proben auf der 17m Station in die Schichten 0-1cm, 1-2cm, 2-3cm und 3-4cm.

Pigmente wurden nur im Bereich 0-1cm mit je 5 Parallelen (s.o.) bzw. auf der 28m Station mit je 10 Parallelen gemessen.

Zur Bestimmung von ATP, Wärmeproduktion, Sauerstoffzehrung und Redoxpotential (17m und 28m) wurden Sedimentkerne ( $\varnothing 10\text{cm}$ ) aus einem Reineck-Kastengreifer (20 \* 30 cm) ausgestochen. Die Kerne wurden zusammen mit dem überstehenden Wasser gewonnen und unter Luftabschluß ins Labor gebracht.

ATP wurde auf der 17m Station in den Schichten 0-1cm, 2-3cm und 4-5cm und auf der 28m Station in den Schichten 0-1cm, 1-2cm und 2-4cm gemessen (je 5 Parallelen aus einer Mischprobe der entsprechenden Schicht aus drei Kernen).

In den Schichten 0-2cm und 2-4cm wurde die Wärmeproduktion bestimmt.

### 2.3. Analysenmethodik

#### Sedimenttemperatur

Die Sedimenttemperatur wurde direkt nach dem Hieven im Backengreifer mit einem elektronischem Temperaturfühler (technotron pt100<sup>r</sup>M) durch Einstechen ins Sediment gemessen.

#### Wassergehalt, Trockengewicht und organische Substanz

Nach kräftiger Durchmischung der Sedimentscheiben wurden Proben von  $5\text{cm}^3$  in eine abgeschnittene Einwegspritze abgefüllt und das Gewicht jeder Probe zunächst im nassen Zustand, dann nach mind. 12-stündiger Trocknung bei  $65^\circ\text{C}$  und weiterhin nach mind. 12-stündiger Veraschung bei  $500^\circ\text{C}$  bestimmt. Aus den sich ergebenden Differenzen wurden der Wassergehalt in Prozent vom Feuchtvolumen, das

Trockengewicht und aus dem aschefreien Trockengewicht der Gehalt an organischer Substanz pro Feuchtvolumen berechnet. Der Kohlenstoffgehalt der Probe wurde mit 50% der organischen Substanz angenommen. Die Proben wurden nicht mit Säure vorbehandelt, da der Gehalt an Karbonaten, die sich bei 500° zersetzen, in den untersuchten Sedimenten vernachlässigbar gering ist.

#### Redoxpotential

Im Labor wurde das Redoxpotential des Sedimentes mit einer Platin-Einstabmeßkette der Firma Ingold gemessen. Die Meßspitze hatte eine Länge von 0.5cm. Bestimmt wurde das Redoxpotential im Wasser dicht über der Sedimentoberfläche des Sedimentkernes und im Sediment bis in eine Tiefe von mind. 6cm.

#### "Protein"

Der Gehalt an "Protein" im Sediment wurde nach der Methode von Lowry et.al. (1951) bestimmt und mit Hilfe von Wassergehalt und Trockengewicht auf den Gehalt pro Volumen berechnet.

Dabei werden auch schwerabbaubare Stickstoffverbindungen erfaßt, z.B. Huminsäuren (Povoledo und Gerletti 1964); da die Methode im Wesentlichen alle org. C-N Verbindungen erfaßt, soll das Wort "Protein" daher im Folgenden als die Summe von Protein und vielen schwerabbaubaren Verbindungen verstanden werden.

Die Sedimentproben wurden im getrockneten und gemörserten Zustand bis zur Analyse aufbewahrt. Gemessen wurde der "Proteingehalt" von 10-100mg Sediment. Verluste durch Lagerung konnten nicht festgestellt werden.

Parallele Messungen des durch Proteasen innerhalb 12h abbaubaren Proteins (Mayer et al., 1986; Proteinfärbung mit Coomassie Blue (Serva Blue G-250<sup>TM</sup>) nach Setchell, 1981) ergaben, daß dieses auf der 19m Station nur etwa 10% des nach Lowry gemessenen "Proteins" repräsentiert.

## Chlorophyll\_a

Die Proben (je  $1\text{cm}^3$ ) für die Pigmentmessung wurden bis zur Bearbeitung tiefgefroren. Nach dem Auftauen wurde das Sediment mit 9ml Aceton versetzt und homogenisiert. Der Überstand wurde abzentrifugiert und der Pigmentgehalt photometrisch bestimmt (UNESCO 1966). Die Werte wurden auf  $1\text{m}^{-2}$  des oberen Sediment Zentimeters hochgerechnet.

## Adenosintriphosphat (ATP)

Direkt nach den Ausfahrten wurde ATP mit kochendem Tris-Puffer nach der Methode von Pamatmat et.al. (1981) aus je  $1\text{cm}^3$  feuchtem Sediment extrahiert. Die Messung erfolgte nach der Methode von Witzel (1979). Die Wiederfundrate wurde nach Graf (1979) bestimmt. ATP-Meßwerte, die mehr als 100% vom Mittelwert abwichen, wurden verworfen.

## Sauerstoffzehrung

Zur Messung der Sauerstoffzehrung wurden Sedimentkerne ( $\emptyset 10\text{cm}$ ) mit dem das Sediment überlagernden Wasser ausgestochen und luftdicht verschlossen (Beschreibung der Rohre bei Forster 1985). Im Labor wurde aus diesem Wasser eine Probe gezogen und die Sauerstoffkonzentration nach Winkler (1888; aus Grasshoff 1976) bestimmt. Unter vorsichtigem Rühren des Wassers wurden die Kerne 12 Stunden gehältert und die dann im Wasser verbleibende Sauerstoffkonzentration bestimmt. Aus der Differenz der Sauerstoffmengen und dem Volumen des Kontaktwassers wurde die Gesamtzehrung errechnet. Da die Sauerstoffzehrung im Wasser im Vergleich zu der im Sediment vernachlässigbar gering ist, wurde die gemessene Sauerstoffzehrung als Maß für den Sauerstoffverbrauch im Sediment gewertet. Ein Nachteil dieser Methode besteht in dem nicht kontrollierbaren Austausch des Wassers über dem Sediment mit dem Wasser außerhalb, während der Kastengreifer gehievt wird. Gelangt dabei zusätzlich Sauerstoff ins Kontaktwasser kann die gemessene Sauerstoffzehrung höher sein als die in situ.

## Wärmeproduktion

Die Wärmeproduktion in den Sedimenten wurde mit einem Doppelzwillingskalorimeter (Pamatmat 1978) gemessen. Es wurde die Wärmeproduktion einer Sedimentscheibe von 2cm Dicke und einem Durchmesser von 8cm gemessen. Bei rein anoxischen Sedimenten wurde eine Angleichzeit von 8 Stunden zugrunde gelegt, bei Oberflächensedimenten betrug die Angleichzeit 5 Stunden.

## In der Wassersäule gemessene Parameter

Die Temperatur und der Salzgehalt der Wassersäule wurden an der 17m und an der 28m Station mit einer Yellowspring-Sonde gemessen. Aus den Salzgehalts- und Temperaturdaten wurde die Dichte bestimmt (Millero et.al. 1976).

Im Sperrgebiet bei Bokniseck war in 16m Tiefe eine Sinkstofffalle verankert, deren Fänge für Analysen der Sedimentationsraten ausgewertet wurden. Leider ging diese Sinkstofffalle mehrfach durch Eisgang bzw. durch Fischereiaktivitäten verloren, so daß die Sedimentationsraten nicht kontinuierlich erfaßt werden konnten.

Sedimentiertes Material wurde von M. Sommer (Institut f. Meereskunde, Kiel ; Diss. in Vorb.) auf den Gehalt an Chlorophyll\_a (als Chlorophylläquivalente) analysiert. Die Messungen in der Wassersäule wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen des Institutes für Meereskunde Kiel gemeinsam durchgeführt und werden in unterschiedlichen Veröffentlichungen publiziert.

## 2.4.Datenverarbeitung und Trendanalysen

Die Datenverarbeitung erfolgte auf einem Atari-ST<sup>TM</sup> mit dem Datenbanksystem Adimens<sup>TM</sup> und der Tabellenkalkulation Vip professional<sup>TM</sup>. Die Grafiken wurden mit dem Programm Pgraph<sup>TM</sup> erstellt und mit Gemdraw<sup>TM</sup> bearbeitet.

Eine lineare Regressionsanalyse erfolgte ebenfalls unter Benutzung von Pgraph<sup>TM</sup> und mit dem Programm Microstat<sup>TM</sup> auf einem IBM-PC<sup>TM</sup>.

Berechnet wurden lineare Regressionen der Mittelwerte für den Zeitraum Anfang Juni 1985 bis Ende Mai 1987. Die Signifikanz der Korrelation wurde auf dem 95%-Niveau getestet (Sokal und Rohlf, 1981).

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Umweltparameter

##### 3.1.1. Windgeschwindigkeit

Die Wassersäule der Kieler Bucht ist im Jahresablauf häufig stabil geschichtet. Neben einer thermischen Sprungschicht in geringer Tiefe (meist zwischen 8 und 14m) tritt in den tieferen Bereichen häufig noch eine haline Sprungschicht auf. Die thermische Sprungschicht löst sich mit sinkenden Lufttemperaturen im Winter auf. Die Frühjahrserwärmung führt dann zu einer erneuten Schichtung, die in der Wassersäule durch das Auftreten der Frühlings-Phytoplanktonblüten angezeigt wird. Die Temperatursprungschicht verhindert im Sommer Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser weitgehend. Eine Verarmung der oberen warmen Deckschicht an Nährsalzen im Sommer ist die Folge. Diese Schichtung kann durch windinduzierte Turbulenz gestört werden. Das salzreiche Bodenwasser im Rinnensystem der Kieler Bucht kommt aus den Belten. Dieser Zufluß wird ebenfalls durch die Windverhältnisse beeinflusst (Weigelt 1988). Der Wind spielt somit eine bedeutende Rolle für Transportprozesse: sowohl für die vertikale Vermischung als auch für die horizontale Advektion.

Die Windgeschwindigkeiten gemessen am Flughafen Kiel Holtenau (zur Verfügung gestellt von Frau Baucus, Deutscher Wetterdienst) wurden ausgewertet. An dieser Landstation werden wegen der Bodentopographie geringere Windstärken gemessen, als sie auf See herrschen. Die in Abb.3 dargestellten Windstärken sind daher lediglich ein relatives Maß für die Windverhältnisse auf See.

Das Auftreten von Starkwindlagen mit Windgeschwindigkeiten von mehr als  $7\text{ms}^{-1}$  ist deutlich auf die Zeit von November bis April beschränkt. Januar bis April 1986 war deutlich windiger als der Frühling 1987. Im Vergleich zu 1985 wurden im Sommer 1986 selten Windgeschwindigkeiten über  $5\text{ms}^{-1}$  gemessen. In den Monaten Mai bis Oktober 1986 waren



dauert durchschnittlich 40 Tage (bei Laboe).

Während meiner Untersuchung trat in beiden Wintern 1985/86 und 1986/87 Eisbildung auf. Die Eisbildung setzte jeweils Anfang Februar ein und behinderte im Winter 1985/86 noch Ende März die Probennahme. Im Winter 1986/87 war bereits Ende Februar eine Probennahme wieder möglich. Treibende Eisfelder konnten aber auch später noch beobachtet werden.

### 3.1.3. Temperatur, Salzgehalt und Dichte in der Wassersäule

Eine resuspendierte Partikel wird, sofern sie ihr spezifisches Gewicht nicht ändert, nicht in Bereiche der Wassersäule gelangen, die eine wesentlich geringere Dichte haben. Unterschiedliche Dichten des Wassers (z.B. an den Sprungschichten) können die Ausbreitung von resuspendiertem Material daher sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung beeinflussen. Ein Transport resuspendierten Materials von flacheren zu tieferen Stationen ist bei geeigneter Strömung durch Sedimentation durch die Sprungschicht hindurch auch bei geschichteter Wassersäule möglich. Der umgekehrte Transport aus der Tiefe in Richtung flacherer Station ist dagegen nur bei besonders geeigneten Verhältnissen möglich. Die Wassersäule auf der 28m Station zeichnet sich über längere Zeiträume während des Jahres durch eine thermische und eine tieferliegende haline Sprungschicht aus. Die Bedingungen für einen Transport von resuspendiertem Material zu den flacheren Stationen sind daher ungünstig.

Die Wassertemperatur in der Kieler Bucht unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Im Sommer sind Oberflächentemperaturen von über 20°C möglich, unter der thermischen Sprungschicht erreichen sie selten mehr als 15°C. Im Winter können die Temperaturen in der gesamten Wassersäule unter 0°C sinken. Der Salzgehalt liegt an der Oberfläche meist zwischen 12 und 17 \*10<sup>-3</sup> und kann in den Rinnen über 24\*10<sup>-3</sup> erreichen (Siedler und Hatje, 1974).

Bei Abkühlung im Winter vermischen sich durch thermische Konvektion die verschiedenen Wassermassen. Sie nehmen nach vollständiger Durchmischung einen ihren Quantitäten

entsprechenden mittleren Salzgehalt bei tiefen Temperaturen an.

Werden alle Meßwerte für Temperatur und Salzgehalt in einem T/S-Diagramm eingetragen, ergibt sich eine charakteristische Verteilung. Von links oben (Oberflächenwasser) bis rechts in der Mitte (Tiefenwasser) ist der Bereich der sommerlichen Verteilung zu erkennen. Von rechts in der Mitte bis in den unteren Teil des Diagramms liegt ein Bereich, in dem vorwiegend Daten aus dem Winter aufgetragen sind. Dieses Verteilungsmuster läßt sich sowohl im Diagramm der 17m Station (Abb.4) als auch in dem der 28m Station (Abb.5) finden. Auf dem Diagramm der 17m Station sind allerdings im Bereich mittlerer Temperatur und hohen Salzgehaltes nur wenige Eintragungen. Selten wurden Salzgehalte  $>24 \cdot 10^{-3}$  gemessen. Diese hohen Salzgehalte treten häufiger nur im tieferen Bereich der 28m Station auf und repräsentieren das in das Rinnensystem eingeflossene Tiefenwasser.

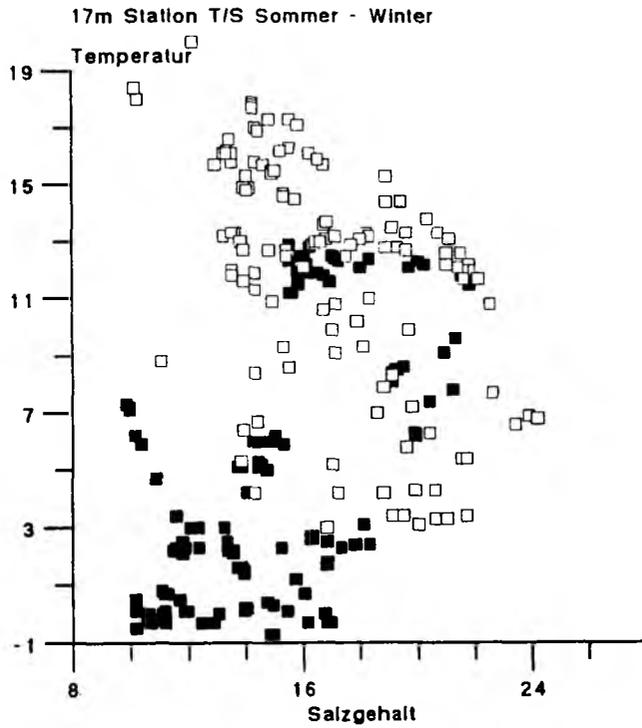


Abb.4 Temperatur- und Salzgehaltsdiagramm (T/S-Diagramm) alle Daten der 17m Station, November bis März dunkel, April bis Oktober hell

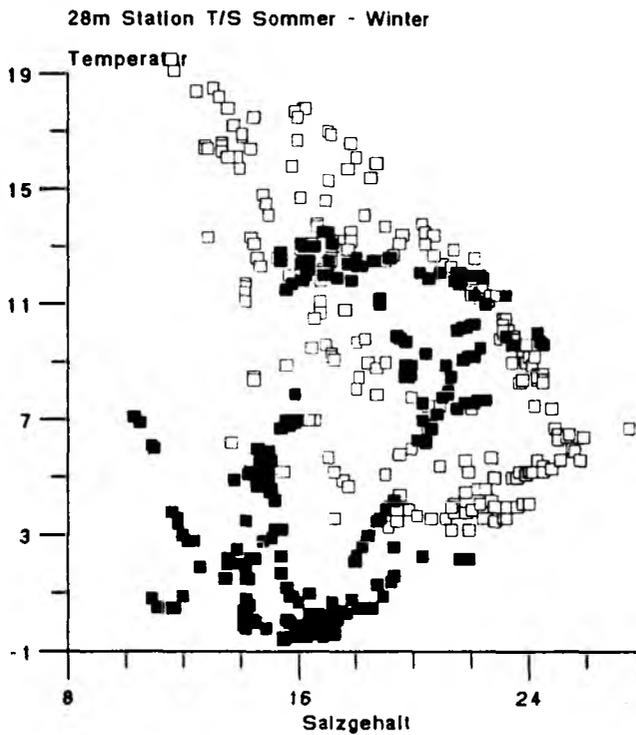


Abb.5 T/S-Diagramm, alle Daten der 28m Station, November bis März dunkel, April bis Oktober hell

In Abb.6 ist der Salzgehalt in 16m Tiefe, also 1m über dem Boden der 17m Station, über die Zeit aufgetragen, analog dazu in Abb.7 der Salzgehalt in 26m Tiefe (2m über dem Boden) und an der Wasseroberfläche der 28m Station. Der Salzgehalt des Bodenwassers unterliegt ebenfalls starken jahreszeitlichen Schwankungen. Deutlich ist an der 17m Station (Abb.6) ein Anstieg zu erkennen, der jeweils etwa im April einsetzt und 1985 bis Juli sowie 1986 bis August anhält. 1985 blieb der Salzgehalt bis in den Oktober hinein relativ hoch und nahm dann kontinuierlich bis April 1986 ab. 1986 ist eine geringfügige Abnahme bis Dezember erkennbar, im Januar 1987 sank der Salzgehalt bis April schnell ab.

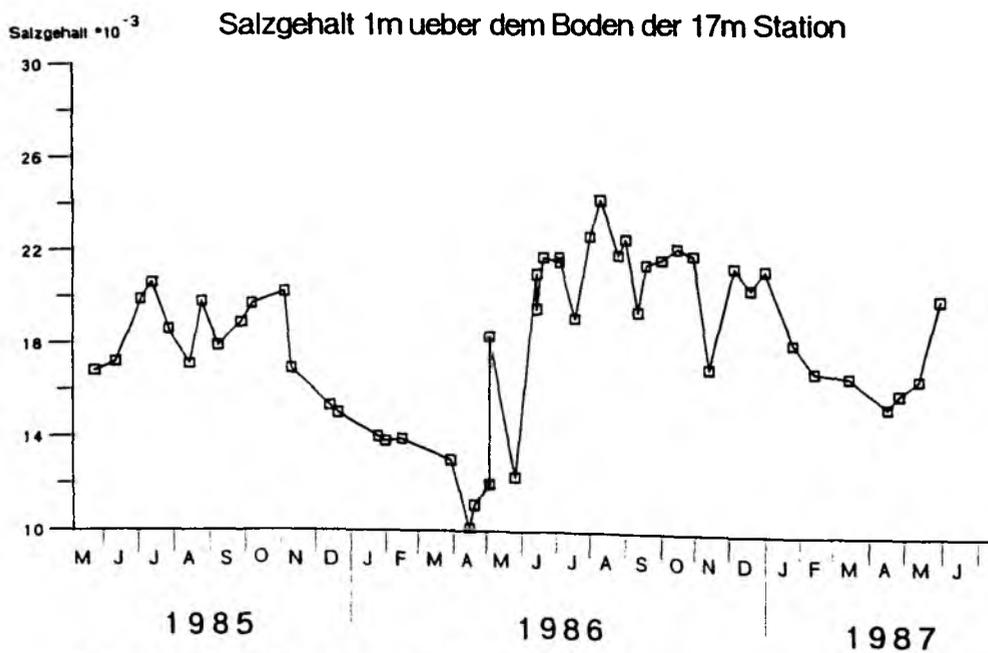


Abb.6 Salzgehalt 1m über dem Boden an der 17m Station

Bei insgesamt höheren Salzgehalten ist der Verlauf im Bodenwasser auf der 28m Station ähnlich (Abb.7). Der Salzgehalt sank von Oktober 1985 bis Februar 1986 und stieg erst Ende Mai stark an. Die Abnahme ist ab August fast kontinuierlich. Prägend für den Jahresgang ist der Anstieg

des Salzgehaltes im Frühsommer. Einzelne kurzfristige Änderungen sind erkennbar. Verantwortlich dafür können drehende Strömungen sein, die eingeflossenes Tiefenwasser nach einer gewissen Verweildauer wieder abtransportieren (ähnliche Beobachtungen in Noji et al., 1986). Die mittlere Strömung in Bodennähe weist an den Stationen in 12m, 17m und 19m Tiefe nach einer Modellrechnung von Boehlich (1987) im Sommer nach Nordwesten, an der 28m Station nach Norden bis Nordosten.

### Salzgehalt 28m Station

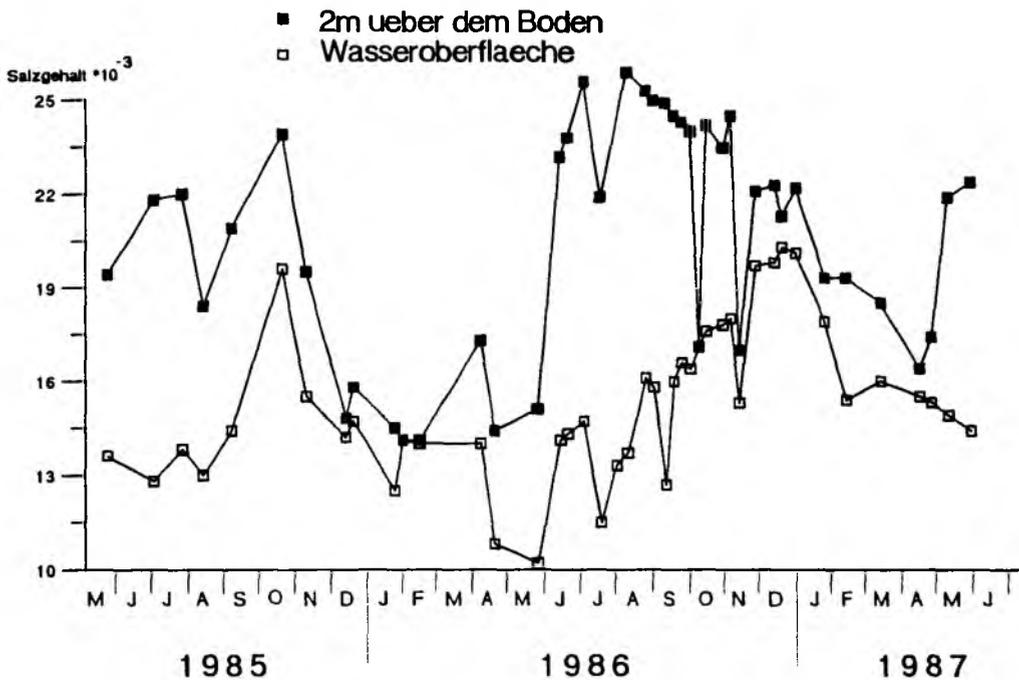


Abb.7 Salzgehalt an der Wasseroberfläche und 2m über dem Boden an der 28m Station

An der Wasseroberfläche waren die Schwankungen weniger ausgeprägt. Bis Ende Mai 1986 sank der Salzgehalt fast parallel zu dem im Bodenwasser. Ab Juni stieg der Salzgehalt im Oberflächenwasser fast kontinuierlich, während er im Bodenwasser bereits wieder fiel. Er erreichte im Dezember fast die Höhe des Salzgehaltes des Bodenwassers. Ab Januar 1987 sanken an der Wasseroberfläche und in Bodennähe die Salzgehalte, am Bodne bis Anfang Mai, an der Oberfläche bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes.

Die Dichten des Bodenwassers der 17m und der 28m Station werden in Abb. 8 dargestellt. Bis Anfang November 1985 war die Dichte des Wassers in 26m Tiefe deutlich höher als in 16m Tiefe, von November bis Anfang April 1986 waren die Dichten sehr ähnlich. Zu dieser Zeit kann ein Transport von Partikeln aus der Rinne auf die flachere 16m-Station stattgefunden haben. Ab April setzte die stabile Schichtung der Wassersäule ein, Austauschprozesse waren damit erschwert. Erst Mitte November 1986 wurde in beiden Tiefen nahezu gleich große Dichten gemessen. Im Winter 1986/87 blieben die Dichten in 16m und 26m Tiefe nur zeitlich begrenzt sehr ähnlich. Meist waren auch im Winter deutlich unterschiedliche Wasserkörper auf beiden Stationen vorhanden.

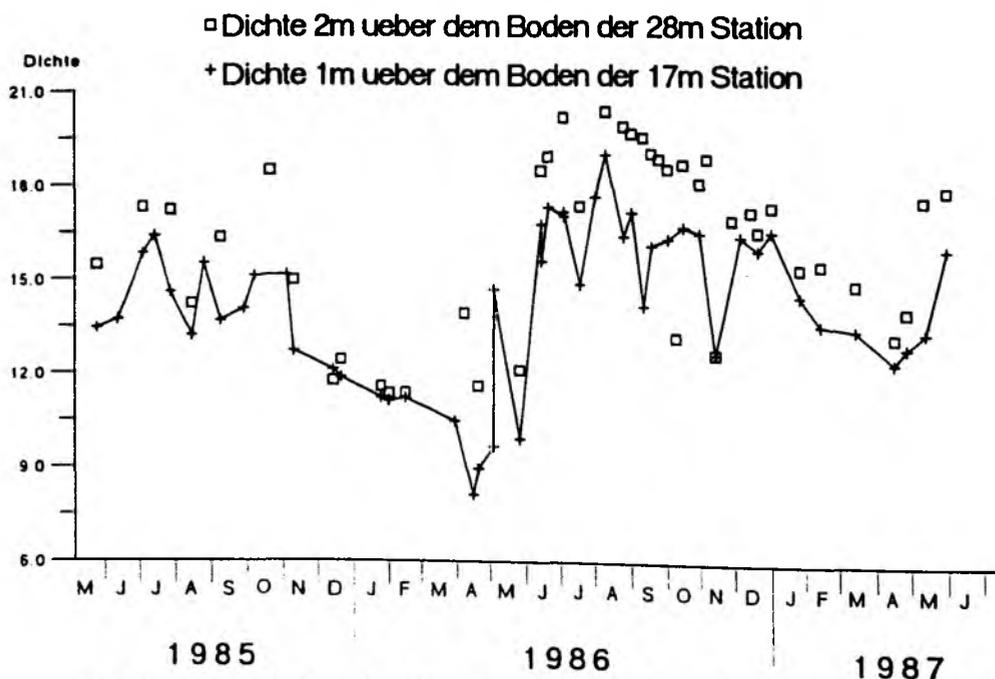


Abb.8 Dichte des Wassers 2m ueber dem Boden an der 28m Station und 1m ueber dem Boden an der 17m Station

### 3.2. Chlorophyll a Äquivalente in der Sinkstofffalle

Die Sedimentation von Phytoplankton ist die wichtigste Nahrungsgrundlage für das Benthos unterhalb der Dichtesprungschicht. Der Eintrag von losgerissenen Makrophyten ist, auf die gesamte Fläche der Kieler Bucht bezogen, weit weniger bedeutend (Abele, 1988).

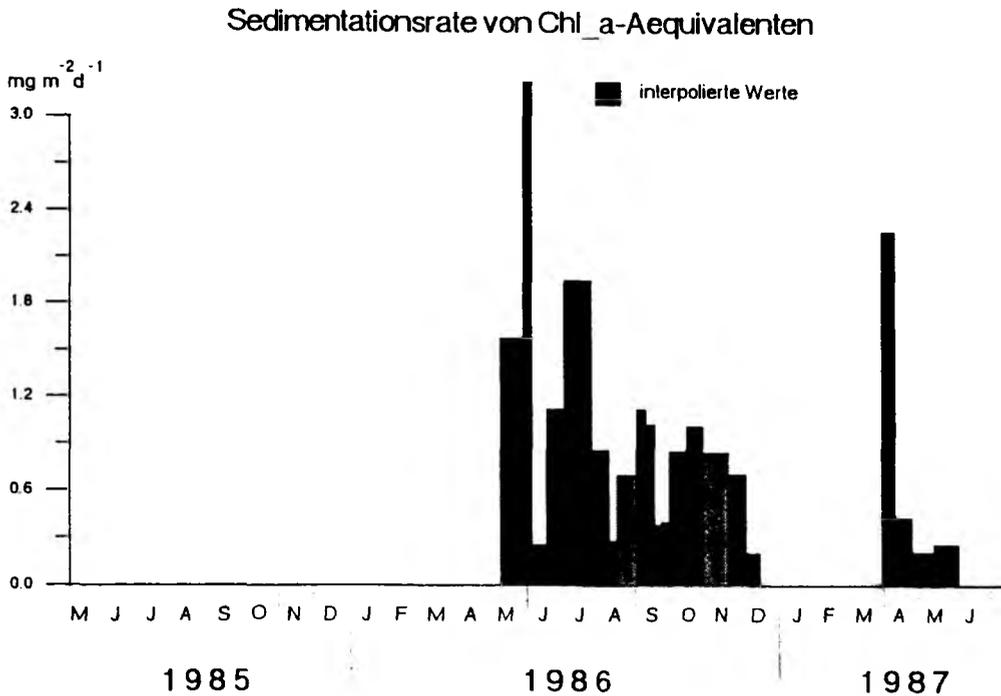


Abb.9 Sedimentationsrate von Chlorophyll<sub>a</sub>-Äquivalenten gemessen mit der Sinkstofffalle in Bökniseck (nach Sommer in Vorb.)

Es liegen Daten über die sedimentierten Chlorophyll-Äquivalente von Mai 1986 bis zum Ende der Untersuchung vor (M.Sommer in Vorb.), unterbrochen durch Ausfallszeiten durch den Verlust der Sinkstofffalle (Abb.9). Im Jahr 1986 wurden von Ende Mai bis Anfang Juni sehr hohe Sedimentationsraten für Chlorophyll ermittelt. Darauf folgen zwei Wochen mit sehr niedriger Sedimentation. In der zweiten Hälfte des Juni war die Chlorophyllsedimentation erneut hoch. Im Sommer war sie relativ gering, und erst im September folgte eine Periode verhältnismäßig hoher Sedimentationsraten, die bis in den Dezember anhielt. Wegen Eisbedeckung konnte erst im

April 1987 wieder eine Sinkstofffalle ausgebracht werden. Bereits die erste Meßperiode vom 30.3. bis 9.4.1987 lieferte die höchsten Sedimentationsraten des Frühjahrs 1987. Ab 23.4.1987 war die Sedimentation von Chlorophyll\_a wieder sehr gering. Für die Zeit von Mai 1986 bis Dezember 1986 läßt sich, unter Interpolation der fehlenden Werte, von einer Gesamtsedimentation von etwa  $0.22\text{gm}^{-2}$  Chlorophyll\_a in die Sinkstofffalle ausgehen.

### 3.3.Ergebnisse der im Sediment gemessenen Parameter

#### 3.3.1.Sedimenttemperatur

Die Sedimenttemperaturen sind durch die geringe Tiefe der Kieler Bucht sehr variabel und beeinflussen daher in starkem Maße biologische Prozesse im Benthos. Die höchsten Temperaturen wurden auf allen Stationen zwischen August und Dezember gemessen. Danach fallen die Temperaturen schnell auf Winterwerte ab und steigen erst im April - Mai wieder an. Auf der 12m und der 17m Station (Abb.10 und Abb.11) wurden im Sommer Temperaturen von etwa  $15^{\circ}$  gemessen, die Winterwerte lagen bei etwa  $0^{\circ}\text{C}$ , wobei das Maximum und das Minimum auf der 12m Station früher erreicht wurden als auf der 17m Station. Auf der 19m Station blieben die Sommertemperaturen (Abb.12) unter  $13^{\circ}\text{C}$ , die Wintertemperaturen deutlich über  $0^{\circ}$ . Auf der 28m Station (Abb.13) lagen die Sommerwerte unter  $11^{\circ}\text{C}$  und die Winterwerte über  $0^{\circ}$ . Das Maximum wurde auf der 28m Station im Jahr 1986 erst im Dezember erreicht und das Minimum im Jahr 1987 erst Ende April.

### Sedimenttemperatur der 12 m Station

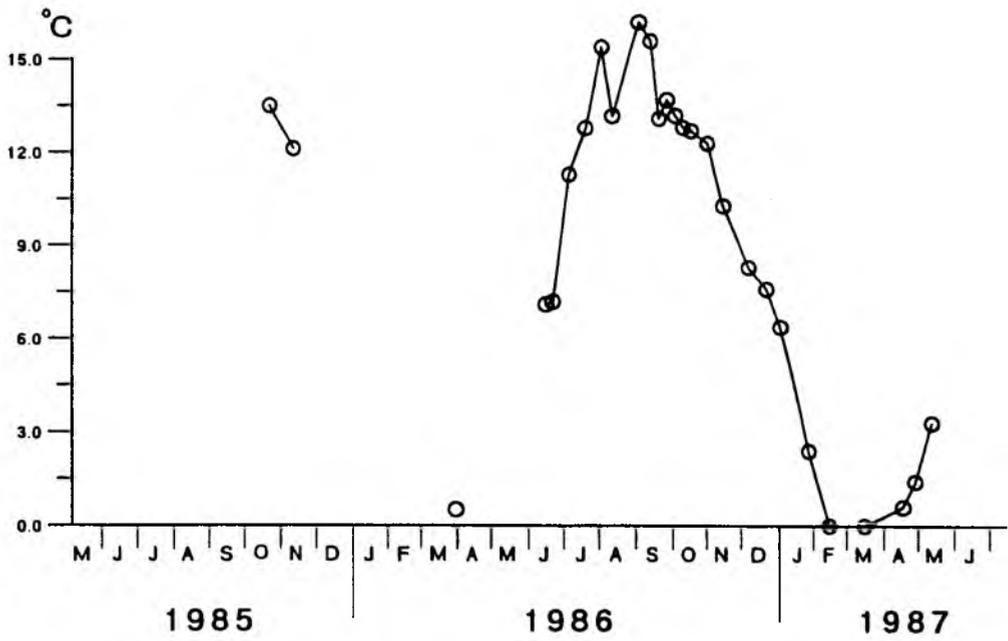


Abb.10 Sedimenttemperatur der 12m Station

### Sedimenttemperatur der 17 m Station

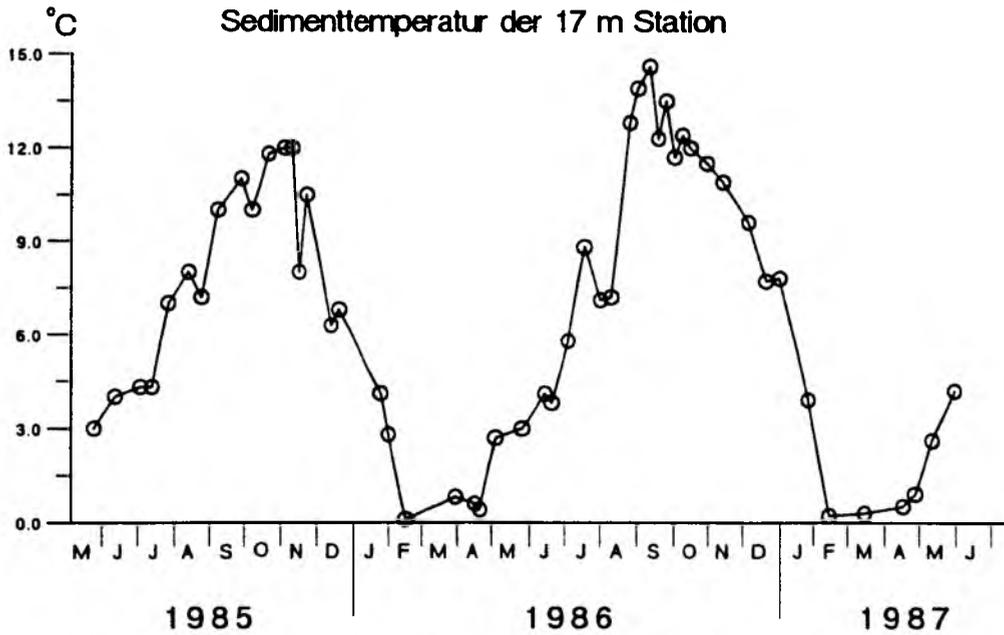


Abb.11 Sedimenttemperatur der 17m Station



Aus den jahreszeitlichen Schwankungen der Sedimenttemperaturen ist erkennbar, daß die Frühjahrsblüten zu einer Zeit (normalerweise zwischen Mitte Februar bis Ende April) sedimentieren, zu der die Sedimenttemperaturen kaum über ihren niedrigsten Wert gestiegen sind. Dagegen sind die Temperaturen oftmals im Winter, wenn wegen Lichtmangel nur geringe Primärproduktion stattfindet, noch relativ hoch. In der Zeit, in der ein großer Anteil der jährlichen Sedimentation von Phytoplankton stattfindet, herrschen die schlechtesten Bedingungen für ihren Abbau hinsichtlich der Temperatur.

### 3.3.2. Wassergehalt

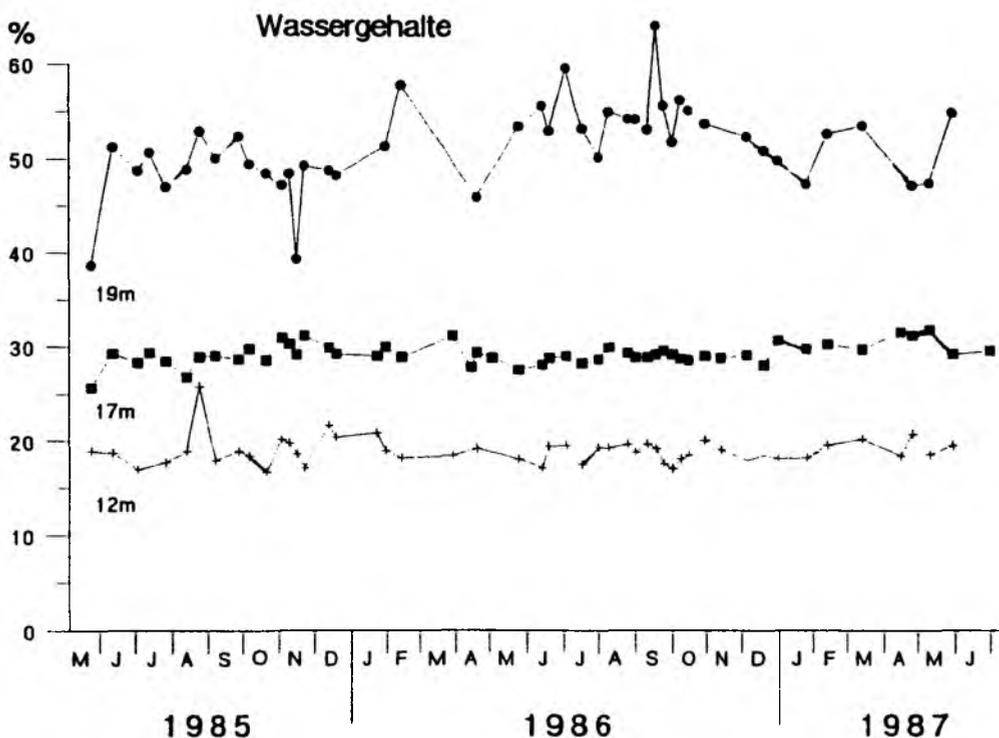


Abb.14 Wassergehalte der Sedimente an den Stationen 12m, 17m und 19m in % vom Feuchtvolumen (Mittelwert der Sedimentschicht 0-4cm)

Wie aus der Abb.14 zu ersehen ist, unterscheiden sich die Wassergehalte der verschiedenen Sedimenttypen beträchtlich. Der mittlere Wassergehalt liegt auf der 19m Station bei 50%,

auf 17m bei 30% und auf 12m bei 20% vom Feuchtvolumen. Auf 28m Tiefe konnten keine befriedigenden Werte ermittelt werden, die standardisierte Probennahme führte durch den extrem hohen Wassergehalt dieses Sedimentes zu großen Fehlern. Ein Beispiel für die Variabilität des Wassergehaltes, in Abhängigkeit von der Jahreszeit und von der Sedimenttiefe, zeigt Abb.15 mit den Isolinien des Wassergehaltes bis in 4cm Sedimenttiefe auf der 17m Station.

Der Wassergehalt in den tieferen Schichten steigt zum Frühjahr hin an, wenn die niedrigsten Sedimenttemperaturen im Jahr erreicht werden.

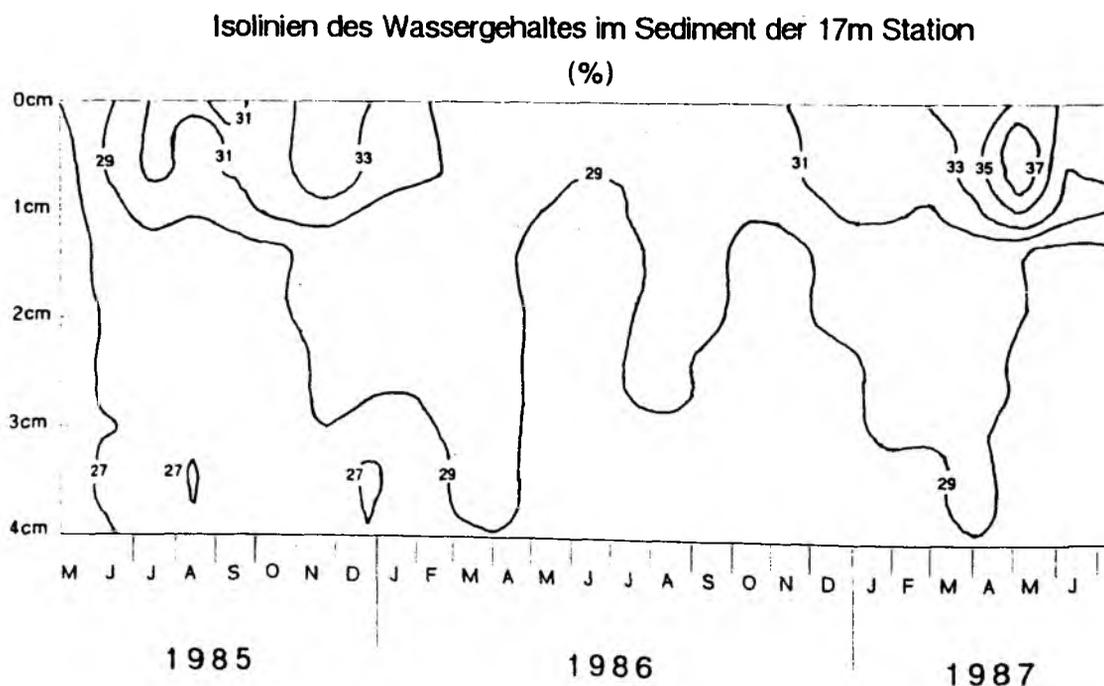


Abb.15 Isolinien des Wassergehaltes in den oberen 4cm des Sedimentes der 17m Station in % vom Feuchtvolumen

Im Untersuchungszeitraum ist der Wassergehalt der Sedimente auf der 17m und der 19m Station signifikant gestiegen (Tab.2). Eine besonders deutliche Steigerung zeigt der Wassergehalt im obersten Sedimentzentimeter auf der 19m Station. Ein signifikanter Trend ist auf der 12m Station nicht feststellbar.

Tab.2

Signifikante Tendenzen einiger ausgewählter Parameter im Untersuchungszeitraum (nach Sokal und Rohlf, 1981; 95% Niveau)

r= Korrelationskoeffizient

n= Anzahl der Proben

<u>Parameter</u>	<u>Station</u>	<u>Sed.tiefe</u>	<u>r</u>	<u>n</u>
C <sub>org</sub>	17m	0-4cm	-0.36	50
"Protein"	12m	0-1cm	-0.44	44
"Protein"	12m	0-4cm	-0.43	44
"Protein"	17m	0-4cm	0.33	48
"Protein"	19m	0-1cm	0.56	44
"Protein"	19m	0-4cm	0.46	44
"Protein"	28m	0-1cm	0.49	47
"Protein"	28m	0-4cm	0.41	46
Wassergehalt	17m	0-4cm	0.29	50
Wassergehalt	19m	0-4cm	0.33	44
"Protein"/C <sub>org</sub>	12m	0-4cm	-0.22	42
"Protein"/C <sub>org</sub>	17m	0-4cm	0.45	47
"Protein"/C <sub>org</sub>	19m	0-4cm	0.42	44

### 3.3.3.Redoxpotential

Das Redoxpotential läßt Rückschlüsse auf die Versorgung des Benthals mit Sauerstoff zu. Ist das Redoxpotential unter 100mV, so wird das Sediment als anoxisch bezeichnet (Jørgensen und Fenchel, 1974).

Die Redoxpotentialmessungen an den Stationen 17m und 28m (Abb.16 und Abb.17) ergeben ähnliche Strukturen, wenn auch die absoluten Werte der Potentiale in den einzelnen Sedimentschichten verschieden hoch waren. Die jeweils höchsten Werte wurden in den Wintermonaten gemessen, wenn die Schichtung des darüberliegenden Wasserkörpers weitgehend aufgelöst ist.

### Redoxpotential (mV) 17m Station

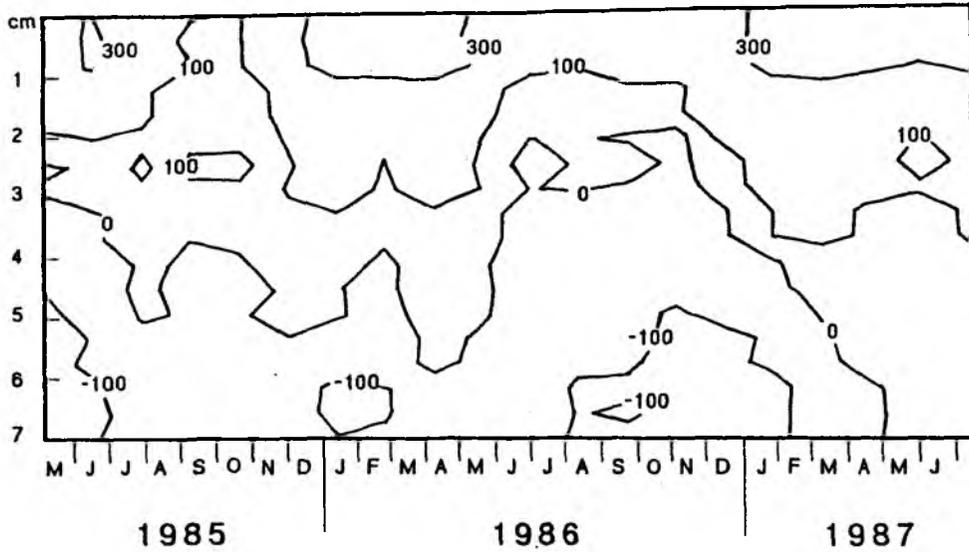


Abb.16 Isolinien des Redoxpotentials in den oberen 7cm des Sedimentes der 17m Station

### Redoxpotential (mV) 28m Station

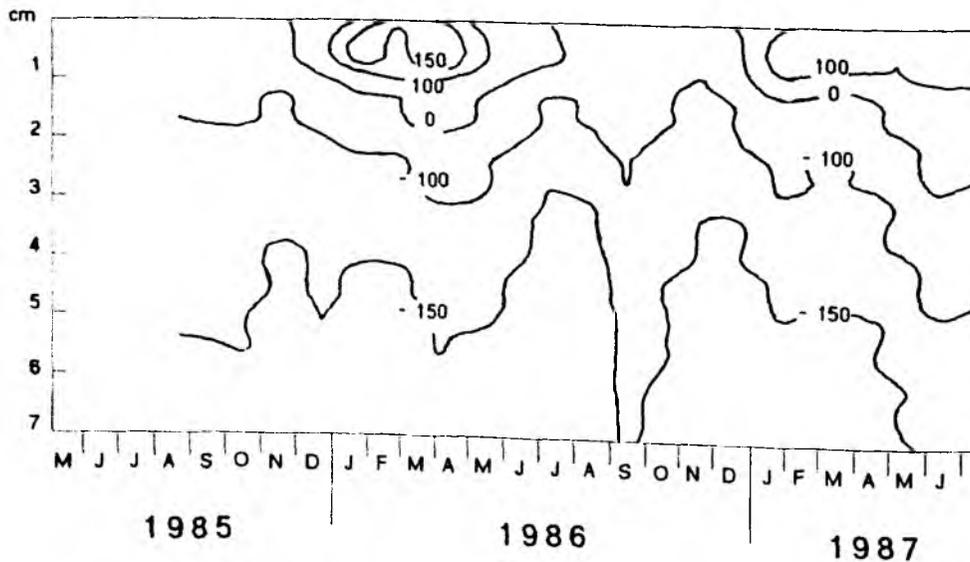


Abb.17 Isolinien des Redoxpotentials in den oberen 7cm des Sedimentes der 28m Station

Im Winter wurden auf der 17m Station im obersten Sedimentzentimeter Werte über 300 mV gemessen, auf der 28m Station noch Werte von mehr als 100 mV. In den Sommermonaten verringert sich auf beiden Stationen das Redoxpotential beträchtlich. Auf der 17m Station wurden Werte unter 200 mV im obersten Zentimeter gemessen, auf der 28m Station in derselben Schicht Werte kleiner 0 mV.

Die -100 mV Isolinie sinkt auf der 28m Station im Lauf der Meßreihe, wenn auch ungleichmäßig, aus der Schicht 1-2cm bis in die Schicht 4-5cm ab. An der 17m Station ist eine ausgeprägte -100 mV Isolinie nur im Herbst 1987 in Schichten tiefer als 4cm zu erkennen.

Signifikante Trends über den gesamten Untersuchungszeitraum waren bis auf eine Ausnahme nicht zu beobachten. Allein im Zentimeter 0-1 auf der 17m Station war eine Tendenz zu höheren Werten feststellbar.

#### 3.3.4. Chlorophyll a Gehalt

Chlorophyll\_a wird dem Sediment mit der Sedimentation von Phytoplankton bzw. dessen Überresten und durch laterale Advektion verdriftender (erranter) Makrophyten und von Makrophytendetritus zugeführt. In der euphotischen Zone gibt es auch eine Besiedlung mit benthischen Primärproduzenten.

Chlorophyll\_a gilt als relativ labile Verbindung außerhalb lebender Zellen. Via Sedimentation wird dem Sediment zwar fortwährend Chlorophyll\_a zugeführt, aber grössere Mengen sollten nur nach den Phytoplanktonblüten im Frühjahr und Herbst sedimentieren (Smetacek, 1985). Großalgenstücke werden insbesondere im Herbst und Winter verfrachtet (Schomann, 1977). Die benthische Primärproduktion ist nur für die flacheren Stationen (<15m) von Bedeutung, auf tieferen Stationen ist die Energie der sichtbaren Strahlung nur an wenigen Tagen im Jahr für größere Primärproduktion ausreichend (Schulz, 1983; Sommer in Vorb.). Die Chlorophyll\_a Konzentrationen sind auf der 12m Station (Abb.18) ähnlich hoch wie auf der 17m Station (Abb.19). Auf der 12m Station sind in den Sommermonaten mit hoher Lichteinstrahlung ausgeprägte Maxima vorhanden.

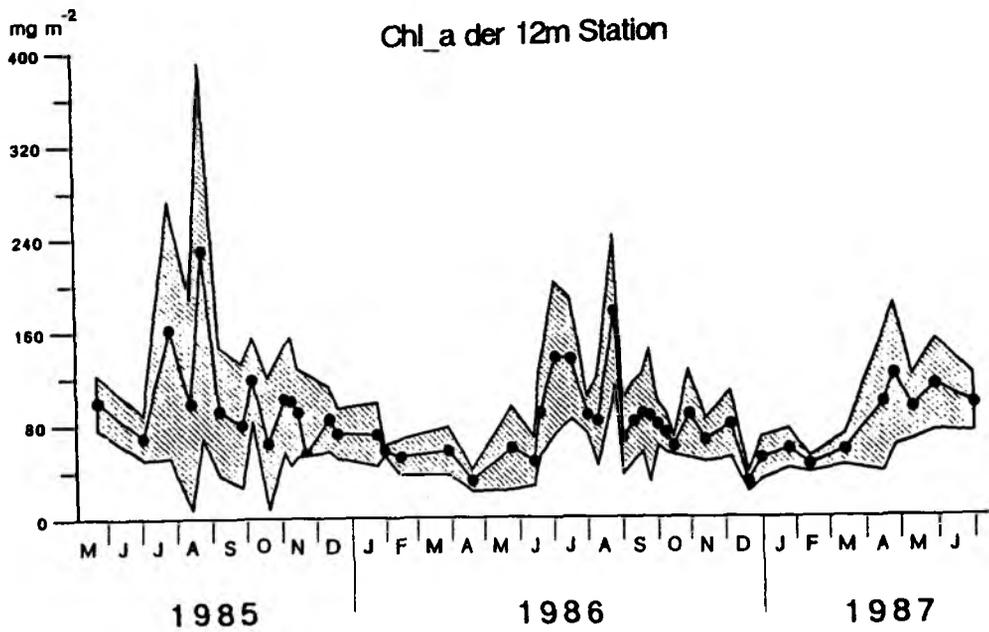


Abb.18 Gehalt an Chlorophyll a im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 12m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

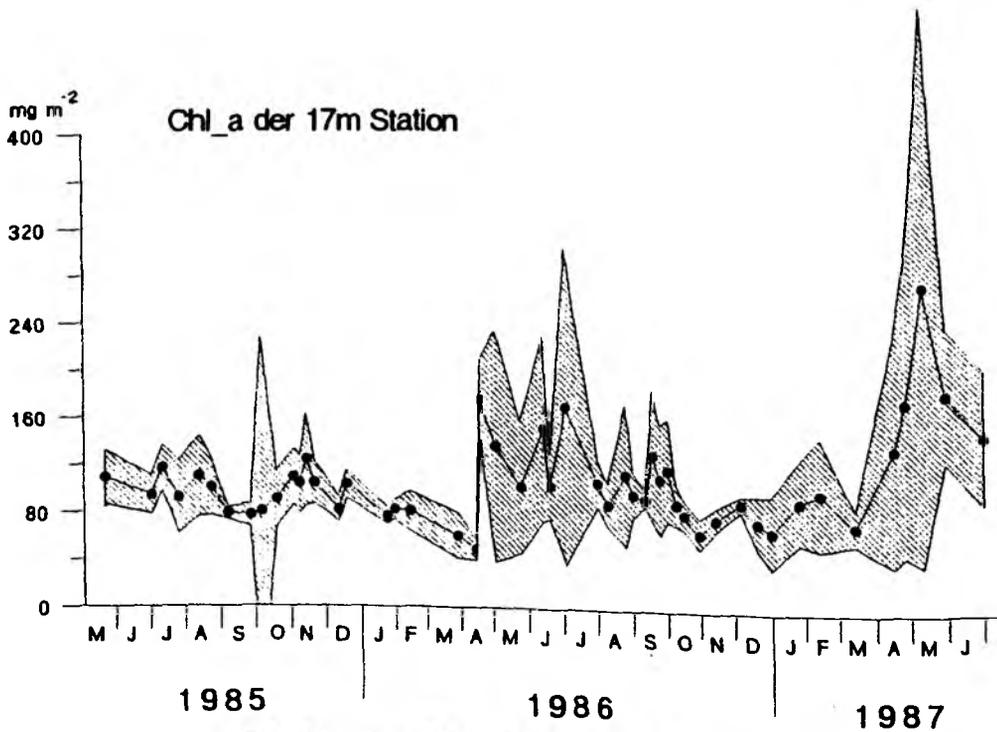


Abb.19 Gehalt an Chlorophyll a im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 17m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

Der Herbst und der Winter sind durch niedrige Werte charakterisiert. Im Frühjahr 1987 stiegen die Chlorophyll\_a Gehalte stark an. Dies wurde im Frühjahr 1986 nicht beobachtet. Der Konfidenzbereich auf 12m ist im Durchschnitt größer als auf 17m, wenn auch nicht so groß wie auf 19m (s.u.).

Auf der 17m Station wurde im Jahr 1985 kein Maximum im Sommer gemessen, die Konzentrationen sanken bis Anfang Oktober und stiegen danach bis zum November an. Der Chlorophyllgehalt sank während des Winters wieder ab, bis zu einem sehr heftigen Anstieg Ende April 1986. Bis Juli blieben die Werte auf einem hohem Niveau, um dann (trotz einiger Zwischenpeaks) bis März 1987 zu sinken. Im April 1987 stieg die Konzentration dann bis zum Mai stark an.

Die Chlorophyll\_a Konzentrationen auf der 19 und 28m Station (Abb.20 und Abb.21) waren etwa gleich hoch und etwa doppelt so hoch wie auf den Stationen 12m und 17m. Der Konfidenzbereich bei 19m ist im Verhältnis zu den flacheren Stationen sehr groß. Der Verlauf der Werte im Jahr 1985 ist gekennzeichnet durch häufige Konzentrationsschwankungen. Im Mittel wurden von Mai bis Oktober 1986 hohe Konzentrationen gemessen, mit einem deutlichen Einbruch im August. Der Chlorophyllgehalt sank danach bis Dezember 1986 stark ab, um dann fast kontinuierlich bis zum Mai 1987 wieder anzusteigen.

Auf 28m ist der Konfidenzbereich geringer, allerdings wurden 10 statt 5 Parallelen gemessen. Vom Beginn der Zeitreihe im Mai 1985 bis zum Februar 1986 sanken die Konzentrationen im Durchschnitt leicht ab. Nur im September und November-Dezember 1985 wurden geringfügig höhere Werte gemessen. Ab April 1986 stieg die Konzentration ähnlich wie auf der 19m Station an. Ebenfalls wurde ein starker Einbruch der Werte mit darauf folgendem erneuten Anstieg im August festgestellt. Entsprechend der 19m Station sanken die Konzentrationen ab Oktober auf der 28m Station deutlich, gefolgt von einem leichten Anstieg bis Mai-Juni 1987.

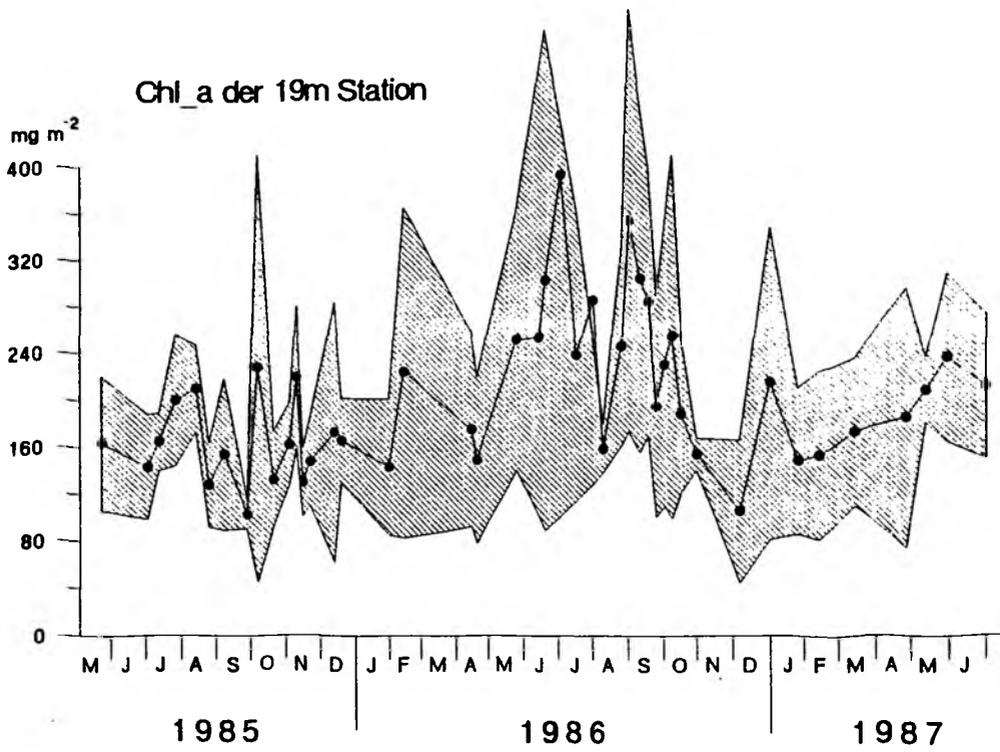


Abb.20 Gehalt an Chlorophyll a im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 19m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

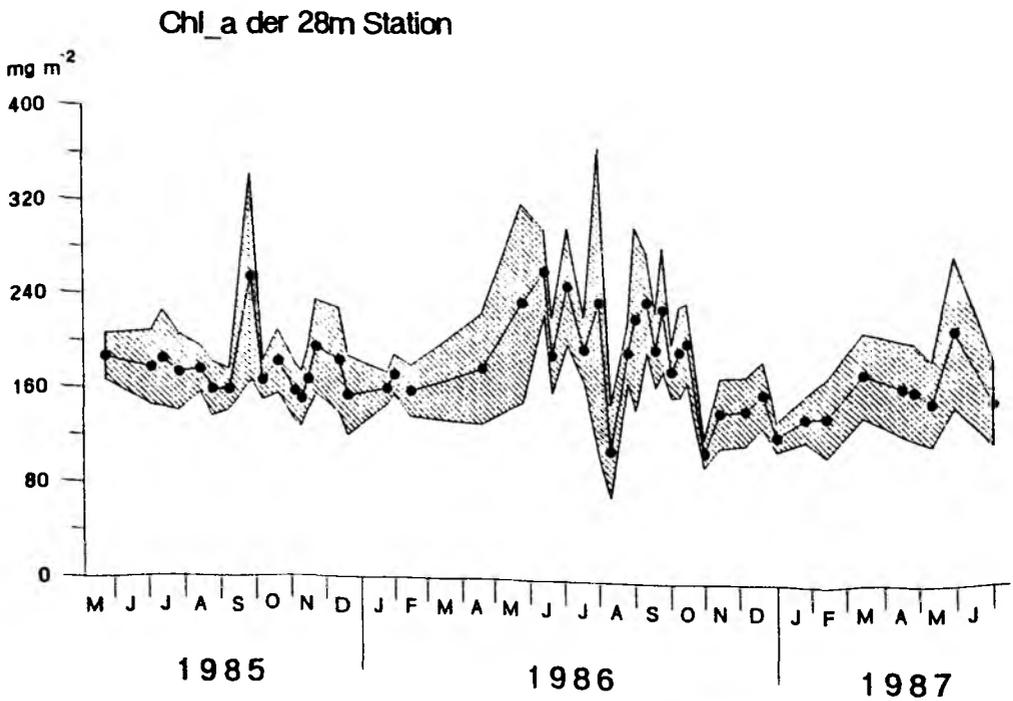


Abb.21 Gehalt an Chlorophyll a im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 28m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

Die lineare Regressionsanalyse ergibt für den gesamten Untersuchungszeitraum auf der 12m Station einen hohen negativen Korrelationskoeffizienten, der jedoch auf dem 95% Niveau nicht signifikant ist. Auf der 17m Station ist der Korrelationskoeffizient positiv, aber nicht signifikant. Der Chlorophyllgehalt im Sediment der 19m Station zeigte eine signifikante Tendenz zu höheren Werten. Die 28m Station weist keine deutlichen Trends auf.

### 3.3.5. Gehalt an organischer Substanz bzw. org. Kohlenstoff

Kohlenstoff liegt im Meeresboden in gelöster und partikulärer Form vor. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur partikulär gebundener Kohlenstoff berücksichtigt.

Der Gehalt des Sedimentes an organisch gebundenem Kohlenstoff unterliegt hauptsächlich Veränderungen durch biologische und physikalische Prozesse. Durch das Zusammenspiel vieler Faktoren in der Zufuhr von Material ins Sediment (Sedimentation, Biodeposition und lateraler Eintrag), bei ebenso variablem Verlust (geologische Sedimentation = dauerhafte Festlegung, Remineralisierung, Bioresuspension und physikalischer Resuspension), ist der Gehalt an Kohlenstoff im Sediment sowohl zeitlich als auch kleinräumig sehr variabel (Rhoads, 1974). Die Aussagen über den Kohlenstoffgehalt in den Sedimenten und seine Änderungen müssen daher mit großer Vorsicht getroffen werden. In der Regel können bestenfalls Tendenzen aufgezeigt werden.

Die Kurven der Gehalte an org. Substanz bzw. Kohlenstoffgehalte ähneln sich auf den Stationen 12m (Abb.22 und Abb.23) und 17m (Abb.24 und Abb.25) während des Untersuchungszeitraumes, allerdings sind die absoluten Gehalte auf 17m etwa 3mal höher als auf 12m. Beiden Stationen gemeinsam ist ein Maximum Ende 1985 und ein Minimum Mitte 1986. Darauf folgt ein Anstieg der Konzentrationen, der aber nicht die Höhe des Jahres 1985 erreicht. Diese Aussagen betreffen sowohl den jeweils obersten Zentimeter Sediment, als auch die über die oberen 4cm des Sedimentes integrierten Werte.

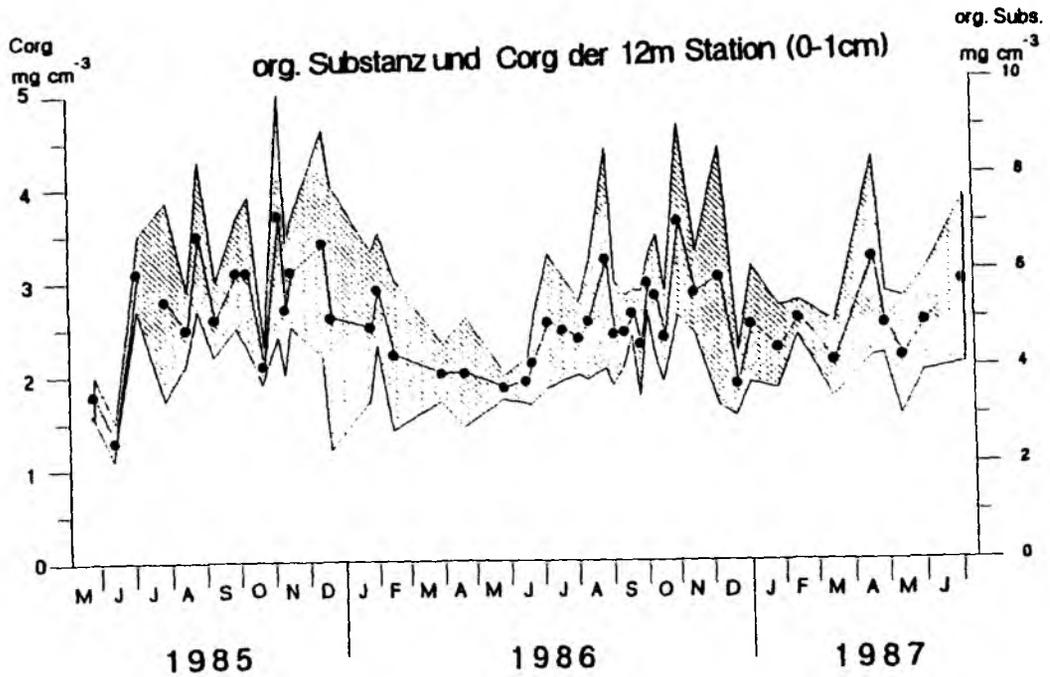


Abb.22 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 12m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

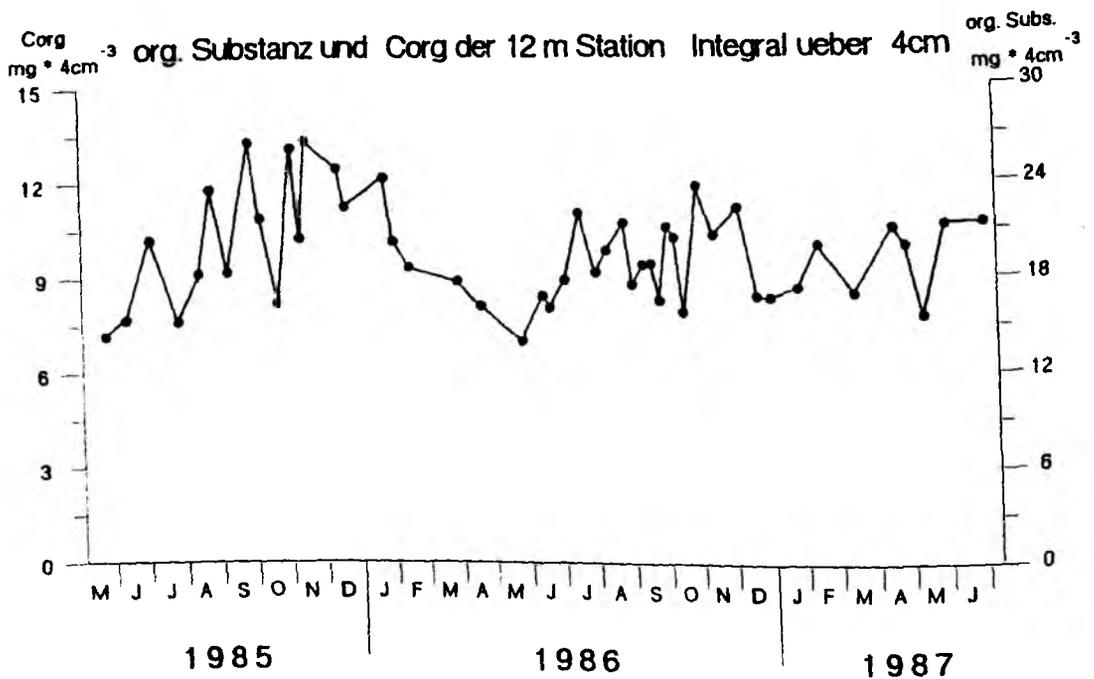


Abb.23 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff integriert ueber die ersten 4cm des Sedimentes der Station 12m

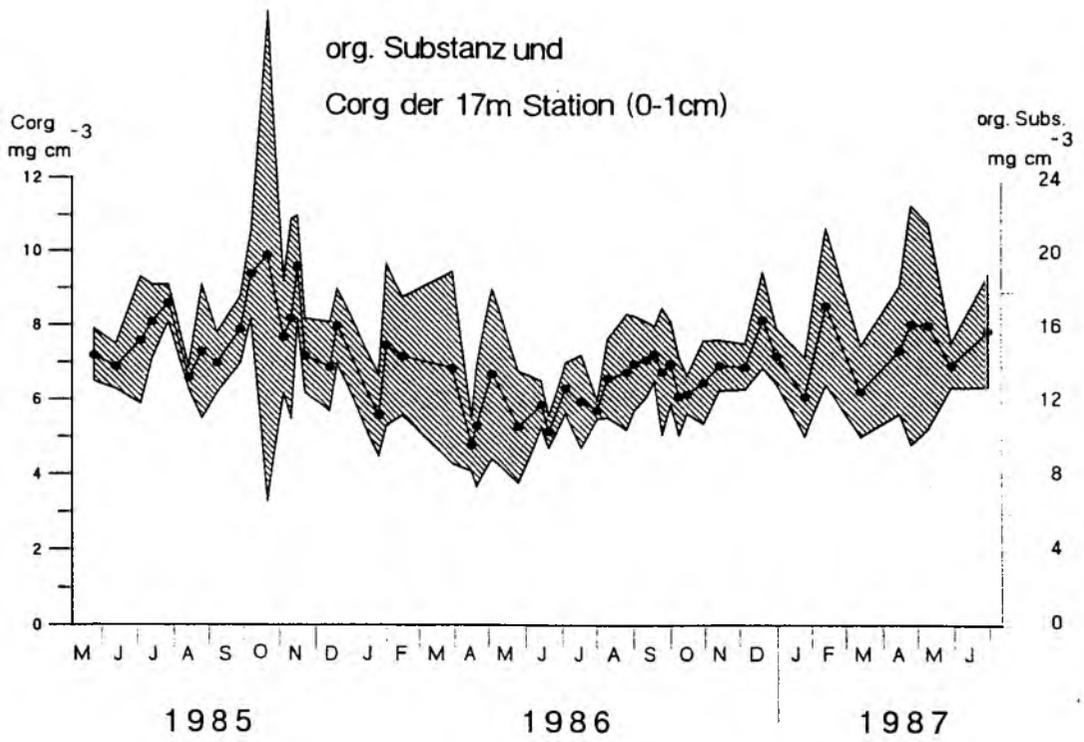


Abb.24 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 17m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

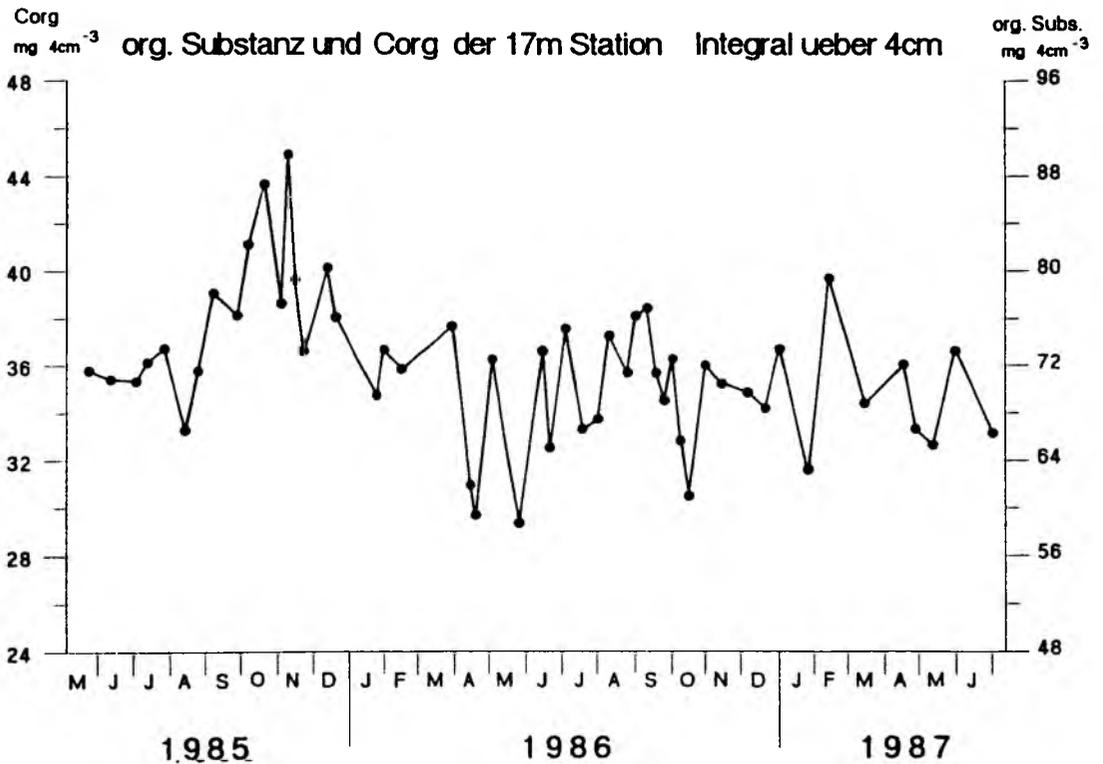


Abb.25 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff integriert über die ersten 4cm des Sedimentes der Station 17m

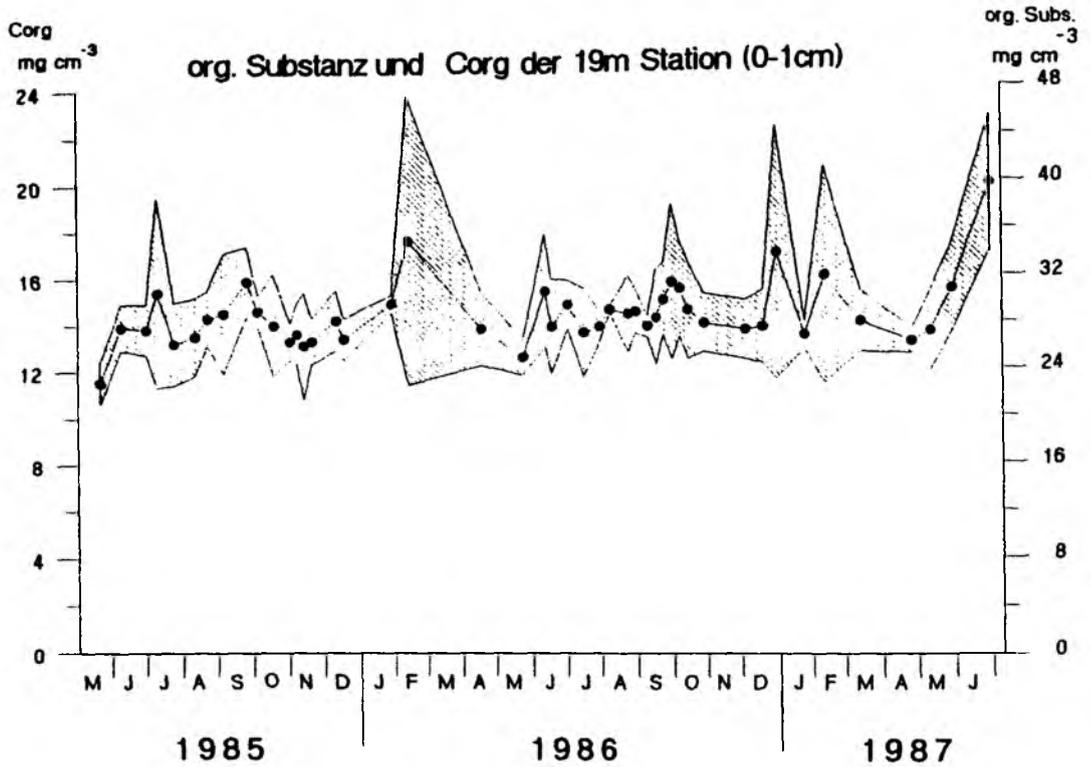


Abb.26 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff im obersten Sedimenthorizont (0-1cm) der 19m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

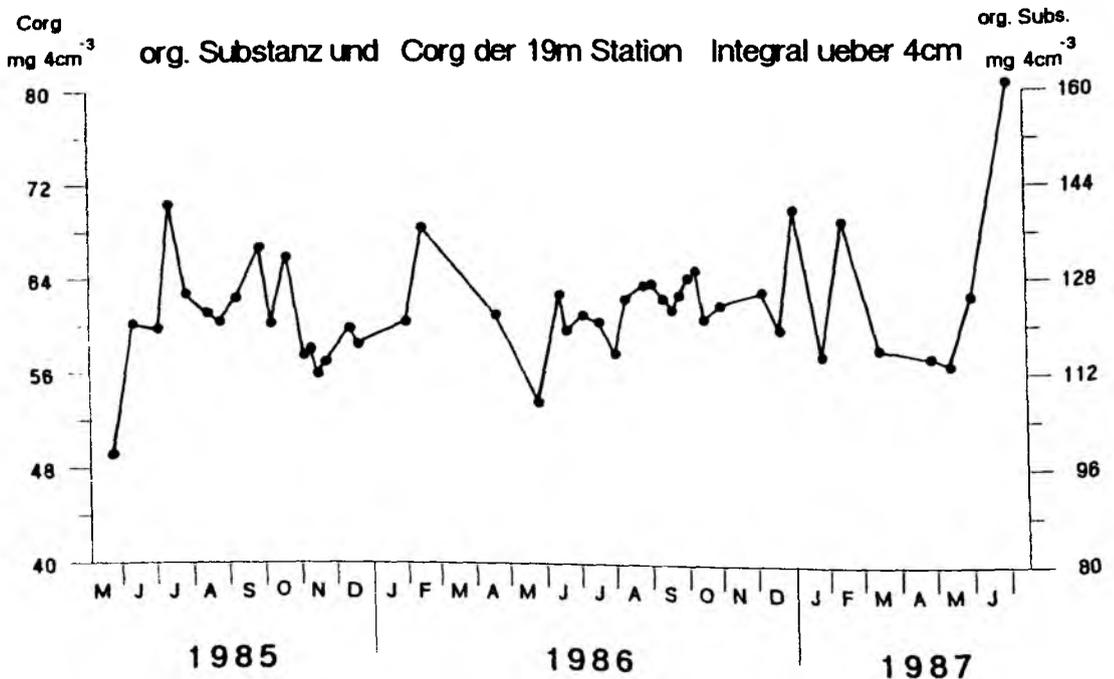


Abb.27 Gehalt an organischer Substanz bzw. Kohlenstoff integriert ueber die ersten 4cm des Sedimentes der Station 19m

Bei den Werten des obersten Zentimeters ist der schmalere Konfidenzbereich im Sommer 1986 (besonders bei 17m) auffällig, der auf eine geringere räumliche Variabilität hindeutet.

Ganz anders stellt sich das Bild auf der 19m Station (Abb.26 und Abb.27) dar. Der Konfidenzbereich ist schmaler. Weder das Maximum Ende 1985 noch das Minimum im Sommer 1986 sind ausgeprägt. Es läßt sich allerdings, wie auf den flacheren Stationen, ein Anstieg vom Sommer 1986 bis Ende des Jahres beobachten.

Signifikante Änderungen wurden nur auf der 17m Station festgestellt (Tab.2). Im gesamten Untersuchungszeitraum sinkt der Gehalt an org. Substanz sowohl im ersten Zentimeter als auch bei den integrierten Werten. An der Sedimentoberfläche ist im Jahr 1985 ein deutlicher Trend zu steigenden Werten sichtbar. Auf den Stationen in 12m und 19m wurden keine signifikanten Änderungen erkennbar. Die jährlichen Veränderungen wurden mit Hilfe der Regression ausgerechnet und ergeben für die 12m Station einen jährlichen Verlust von 3.3%, für die 17m Station ebenfalls eine Abnahme von allerdings 4.8% und auf der 19m Station eine Zunahme von jährlich 2.8%.

#### 3.3.6. "Proteinkonzentration bezogen auf das Trockengewicht"

Durch die Wahl der Methode repräsentiert der hier gemessene "Proteingehalt" der Sedimente nicht nur biologisch leicht abbaubare Verbindungen, sondern auch einen beträchtlichen Anteil der schwerabbaubaren C-N Verbindungen. Da sich diese besonders in den tieferen sauerstofflosen Schichten anreichern können, wurden in den Schichten unterhalb der Sedimentoberfläche häufig hohe Konzentrationen gemessen.

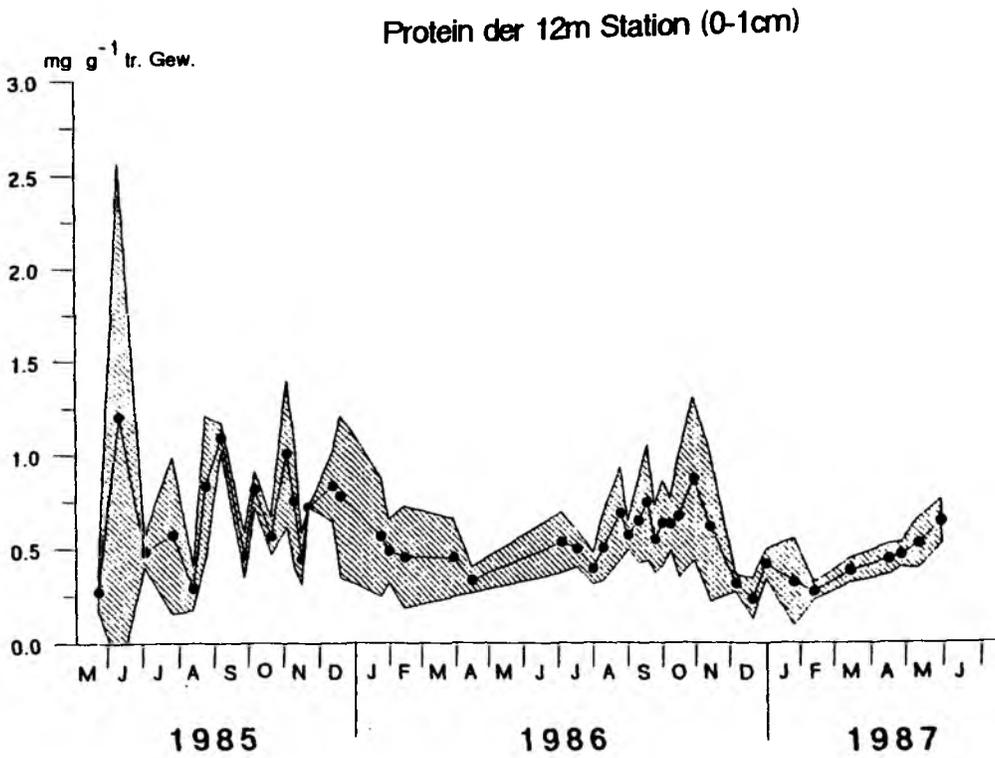


Abb.28      Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) im obersten Sedimenthorizont der 12m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

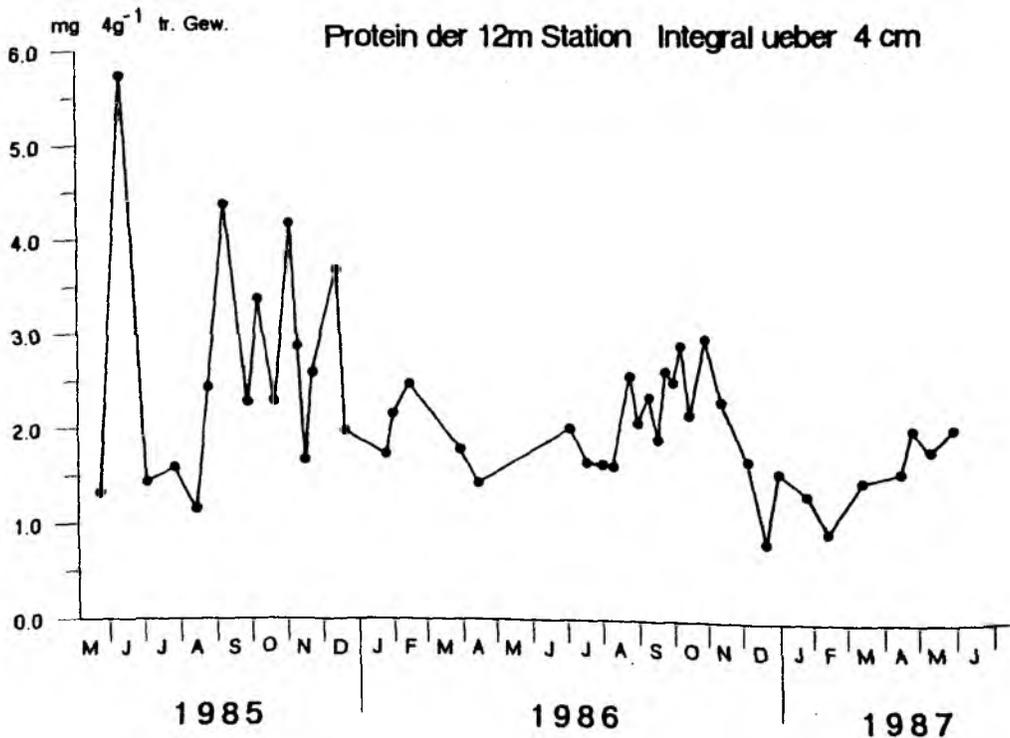


Abb.29      Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral von Messungen aus dem Material der oberen 4cm des Sedimentes der 12m Station



Der "Proteingehalt", bezogen auf das Trockengewicht, der untersuchten Sedimente stieg mit zunehmender Wassertiefe deutlich an. Die "Proteinwerte" auf der 12m Station (Abb.28 und Abb.29) waren etwa 40fach geringer als auf der 28m Station (Abb.34 und Abb.35). Die Konzentrationen waren (mit einer Ausnahme) nach niedrigen Werten im Juli von August 1985 bis Dezember 1985 relativ hoch. Während des Winters fielen die "Proteinkonzentrationen" bis April 1986 fast kontinuierlich. Von August bis Oktober-November stiegen die Werte dann wieder fast kontinuierlich an. Danach folgte allerdings ein schneller, starker Abfall bis in den Dezember 1986. Im Unterschied zum vorigen Winter (1985/86) waren die "Proteingehalte" während des Winters 1986/87 sehr niedrig. Erst ab Februar 1987 ist bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes wieder eine länger andauernde Zunahme beobachtbar. Auf der 17m Station (Abb.30) sind die "Proteinkonzentrationen" in der Schicht 0-1cm sehr variabel. Deutlicher ausgeprägt sind die Veränderungen der Konzentrationen bei den über 4cm integrierten Werten (Abb.31). Nach einem Abfall der Werte von Juni bis August 1985 stiegen die Konzentrationen bis zum November stark an und blieben mit einer Ausnahme bis Ende Dezember hoch. Nach einer drastischen Abnahme wurden im Februar 1986 die niedrigsten "Proteinwerte" der gesamten Zeitreihe gemessen. Von Februar bis November 1986 war, bis auf eingeschobene Peaks, ein deutlicher Trend zu höheren Werten beobachtbar. Ab Dezember lagen die Konzentrationen wieder deutlich niedriger, jedoch auf einem höheren Niveau als im Januar - Februar 1985. Zum Frühjahr 1987 stiegen die "Proteinkonzentrationen" dann wieder an.

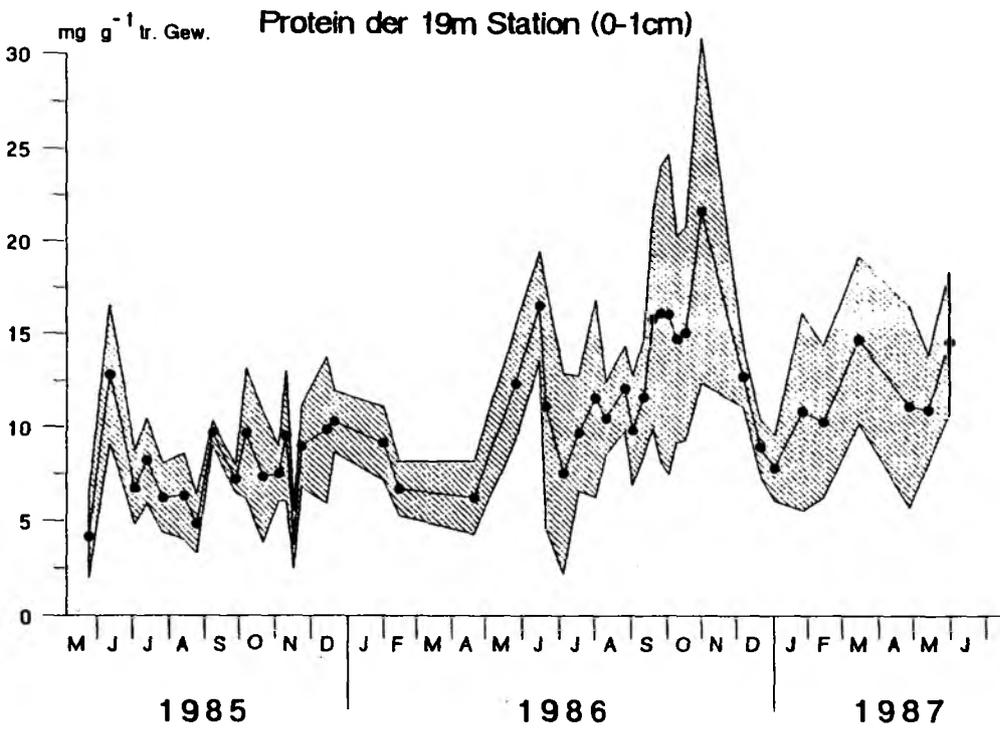


Abb. 32 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) im obersten Sedimenthorizont der 19m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

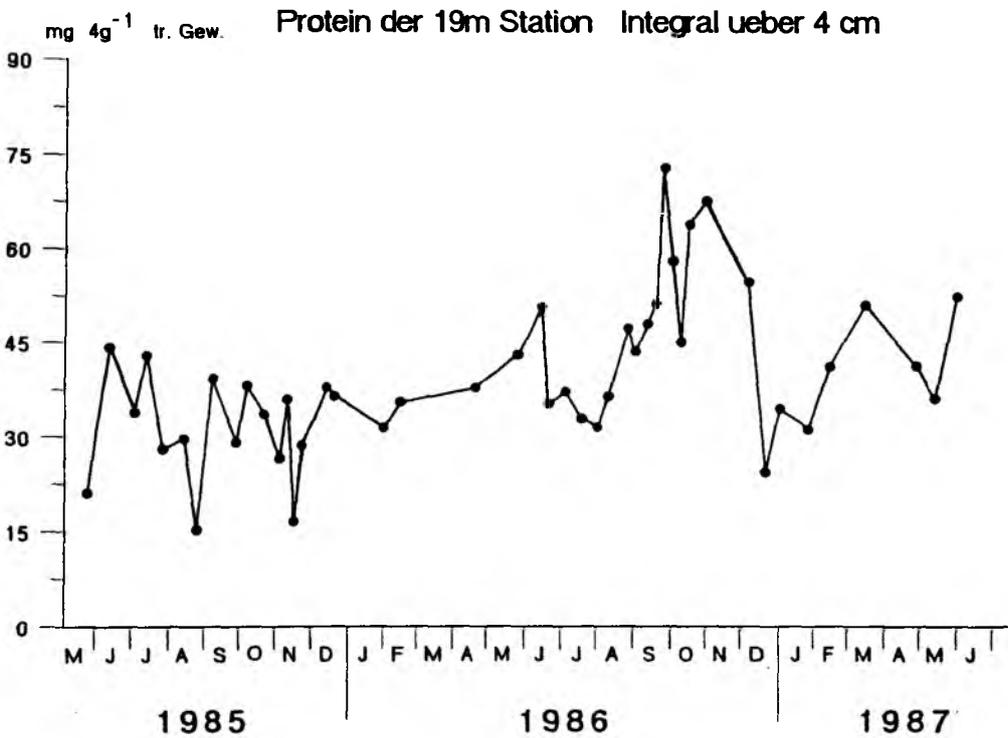


Abb. 33 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral von Messungen aus dem Material der oberen 4cm des Sedimentes der 19m Station

Auf der 19m Station wurden im Verlauf des Jahres 1986 ebenfalls ansteigende Werte gemessen. Auf dieser Station stiegen im Herbst 1985 die Konzentrationen im obersten Zentimeter (Abb.32) leicht an, während insgesamt in den Schichten 0-4cm (Abb.33) eine leichte Abnahme zu beobachten war. Wie auch auf der 17m Station sanken die Konzentrationen von November bis Dezember 1986 auf der 19m Station. Sie erreichten dabei nicht mehr das Niveau der niedrigsten Werte im Jahr 1985.

Aufgrund der höheren Anzahl an Parallelen, die auf der 28m Station gemessen wurden, sind die Konfidenzbereiche relativ klein (Abb.34; Abb.35). Die von Ausfahrt zu Ausfahrt teilweise stark variierenden Werte sind häufig signifikant voneinander verschieden. Ungeachtet dieser kurzfristigen Schwankungen sind mittelfristige Tendenzen erkennbar. Von Beginn der Zeitreihe bis Anfang August wurden relativ hohe "Proteinkonzentrationen" gemessen. Anschließend war eine fallende Tendenz festzustellen, die an der Sedimentoberfläche deutlicher ausgeprägt war und bis Ende Dezember anhielt. Zwischen Januar 1986 und August 1986 ist ein breiter Peak zu erkennen, mit einem Maximum im Juni. Der Herbst 1986 war wiederum durch relativ hohe "Proteinkonzentrationen" gekennzeichnet. Auch im Winter 1986-1987 wurden geringere Konzentrationen gemessen, die aber über denen des Vorjahres lagen. Der folgende Anstieg bis Mai 1987 ging ebenfalls über die vergleichbaren Werte im Mai 1985 bzw. 1986 hinaus.

Von allen untersuchten Parametern wies der "Proteingehalt" am häufigsten signifikante Trends auf. Der "Proteingehalt" auf der 12m Station sank im Untersuchungszeitraum sowohl im obersten Zentimeter des Sedimentes, als auch, weniger deutlich, in den Sedimentschichten 0-4cm. Auf den anderen Stationen zeichneten sich deutliche Trends zu höheren Werten ab. Nur im Oberflächensediment der 17m Station ist dieser Trend nicht signifikant.



### 3.3.7. "Proteinmengen" bezogen auf Sedimentflächen

Unter Einbeziehung von Wassergehalt und Trockengewicht der Sedimente wurden die über die Schicht 0-4cm integrierten "Proteingehalte" auf einen Quadratmeter bezogen (Abb.36 bis 39). Auf der 28m Station lagen allerdings nicht von jeder Ausfahrt Wassergehalt und Trockengewicht pro  $\text{cm}^{-3}$  vor, für diese Station wurden Werte als Konstanten (spez.Gew.=1.17; Wassergehalt = 80%) angenommen, die während der ersten Ausfahrt ermittelt worden waren.

Die flächenbezogenen Darstellungen der Konzentrationen unterscheiden sich im Verlauf nur geringfügig von den auf das Trockengewicht bezogenen. In den Absoluthöhen unterscheiden sich die Stationen nicht so stark. Die Werte für "Protein" auf der 17m Station sind im Mittel mit  $120 \text{ gm}^{-2}$  nur doppelt so hoch wie auf der 12m Station. Eine weitere Verdoppelung der Werte findet sich auf der 19m Station. Auf der 28m Station lagen die "Proteinkonzentrationen" meist über  $500 \text{ gm}^{-2}$ , im Vergleich zur 12m Station etwa 10fach höher.

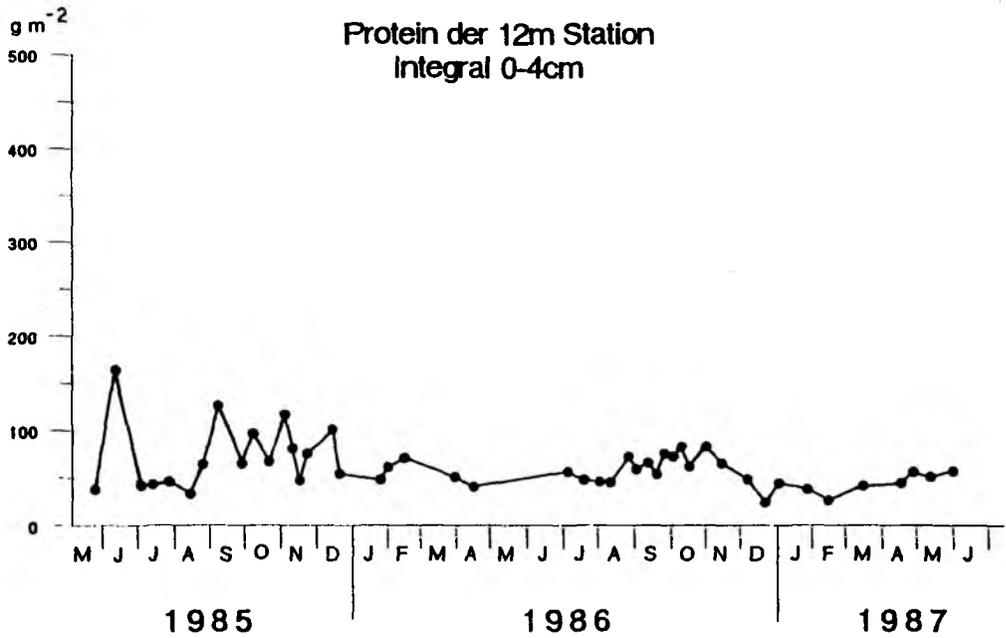


Abb.36 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral über die oberen 4cm des Sedimentes der 12m Station (hochgerechnet für 1m<sup>-2</sup>)

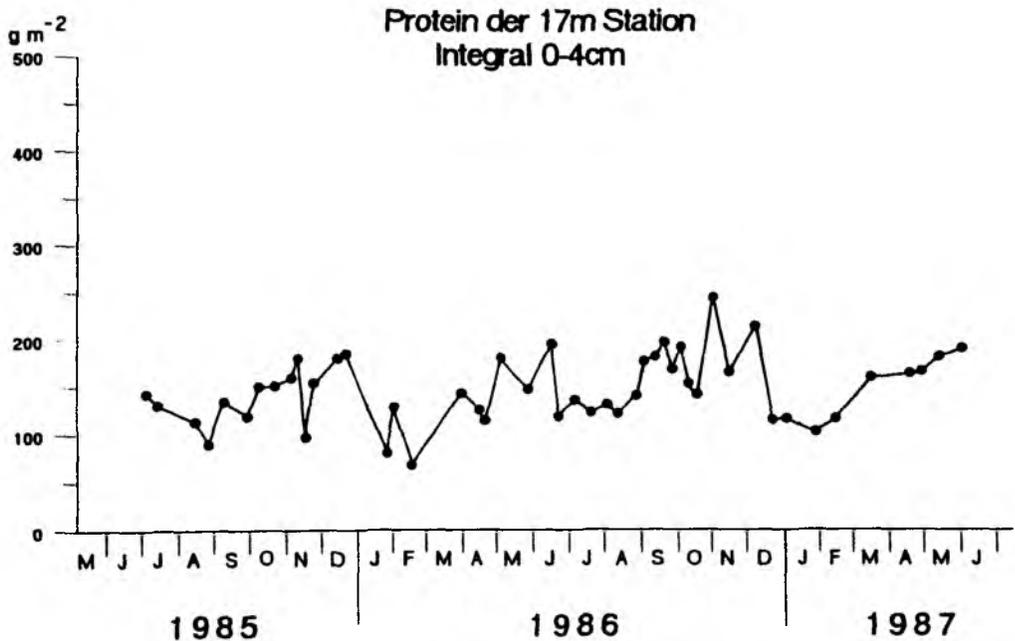


Abb.37 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral über die oberen 4cm des Sedimentes der 17m Station (hochgerechnet für 1m<sup>-2</sup>)

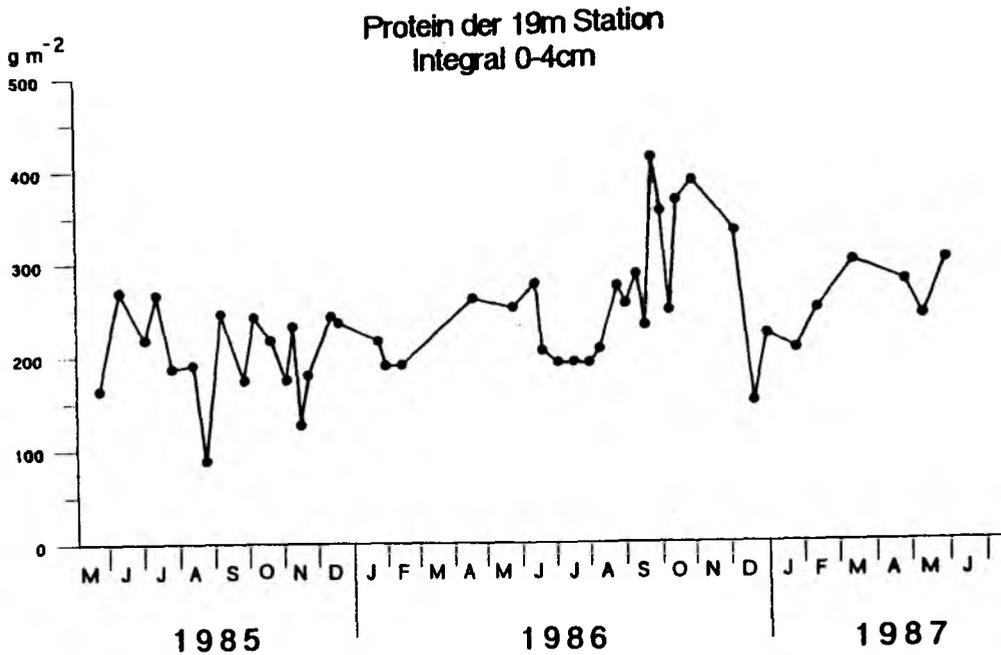


Abb.38 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral über die oberen 4cm des Sedimentes der 19m Station (hochgerechnet für 1m<sup>-2</sup>)

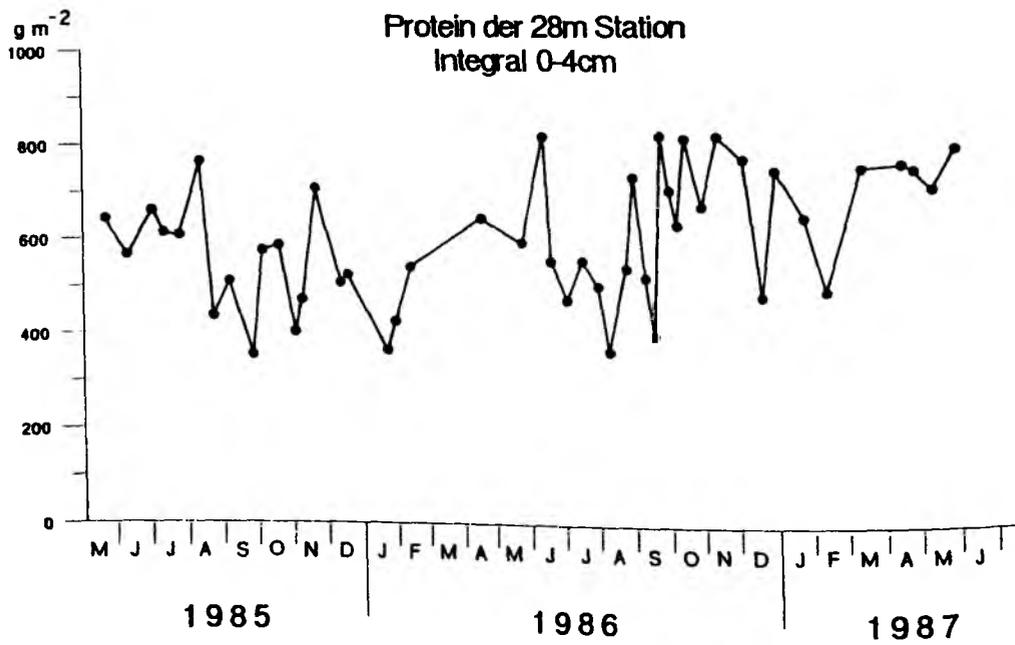


Abb.39 Konzentration von "Protein" (Folin-positive Substanzen) Integral über die oberen 4cm des Sedimentes der 28m Station (hochgerechnet für 1m<sup>-2</sup>)

### 3.3.8. ATP (Adenosintriphosphat)

Da das Verhältnis aus ATP und lebender organischer Substanz einer Organismenart relativ konstant ist, ist die ATP-Konzentration ein relatives Maß für die Biomasse im Sediment (Holm-Hansen und Paerl, 1972; Karl, 1980). Aktivitätsänderungen wirken sich nur geringfügig auf den ATP-Gehalt aus, solange sich die Artenzusammensetzung nicht stark ändert. Besondere Ereignisse, wie z.B. die Sedimentation einer Diatomeenblüte, können allerdings zu einer Zufuhr von in Diatomeen enthaltenem, nicht im Benthos entstandenem ATP führen (Czytrich et al. 1986).

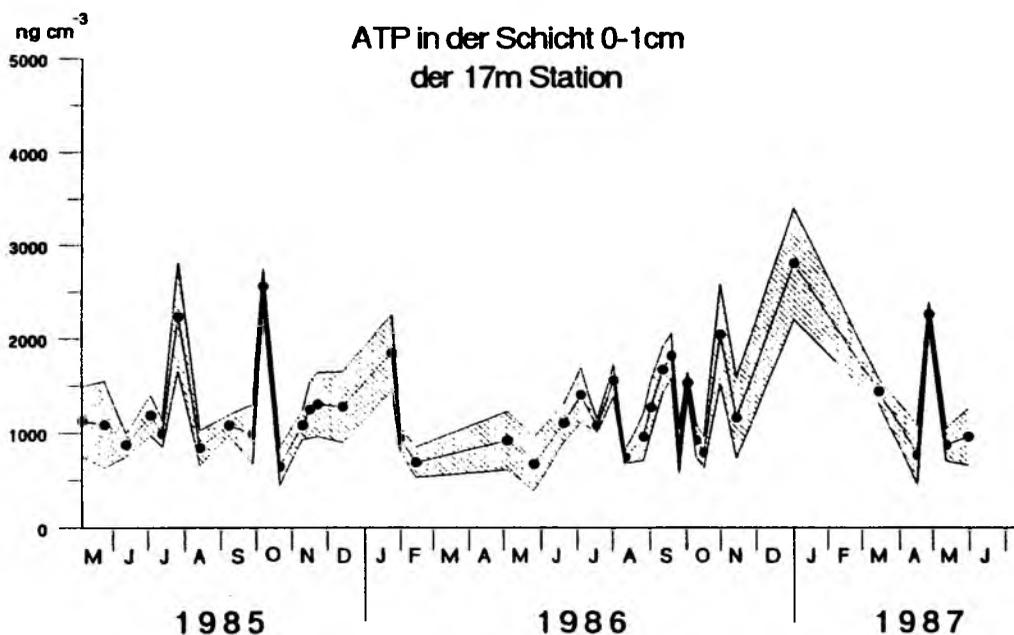


Abb.40 Gehalt an Adenosintriphosphat (ATP) im Sedimenthorizont 0-1cm der 17m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

Auf der 17m Station blieben die ATP-Konzentrationen in der Schicht 0-1cm (Abb.40) im Jahr 1985 relativ konstant bis auf zwei sehr kurze Maxima im Juli und Oktober und einen etwas niedrigeren, aber deutlich ausgeprägten Anstieg im Januar 1986. Anschließend sank die Konzentration stark ab, um dann ab Mai bis Ende 1986 mit Schwankungen anzusteigen. Im

Frühjahr 1987 wurden, mit einer Ausnahme im Mai, erneut relativ niedrige Werte gemessen. Deutlich erkennbar sind bei den über 4cm Sedimenttiefe integrierten Werten (Abb.41) die relativ hohen Winterwerte und der sehr starke Einbruch im Januar 1986 mit dem nachfolgenden stetigen Anstieg bis zum Dezember.

Anhand der Isolinien (Abb.42) ist eine Konzentration der ATP-Biomasse oberhalb von 3cm Sedimenttiefe zu erkennen. In der Schicht 3-4cm wurden in der Regel die niedrigsten ATP-Werte gemessen, darunter stiegen die Konzentrationen oft wieder leicht an.

Die Abb.43 zeigt die ATP-Konzentrationen des obersten Sedimentzentimeters der 28m Station. Ein geringes Maximum ist auch hier von Dezember 1985 bis Januar 1986 zu erkennen. Im Januar 1987 wurden jedoch nur geringe Konzentrationen gemessen. Von Januar 1986 bis März 1987 fallen die Konzentrationen im Schnitt leicht ab. Die Zeitreihe weist zwei deutliche Peaks auf, einen im Juli 1986 und einen Anfang Juni 1987. Im Vergleich mit der Zeitreihe der über 4cm Sedimenttiefe integrierten Werte (Abb.44) wird ersichtlich, dass diese Peaks fast nur Konzentrationsanstiege im Oberflächensediment darstellen, während sich andere Peaks der Integralkurve an der Sedimentoberfläche nicht widerspiegeln. In der Integralkurve sind auch im Winter 1985/86 hohe Werte zu erkennen. Der abnehmenden Tendenz während des Jahres 1986, die an der Sedimentoberfläche beobachtet wurde (Minimum im Herbst), steht eine Tendenz zu steigenden Werten in den tieferen Schichten entgegen (Minimum im April). Die ATP-Biomasse auf der 28m Station war im Durchschnitt höher als auf der 17m Station und war deutlich im obersten Zentimeter konzentriert.

Auf der 17m Station ließen sich signifikante Veränderungen für den Untersuchungszeitraum nicht feststellen, für das Jahr 1986 wurden signifikant steigende Tendenzen ermittelt. Eine Regressionsanalyse für die 28m Station wurde nicht durchgeführt, da nicht ausreichend viele Daten vorlagen.

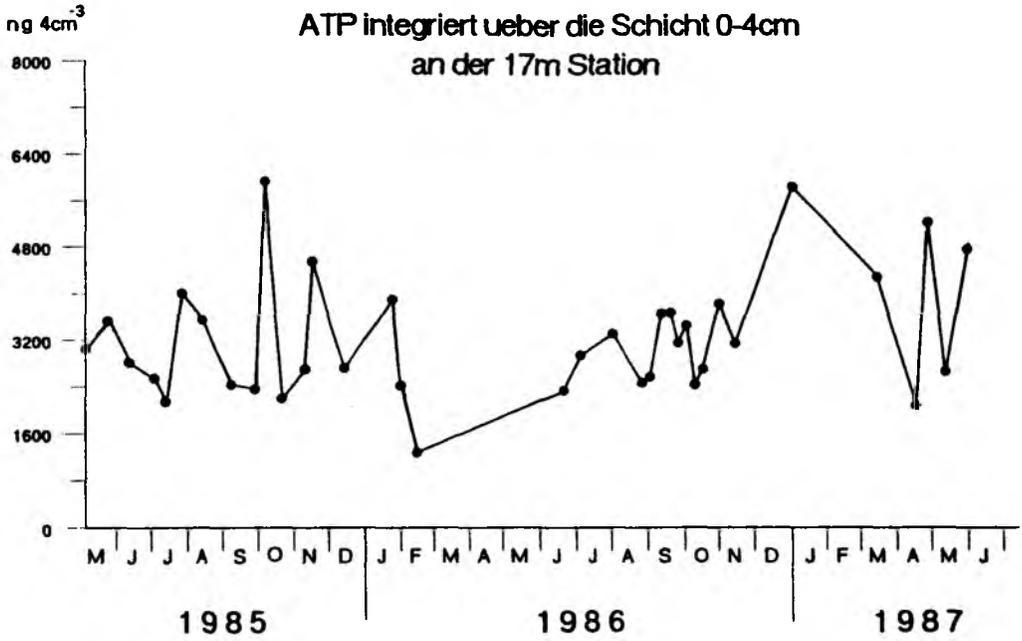


Abb.41 Gehalt an Adenosintriphosphat (ATP) Integral über den Sedimenthorizont 0-4cm der 17m Station

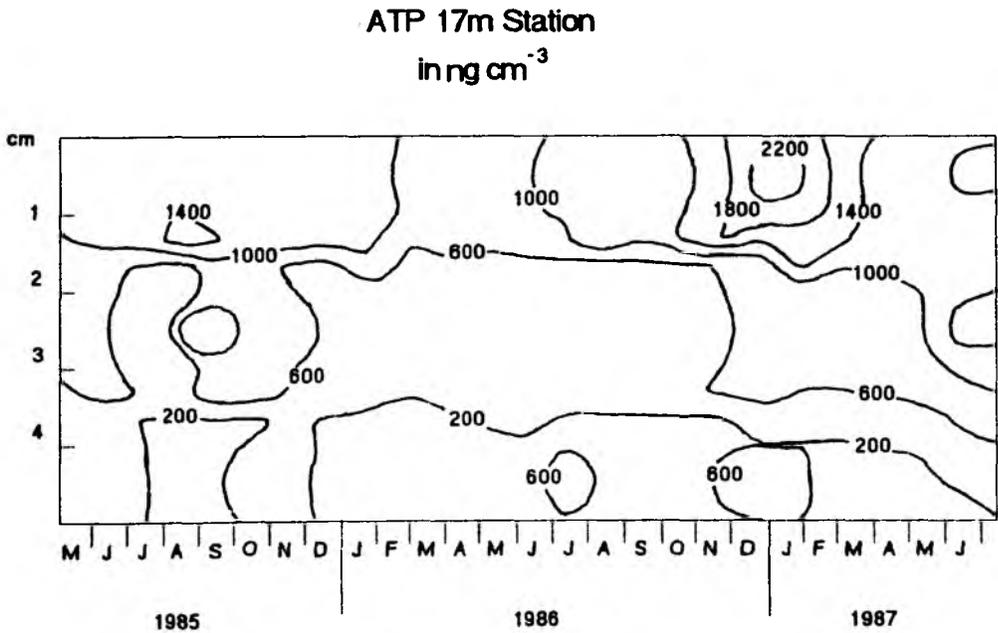


Abb.42 Isolinien des Gehaltes an Adenosintriphosphat (ATP) in den oberen 5cm des Sedimentes an der 17m Station

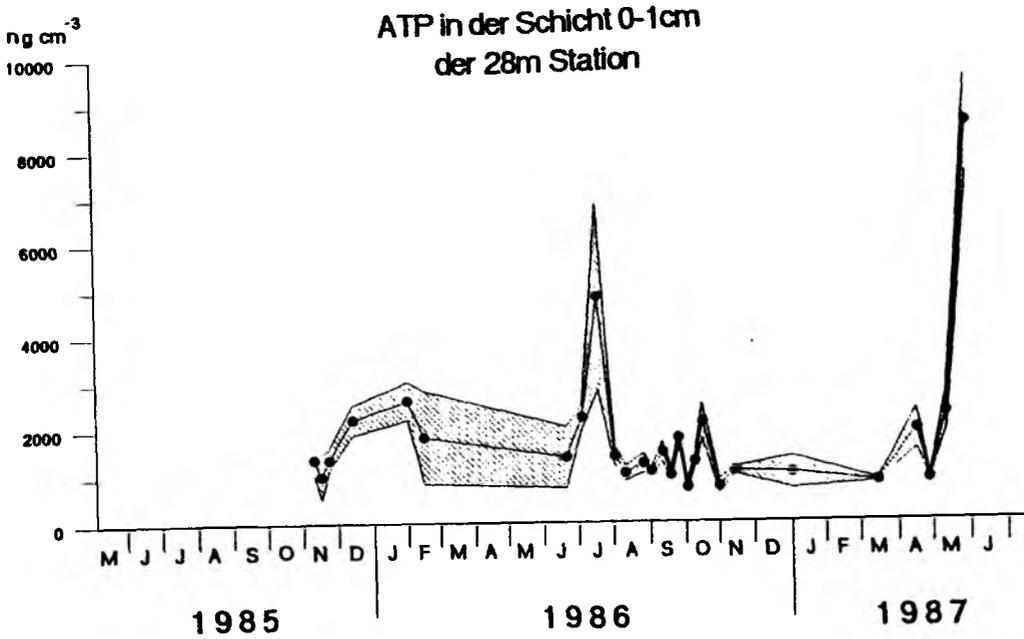


Abb.43 Gehalt an Adenosintriphosphat (ATP) im Sedimenthorizont 0-1cm der 28m Station mit Konfidenzbereich (95% Niveau)

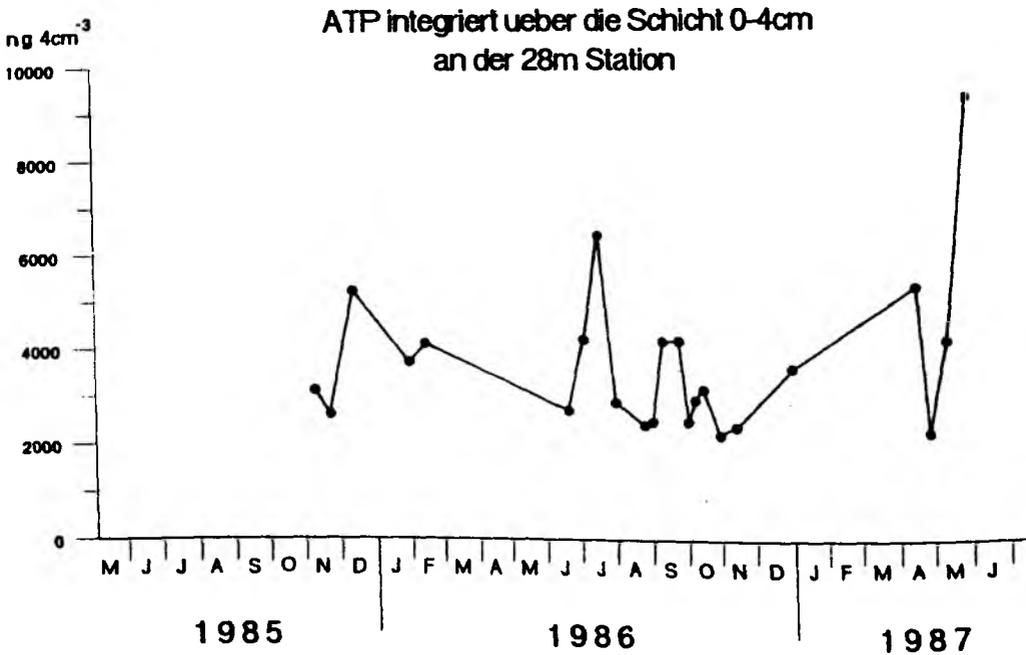


Abb.44 Gehalt an Adenosintriphosphat (ATP) Integral ueber den Sedimenthorizont 0-4cm der 28m Station

### 3.3.9. Sauerstoffzehrung

Der Verbrauch an Sauerstoff wird häufig zur Ermittlung der Remineralisierungsleistungen von benthischen Organismen oder Organismengruppen herangezogen (z.B. Hargrave, 1973). In den Sedimenten der Kieler Bucht liegt freier Sauerstoff aber nur in den obersten Millimetern vor, abgesehen von Röhren und Gängen, die mit sauerstoffreicherem Wasser durchspült werden. In den sauerstofffreien Schichten wird Material anaerob abgebaut. Über die Messung des Verbrauchs von Sauerstoff kann daher nur ein Teil des benthischen Stoffwechsels quantifiziert werden.

Die Messung der Sauerstoffzehrung war nur an der 17m Station sinnvoll, denn das Wasser dicht über dem Sediment der 28m Station war häufig völlig sauerstofffrei, eine Verbrauchsmessung demzufolge sinnlos.

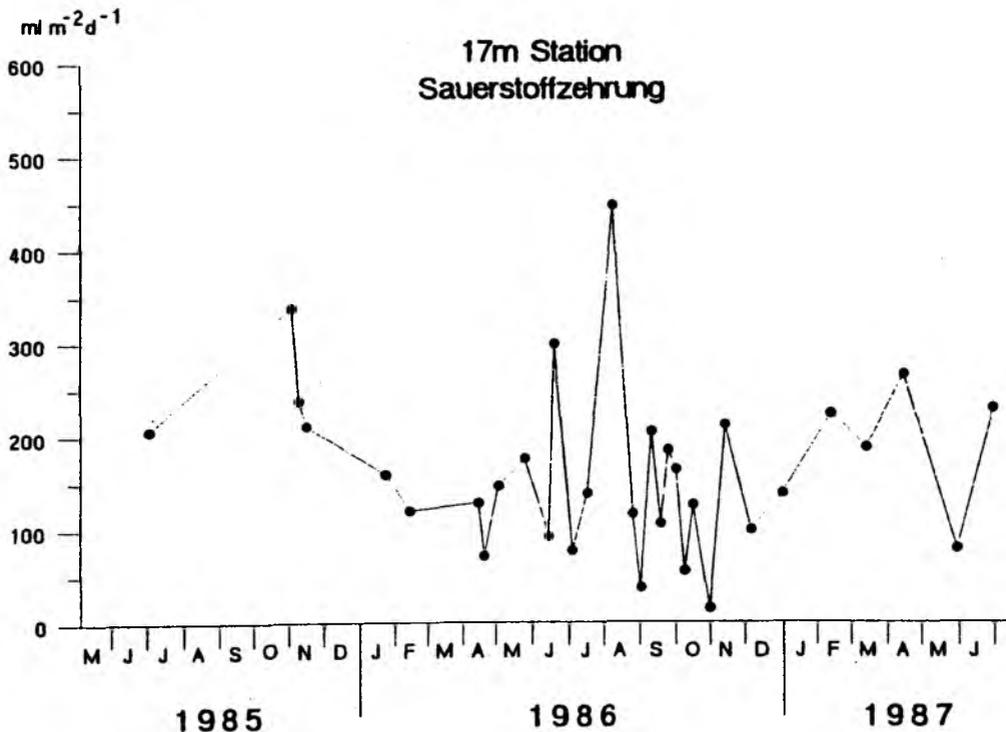


Abb.45 Sauerstoffzehrung des Sedimentes der 17m Station ermittelt durch Messung der Sauerstoffzehrung im Kontaktwasser über 12 Stunden und hochgerechnet auf 24 Stunden

Auf der 17m Station (Abb.45) waren die

Sauerstoffzehrungsraten im Herbst 1985 und Winter bis Frühjahr 1986/87 relativ hoch und im Frühling und Sommer 1986 relativ niedrig. Dieses entspricht in etwa dem zeitlichen Ablauf der Wärmeproduktion auf der 17m Station.

Die Sauerstoffzehrung im Sommer 1986 war meist gering. Die Variabilität war größer als bei der Wärmeproduktion im selben Zeitraum. Im August 1986 wurde die maximale Zehrung überhaupt gemessen. Im Sommer ist die Sauerstoffsättigung im Bodenwasser generell sehr gering, auch das Redoxpotential im Sommer 1986 weist auf anoxische Zustände im Sediment hin. Es ist daher denkbar, daß die hohen Sauerstoffzehrungen im Sommer Artefakte sind und durch Sauerstoffzufuhr während der Probennahme erklärt werden müssen.

#### 3.3.10. Wärmeproduktion

Die Wärmeproduktion ist ein direktes Maß für die Stoffwechselaktivität der benthischen Organismen. Sie spielt bei der Bilanzierung des Kohlenstoffumsatzes eine zentrale Rolle, da im Gegensatz zur Sauerstoffzehrung bei der Wärmeproduktion die Stoffwechselleistungen aerober und anaerober Organismen gleichzeitig ermittelt werden können. Die Wärmeproduktion der 0-2cm Schicht des Sedimentes der 17m Station (Abb.46) wies zwei deutliche Maxima auf, von August bis November 1985 und von November 1986 bis Februar 1987. Zwischen beiden Maxima blieb die Wärmeproduktion im Jahr 1986 niedrig, unterbrochen von zwei kleineren Peaks im Februar und Mai - Juni. Die Wärmeproduktion in der Schicht 2-4cm (Abb.47) zeigte einen ähnlichen Verlauf, allerdings mit weniger ausgeprägten Peaks im Jahr 1986.

Von der 28m Station liegen nur einige Messungen der Wärmeproduktion zwischen Januar 1986 und Oktober 1986 vor (Abb.48). Alle Werte waren niedrig und entsprachen insgesamt denen der 17m Station. In der Schicht 0-2cm wurden etwas höhere Werte zwischen März und Juni gemessen, in der Schicht 2-4cm im Juni bis Anfang Juli. Diese Peaks traten etwa zur selben Zeit auf wie das kleine Sommermaximum an der 17m Station.

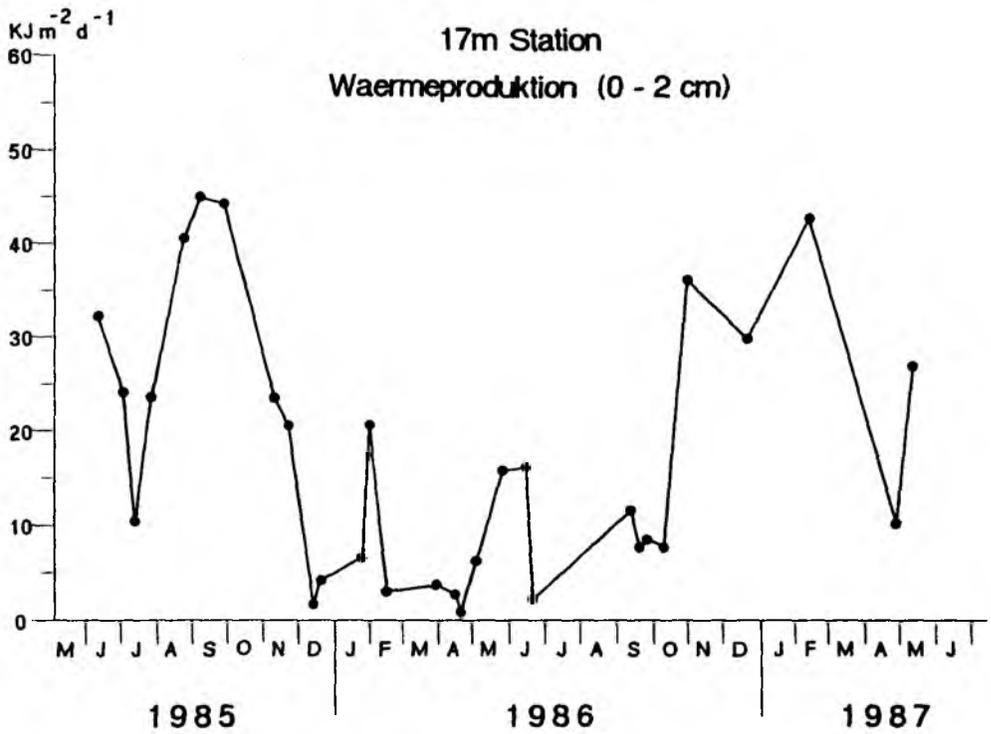


Abb.46 Waermeproduktion in den oberen 2cm des Sedimentes der 17m Station

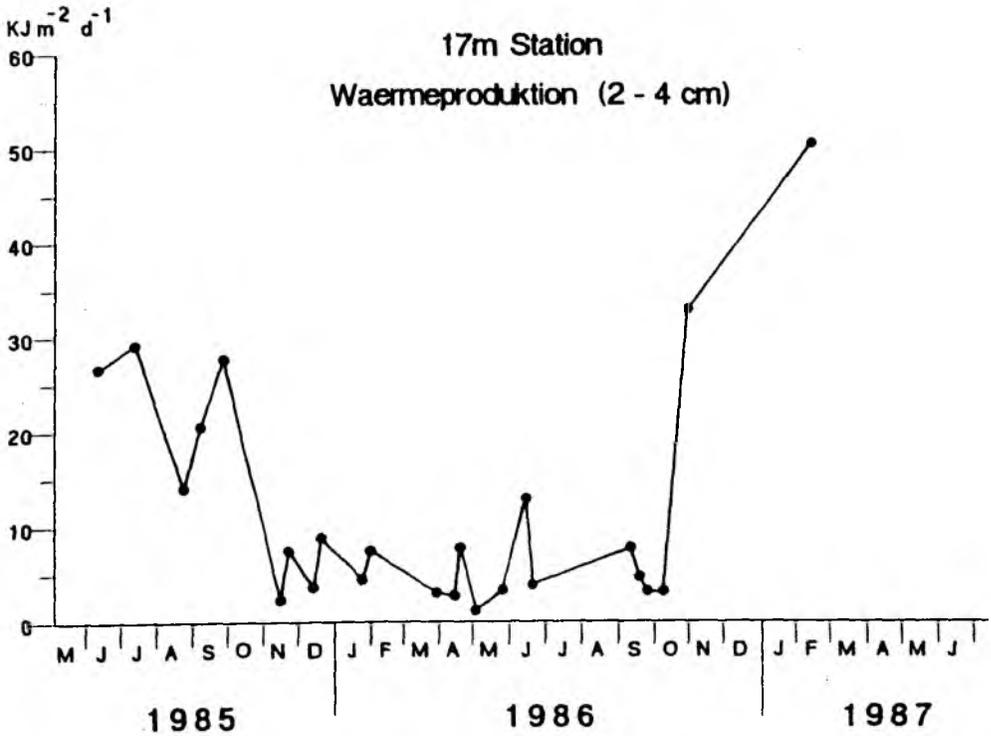


Abb.47 Waermeproduktion im Sedimenthorizont 2-4cm der 17m Station

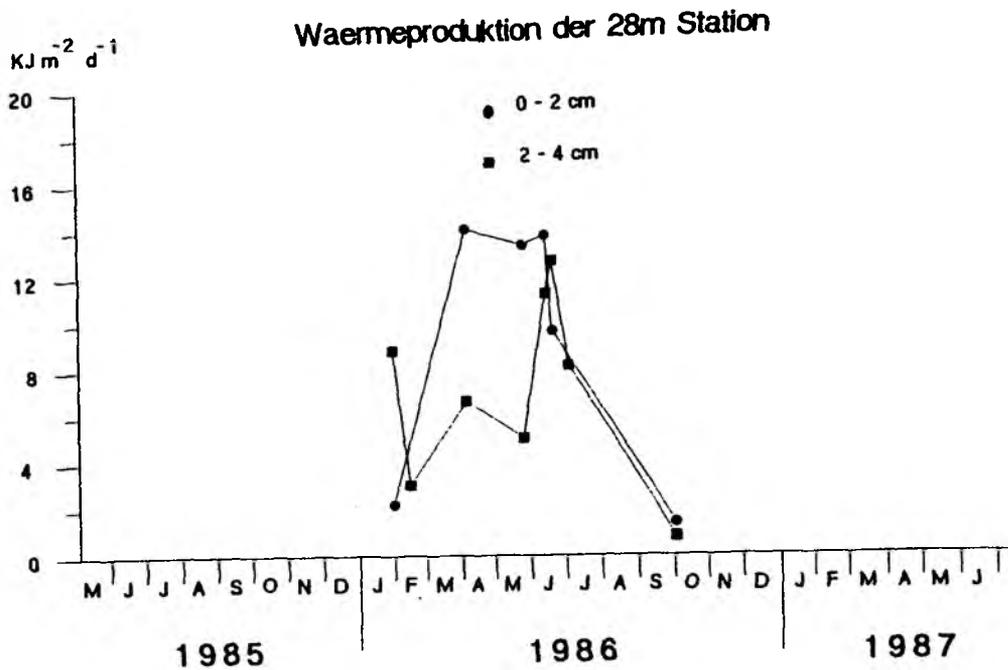


Abb.48 Wärmeproduktion in den Sedimenthorizonten 0-2cm und 2-4cm der 28m Station

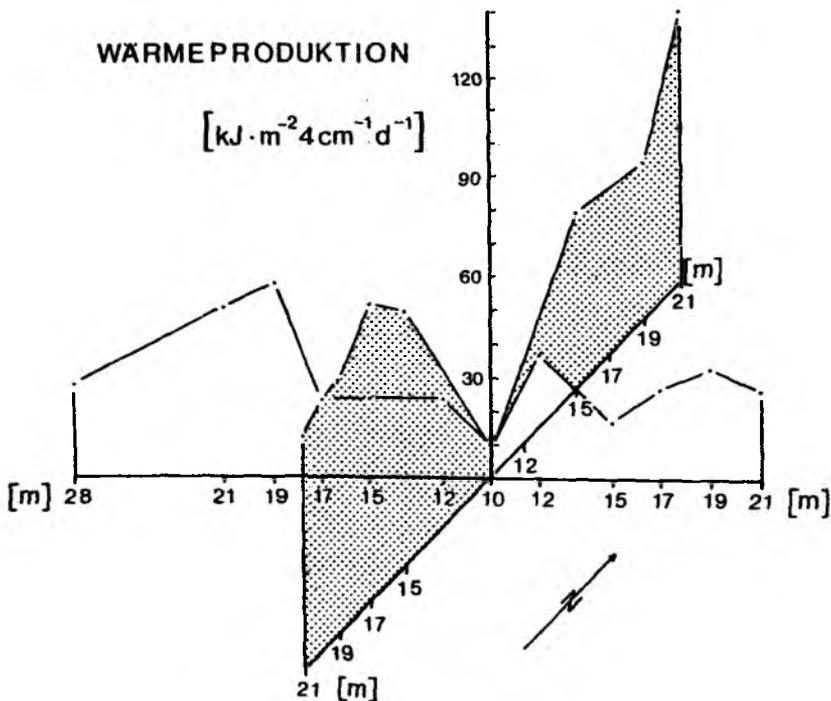


Abb.49 Wärmeproduktion an 20 Stationen auf vier Profilen in der Kieler Buch im Juni 1987. Integrale über die Sedimentschichten von 0-4cm (nach Graf und Eversberg, unveröff.)

### 3.3.11. Wärmeproduktion auf vier Profilen

Die im Juni 1987 durchgeführte Messung der Wärmeproduktion auf vier Profilen (Abb.2) zeigte eine große Heterogenität der benthischen Aktivität (Graf und Eversberg, unveröff.Daten; Abb.49). Eine generelle Hochaktivitätszone ist nicht erkennbar. Auf dem Nordprofil wurden unterhalb von 15m Wassertiefe hohe Wärmeproduktionswerte gemessen, das Wärmeproduktionsmaximum war in 21m Tiefe. Auf dem Westprofil, auf dem die Dauerstationen liegen, wurde der höchste Wert in 19m Tiefe gemessen. Auf dem Südprofil wurden wiederum unterhalb von 15m Wassertiefe generell hohe Wärmeproduktionen gemessen, das Maximum lag in 15m Tiefe. In den Sedimenten östlich von Gabelsflach wurden im Mittel geringere Wärmeproduktionen bestimmt.

### 3.4. Abgeleitete Ergebnisse

#### 3.4.1. Anteil von "Protein" an der organischen Substanz

Proteine gehören an sich zu den leicht abbaubaren organischen Verbindungen. Daher ist zu erwarten, daß der Eintrag von neuem organischen Material das Verhältnis Protein zu organischer Substanz im Sediment erhöht, bis die Proteine abgebaut sind (Rice, 1982). Da die von mir angewendete Methode nicht nur Proteine, sondern vor allem schwerer abbaubare Substanzen erfaßt (organische C=N Verbindungen z.B. Gelbstoffe und Phenolverbindungen), ist besonders auf den tieferen Stationen ein erhöhtes Verhältnis von "Protein" zu organischer Substanz zu erwarten.

Eine längerfristige Veränderung des Verhältnisses kann auf eine Verschiebung des Verhältnisses von leicht biologisch abbaubarem Material zu schwerer abbaubarem Material hindeuten.

Zur Berechnung des Verhältnisses wurden die auf einen Quadratmeter bezogenen und über 4cm integrierten Werte benutzt (Abb. 36 bis 38 und 23, 25 und 27).

Auf der 12m Station (Abb.50) liegt, für den gesamten Zeitraum berechnet, eine gerade nicht mehr signifikante Tendenz zu niedrigeren Verhältniszahlen vor.

Abgesehen von der Gesamttendenz sind Perioden mit relativ niedrigem Verhältnis jeweils im Zeitraum Juli bis August und Januar bis Februar zu erkennen. Der Herbst und der Frühwinter bzw. das Frühjahr weisen jeweils eher hohe Werte auf.

Das Verhältnis von "Protein" zu organischer Substanz auf der 17m Station (Abb.51) ist niedriger als auf der 12m Station und zeigt einen signifikanten Anstieg. Ähnlich wie bei der 12m Station, ist auch auf der 17m Station im Spätwinter bis ins Frühjahr hinein das Verhältnis niedrig. Im Sommer treten hier, wenn auch nicht so deutlich, niedrige Verhältnisse auf. Das Verhältnis ist, ähnlich wie auf der 12m Station im späten Frühling und im Herbst bis in den frühen Winter hoch.

Abb.52 zeigt Isolinien des prozentualen Verhältnisses von "Protein" zu organischer Substanz. Der Anteil an "Protein" steigt besonders in der Schicht 3-4cm.

Auf der 19m Station (Abb.53) sind die Verhältnisse denen der 17m Station ähnlich, die Tendenz zu steigenden Werten ist deutlich ausgeprägt. Relativ hohe bzw. niedrige Verhältnisse sind zu vergleichbaren Zeiten wie auf 17m festzustellen. Wie an der 17m Station bestand ein extrem hohes Verhältnis von "Protein" zu organischer Substanz im Herbst 1986.

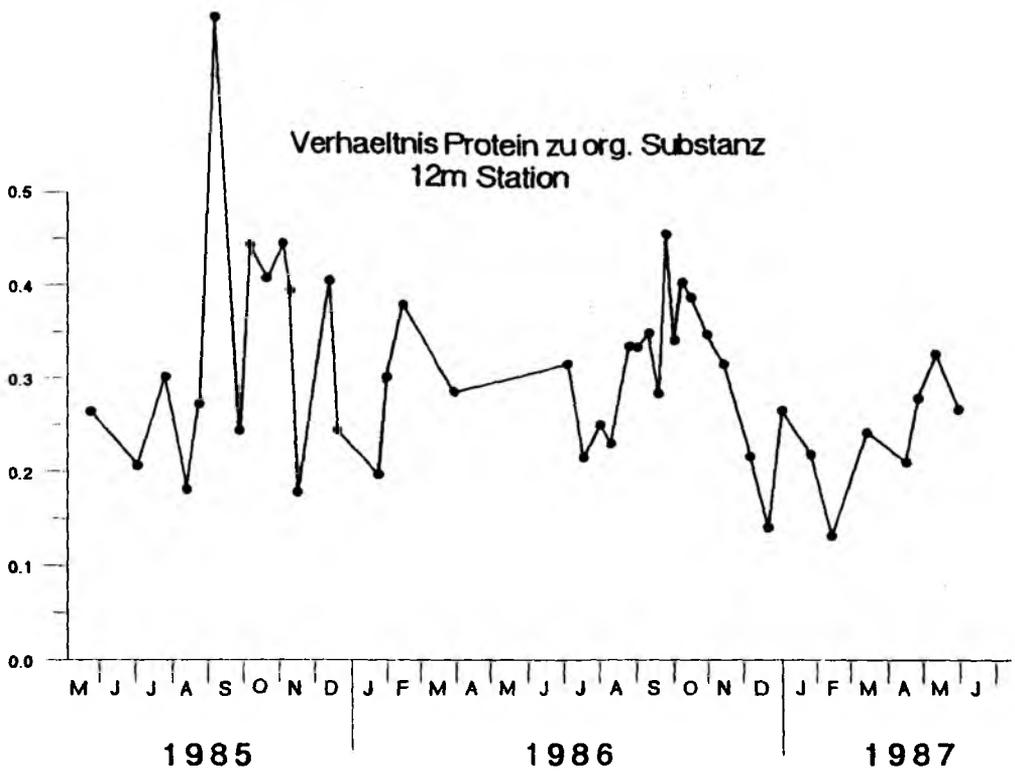


Abb.50 Verhältnis der "Proteingehalte" und der org. Substanz im Sediment der 12m Station (Integrale über 0-4cm)

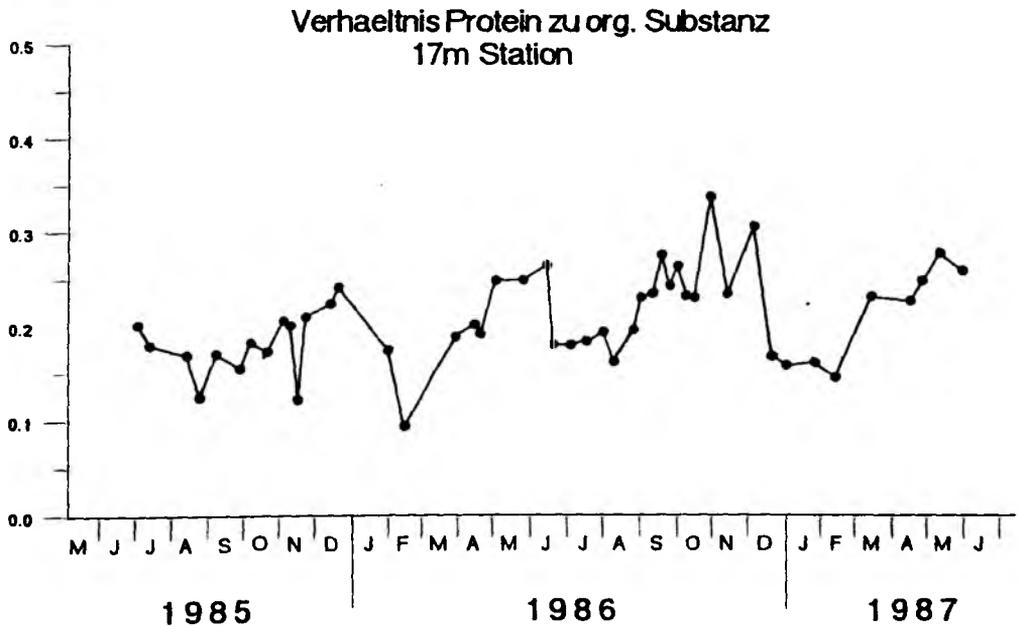


Abb.51 Verhältnis der "Proteingehalte" und der org. Substanz im Sediment der 17m Station (Integrale über 0-4cm)

## Isolinien des Verhaeltnis Protein zu Kohlenstoff in % 17m Station

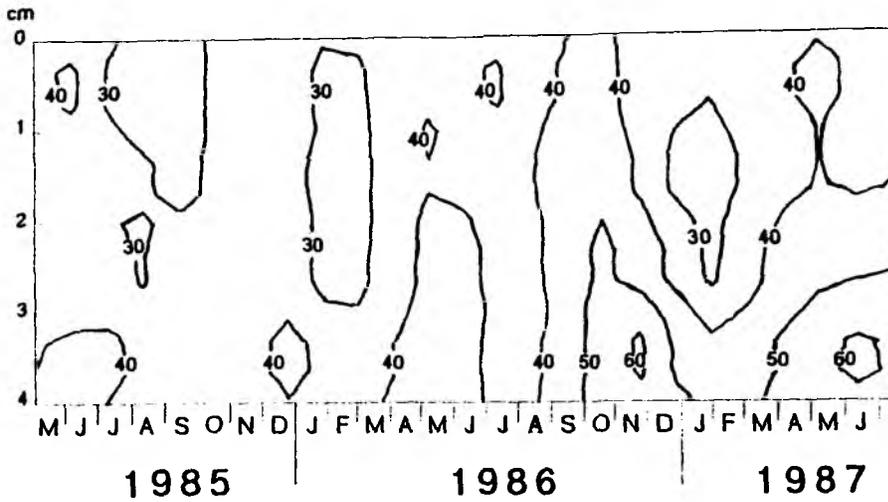


Abb.52 Isolinien des Prozentualen Verhältnisses von "Protein" zu Kohlenstoff in den oberen 4cm des Sedimentes an der 17m Station

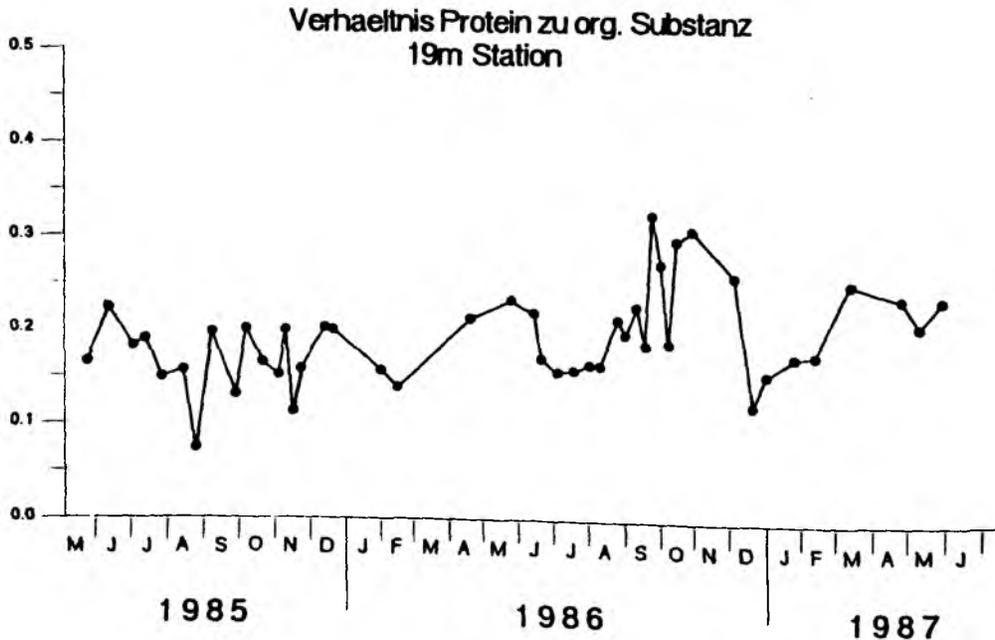


Abb.53 Verhältnis der "Proteingehalte" und der org. Substanz im Sediment der 19m Station (Integrale über 0-4cm)

### 3.4.2. Abbau der organischen Substanz

Der Abbau von organischer Substanz wurde als prozentualer täglicher Abbau des Kohlenstoffs (50% der organischen Substanz) dargestellt und mit drei unterschiedlichen Methoden errechnet:

a) errechnet aus Wärmeproduktion und Kohlenstoff

Aus der Wärmeproduktion pro Tag läßt sich unter der Annahme, daß bei Verbrennung von Phytoplankton mit einem Gehalt von 1g Kohlenstoff 40KJ an Wärme freiwerden (Salonen et al., 1976), die tägliche Verbrennungsrate und dadurch der tägliche Verbrauch an organischem Material durch benthische Remineralisierung abschätzen.

Da die Variabilität der Wärmeproduktion höher ist als die der Kohlenstoffkonzentrationen im Sediment, ähnelt die Abbildung des prozentualen täglichen Abbaus (Abb.54) der Abbildung der Wärmeproduktion (Abb.46). Unterschiede sind gegen Ende der Zeitreihe erkennbar, wo die Abbauraten im Vergleich zu denen am Beginn der Zeitreihe geringer sind. Niedrige Abbauraten, wie sie vor allem 1986 ermittelt wurden, haben im obersten Zentimeter des Sedimentes eine Größenordnung von unter 0.1% des Kohlenstoffgehaltes pro Tag. Hohe Werte, wie im Herbst 1985 und Winter 1987, liegen etwas über 0.6% pro Tag. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß in die Rechnung sämtlicher Kohlenstoff eingeht, also auch der aus schwer abbaubaren Verbindungen. Wird der Sedimentbereich von 0-4cm betrachtet (Abb.55), sind die Werte niedriger, selten wird an einem Tag mehr als 0.5% des Kohlenstoffgehaltes dieser Schicht mineralisiert. Dies wird weniger durch geringere Wärmeproduktionsleistungen als durch die höheren Kohlenstoffgehalte in den tieferen Sedimentschichten bewirkt.

## Prozentuale taegliche Remineralisierung von Kohlenstoff

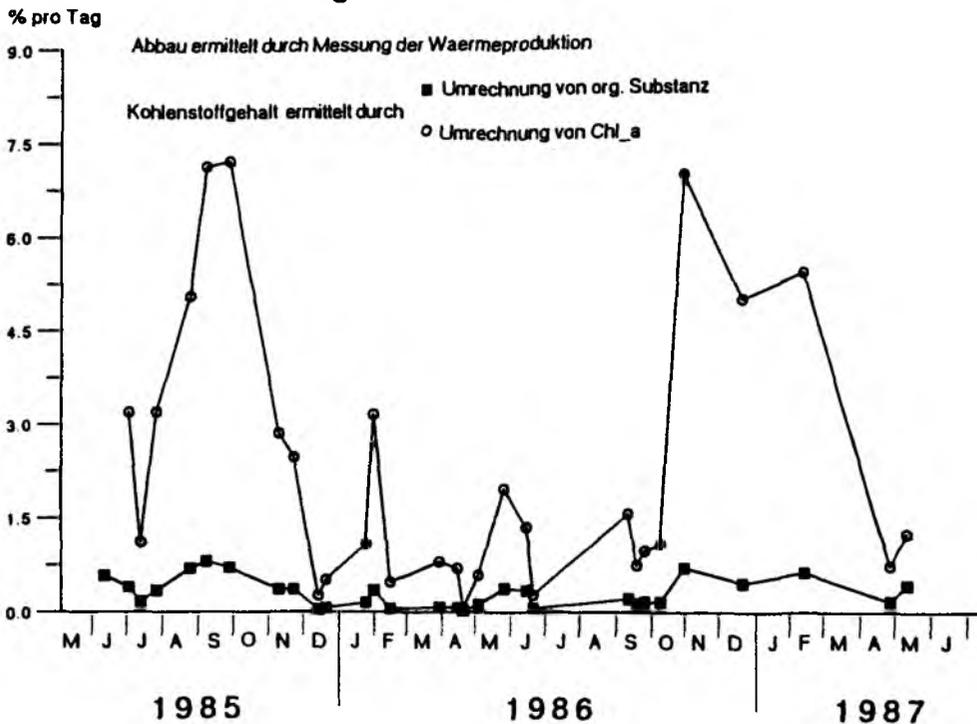


Abb.54 Täglicher Abbau von organischem Material in Prozent vom gesamten Kohlenstoff und dem Kohlenstoff aus Phytoplankton (über Chl\_a ermittelt) der Schicht 0-1cm, ermittelt über Waermeproduktion (17m Station)

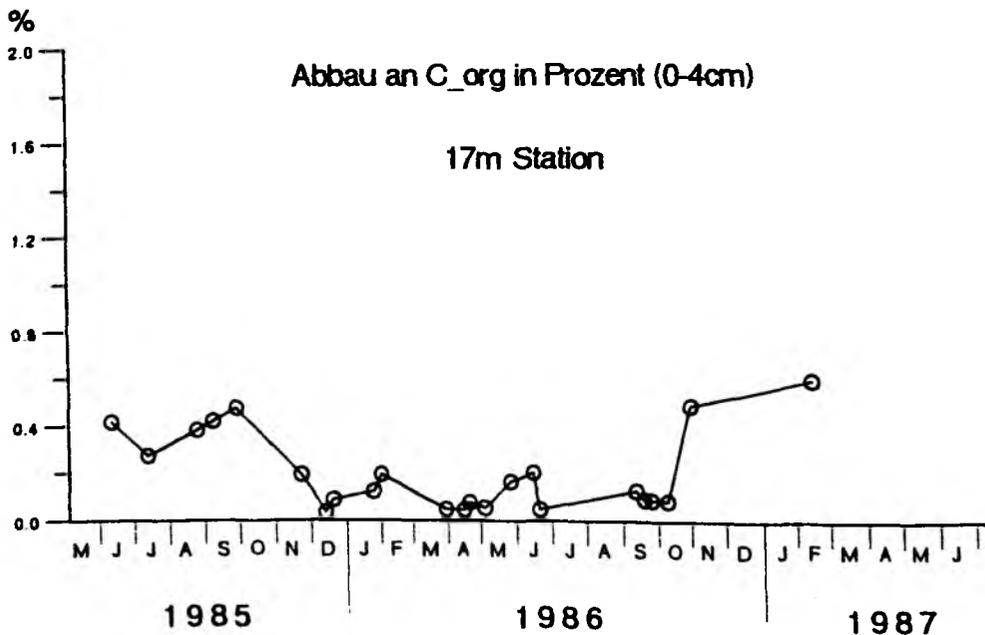


Abb.55 Täglicher Abbau von organischem Material in Prozent vom gesamten Kohlenstoffgehalt ermittelt über Waermeproduktion (Schicht 0-4cm, 17m Station)

b) errechnet aus Wärmeproduktion und Chlorophyll\_a-Gehalt

Eine ähnliche Darstellung wird mit Hilfe der Chlorophyll\_a-Werte gegeben (Abb.54). Es wurde dazu ein Verhältnis von Chl\_a zu Phytoplanktonkohlenstoff von 1 : 100 angenommen (Smetacek & Hendrikson, 79).

Der mit dieser Annahme errechnete Kohlenstoff soll den Anteil am Kohlenstoff repräsentieren, der aus pflanzlichem Material stammend vor relativ kurzer Zeit das Sediment erreichte. Es wurde nur die oberste Sedimentschicht 0-1cm berücksichtigt.

Wenn nur mit der Remineralisierung dieses Material gerechnet wird, erhöht sich die tägliche Abbauleistung beträchtlich. Zu Zeiten hoher Abbauleistung würden pro Tag mehr als 7% des vorliegenden Materials remineralisiert. Im Frühjahr und Sommer 1986 lagen allerdings auch diese Werte weitaus niedriger (meist <1%).

c) errechnet aus Sauerstoffzehrung und Kohlenstoff

Auch der Sauerstoffverbrauch des Benthos läßt sich in eine Abbauleistung umrechnen (Abb.56; Ivlev, 1934). Es wurde ein Respirationsquotient (RQ) von 1 gewählt, der den Verhältnissen im Sediment nahe kommt (Pamatmat, 1971). Die Zehrung des Sedimentes wird durch Sauerstoffmessungen im über dem Sediment stehenden Wasser ermittelt, eine einfache Zuordnung dieser Messungen zu bestimmten Sedimentschichten ist nicht möglich. Es wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Schicht 0-4cm gewählt.

Der durch die Sauerstoffzehrung ermittelte prozentuale tägliche Abbau ist etwa einen Faktor 10 niedriger, als der durch Wärmeproduktion ermittelte. Hohe Verhältnisse im Sommer 1986 müssen als durch Artefakte bei der Zehrungsmessung (siehe S.8) entstanden bewertet werden.

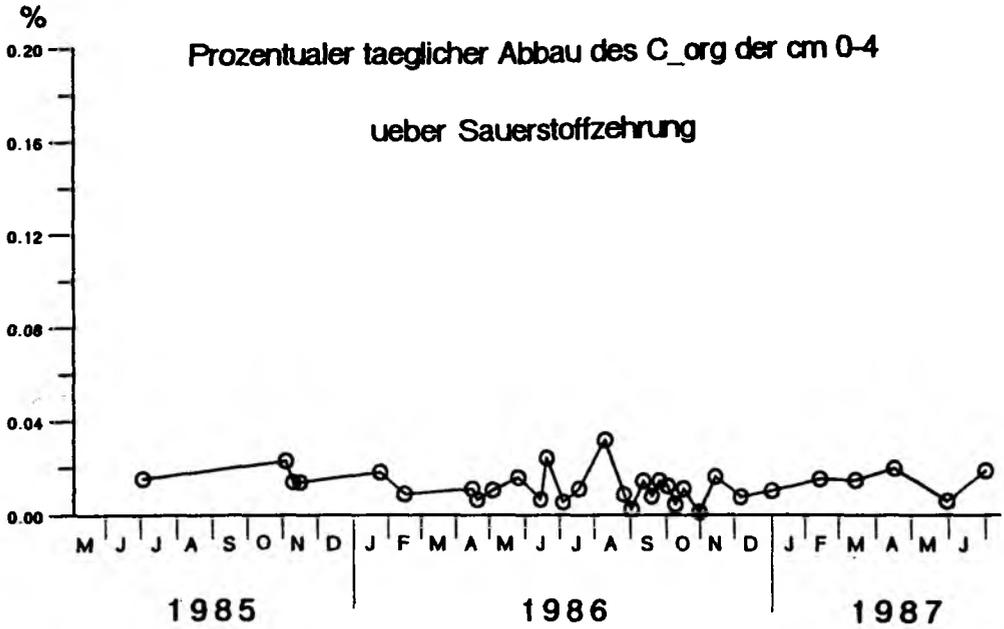


Abb.56 Täglicher Abbau von organischem Material in Prozent vom Kohlenstoff der Schicht 0-4cm, ermittelt über Sauerstoffzehrung (17m Station)

## 4. Diskussion

### 4.1. Beschreibung der einzelnen Stationen

#### 4.1.1. 12m Station

Das Sediment an der 12m Station besteht aus mittelgrobem Sand mit nur einem geringen Anteil von organischem Material (organische Substanz etwa 0.2-0.5% vom Trockengewicht). Mit 15-20% vom Feuchtvolumen ist der Wassergehalt niedrig. Teilweise wurden fädige Grünalgen und kleinere Thalli von Rotalgen in den Proben gefunden. Im Sediment sind nicht ausreichend größere Steine vorhanden, um ausgedehnteren Makroalgenbeständen Halt zu bieten. Das Auftreten ausgedehnter Sandrippelfelder weist auf den erodierenden Einfluß von Seegang hin (Grafenstein 1982). Die 12m Station liegt im Gegensatz zu den übrigen Stationen im überwiegenden Teil des Jahres innerhalb der euphotischen Zone. Die benthische Primärproduktion ist deshalb von großer Bedeutung. Durch eine ständige Remineralisierung tritt kein Nährsalzmangel auf. In den lichtreichen Sommermonaten sind hohe Chlorophyll<sub>a</sub> Konzentrationen die Regel. Da diese Station im Sommer oberhalb der thermischen Sprungschicht in der Zone der pelagischen Primärproduktion liegt, können die benthischen Filtrierer unter der Makrofauna die Phytoplanktonproduktion direkt nutzen. Der Kohlenstoffhaushalt des Sedimentes dieser Station ist daher weniger, als an den tieferen Stationen, durch Sedimentationsereignisse beeinflusst. Mit dem Anstieg der Chlorophyll-Konzentrationen im Frühling-Sommer steigen die Kohlenstoffwerte ebenfalls an. Diese hohen Kohlenstoffwerte wurden bis in den Winter hinein gemessen, wenn die Lichtmenge für eine größere Primärproduktion nicht mehr ausreicht und die Chlorophyll<sub>a</sub> Konzentrationen bereits wieder gering sind. Die "Proteingehalte" stiegen später als die Chlorophyll<sub>a</sub>- und Kohlenstoffwerte an, blieben aber ebensolange hoch wie die Kohlenstoffwerte.

Die Tendenz zu abnehmenden "Protein"- (signifikant) und Kohlenstoffwerten (nicht signifikant) während der 26 Monate

dieser Untersuchung ist wahrscheinlich durch die langanhaltende Eisbedeckung in den Wintern 1985/86 und 1986/87 bedingt. Besonders prägnant war die Abnahme der Kohlenstoff- und "Proteinkonzentrationen" vom Dezember 1985 - Januar 1986 bis zum April - Mai 1986 und das Ansteigen der Chlorophyllkonzentrationen im späten Frühjahr 1986. Im weiteren Verlauf des Jahres 1986 stieg die Konzentration nicht so hoch an wie im entsprechenden Zeitraum von 1985.

Da im Unterschied zu den drei tiefer gelegenen Stationen eine Versorgung des Sedimentes an der 12m Station mit Sauerstoff fast ständig gewährleistet ist, wird nahezu das gesamte zur Verfügung stehende organische Material auch völlig abgebaut. Es bleiben nur wenige schwer abbaubare Substanzen im Sediment zurück. Da außerdem das Verhältnis "Protein" zu Kohlenstoff signifikant sinkt, scheint während der Untersuchung an der 12m Station eine Unterversorgung mit organischem Material vorgelegen zu haben.

#### 4.1.2. 17m Station

Die 17m Station wurde als eine der beiden Hauptstationen ausgewählt, da der Tiefenbereich um 17m als das artenreichste Gebiet des Benthals der Kieler Bucht gilt. Auch die Fischerei nutzt diesen Tiefenbereich besonders intensiv. Eine Verschlechterung der Lebensbedingungen in diesem Tiefenbereich könnte das Ökosystem der Kieler Bucht überproportional stark ändern.

Die benthische Primärproduktion allein reicht hier zu einer Ernährung des Benthos nicht aus. Da diese Station etwa von April/Mai bis November/Dezember unterhalb der Dichtesprungschicht (<15m) liegt, können die benthischen Filtrierer keine größeren Mengen an Nahrung direkt aus dem Lebensraum des Phytoplanktons gewinnen. Das Benthos ist daher auf eine Zufuhr organischen Materials durch Sedimentation oder durch laterale Advektion angewiesen. Die benthische Stoffwechselaktivität, gemessen als Wärmeproduktion, wird durch die wechselhafte Zufuhr von organischem Material einerseits, und Sauerstoff andererseits kontrolliert und somit weniger durch

Temperaturunterschiede gesteuert.

Ein großer Anteil der jährlichen Zufuhr an organischem Material wird während kurzfristiger Ereignisse eingetragen. Im Frühjahr und im Herbst sedimentieren Phytoplanktonblüten, und im Winter erreichen Reste von losgerissenen Makrophyten aus flacheren Gebieten die Station. Im Vergleich dazu ist die Menge an leicht abbaubarer Substanz, die im Sommer aus der Wassersäule oberhalb der Sprungschicht sedimentiert, gering. Ein Teil des Kohlenstoffbedarfes wird aus resuspendiertem Material gedeckt, das durch laterale Verdriftung diese Station erreicht. Einen nicht geringen Anteil daran haben die Suspensionsfresser, denen ein direktes Partizipieren an der Primärproduktion nur kurze Zeit im Jahr möglich ist. Die starken Anstiege der Chlorophyll\_a Konzentrationen im Sediment jeweils im April sind auf die Sedimentation der Frühjahrsdiatomeenblüten zurückzuführen. Die Herbstblütensedimentation ist weniger deutlich erkennbar, da vorwiegend die in der Wassersäule zerfallenden Ceratien sedimentieren.

Biomasse- (ATP-Konzentration) und Aktivitäts-Parameter (Wärmeproduktion und Sauerstoffzehrung) erreichten nicht immer die erwarteten hohen Werte nach den Sedimentationsereignissen (Graf, 1988). Die Wärmeproduktion sank im Winter 1985/86 auf extrem niedrige Werte und blieb relativ niedrig bis Oktober 1986. Ihre Entsprechung fanden diese Ergebnisse in den ATP Konzentrationen. Im Januar 1986 schien die benthische Gemeinschaft völlig zusammenzubrechen und erholte sich erst gegen Ende des Jahres wieder. Eine geringfügig höhere ATP-Konzentration im Sommer 1986 in 4-5cm Sedimenttiefe deutet auf eine Verstärkung des anoxischen Stoffwechsels hin. Die Messungen der Sauerstoffzehrung unterstützen prinzipiell diese Deutung, allerdings wurden im Sommer 1986 einige extrem hohe Werte gemessen, die durch methodische Fehler entstanden sein können. Es wurden zudem niedrige Redoxpotentialwerte gemessen, die 100mV Linie z.B. stieg im Sommer 1986 bis dicht unter die Sedimentoberfläche.

Ab April 1986 lag die 17m Station bei windarmen Wetterlagen unterhalb der Dichtesprungschicht, wodurch sich

die Zufuhr von Sauerstoff von der Wasseroberfläche stark verringerte. Nach den ersten Starkwindereignissen im Oktober 1986 änderten sich die Verhältnisse wieder. Zwar wurde die Schichtung noch nicht aufgehoben, das Redoxpotential stieg aber wieder an. In der Folgezeit steigerte sich sowohl die Aktivität (Wärmeproduktion) als auch die gemessene Biomasse (ATP).

Der "Proteingehalt" des Sedimentes veränderte sich erwartungsgemäß, fallend im Winter mit Absterben großer Teile der Organismen und steigend nach den Sedimentationsereignissen. Der "Proteingehalt" stieg besonders in den tieferen Schichten durch Anhäufung solcher Stoffe, die anoxisch schlecht abbaubar sind, ab Sommer 1986 im Mittel kontinuierlich an. Wird der gesamte Untersuchungszeitraum betrachtet, lag besonders in den tieferen Schichten ein signifikanter Trend zu höheren "Proteinkonzentrationen" vor. Ein ähnlicher Kurvenverlauf ließ sich auch für den Kohlenstoff erwarten. Doch sank der Gehalt an Kohlenstoff bis Juni/Juli 1986 stetig in fast allen beprobten Schichten und stieg erst nach der Sedimentation der Herbstblüte wieder. Hier lag eine signifikante Tendenz zu niedrigeren Werten vor. Das überraschende Ergebnis, daß zu Zeiten geringer Abbauleistung niedrigste Werte der Kohlenstoffkonzentration auftreten, läßt darauf schließen, daß die Zufuhr von organischem Material geringer war als der Verlust durch Abbau. Eine Interpretation könnte sein, daß die Zufuhr von in tieferen Gebieten resuspendierter organischer Substanz durch die lange Eisbedeckung Anfang 1986 und anschließendem langanhaltend windarmen Wetter verringert war.

Zudem kommt es zu einer Anreicherung von Stoffen, die unter Sauerstoffmangelbedingungen nicht oder nur langsam abgebaut werden, hier meßbar als Erhöhung der "Proteinkonzentration".

Allerdings sammelten sich auch nach einem Sommer mit geringer Sauerstoffzufuhr nicht solche große Mengen abbaubarer Materialien an, daß es durch sofortige Oxidation zu dauerhaft anoxischen Zuständen in den oberen Zentimetern

des Sedimentes gekommen wäre. Nach dem Winter 1986/87 erreichte das Redoxpotential seine höchsten Werte.

#### 4.1.3. Die 19m Station

Das Sediment der 19m Station, der tiefsten Station im Bereich Gabelsflach, befindet sich lange Zeit während des Jahres (etwa von April bis Oktober) unterhalb der thermischen Sprungschicht. Eine nennenswerte benthische Primärproduktion ist wegen Lichtmangel nicht zu erwarten. Der Stoffwechsel der Organismen ist nahezu vollständig von einer Zufuhr abbaubaren Materials aus der Wassersäule bzw. aus flacheren Gebieten abhängig.

Nach der Korngröße muß das Sediment als Feinsand klassifiziert werden, es ist allerdings bereits leicht schlickig. Die Konzentrationen von Kohlenstoff und "Protein" waren etwa doppelt so hoch wie an der 17m Station. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff änderte sich über den Untersuchungszeitraum nicht signifikant. Im obersten Zentimeter war ein nichtsignifikanter schwacher Anstieg erkennbar. Der "Proteingehalt" zeigte, insbesondere ab der zweiten Hälfte des Jahres 1986, einen drastischen Anstieg, der sowohl über den gesamten Untersuchungszeitraum als auch im Jahr 1986 signifikant war. Auch nach einer Korrektur entsprechend dem steigenden Wassergehalt ist die Zunahme signifikant. Von allen Stationen sind die Veränderungen des "Proteingehaltes" auf der 19m Station am deutlichsten zu erkennen. Auch die Chlorophyll<sub>a</sub> Konzentrationen zeigten einen signifikanten Anstieg, der besonders durch die hohen Konzentrationen in der zweiten Jahreshälfte 1986 bewirkt wurde.

Die steigenden Konzentrationen des "Proteins" bis in 4cm Tiefe lassen den Schluß zu, daß kein Gleichgewicht zwischen der Remineralisierung und der Zufuhr bestand. Die 19m Station muß daher als eine Station betrachtet werden, die durch Eutrophierung gefährdet ist.

#### 4.1.4. Die 28m Station

Die in 28m Tiefe liegende Station bei Bokniseck

unterscheidet sich grundlegend von den Stationen bei Gabelsflach. Sie ist ein Teil des Systems tieferer Rinnen, die die Kieler Bucht durchziehen. Diese Rinnen unterliegen häufigen Salzgehaltsschwankungen durch die wechselnden Zuflüsse salzhaltigeren Tiefenwassers aus den Belten. Der Salzgehalt in Bodennähe ist daher fast immer größer als darüber. Eine starke Salzgehaltssprungschicht ist die Folge, die eine Durchmischung der Wassersäule bis zum Boden, mit Ausnahme weniger Male im Winter, während des ganzen Jahres verhindert.

Durch die verminderte Zufuhr von Sauerstoff ist das Sediment in 28m selbst an der Oberfläche so gut wie immer sub- bzw. anoxisch. Organisches Material wird unter Sauerstoffabschluß langsamer und oft nicht vollständig abgebaut, so daß insbesondere schwerer abbaubares Material akkumulieren kann.

Die Rinnen sind Auffangbecken von Material, welches die flacheren Bereiche passiert. Die 28m Station liegt daher in einem Ablagerungsgebiet, in dem die Sedimentmächtigkeit ständig wächst. Das Sediment ist extrem wasserhaltig und leicht aufzuwirbeln. Bei geeigneten Bedingungen ist daher eine Resuspension möglich, durch die Material von der 28m Station auf die flacheren Stationen zurückverfrachtet werden kann.

Die "Proteinkonzentrationen" sind höher als an den anderen Stationen. In diesen anoxischen Gebieten hat sich eine, speziell an diese Verhältnisse angepaßte Lebensgemeinschaft entwickelt, die auch unter diesen extremen Bedingungen noch hohe (Bakterien-) Biomasse aufbauen kann. An der Sedimentoberfläche wurden ATP Konzentrationen gemessen, die zeitweilig höher waren als auf der 17m Station. Auch in den tieferen Sedimentschichten waren die ATP-Konzentrationen mit denen der flacheren Station vergleichbar. Über den 26-monatigen Untersuchungszeitraum liegt an der Sedimentoberfläche eine Tendenz zu niedrigeren ATP-Werten vor, der letzte Meßpunkt im Juni 1986 war allerdings der höchste der Meßreihe.

Die Wärmeproduktion war in der Schicht 2-4cm ebenso hoch

wie in der Schicht 0-2cm.

Die "Proteinkonzentration", hier interpretiert als zum großen Teil schwerer abbaubare Substanzen, stieg in allen Sedimentschichten während der Untersuchung signifikant an.

Die Isolinie des Redoxpotentials von -100mV lag von August 1985 bis Dezember 1986 ständig in einer Tiefe zwischen 1.5 und 3cm, danach sank sie bis in etwa 5cm Tiefe ab.

Obwohl das Sediment an der 28m Station bereits stark verschlickt ist, nahm der Gehalt an organischem Material im Untersuchungszeitraum weiter zu. An dieser Station angesammeltes Material ist nicht unbedingt aus dem Stoffkreislauf herausgenommen, es kann nach Resuspension und erneuter Sedimentation zu flacheren Stationen gelangen und dort den Sauerstoffbedarf erhöhen.

#### 4.2. Zuordnung von Ereignissen in der Wassersäule und im Benthos

Die benthische Lebensgemeinschaft reagiert auf äußere Einwirkungen wie erhöhte Zufuhr von Nahrung oder Änderungen der Verfügbarkeit von Sauerstoff. Die Reaktionen des Benthos auf die Sedimentation von Phytoplanktonblüten sind im Bereich der Kieler Bucht gut dokumentiert (z.B. Graf, 1987). Während der Untersuchung konnten vier Phytoplanktonblüten beobachtet werden (M. Sommer, in Vorb.), die Auswirkungen auf das Sediment der 17m Station werden im Folgenden beschrieben.

Im Oktober 1985 endete eine Planktonblüte, die vor allem von Ceratien gebildet wurde. Der Beginn konnte nicht genau bestimmt werden. Von September bis Oktober 1985 wurde eine hohe Wärmeproduktion im Sediment der 17m Station gemessen. Die Sauerstoffzehrung im November 1985 war deutlich erhöht (von Juli bis Anfang November liegen keine Daten vor). Die Kohlenstoffkonzentrationen erreichten zwischen September und November 1985 maximale Werte. Im November stieg der Chlorophyll\_a Gehalt an. Diese Veränderungen lassen sich als Reaktion des Benthos auf die Sedimentation einer Herbstblüte 1985 deuten (vgl. Czytrich et al., 1986).

Anfang Februar 1987 wurde eine hohe Wärmeproduktion gemessen, solche Peaks im Winter wurden von Graf (1983; 1987b) ebenfalls beschrieben und auf einen Eintrag von Makroalgen zurückgeführt. Nach Abele (1988) wurden im Winter 1986/87 im Sediment der 17m Station keine Pigmentkonzentrationen gemessen, die auf einen größeren Eintrag von Makroalgen hindeuten würden. Wahrscheinlicher scheint eine Aktivitätssteigerung durch Zufuhr von Sauerstoff, erkennbar an der Erhöhung des Redoxpotentials, wodurch Material abgebaut werden konnte, welches sich ab Juni 1986 angesammelt hatte.

Die Frühjahrsblüte im Jahr 1986 entwickelte sich nach M. Sommer (in Vorb.) relativ spät im März bis April.

Das Benthos reagierte im April 1986 durch verstärkte Aktivität, die eine höhere Wärmeproduktion verursachte. Eine etwas stärkere Sauerstoffzehrung war ebenfalls erkennbar. Sehr deutlich ist der Anstieg der Chlorophyll\_a Konzentration Ende April.

Im Herbst 1986 bildete sich zwischen Oktober und November erneut eine Ceratienblüte. Die Wärmeproduktion im Sediment stieg ab Oktober stark an und blieb während des folgenden Winters hoch. Die Sauerstoffzehrung, der Chlorophyll\_a- und Kohlenstoffgehalt blieben dagegen relativ niedrig, während in den oberen 4cm des Sedimentes die "Proteinkonzentrationen" anstiegen. Ein Kausalzusammenhang dieser Ergebnisse konnte nicht gefunden werden.

Trotz relativ langer Eisbedeckung entwickelte sich die Frühjahrsblüte der Diatomeen im Jahr 1987 früh. Bereits im Februar wurden grosse Anzahlen an Phytoplankton gezählt. Als Folge stiegen die Kohlenstoff-, "Protein"- und Chlorophyll\_a-konzentrationen im Sediment an. Die Wärmeproduktion, hoch seit der vorherigen Herbstblüte, steigerte sich noch einmal und die Sauerstoffzehrung erreichte hohe Werte.

Konzentrationsänderungen als Folge der Sedimentation von Phytoplanktonblüten lassen sich auf den Stationen in 19m und 28m Tiefe ebenfalls erkennen. Die 12m Station bildet eine Ausnahme, denn Veränderungen aufgrund von Sedimentations-

ereignissen ließen sich nicht erkennen.

Im Sommer 1986 waren starke Veränderungen von vielen Parametern auf allen vier Stationen erkennbar. Von Mitte Juni an bis August sanken auf den Stationen 17m, 19m und 28m deutlich die "Proteingehalte", auf der 12m Station war diese Tendenz ab Ende Juni zu erkennen. Die Kohlenstoffgehalte tendierten im gleichen Zeitraum zum Steigen. Die Chlorophyll\_a-Werte hatten zu dieser Zeit große Konfidenzbereiche, die Mittelwerte waren hoch. Das Redoxpotential auf den Stationen 17m und 28m war sehr niedrig. Auf 28m stiegen Mitte Juni Wärmeproduktion und ATP-Gehalt. Auf 17m wurde Mitte Juni 1986 eine etwas höhere Wärmeproduktion gemessen. Zu dieser Zeit stieg der Salzgehalt in der Wassersäule generell an, in 26m Tiefe um mehr als  $10 \cdot 10^{-3}$ , an der Wasseroberfläche immerhin noch um fast  $4.5 \cdot 10^{-3}$ . Diese drastische Änderung des Salzgehaltes kann nur durch den Einstrom von Wasser aus den Belten verursacht worden sein.

Während einer Ausfahrt Mitte August 1986 wurde in der Wassersäule ein geringfügig niedrigerer Salzgehalt gemessen, die Sedimenttemperatur auf den Stationen 12m, 17m und 19m sank gleichzeitig um etwa  $1.5^{\circ}\text{C}$ . In 28m Tiefe konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Wahrscheinlich ist ein kurzfristiger Rückstrom des eingeflossenen Wassers verantwortlich für diese Veränderungen.

Ebenfalls ab Mitte August 1986 stiegen die "Proteingehalte" in allen Tiefen sehr deutlich an, während die Wärmeproduktion auf 17m und 28m sehr gering war. Auch die ATP-Konzentrationen auf 28m fielen wieder stark ab.

Ein sehr ähnliches Phänomen war im November 1983 in Boknis Eck beobachtet worden (Czytrich et al., 1986). Einem Einstrom von Wasser mit höherem Salzgehalt folgte eine Zunahme der Wärmeproduktion und ein Anstieg der ATP-Konzentration bei gleichzeitig sinkenden Redoxpotentialwerten. In der Sinkstofffalle wurde im November 1983 nur wenig sedimentiertes Material gefunden. Auch im Juni 1986 wurde nur eine geringe Sedimentationsrate an

Chlorophyll\_a ermittelt, die Sedimentation im Juli 1986 dagegen war hoch.

Als Erklärung für den gesteigerten Stoffumsatz im Herbst 1983 wurde die Umlagerung von Substanzen (gelöste und partikuläre) im Sediment selbst durch Porenwasseraustausch vermutet (s.a. Duursma und Smies, 1982). In Laborexperimenten mit Sedimentkernen von 10cm Durchmesser konnte dieser Prozeß allerdings nicht nachvollzogen werden (Koeve, 1986). Möglich ist auch ein Eintrag von Material durch Strömungen in Bodennähe unterhalb der Sinkstoffallen. Die Sestonkonzentrationen in der freien Wassersäule oberhalb von 25m waren im Jahr 1983 allerdings gering. Ein lateraler Transport müßte demnach unabhängig von der Wassertiefe an den Stationen immer in Bodennähe stattgefunden haben (siehe auch Rhoads et al., 1984).

### 4.3. Bilanzierungen

#### 4.3.1. Bilanz des org. Materials im Sediment der 17m Station

Eine Bilanzierung der organischen Substanz im Sediment erfordert die Aufrechnung der Zufuhr von Material zum Boden, des Abbaus und der Einlagerung desselben im Sediment.

Von allen vier Stationen liegt für die 17m Station der beste Datensatz vor. Es soll daher für diese Station eine Bilanzierung für das Jahr 1986 vorgenommen werden.

##### a) Zufuhr von organischer Substanz

Durch die Sedimentation von Phytoplankton in der Zeit von Mai bis Dezember 1986 gerieten etwa  $0.22\text{gm}^{-2}$  Chlorophyll\_a-Äquivalente in die Sinkstofffalle. Bei einem Verhältnis von 100 zu 1 von Kohlenstoff zu Chlorophyll\_a wären demnach  $22\text{gm}^{-2}$  an Kohlenstoff sedimentiert. Eine etwa gleich hohe Sedimentation kann für die Zeitspanne von Januar bis Mai angenommen werden. In der Literatur wird die jährliche Sedimentation von Phytoplanktonkohlenstoff in der Kieler Bucht mit etwa 50 bis  $65\text{gCm}^{-2}$  angegeben (von Bröckel 1975, Smetacek 1980).

Für die Bilanzierung soll hier eine Sedimentation von 44 bis  $65\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  angenommen werden.

Nach Abele (1988) wird in den tieferen Gebieten der Kieler Bucht durch Rotalgendetritus etwa 10% der Menge des Phytoplanktonkohlenstoffes zugeführt. Der Eintrag für die 17m Station wurde nicht quantifiziert. Nach Liebezeit (1986) stammen 73% der Kohlenhydrate in den Sedimenten der Kieler Bucht aus Makroalgen.

##### b) Abbau von organischer Substanz

Unter der Annahme, daß organisches Material mit einem Gehalt von 1g Kohlenstoff bei Verbrennung 40KJ Wärme erzeugt, wurden die Wärmeproduktionsdaten in Abbauleistungen umgerechnet.

Im obersten Zentimeter wurden pro Jahr etwa  $90\text{gCm}^{-2}$  abgebaut, wenn über die nicht beprobten Zeiten linear interpoliert wird. Für die Schicht 0-4cm betrug die

Abbauleistung etwa  $400\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ . Die Remineralisierung war im Jahr 1986 niedriger als in der Literatur für vergleichbare Stationen angegeben wird. Dies ist wahrscheinlich auf eine Sauerstoffmangelsituation zurückzuführen, die sich sehr früh im Jahr entwickelte und nach Beobachtung bei der Probennahme zum Zusammenbruch der Makrofaunapopulation führte. Die durch Umrechnung der Sauerstoffzehrungsraten ermittelten Abbauleistungen waren entsprechend niedrig ( $\text{ca.}40\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ ). Sie dürfen daher, weil sie nicht den gesamten benthischen Stoffwechsel erfassen, nicht als Grundlage der Bilanzierung herangezogen werden (ausführlich siehe dazu: Graf, 1988).

### c) Gehalt an Kohlenstoff im Sediment

Der Kohlenstoffgehalt nahm an dieser Station während der Untersuchung geringfügig ab, in der Schicht 0-1cm um  $4\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  und in der Schicht 0-4cm um  $20\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ . Diese Mengen wurden dem Sediment selbst entzogen und müssen in der Bilanz als Zufuhr berücksichtigt werden.

Der Bedarf an Kohlenstoff im Jahr 1986 kann für die Schicht 0-4cm auf  $400 - 20 \text{ gCm}^{-2}\text{y}^{-1} = 380\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  abgeschätzt werden.

Diesem Bedarf steht eine Zufuhr durch vertikale Sedimentation von etwa  $44-65\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  entgegen.

Ähnlich krasse Mißverhältnisse zwischen vertikaler Zufuhr und Bedarf an organischem Material in der Kieler Bucht wurden von verschiedenen Autoren beschrieben. Neben Ungenauigkeiten der Methoden, wobei besonders eine Unterschätzung der Sedimentation bei Verwendung von Sinkstofffallen genannt wird (Graf, 1988), wird eine seitliche Verdriftung von Material zur Erklärung herangezogen (Graf et al., 1983; Balzer et al., 1986).

Scheinbar als Widerspruch zur Abnahme des Kohlenstoffs erscheint die gleichzeitige Zunahme an "Protein" an der 17m Station. Während der Kohlenstoffgehalt in der Schicht 0-4cm um etwa  $20\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  sank, stieg der "Proteingehalt" gleichzeitig um etwa  $21\text{gm}^{-2}\text{y}^{-1}$ . Der Kohlenstoff im "Protein"

ist nur ein Teil des gesamten Kohlenstoffpools (etwa 1:5 an der 17m Station), die Konzentrationen von Nicht-"Protein"-Verbindungen mit Kohlenstoff können sich unabhängig von "Protein"-Konzentrationen ändern.

Da die "Proteine" zum großen Teil schwerabbaubare Substanzen repräsentieren, bedeutet dies eine Verschiebung des Verhältnisses von leicht- zu schwerabbaubaren Verbindungen. Die Isolinien des Verhältnisses "Protein" zu Kohlenstoff (Abb.52) zeigen, daß diese Verschiebung insbesondere in den tieferen Sedimentschichten stattgefunden hat.

Wird der Gehalt des "Proteins" an Kohlenstoff mit 53.5% angenommen (Strickland, 1960), so ergibt sich eine Verschiebung des Anteils des Kohlenstoffs aus "Protein" am Gesamtkohlenstoffgehalt von anfänglich ca. 20% auf 24% nach einem Jahr.

Das Verhältnis von "Protein" zu Kohlenstoff scheint invers mit dem Redoxpotential des Sedimentes verknüpft zu sein. Die Verhältniszahl ist dann niedrig, wenn das Redoxpotential hoch ist. Auch bei niedrigem Redoxpotential, d.h. unzureichender Zufuhr von Sauerstoff, wird organisches Material abgebaut, wodurch sich der Gehalt an Kohlenstoff im Sediment verringert. Dieser Abbau ist jedoch nicht vollständig, teilweise bilden sich schwerer abbaubare Verbindungen, die den "Protein"-Pool erhöhen. Die Proteasen-Aktivität ist bei Sauerstoffmangel vermindert (Meyer-Reil, 1983), was zu einer weiteren Akkumulation von "Protein" führt.

Gelangt nun durch die Durchmischung der Wassersäule im Winter Sauerstoff zum Boden, dann kann auch ein Teil der schwerer abbaubaren Verbindungen noch remineralisiert werden, der "Proteingehalt" sinkt. Da "Protein" auch Kohlenstoff enthält, sinkt neben dem "Proteingehalt" in geringerem Umfang auch der Kohlenstoffgehalt des Sedimentes. Das Verhältnis "Protein" zu Kohlenstoff wird insgesamt geringer.

#### 4.3.2. Flächendeckende Bilanzierung

Die beprobten Stationen können aufgrund der Sedimentzusammensetzung und ihrer Tiefe bestimmten Tiefenlagen bzw. bestimmten Flächen der Kieler Bucht zugeordnet werden.

Die 12m Station soll als stellvertretend für den Tiefenbereich 0-14m mit einer Fläche von 817km<sup>2</sup> gelten. Entsprechend wurde der 17m Station der Tiefenbereich von 14-18m mit 662km<sup>2</sup>, der 19m Station der Bereich 18-22m mit 632km<sup>2</sup> und der 28m Station der Bereich 22-36m mit 460km<sup>2</sup> zugeordnet (Flächenangaben aus Babenerd und Gerlach, 1987). Die Mengen an organischer Substanz bzw. an "Protein" im Sediment der einzelnen Stationen wurden auf die entsprechenden Flächen hochgerechnet und auf eventuelle Tendenzen hin untersucht. Diese Berechnungen sollen eine grobe Abschätzung der wirklich involvierten Mengen sein. Dazu wird vorausgesetzt, daß die verschiedenen Tiefenbereiche in der gesamten Kieler Bucht gleichzeitig den gleichen Prozessen unterworfen sind wie die ausgewählten Stationen.

Für die organische Substanz bzw. den Kohlenstoff (Abb.57) in den oberen 4cm des Sedimentes ergibt sich im Bereich von 0-14m eine (allerdings nicht signifikante) Abnahme von täglich 15.6t org. Substanz und 7.8t Corg während der 26-monatigen Untersuchung. Die Tendenz im Bereich 14-18m war ebenfalls (aber signifikant) fallend, mit einem Verlust von etwa 60t org. Substanz bzw. 30t Kohlenstoff täglich. Im Gegensatz dazu gab es einen Zuwachs an organischer Substanz in ähnlicher Höhe im Bereich 18-22m, der Trend war allerdings nicht signifikant. Da auf der 28m Station kein Kohlenstoffgehalt gemessen wurde, fehlt der Tiefenbereich von 22-36m.

Der Tiefenbereich bis in eine Tiefe von 22m (=2111 km<sup>2</sup>) verlor demnach im Untersuchungszeitraum etwa insgesamt 16t organischer Substanz bzw. 8t Kohlenstoff pro Tag (Abb.58) das sind pro Jahr etwa 5840t org. Subs. bzw. 2920tC.

org. Substanz und Kohlenstoff der Schicht 0-4 cm

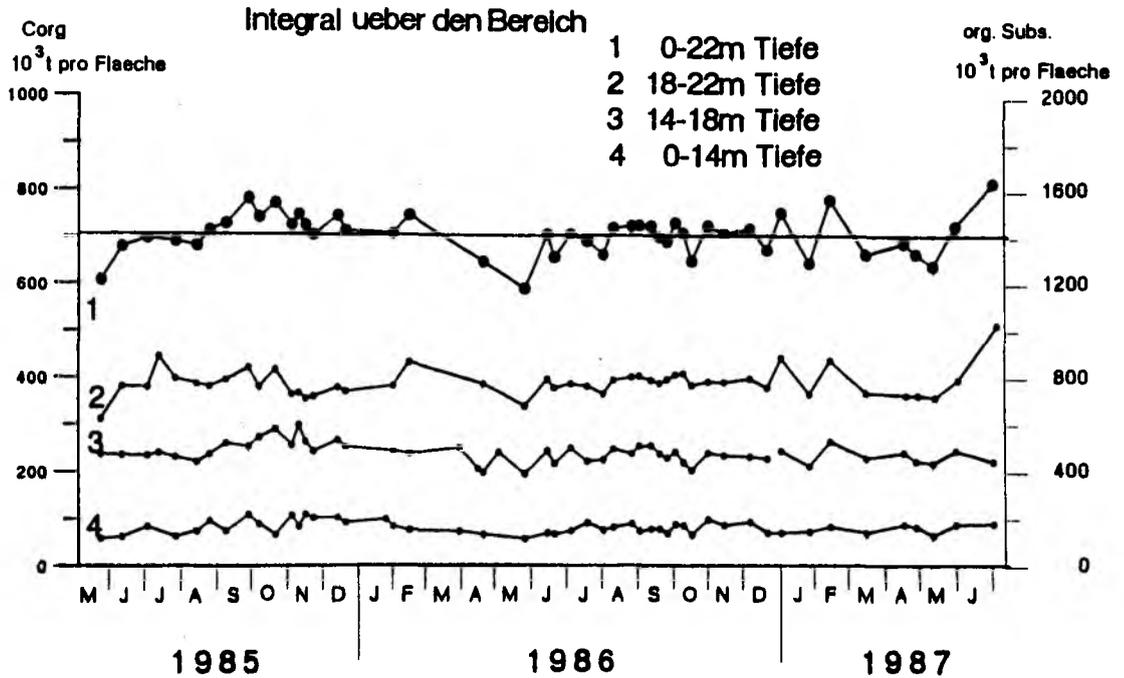


Abb.57 Mengen an organischer Substanz bzw. Kohlenstoffmengen der Schichten 0-4cm in drei Tiefenbereichen (0-14m, 14-18m und 18-22m der Kieler Bucht) und deren Summe (Summenkurve mit Regressionsgerade)

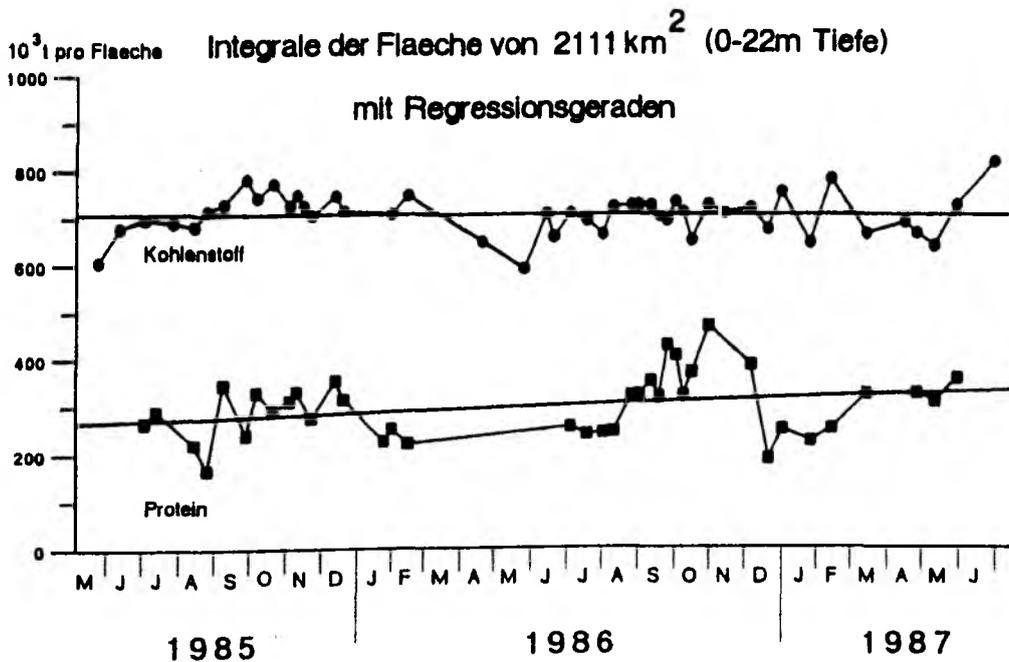


Abb.58 Kohlenstoff- und "Protein"mengen der Schicht 0-4cm integriert ueber die Flaechе des Tiefenbereiches 0-22m der Kieler Bucht ( $2111 \text{ km}^2$ ) mit Regressionsgeraden

Eine analoge Berechnung für "Protein" ergab eine Tendenz zu höheren Werten bei einem täglichen Zuwachs von etwa 80t oder 29200tC pro Jahr für den Bereich 0-22m (Abb.58). Für die gesamte Kieler Bucht (=2571 km<sup>2</sup>; Abb.59) ergab sich ein Zuwachs von etwa 200t "Protein" täglich oder 73000t "Protein" pro Jahr, nach der Regression ist dies ein Anstieg von 15.5% jährlich.

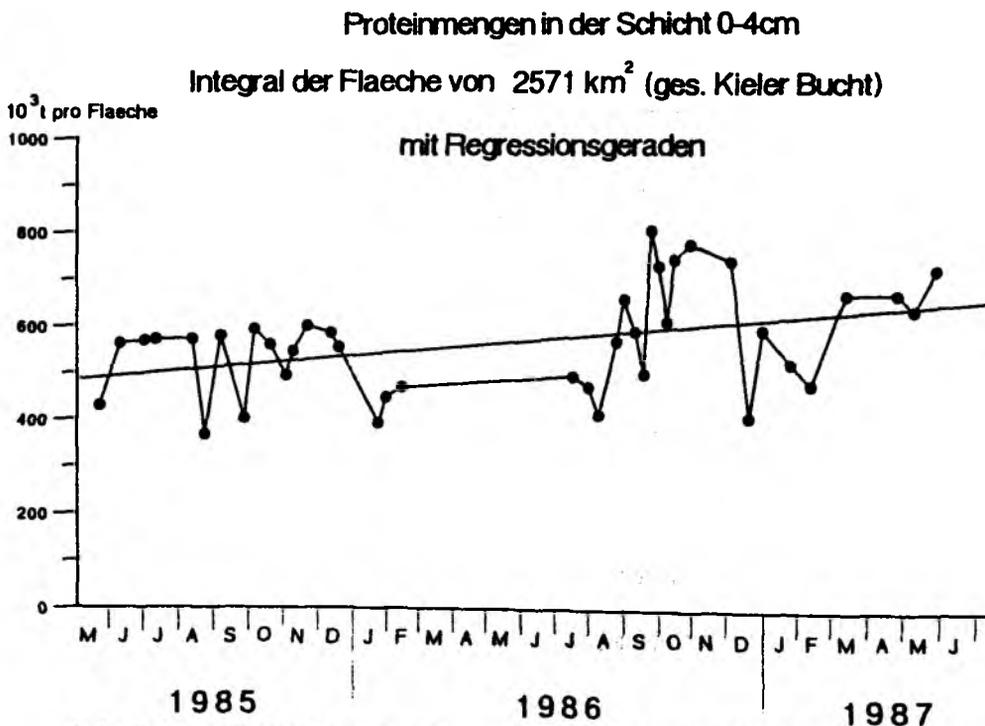


Abb.59 "Proteinmengen" der Sedimentschicht 0-4cm, Integral über die Fläche der gesamten Kieler Bucht (2571 km<sup>2</sup>)

Nach dieser Berechnung müssen im Sediment große Mengen an organischem Material in einen schwerer abbaubaren Zustand überführt worden sein, bzw. Proteine wurden nicht abgebaut, während sich der gesamte Bestand der organischen Substanz relativ wenig änderte.

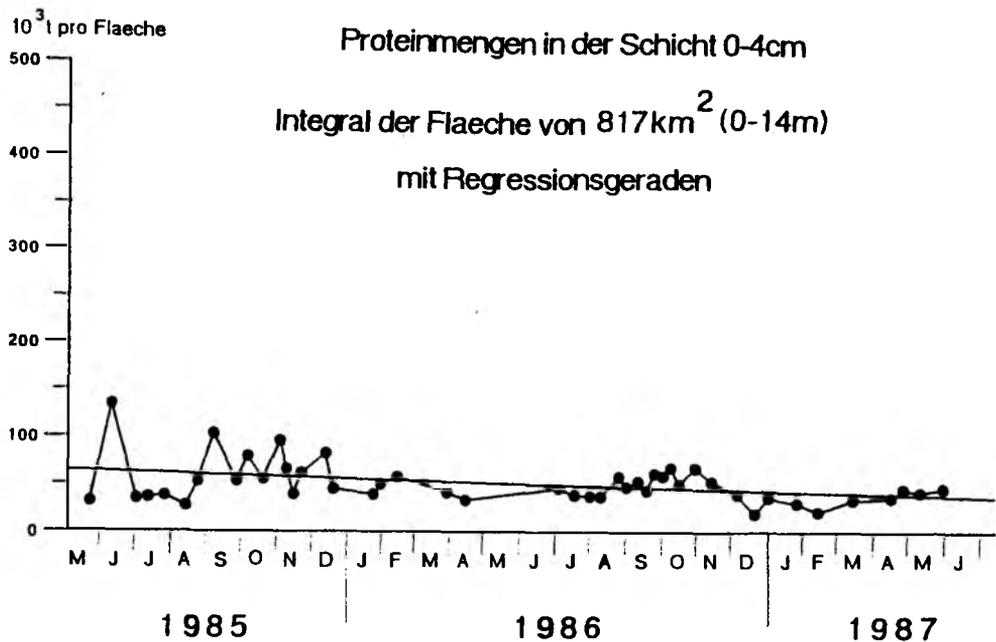


Abb.60 "Proteinmengen" der Sedimentschicht 0-4cm, Werte der 12m Station integriert über die Fläche des Tiefenbereiches von 0-14m Tiefe der Kieler Bucht (mit Regressionsgeraden)

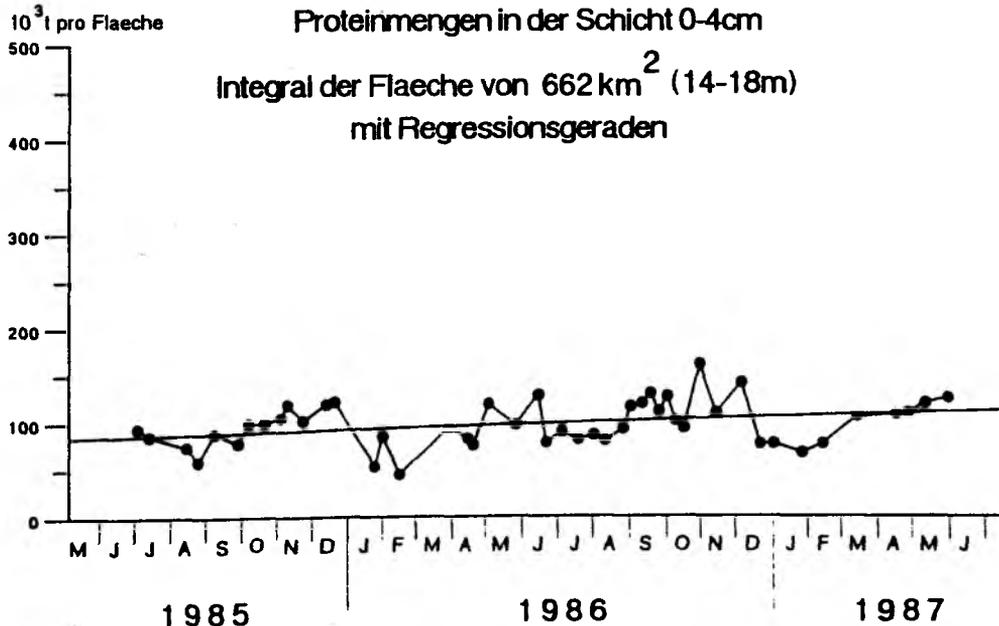


Abb.61 "Proteinmengen" der Sedimentschicht 0-4cm, Werte der 17m Station integriert über die Fläche des Tiefenbereiches von 14-18m Tiefe der Kieler Bucht (mit Regressionsgeraden)

In den einzelnen Tiefenbereichen waren die Veränderungen bis auf den Bereich 14-18m signifikant. Der Bereich 0-14m verlor etwa 30t "Protein" pro Tag (Abb.60, 19% pro Jahr). Auf dieser Station war der Verlust an "Protein" (30t) höher als der Verlust an organischer Substanz (15.6t). Diese Differenz läßt sich eher durch Meßungenauigkeiten als durch biologische Prozesse erklären.

Die Zunahme an "Protein" im Bereich 14-18m (Abb.61) war etwa  $35\text{td}^{-1}$  (15% pro Jahr), der Gewinn im Bereich 18-22m betrug etwa  $75\text{td}^{-1}$  (Abb.62; 23% pro Jahr), der des Bereiches 22-36m etwa  $110\text{td}^{-1}$  (Abb.63; 17% pro Jahr).

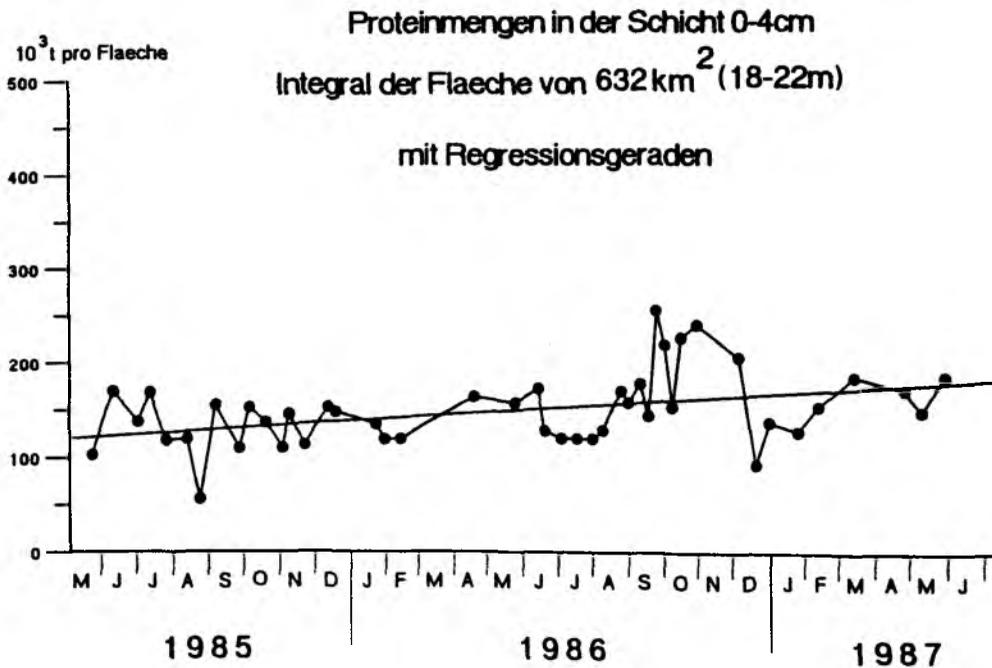


Abb.62 "Proteinmengen" der Schicht 0-4cm, Werte der 19m Station integriert über die Fläche des Tiefenbereiches von 18-22m Tiefe der Kieler Bucht (mit Regressionsgeraden)

Der Überschuß an "Protein" betrug in der Kieler Bucht im Untersuchungszeitraum etwa  $73000\text{ty}^{-1}$ . Das Verhältnis von "Protein" zu Stickstoff im Sediment liegt an der 19m Station etwa bei 5.5 : 1. An flacheren Stationen ist es etwas höher und bei 24m ist es mit 4.5 : 1 deutlich geringer. Zur Abschätzung des minimalen Gehaltes an akkumulierten Stickstoff soll hier das Verhältnis 6.25 : 1 wie von frischem

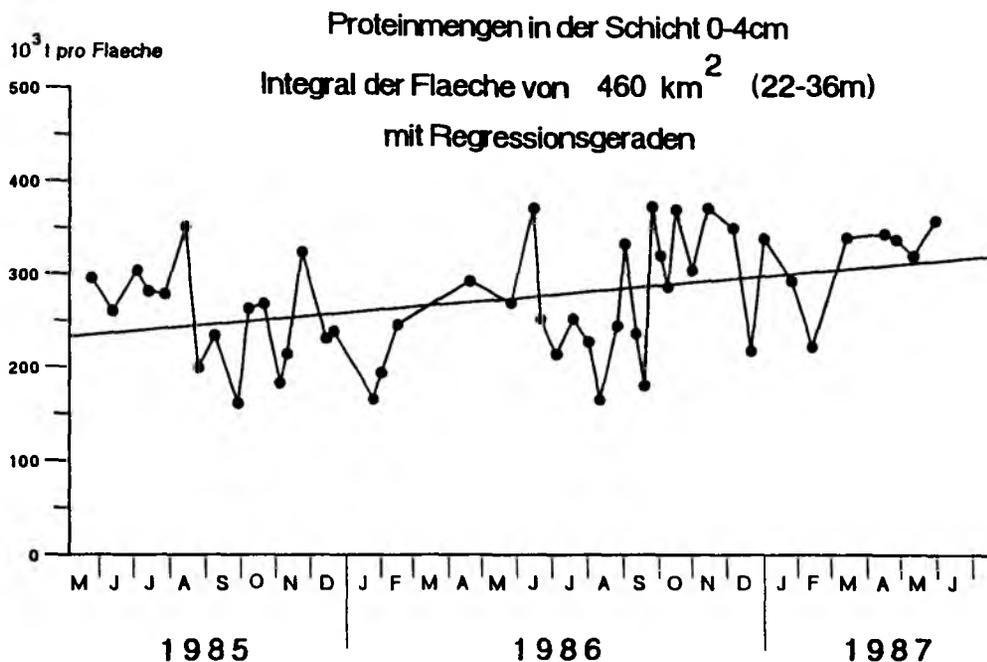


Abb.63 "Proteinmengen" der Sedimentschicht 0-4cm, Werte der 28m Station integriert über die Fläche des Tiefenbereiches von 22-36m Tiefe der Kieler Bucht (mit Regressionsgeraden)

Tab. 3

Jährliche Veränderungen der in den oberen 4cm des Sedimentes enthaltenden Mengen an org. Substanz bzw. "Protein".  
(in Tonnen pro Jahr; \* ermittelt durch lineare Regression der Summenkurve)

<u>Tiefenbereich</u>	<u>org. Substanz</u>	<u>"Protein"</u>
0-14m (817km <sup>2</sup> )	-5694	-10950
14-18m (662km <sup>2</sup> )	-21900	+12775
18-22m (632km <sup>2</sup> )	+21900	+27375
22-36m (460km <sup>2</sup> )	-	+40150
gesamte Kieler Bucht (2571km <sup>2</sup> )	-	+69350 (+73000*)

Material angenommen werden (nach dem Kjeldahlfaktor von 16%, Strickland, 1960). Berechnet mit diesem Faktor wären mit dem "Protein" etwa 12000t Stickstoff gebunden (Regression aus Abb.59; eine Aufsummierung der Werte der einzelnen Stationen ergibt 11300tNy<sup>-1</sup>).

Nach Prado-Fiedler (1988) gelangten 1986 über die Luft beim Leuchtturm Kiel etwa 2gNm<sup>-2</sup>y<sup>-1</sup> ins Wasser. Auf die gesamte Fläche (2571km<sup>2</sup>) hochgerechnet, gelangen damit etwa 5100ty<sup>-1</sup> in die Kieler Bucht, also fast die Hälfte der nach oben beschriebener Rechnung 1986 im Sediment festgelegten Menge.

Durch Einleitungen, durch Zufuhr über Flüsse und mit der Düngerabschwemmung gelangten nach Gerlach (1986) täglich etwa 35tN (abgeschätzt für die Jahre 1972-74) in die Kieler Bucht. Im Jahr wären das etwa 13000t Stickstoff.

Nach Balzer und Kähler (1989) werden in der Kieler Bucht etwa 1443t Stickstoff pro Jahr dauerhaft unterhalb der bioturbierten Zone abgelagert (tiefer als 10cm; Gesamtstickstoff).

Durch Denitrifikation verliert das Sediment der Kieler Bucht etwa 345lt Stickstoff pro Jahr (Kähler 1989).

Die Fixierung von Stickstoff durch Blaualgen ist in der Kieler Bucht von untergeordneter Bedeutung (Smetacek, 1975).

In Abb.64 sind schematisch die Stickstoffzufuhren über die Luft und durch Landabfluß sowie die Akkumulation von Stickstoff in der Schicht 0-4cm bzw. unterhalb von 10cm Sedimenttiefe dargestellt. Einer Zufuhr von etwa 18000t Stickstoff pro Jahr steht eine Denitrifikation und Akkumulation von zusammen etwa 17000t gegenüber. Dabei ist allerdings nicht berücksichtigt, wieviel eventuell in der nicht erfaßten Schicht 4-10cm des Sedimentes akkumuliert.

Der Eintrag an überwiegend nicht partikulär gebundenem Stickstoff von Land und über die Luft wäre fast ausreichend für die errechnete Akkumulation im Sediment bzw. Denitrifizierung. Voraussetzung ist allerdings eine Fixierung der gelösten Stickstoffverbindungen durch Primärproduktion.

Stickstoff-Fluesse in der Kieler Bucht  
in  $10^3 \text{ t Ny}^{-1}$

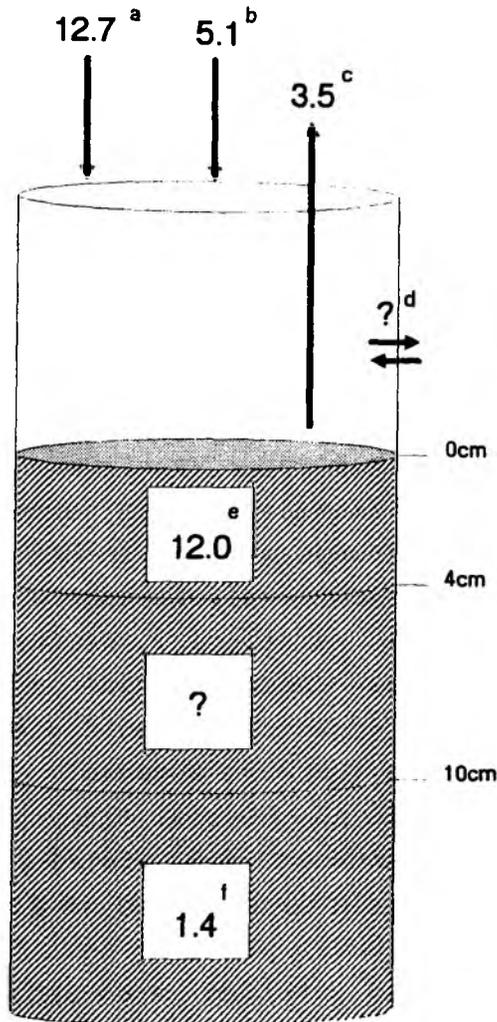


Abb.64 Schematische Darstellung der jährlichen Stickstoffzufuhren in die Kieler Bucht über Landabfluß<sup>a</sup> und Lufteintrag<sup>b</sup>, der Verlust durch Denitrifikation<sup>c</sup> und der Akkumulation von Stickstoff in den oberen 4cm des Sedimentes<sup>e</sup> bzw. unterhalb von 10cm<sup>f</sup>. Die lateralen Flüsse<sup>d</sup> sind weitgehend nicht bekannt (Quellen s. Text).

Die jährliche Sedimentation von Phytoplanktonkohlenstoff wird in der Kieler Bucht mit etwa  $65 \text{ gCm}^{-2}$  angegeben (von Bröckel 1975, Smetacek 1980). Das entspricht einer Menge von etwa 170000 tC bzw. bei einem Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff von 5.7 zu 1 (Gewichtseinheiten nach dem Redfield Verhältnis) einer Menge von  $30000 \text{ ty}^{-1}$  an

Stickstoff in der gesamten Kieler Bucht. Danach würde ein großer Teil des sedimentierenden partikulären Stickstoffs im Sediment akkumulieren, für die Remineralisierung stände dadurch nur wenig Material zur Verfügung. Nach dieser Abschätzung ist also entweder die Akkumulation zu hoch abgeschätzt, oder die Messungen der Sedimentation ergaben zu geringe Werte. Auch eine Bilanzierung des Kohlenstoffs führt zu keiner stimmigeren Bilanz. Zu den 170000 tC jährlich aus Phytoplankton kommen etwa 16000 bis 18800tC aus Rotalgen, die bevorzugt in den tieferen Teilen der Kieler Bucht deponiert werden (Abele 1988, Breuer 1990).

Im Juni 1987 wurde auf vier Profilen der Versuch unternommen, über die Wärmeproduktion eine synoptische Aufnahme der Remineralisierungsleistung in der Kieler Bucht zu erhalten (Abb.49). Die Remineralisierungsleistung im Juni entspricht annähernd der mittleren Remineralisierungsleistung während des Jahres. Demnach würde im Sediment der Kieler Bucht jährlich organisches Material mit einem Kohlenstoffgehalt von etwa 1000000t abgebaut. Außerdem aber akkumulieren größere Mengen an Material, zumindest unterhalb von 17m Tiefe. Unter der Annahme, daß "Protein" zu 53.5% aus Kohlenstoff besteht, sammeln sich allein an Kohlenstoff aus "Protein" weiterhin etwa 40000t pro Jahr an.

Nach dieser Aufstellung stellen die Sedimentation an Phytoplankton und die Zufuhr an Rotalgen zusammen höchstens 20% des benötigten Kohlenstoffs.

Bei der zitierten Sedimentationsrate von 170000tC aus Phytoplankton und der lateralen Zufuhr von 16000 bis 18800tC $y^{-1}$  aus Makroalgen bleiben extreme Lücken in der Bilanzierung, die, da eine Bilanz der ganzen Kieler Bucht aufgestellt wurde, auch durch eine Einführung einer lateralen Advektion innerhalb der Kieler Bucht nicht zu schließen sind.

Wenn auch die einzelnen Werte dieser Untersuchung sicher mit großen Fehlern behaftet sind, liegt doch eine Gesamtheit von Einzelergebnissen vor, die eine Überprüfung der Materialflüsse dringend erforderlich machen. Neben der

Sedimentation und dem Verdriften von Makroalgen gibt es weitere Wege, auf denen dem Sediment organisches Material zugeführt wird. Der zusätzliche Eintrag durch Sedimentation von Material aus dem eindringenden Wasser der eigentlichen Ostsee und aus dem Tiefenwasser, welches aus den Belten zufließt, ist nicht ausreichend quantifiziert. Durch das von benthischen Suspensionsfressern in den flacheren Gebieten der Kieler Bucht aus der Primärproduktion aufgenommene Material wird die Zufuhr zum Benthos ebenfalls erhöht. Auch darüber fehlen verlässliche Abschätzungen. Die Suspensionsfresser, z.B. Mya arenaria, bauen jedes Jahr eine große Biomasse auf (Brey, 1984), die alleine eine Zufuhr von Nahrung mit  $100\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  (Graf, 1988) erforderlich macht.

Überprüft werden sollte, ob sich die Akkumulation von organischem Material auch in den folgenden Jahren fortsetzt. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Anreicherungen in den Bereichen um 17m, die eine zunehmende Verschlickung andeuten. Sammelt sich über mehrere Jahre oxidierbares Material im Sediment an, wird eine immer höhere "Sauerstoffschuld" eingegangen. Diese Sauerstoffschuld kann im folgenden Frühjahr zu einer höheren Sauerstoffzehrung und zu frühem Sauerstoffmangel führen. Im Laufe des Frühjahrs 1988 sank der Sauerstoffgehalt im Wasser unterhalb 14m von  $9\text{mg l}^{-1}$  am 17.3.1988 auf  $3\text{mg l}^{-1}$  am 30.6.1988 (eigene unveröff. Daten; 17m Station). Die Differenz von  $6\text{mg l}^{-1}$  ergibt bei einem Wasservolumen von  $9.9\text{km}^3$  der Kieler Bucht unterhalb von 14m eine Zehrung von etwa 60000t Sauerstoff. Bei einem  $RQ = 1$  entspricht dies einem Umsatz von etwa 22000t Kohlenstoff. Die Fläche der Kieler Bucht unterhalb von 14m beträgt etwa  $1754\text{km}^2$ . Demnach wurden etwa  $12.5\text{gCm}^{-2}$  bis Ende Juni umgesetzt. Da die weitere Sauerstoffzufuhr in dieser Tiefe bis in den Winter hinein behindert ist, kann es zu einer weiteren Akkumulierung von Material kommen.

#### 4.4. Transport von organischem Material

Die Bilanzierung der organischen Substanz im vorigen Kapitel zeigte die große Bedeutung von Transportprozessen. Sie sollen im folgenden Kapitel daher diskutiert werden.

Unter Transportprozessen sollen hier die Prozesse verstanden werden, die dem Benthos der verschiedenen Stationen partikuläres organisches Material zuführen oder resuspendiertes Material verdriften lassen.

Sofern die Station innerhalb der euphotischen Zone liegt, ist eine benthische Primärproduktion möglich, nicht alles organische Material was zum Abbau zur Verfügung steht, muß in partikulärer Form zugeführt werden.

Ein weiterer Sonderfall ist gegeben, wenn die Station innerhalb der durchmischten Deckschicht liegt. In diesem Fall können benthische Suspensionsfresser organisches Material aktiv aus dem Pelagial entnehmen. In allen anderen Fällen wird die Zufuhr allein durch die physikalischen Gegebenheiten kontrolliert. Der wichtigste Mechanismus, der Partikel zum Sediment bringt, ist die Sedimentation. Fast alle organischen Partikel haben eine Dichte, die höher ist als die des Seewassers; sie sedimentieren daher, sofern sie sich nicht aktiv (Organismen) oder durch Turbulenz im Wasser in Suspension halten. Einmal in direkte Nähe des Bodens gekommen, können sie hier entweder von Organismen aktiv aus dem Wasser herausgefischt werden, oder sie fallen direkt auf den Boden.

Da die Kieler Bucht nur einen geringen Eintrag organischer partikulärer Substanzen vom Festland hat, sind die wichtigsten Quellen im marinen Bereich zu suchen. Die Sedimentation von Phytoplanktonorganismen und deren Resten stellt die direkteste Zufuhr von Nahrung für das Benthos dar. Doch auch Produkte der benthischen Primärproduktion finden ihren Weg bis in die tiefsten Bereiche der Kieler Bucht. Die Makrophyten können einen Teil der jährlichen Zufuhr stellen. Die Transportwege dieses Materials sind nur ungenügend untersucht, einzig das Vorkommen an den Stationen konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden. Viele der teilweise sehr zarten Thalli der Makroalgen werden im Herbst

losgerissen und verdriften dicht am Boden entlang. Lose Thalli wurden häufig in den Greiferproben gefunden, und unter Wasser aufgestellte Zäune setzen sich nach einiger Zeit voll mit angeschwemmten Algen (Schomann, 1977). Auf dem Sediment wurden von Tauchern regelrechte Walzen aus miteinander verflochtenem Makrophytenmaterial beobachtet, die mit den Wasserbewegungen über den Boden rollten. Seegrasstücke werden häufig an der Wasseroberfläche treibend gefunden. Da diese ebenfalls in Greiferproben vorkommen, ist ein späteres Absinken nach Verlust von Gasblasen wahrscheinlich.

Sedimentiertes Material kann, solange es noch lose auf der Sedimentoberfläche liegt, relativ leicht durch Turbulenz wieder in Suspension gelangen.

Nach Grafenstein (1982) kann man im Gebiet der westl. Kieler Bucht mit mehr als  $300 \text{ hy}^{-1}$  rechnen, in denen der Seegang stark genug ist, um Partikel einer Größe unter  $0.09 \text{ mm}$  zu verdriften. Der größte Teil der im Wasser dicht über dem Sediment treibenden Partikel hatte in einer Coulter Counter Zählung einen Durchmesser zwischen  $0.04$  und  $0.1 \text{ mm}$  (eigene unveröff. Daten). Einige Makrobenthosorganismen stoßen Partikel aus, die so in die Wassersäule zurückgelangen.

Resuspendiertes Material kann mit der Strömung in andere Gebiete verfrachtet werden und dort erneut sedimentieren. Bei geeigneten Bedingungen ist so auch ein Transport von Material aus der Tiefe in flachere Gebiete möglich.

Bis auf die direkte Sedimentation von Phytoplankton-Material, welche in erster Näherung über den gesamten Tiefenbereich gleichmäßig ist, sind alle anderen angesprochenen Transportprozesse durch eine laterale Verlagerung von Partikeln von einem in einen anderen Bereich charakterisierbar. Sie werden unter dem Begriff laterale Advektion zusammengefaßt. Die Sedimentation von Phytoplankton in der Kieler Bucht war häufig Gegenstand von Untersuchungen. Das Zusammenspiel von Sedimentation und benthischer Reaktion darauf ist als benthisch-pelagische Kopplung beschrieben worden. Die laterale Advektion wurde bislang nur am Beispiel der Makrophyten direkt untersucht.

wobei Pigmente als Marker dienten. Die Veränderung der Eintragsmenge durch horizontal wirkende Prozesse führte zur Einführung des Terms "lateraler Advektionsfaktor" durch Graf et al. (1983). Danach wurden an bestimmten Stationen Abbaumengen bestimmt, die 4-7mal über der Höhe der vertikalen Phytoplankton-Sedimentation lagen (lateraler Advektionsfaktor "Laf"=4-7). Balzer et.al. (1986) errechneten einen Transport von Material aus flacheren Zonen (<10m) in tiefere Zonen (>10m, <28m), der etwa so hoch war wie die Phytoplanktonsedimentation.

Der laterale Partikeltransport ist nur sehr schwer direkt zu messen. In der vorliegenden Untersuchung sollte die Umverteilung von Material daher indirekt nachgewiesen werden. Durch die klimatische Situation während der Untersuchung dürfte die Verlagerung von Partikeln aus den tieferen Bereichen in flachere Gebiete keine große Rolle gespielt haben.

Aufgrund der Dichteverteilung herrschten für einen solchen Transport nur von November 1985 bis in den März 1986 und von November 1986 bis Januar 1987 gute Voraussetzungen. Die Eisbedeckung ab Februar 1986 und relativ schwacher Wind ab Mai 1986 dürfte dagegen eine Umverteilung von tieferen in flachere Bereiche im größeren Maßstab behindert haben.

Um diese Umverteilungen zu quantifizieren, wurden die "Proteinmengen" der Flächen berechnet und die Stationen bestimmten Tiefenbereichen zugeordnet (s. S. 74).

In Abb.65 sind die Ergebnisse dieser Abschätzung dargestellt. Die Summe repräsentiert demnach die gesamte "Proteinmenge" des Sedimentes der Kieler Bucht in den oberen 4cm. Zu zwei Zeitpunkten, Anfang Dezember 1985 und Ende Oktober 1986, sinkt die "Proteinmenge" des Bereiches 22-36m, während die "Gesamtproteinmenge" sich nicht wesentlich ändert. Zur selben Zeit steigt die "Proteinmenge" der Sedimente oberhalb von 22m. Dies kann als indirekter Beweis einer Umverteilung von Material aus den tieferen Bereichen der Kieler Bucht in flachere Bereiche gedeutet werden. Die umverteilte Menge an "Protein" lag nach dieser Abschätzung bei 100000t bzw. bei 75000t während 21 bzw. 14 Tagen. Bei

einem Wasservolumen von  $42\text{km}^3$  in der Kieler Bucht müßten innerhalb weniger Tage zwischen  $1.8$  und  $2.4\text{mg l}^{-1}$  an "Protein" ins Wasser resuspendiert und anschließend wieder sedimentiert sein (Sedimentationsrate ca.  $2\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ).

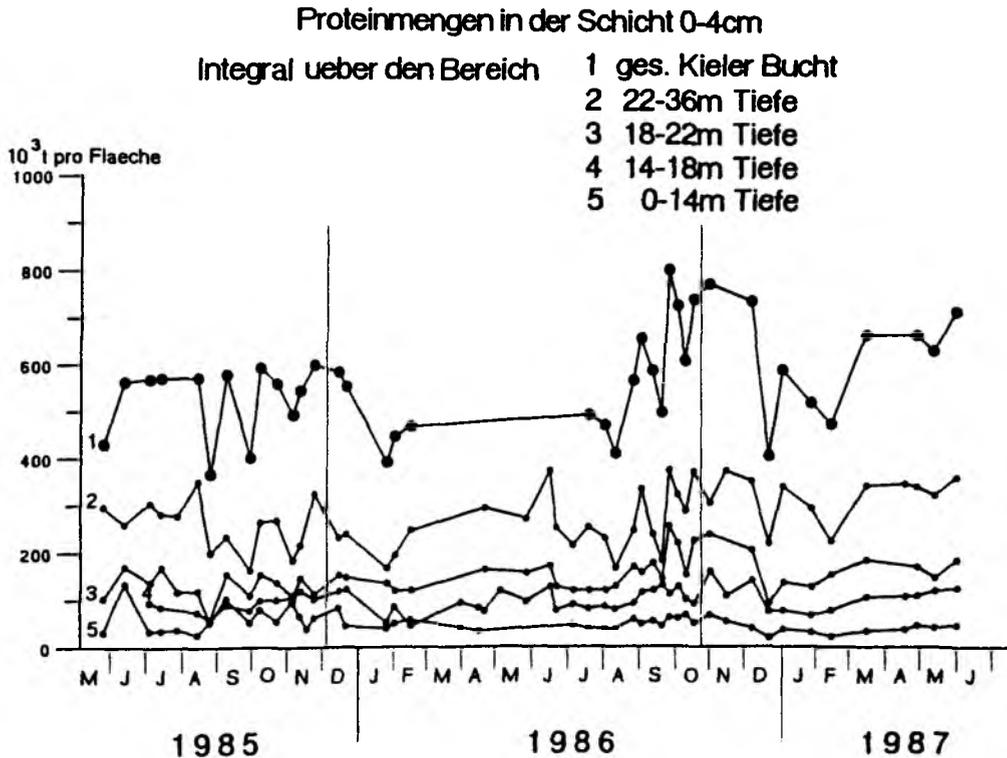


Abb.65 "Proteinmengen" der Sedimentschichten 0-4cm in den vier Tiefenbereichen der Kieler Bucht und deren Summe, markiert durch vertikale Linien sind zwei Termine einer möglichen Umverteilung durch Resuspension in tieferen Gebieten und Sedimentation in flacheren Bereichen

Typische Proteinkonzentrationen (reines Protein) im Wasser der Kieler Bucht liegen um  $0.2\text{mg l}^{-1}$  (Krey, 1974). Ebenfalls Anfang Dezember 1985 und Ende Oktober 1986 stieg der

Kohlenstoffgehalt im Sediment oberhalb einer Wassertiefe von 22m. Der Zuwachs an Kohlenstoff lag jeweils bei etwa 40000t, was einem Verlust von etwa  $1\text{mg l}^{-1}\text{C}$  aus dem gesamten Wasservolumen der Kieler Bucht bedeuten würde. Es müßten jeweils etwa  $19\text{g m}^{-2}$  an Kohlenstoff sedimentiert sein. Die für eine solche Umverteilung nötigen Sedimentationsraten wären extrem hoch, wenn auch denkbar.

Die maximale Konzentrationsänderung im Sediment oberhalb von 22m beträgt für "Protein" etwa 200000t innerhalb von 15 Tagen und für Kohlenstoff etwa 140000t innerhalb von 18 Tagen. Im Dezember 1986 sank der "Proteingehalt" der oberen 4cm des Sedimentes der Kieler Bucht in 15 Tagen um fast 350000t. Die für eine Umverteilung solcher Mengen nötigen Resuspensions- und Sedimentationsraten sind kaum als realistisch anzunehmen.

#### 4.5. Schlußbetrachtungen

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Bilanz der organischen Substanz in den Sedimenten der Kieler Bucht aufgestellt. Eine "positive" Bilanz, d.h. eine Akkumulation von organischem Material, kann als Indiz für eine Veränderung der Sedimentzusammensetzung in Richtung Schlick gedeutet werden. Die Zunahme von organischer Substanz im Sediment ist ein Resultat der Eutrophierung. Daß in den tiefsten Zonen der Kieler Bucht organisches Material über längere Zeiträume Zeit akkumuliert ist, wird durch die große Schicht des feinkörnigen Materials (mit hohem organischen Anteil) der Sedimente dieser Gebiete dokumentiert (Healy und Werner, 87). Eine Zunahme der organischen Substanz in flacheren Gebieten muß gerade in Hinblick auf die immer häufiger auftretenden Sauerstoffmangelsituationen in großen Arealen Anlaß zur Besorgnis geben.

Stellvertretend für die unterschiedlichen Sedimenttypen und Tiefenbereiche der Kieler Bucht, die sich durch unterschiedlichen "benthischen Metabolismus" auszeichnen, wurden vier repräsentative Stationen ausgewählt:

Eine Station in 12m Tiefe, die ganzjährig ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird und in der euphotischen Zone liegt.

Eine Station in 17m Tiefe, die häufig unterhalb der Temperatursprungschicht liegt und, dicht besiedelt, eine hohe benthische Aktivität hat.

Eine Station in 19m Tiefe, deren Versorgung mit Sauerstoff bereits deutlich beschränkt ist und deren Sediment eine hohe Konzentration an organischem Material hat.

Die tiefste Station in 28m Tiefe ist durch ihre Lage im Rinnensystem der Kieler Bucht häufig nicht nur durch die Temperatursprungschicht sondern auch durch eine Salzgehaltssprungschicht von der Sauerstoffzufuhr von der Oberfläche abgeschlossen.

Der hier vorgestellte Datensatz wurde in einem Zeitraum von 26 Monaten erstellt, wobei sich die beiden untersuchten Winter durch überdurchschnittliche lange Eisbedeckung auszeichneten. Eine Beeinflussung des Benthals durch die

Eisbedeckung muß angenommen werden.

Die Variationsbreiten praktisch aller gemessenen Parameter sind durch zeitliche und räumliche Variation natürlicherweise groß. Nur wegen der Vielfalt der Messungen (4 Stationen, verschiedene Sedimenttiefen und ein Beprobungszeitraum von mehr als zwei Jahren mit geringen Probennahmeintervallen) ist es statthaft, überhaupt auf Tendenzen zur Konzentrationsänderung einiger Parameter zu schließen.

Die 12m Station wird nach den vorgestellten Ergebnissen direkt vom Pelagial beeinflusst. Der Gehalt an organischem Material war relativ gering, und eine nennenswerte Akkumulation fand nicht statt. Abbaubares Material wurde weitgehend oxidiert. Wird z.B. durch lange Eisbedeckung ein Transport von Material aus den tieferen Gebieten zu diesem Standort verhindert, dokumentiert sich dies in einer Abnahme des Bestandes an organischem Material.

Auch das Benthos auf der 17m Station ist zum Teil auf resuspendierte Nahrung aus den tieferen Bereiche angewiesen. Dies dokumentiert sich in der Abnahme des gesamten Pools an Kohlenstoff nach längerer Eisbedeckung. Der Sauerstoff reichte aber an dieser Station, zumindest im Untersuchungszeitraum, nicht mehr aus, um die vorhandene Nahrung vollständig abzubauen. Es sammelten sich schwer abbaubare Verbindungen an, die, sollten sie abgebaut werden, den Sauerstoffbedarf der Sedimente zusätzlich erhöhen werden.

An der 19m Station erhöhte sich nicht nur der Pool an schlecht abbaubarem Material ("Protein"), auch die Gesamtmenge an organischer Substanz im Sediment nahm (allerdings nicht signifikant) zu.

Das Sediment der 28m Station enthält prinzipiell sehr viel organisches Material. Die hohe Akkumulationsrate zeigt, daß im Mittel das Nahrungsangebot nicht völlig ausgenutzt werden kann. Im Untersuchungszeitraum kam es zu einem weiteren Anstieg der Konzentration von schwerabbaubarem Material.

Nur geringe Mengen des sedimentierten Kohlenstoffs werden

dauerhaft im Sediment eingelagert. Solange ein Kohlenstoffatom nicht unterhalb der bioturbirten Zone gelangt, kann es wieder in den Stoffkreislauf zurückgelangen. Selbst ein großer Teil der Verbindungen, die in die tieferen Rinnen gelangen, werden remineralisiert oder resuspendiert.

Die flächenbezogenen Hochrechnungen ergaben eine Verringerung des organischen Materials in den flacheren Gebieten der Kieler Bucht und eine Anreicherung in den tieferen Teilen. Der Betrag der Anreicherung war weitaus höher als der der Verringerung. Eine netto Zunahme der Menge an organischer Substanz im Benthos der Kieler Bucht, wie durch den Anstieg der schwerer abbaubaren Substanzen dokumentiert, erhöht anschließend den potentiellen Sauerstoffbedarf und damit die Wahrscheinlichkeit weiterer Sauerstoffmangelsituationen. Diese wiederum erhöhen die Wahrscheinlichkeit, daß nicht alles zur Verfügung stehende Material abgebaut wird. Eine zunehmende Veränderung der Sedimentzusammensetzung in Richtung Schlick ist die Folge. Beim Übergang vom oxischen zum anoxischen Zustand wird im Sediment an Eisen gebundenes Phosphat teilweise wieder freigesetzt (Balzer, 1978), welches das Wachstum von Phytoplankton weiter verstärken kann.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß der beobachtete Anstieg der Proteinkonzentration durch die ungewöhnlichen Klimabedingungen im Untersuchungszeitraum ausgelöst worden ist. Aber auch in diesem Fall zeigt sich, wie empfindlich das System der Kieler Bucht auf eine mögliche Eutrophierung reagieren kann.

Wie auch in verschiedenen früheren Arbeiten (z.B. Graf, 1984; 1987b; 1988) war der ermittelte Bedarf des Benthos an Nahrung weitaus höher als die mit Hilfe der Sinkstofffalle ermittelte Zufuhr. Laterale Umverteilungen von Material, wie in den oben erwähnten Arbeiten gefordert, konnten indirekt nachgewiesen werden. Sie scheinen aber zu selten und im Ausmaß zu gering zu sein, um alleine eine stimmige Bilanz zu ermöglichen.

Es bleibt zu klären, inwiefern die Ermittlungen von Zufuhr

bzw. Bedarf fehlerhaft sein können. Für die korrekte Ermittlung des Bedarfs an abbaubaren Stoffen spricht die gute Korrelation von über Wärmeproduktion errechneten Abbauleistungen bei kontrollierter Zugabe von Nahrung im Laborexperiment (Graf, 1987). Die Produktion von Bakterienbiomasse in den oberen vier Zentimetern des Sedimentes der Kieler Bucht beträgt konservativ geschätzt etwa  $150\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  (Sich, Inst.f. Meeresk. Kiel, pers. Mittl.;  $10\mu\text{gCcm}^{-3}\text{d}^{-1}$ ). Eine Produktion dieser Größenordnung produziert Wärme in der gemessenen Größenordnung.

Die Sedimentationsraten (bestimmt mit Hilfe der Sinkstoffalle) andererseits sind plausibel, wenn von einer jährlichen Primärproduktion von etwa  $165\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$  (v.Bodungen, 1975) ausgegangen wird. Nach Hochrechnung bisher unveröffentlichten Daten (Hansen & Horstmann, Inst. f. Meeresk. Kiel, pers. Mittl.) hat sich die Primärproduktion zwischen 1985 bis 1988 bei Bokniseck zumindest im Sommer mehr als verdoppelt.

Veränderungen im Lebensraum Kieler Bucht durch höhere Belastung durch organisches Material belegen auch die Veränderungen der Artenzusammensetzung des Makrozoobenthos. In den tieferen Gebieten sind einige Arten praktisch verschwunden, nur der Bestand einiger Arten, die eine hohe Toleranz gegen organische Verschmutzung haben, nahm zu (Weigelt, 1988). Die Biomasse oberhalb der Salzgehaltssprungschicht hat zugenommen (Brey, 1986). Sollten sich die von 1985 - 1987 beobachteten Tendenzen fortsetzen, so würden die Sedimente in den tieferen Bereichen der Kieler Bucht durch Akkumulation von nicht abgebauter organischer Substanz zunehmend belastet werden und es kann zu häufigerem Sauerstoffmangel in ausgedehnteren Arealen kommen. In den flacheren Gebieten kann das Zoobenthos bei ausreichendem Eintrag von Sauerstoff auf eine Erhöhung der Nahrungszufuhr mit steigender Biomasse reagieren.

## 5.Literaturverzeichnis

- Abele, D. (1988): Carotinoide als biogene Marker für benthische Makroalgen im Sediment der Kieler Bucht. Diss. Univ. Kiel, 113 pp.
- Arntz, W.E. (1977): Zielsetzung und Probleme struktureller Benthosuntersuchungen in der marinen Ökosystemforschung. Verh. Ges. f. Ökol. Kiel 77(78): 35-51.
- Babenerd, B., Gerlach, S.A. (1987): Bathymetry and sediments of Kieler Bucht. In: Seawater-sediment interactions in coastal waters. An interdisciplinary approach. Rumohr, J., Walger, E., Zeitzschel, B. (eds.), Springer-Verlag, New York, 16-31.
- Balzer, W. (1978): Untersuchungen über den Abbau organischer Materie und Nährstoff-Freisetzung am Boden der Kieler Bucht beim Übergang vom oxischen zum anoxischen Milieu. SFB 95 Report No. 36 Univ. Kiel, 126 pp.
- Balzer, W., Pollehne, F. & Erlenkeuser, H. (1986): Cycling of organic carbon in a coastal marine system. In: Sed der Primärproduktion des Planktons in der Kieler Bucht unter Berücksichtigung der Hydrographie. Diss. Univ. Kiel, 116pp.
- Boehlich, M.J. & Backhaus, J.O. (1987): Atlas simulierter Strömungen in der südwestlichen Ostsee für sommerliche Bedingungen. Technical Report 4-87, Inst. f. Meeresk. Univ. Hamburg
- Breuer, G. (1989): Vegetationsstruktur, Biomasse und Produktivität der sublitoralen Rotalgengemeinschaften der Restsedimentgebiete in der Kieler Bucht, Diss. Univ. Kiel, 247pp.
- Brey, T. (1984): Gemeinschaftsstrukturen, Abundanz, Biomasse und Produktion des Makrozoobenthos sandiger Böden der Kieler Bucht in 5-15m Wassertiefe. Ber. Inst. Meeresk. Kiel 123: 124pp.

- Brey, T. (1986): Increase in macrozoobenthos above the halocline in Kiel Bay comparing the 1960s with the 1980s. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 28: 299-302.
- Bröckel, K.v. (1975): Der Energiefluß im pelagischen Ökosystem vor Boknis Eck (westl. Ostsee). Diss. Univ. Kiel, 96pp.
- Czytrich, H., Eversberg, U. & Graf, G. (1986): Interaction between pelagial and benthal during autumn in Kiel Bight. II. Benthic activity and chemical composition of organic matter. *Ophelia* 26: 123-133.
- Dietrich, G. & Schott, F. (1974): Wasserhaushalt und Strömungen. In: *Meereskunde der Ostsee*. Magaard, L. & Rheinheimer (eds.), Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 33-41.
- Duursma, E.K. & Smies, M. (1982): Sediments and Transfer at and in the Bottom interfacial layer. In: *Pollutant transfer and transport in the sea. Volume II*. Gunnar Kullenberg (ed.), CRC Press Boca Raton, Florida, 101-138.
- Ehrhardt, M. & Wenck, A. (1984): Wind pattern and hydrogen sulphide in shallow waters of the Western Baltic Sea, a cause and effect relationship? *Meeresforsch.* 30: 101-110
- Eversberg, U. (1985): Entwicklung und Sedimentation einer Herbstblüte. Umsatz der organischen Substanz im Sediment und Reaktion des Benthos. Dipl., Univ. Kiel, 67pp.
- Forster, S. (1985): Was bedeutet 'Sauerstoffzehrung' bei marinen Sedimenten? Dipl. Univ. Kiel.
- Gerlach, S.A. (1984): Oxygen depletion 1980-1983 in costal waters of the Federal Republic of Germany. First report of the working group "Eutrophication of the North Sea and the Baltic". *Ber. Inst. f. Meeresk.* Kiel 130: 87pp.
- Gerlach, S.A. (1986): Langfristige Trends bei den Nährstoff-Konzentrationen im Winterwasser und Daten für eine Bilanzierung der Nährstoffe in der Kieler Bucht. *Meeresforsch.* 31: 153-174.

- Graf, G. (1979): Energy-Charge-Messung im marinen Benthos. Diss. Univ. Kiel, 121pp.
- Graf, G. (1987): Benthic energy flow during a simulated autumn bloom sedimentation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 39: 23-29.
- Graf, G. (1987b): Benthic response to the annual sedimentation pattern. In: Seawater-sediment interactions in coastal waters. An interdisciplinary approach. Rumohr, J., Walger, E., Zeitzschel, B. (eds.), Springer-Verlag, New York, 84-92.
- Graf, G. (1988): Die Reaktion des Benthals auf den saisonalen Partikelfluß und die laterale Advektion, sowie deren Bedeutung für Sauerstoff- und Kohlenstoffbilanzen. Habil. Univ. Kiel, 77pp.
- Graf, G., Bengtson, W., Faubel, A., Meyer-Reil, L.-A., Schulz, R., Theede, H. & Thiel, H. (1984): The importance of the spring phytoplankton bloom for the benthic system of Kiel Bight. Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer 183: 136-143.
- Graf, G., Schulz, R., Peinert, R. & Meyer-Reil, L.-A. (1983): Benthic response to sedimentation events during autumn to spring at a shallow water station in Western Kiel Bight. I. Analysis of processes on a community level. Mar. Biol. 77: 235-246.
- Grafenstein, U.v. (1982): Zur Erosionswirkung von Seegang: Beobachtungen an Wellenrippeln in der Kieler Bucht (Westl. Ostsee). SFB 95 Report No. 63 Univ. Kiel, 43pp.
- Grasshoff, K. (1976): Methods of seawater analysis. Verlag Chemie. Weinheim, 317pp.
- Hargrave, B.T. (1973): Coupling carbon flow through some pelagic and benthic communities. J. Fish. Res. Board Can. 30: 1317-1326.
- Healy, T. & Werner, F. (1987): Sediment budget for a semi-enclosed sea in a near homogeneous lithology; Example of Kieler Bucht, Western Baltic. Senckenbergiana marit. 19: 195-222.

- Holm-Hansen, O. & Paerl, H.W. (1972): The applicability of ATP determination for estimation of microbial biomass and metabolic activity. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 29: 149-168.
- Ivlev, V.S. (1934): Eine Mikromethode zur Bestimmung des Kaloriengehalts von Nährstoffen. Biochem. Z. 275: 51-55.
- Jørgensen, B.B. & Fenchel, T. (1974): The sulfur cycle of a marine sediment model system. Mar. Biol. 24: 189-201.
- Kähler, P. (in Vorb.): Stickstofffreisetzung durch Denitrifikation in marinen Küstensedimenten (Ostsee: Kieler Bucht) Diss. Univ. Kiel.
- Karl, D.M. (1980): Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology. Microbiol. Rev. 44: 739-796.
- Koeve, W. (1986): Austauschprozesse zwischen Porenwasser und bodennahem Wasser in der Kieler Bucht. unveröff. Dipl. Univ. Kiel
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. & Randall, R.J. (1951): Protein measurement with the Folin Phenol Reagent. J. Biol. Chem. 193: 265-275.
- Mayer, L.M., Schick, L.L. & Setchell F.W. (1986): Measurement of protein in nearshore marine sediments. Mar.Ecol. Prog. Ser. 30: 159-165.
- Millero, F.J., Gonzales, A. & Ward, G.K. (1976): The density of seawater solutions at one atmosphere as a function of temperature and salinity. J. Mar. Res. 34: 61-93.
- Noji, T., Passow, U. & Smetacek, V. (1986): Interaction between pelagial and benthal during autumn in Kiel Bight. I. Development and sedimentation of Phytoplankton blooms. Ophelia 26: 333-349.
- Palosuo, E. (1966): Ice in the Baltic, In: Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. H.Barnes (ed.) 4: 79-90.
- Pamatmat, M.M. (1971): Oxygen consumption by the seabed IV. Shipboard and laboratory experiments. Department of Oceanography, Contribution No. 602, 536-550.

- Pamatmat, M.M. (1978): Oxygen uptake and heatproduction in a metabolic conformer ( *Littorina irrorata* ) and a metabolic regulator ( *Uca pugnax* ). *Mar. Biol.* 48: 317-325.
- Pamatmat, M.M., Graf, G., Bengtson, W. & Novak, C.S. (1981): Heat production, ATP concentration, and electron transport activity of marine sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 4: 135-143.
- Povoledo, D. & Gerletti, M. (1964): Studies on the sedimentary acid soluble organic matter from Lake Maggiore (North Italy). *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 17: 115-150
- Prado-Fiedler, R. (1988): Deposition and precipitation scavenging processes of atmospheric nitrogen species over the Kiel Bight. *Diss. Univ. Kiel*, 109pp.
- Rhoads, D.C. (1974): Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 12: 263-300.
- Rhoads, D.C., Boyer, L.F., Welsh, B.L. & Hampson, G.R. (1984): Seasonal dynamics of detritus in the benthic turbidity zone (BTZ); implications for bottom-rack molluscan mariculture. *Bull. Mar. Sci.* 35: 536-549.
- Rice, D.L. (1982): The detritus nitrogen problem: new observations and perspectives from organic geochemistry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 9: 153-162.
- Salonen, K.J., Sarvala, J., Hakala, I. & Kiljanen, M.-L. (1976): The relation of energy and organic carbon in aquatic invertebrates. *Limnol. Oceanogr.* 21: 724-730.
- Schomann, H. (1977): Qualitative und quantitative Untersuchungen an der erranten Vegetationskomponente im Phytobenthos der Westlichen Ostsee. *Dipl. Univ. Kiel*.
- Schulz, R. (1983): Die Wirkung von Sedimentationsereignissen auf die benthische Lebensgemeinschaft. *Diss. Univ. Kiel*, 116pp.
- Setchell, F.W. (1981): Particulate protein measurement in oceanographic samples by dye binding. *Mar. Chem.* 10: 301-313.

- Siedler, G. & Hatje, G. (1974): Temperatur, Salzgehalt und Dichte, In: Meereskunde der Ostsee. Magaard, L. & Rheinheimer (eds.) Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 43-60.
- Smetacek, V. (1975): Die Sukzession des Phytoplanktons in der westlichen Kieler Bucht. Diss. Univ. Kiel, 151pp.
- Smetacek, V. (1980): Annual cycle of sedimentation in relation to plankton ecology in Western Kiel Bight. *Ophelia* Suppl. 1: 65-76.
- Smetacek, V. (1985): Die Struktur mariner pelagischer Systeme. Habil. Univ. Kiel, 92pp.
- Smetacek, V. & Hendrikson, P. (1979): Composition of particulate organic matter in Kiel Bight in relation to phytoplankton succession. *Oceanologica acta*, Vol.2 No.3: 287-298.
- Sokal, R.R. & Rohlf, F.J. (1981): Biometry (2nd Edition). W.H. Freeman and Company, San Francisco, 859pp.
- Sommer, M. (in Vorb.): Arbeitstitel: Sporen und Ruhestadien des Phytoplanktons der Kieler Bucht als Lebenszyklen; Vorkommen, räumliche Verbreitung und Bedeutung für Küstenökosysteme. Diss. Univ. Kiel
- UNESCO (1966): Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monogr. oceanogr. Methodol. (UNESCO) 1: 66pp.
- Weigelt, M. (1985): Auswirkungen des Sauerstoffmangels 1981 auf Makrozoobenthos und Bodenfische in der Kieler Bucht. Ber. Inst. f. Meereskunde Kiel 138: 122pp.
- Weigelt, M. (1988): Auswirkungen von Sauerstoffmangel auf die Bodenfauna der Kieler Bucht. Ber. Inst. f. Meereskunde Kiel 176: 299pp.
- Winkler, L.W. (1888): Die Bestimmung des im Wasser gelösten Sauerstoffs. Ber. dtsh. Chem. Ges. 21: 28-43.
- Witzel, K.-P. (1979): The adenylate energy charge as a measure of microbial activities in aquatic habitats. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 12: 146-165.