

Die „Berichte aus dem Institut für Meereskunde“ erscheinen in unregelmäßiger Folge und sind gedacht als Arbeitsunterlagen für den sich mit dem jeweiligen Thema befassenden Personenkreis. Die Hefte werden fortlaufend nummeriert. Sie sind unredigierte Beiträge und geben allein die Meinung des Verfassers wieder.

**D 2300 Kiel 1, Düsternbrooker Weg 20**

Berichte  
aus dem  
Institut für Meereskunde  
an der  
Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Nr. 98

DIE VARIABILITÄT DER PHYTOPLANKTONSCHICHTUNG  
IN DRIFTENDEN WASSERKÖRPERN

Untersuchungen aus dem Skagerrak, Kattegat und  
Bornholm-Becken im März 1979

von

HENNING ASTHEIMER

DOI 10.3279/IFM-BER-98

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:  
Henning Astheimer  
Institut für Meereskunde  
Abteilung Planktologie  
Düsternbrooker Weg 20  
2300 Kiel 1

---

Diese Arbeit wurde 1982 als Dissertation bei der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel eingereicht.

ISSN 0341-8561

## Vorwort

Durch die Wahl eines Themas auf dem Grenzgebiet zwischen Biologischer Meereskunde und Physikalischer Ozeanographie und wegen der Fülle der während der Forschungsfahrt anfallenden Daten war ich von Anfang an auf Unterstützung angewiesen, für die ich mich hier herzlich bedanken möchte.

Den "Vorsitz" führte Herr Prof. Dr. B. Zeitzschel; ich danke ihm für seine wohlwollende Betreuung.

Von den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Metrologie des Instituts für Angewandte Physik, die die Multisonde bedienten und mir ihre Daten zur Verfügung stellten, danke ich vor allem Herrn Dr. H. Haardt für seine allzeit offene und kritische Anteilnahme.

Herr P. Fritsche, Frau B. Götze und Frau M. Sepulveda-Garcia halfen tatkräftig bei der Gewinnung der planktologischen Daten und der Driftprotokollierung.

Kapitän Schmickler und seiner Mannschaft vom FS "Poseidon" danke ich für ihre Einsatzfreudigkeit und ganz besonders für ihre Hilfestellung bei den Driftkörperexperimenten.

Die Abt. Meeresphysik stellte mir den Strömungsmesser zur Verfügung; die Driftbojen durfte ich von der Abt. Theoretische Ozeanographie entleihen.

Herr Chr. Sperling wertete die Phytoplanktonproben mikroskopisch aus und stellte mir freundlicherweise seine Ergebnisse zur Verfügung.

Die Bearbeitung aller Daten erfolgte auf den Rechenanlagen der Christian-Albrechts-Universität und des Instituts für Meereskunde. Ich danke Herrn T. Müller, Frau M. Knoll und Herrn Dr. H. Peters (Abt. Meeresphysik) für ihre Hilfe bei der Benutzung ihrer Programme auf der Electrologica-X8. Die Plotprogramme (PDP 11/45) stammen von Herrn J. Holtorff (Abt. Theoret. Ozeanogr.).

Neben einer Reihe eigener Programme für die Bearbeitung der IfM-formatierten Daten und der Phytoplanktondaten habe ich einige der statistischen Tests aus dem "SPSS"-Programmpaket (PDP 10) benutzt.

Für ihre wissenschaftliche Beratung und konstruktive Diskussionsbereitschaft bin ich besonders den Herren Drs. J. Kielmann (Abt. Theoret. Ozeanogr.) und W. Zenk (Abt. Meeresphysik) verpflichtet.

I N H A L T  
=====

	<u>Seite</u>
0. Zusammenfassung/ Abstract .....	1/2
=====	
1. Kapitel: Einführung in das Thema.....	3
=====	
<u>1.1. Einleitung</u>	
<u>1.2. Meßmethoden.....</u>	5
1.2.1. Photometrie	
1.2.2. Fluorometrie.....	6
1.2.2.1. Allgemeines	
1.2.2.2. Die Eichung der Fluoreszenzsonde.....	7
<u>1.3. Phytoplankton-Verteilung.....</u>	11
1.3.1. Horizontalstudien.....	12
1.3.2. Vertikalstudien.....	14
<u>1.4. Zusammenfassung und Hypothesen.....</u>	17
<u>1.5. Arbeitsziel.....</u>	18
2. Kapitel: Datengewinnung und -verarbeitung.....	20
=====	
<u>2.1. Meeresgebiet</u>	
2.1.1. Stationskarte	
2.1.2. Allgemeine Hydrographie	
2.1.3. Wetter.....	22
<u>2.2. Planktologische Messungen.....</u>	24
2.2.1. Entnahme der Wasserproben	
2.2.2. Phytopigmente.....	25
2.2.3. Phytoplanktonzellzahlen	

	<u>Seite</u>
2.2.4. Nährstoffe.....	26
<u>2.3. Ozeanographische Messungen</u>	
2.3.1. Multisonde	
2.3.2. Driftkörper	
2.3.3. Arbeitsprogramm "Driftstation".....	28
2.3.4. Ankerstation 87, Kattegat.....	30
3. Kapitel: Ergebnisübersicht.....	32
=====	
<u>3.1. Chlorophyll-Fluoreszenz</u>	
3.1.1. MS-Profile und Wasserproben (Fluorometer /Photometer)	
3.1.2. Statistische Analyse.....	35
3.1.3. Schlußfolgerungen.....	36
<u>3.2. Driftstationen und Ankerstation.....</u>	38
3.2.1. T/S-Charakteristik	
3.2.2. Mittlere Profile, Phytoplanktonarten und Nährstoffe	
Skagerrak, Station 28.....	44
Kattegat, Station 78.....	48
Bornholm, Station 107.....	52
Kattegat-AS, Station 87.....	56
3.2.3. Bearbeitung der Multisondenprofile.....	59
am Beispiel der Chlorophyllfluoreszenz	
Skagerrak I Originaldaten,	
Kattegat I Stundenmittel,	
Bornholm I Geglättete Mittel	
Kattegat-AS I und Isolinien	
3.2.4. Zeitreihen der integrierten Meßgrößen.....	68
3.2.5. Zeitreihen der T/S-Beziehung.....	74
3.2.6. Driftkörperversetzung.....	78
3.2.7. Ankerstation Kattegat.....	82
<u>3.3. Zusammenfassende Diskussion.....</u>	83
3.3.1. Chlorophyll-Fluoreszenz-Beziehung	
3.3.2. Ankerstation Kattegat	
3.3.3. Driftstationen.....	85

4. Kapitel: Raum- und Zeitabhängigkeit der Wasser- und Phytoplanktonkörper.....	92
=====	
4.1. Verfahren	
4.2. Skagerrak.....	95
4.3. Kattegat.....	97
4.4. Bornholm.....	100
<u>4.5. Zusammenfassende Diskussion.....</u>	<u>102</u>
4.5.1. Größe von Phytoplanktonpatches	
4.5.2. Hypothetische Entwicklung eines Phytoplankton- patches.....	104
4.5.3. Raum- und Zeitabhängigkeit.....	108
5. Kapitel: Die Phytoplanktonschichtung.....	111
=====	
5.1. Kleinräumig-horizontale Patchiness	
5.2. Zeitreihen der kleinräumig-horizontalen Patchi- ness.....	114
5.3. Lage der Phytoplanktonschichten im Dichtefeld.	117
5.4. Zeitreihen der vertikalen Feinstruktur.....	121
<u>Anmerkung d.V.....</u>	<u>124</u>
Literatur.....	125
=====	

## Anhang

=====

### 1. Stationsanordnung

### 2. Tabellen zur Photometrie

- 2.1. Absorptionsmaxima
- 2.2. Extinktionskoeffizienten
- 2.3. Pigmentkonzentration

### 3. Tabellen zur Fluorometrie

- 3.1. Anregung und Emission
- 3.2. Eich-tabelle der EOS-Sonde

### 4. Phytoplanktonarten

- 4.1. Skagerrak
- 4.2. Kattegat
- 4.3. Bornholm
- 4.4. Codeliste

### 5. Isolinien (zu Kap. 3.2.3.)

- 5.1. Skagerrak
- 5.2. Kattegat
- 5.3. Bornholm
- 5.4. Kattegat-Ankerstation

### 6. Filterresponse

### 7. Verzeichnis der Abbildungen

### 8. Verzeichnis der Tabellen im Text

## 0. Zusammenfassung

Im Skagerrak, Kattegat und Bornholm-Becken wurde die Phytoplanktonfrühjahrsblüte in driftenden Wasserkörpern über Zeiträume von jeweils ca. 15 Std. registriert. Dies geschah in situ mit Hilfe einer Chlorophyllfluoreszenzsonde, die zusammen mit den anderen Sensoren der "Kieler Multisonde" (u.a. Druck, Temperatur, Leitfähigkeit) eingesetzt wurde. Zusätzlich wurde im Kattegat bei verankertem Schiff eine Meßserie von 15 Tiefenprofilen durchgeführt, die unter den gegebenen Strömungsverhältnissen eine Horizontalauflösung von ca. 75 m ergab.

Nach einer vorläufigen Kalibrierung der Fluoreszenzsonde im Labor mittels einer Algenmonokultur zeigte sich, daß eine zusätzliche Nachkalibrierung gegen die photometrischen Chlorophyllanalysen aus den gepumpten Wasserproben nicht erforderlich war.

Der Einfluß advektiver Prozesse auf den Driftstationen wurde beurteilt anhand der T/S-Zeitreihen, Integralzeitreihen und der Änderungen in den Phytoplanktonzellkonzentrationen, so daß für die Chlorophyllverteilung jeder Station die Anteile räumlich bzw. zeitlich bedingter Heterogenität abgeschätzt werden konnten.

Die kleinräumige Chlorophyllverteilung ist auf allen Stationen - besonders vertikal - sehr variabel. In den Isoliniendarstellungen geglätteter Chlorophyllprofile lassen sich im Bereich starker Dichtegradienten Phytoplanktonpatches mit erhöhter Chlorophyllkonzentration erkennen, die in homogene Planktonschichten eingebettet sind. Ihre Größe liegt im Kattegat bei ca. 300 m (Länge) mal 3 m (Höhe). Daraus wurden Diffusionskoeffizienten berechnet zu  $10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  horizontal und  $5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  vertikal.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird ein Modell der Entwicklung der Frühjahrsblüte in geschichtetem Wasser vorgestellt.

Für zukünftige Untersuchungen ähnlicher Art werden eine Vergrößerung des Meßvolumens der Fluoreszenzsonde und ihr Einsatz auf einem "Batfish" empfohlen.



A b s t r a c t

In the Skagerrak, Kattegat, and Bornholm Basin, the phytoplankton spring bloom was monitored in drifting bodies of water over periods of about 15 h. A chlorophyll-fluorescence sonde was used mounted on the "Kiel Multisonde" together with sensors for pressure, temperature, and conductivity. Additionally, a series of 15 depth profiles was obtained at a moored station in the Kattegat. According to the local current situation, the horizontal resolution was some 75 m.

The photometrically analysed field samples did not deviate significantly from the data of the fluorescence sonde which had been precalibrated in the laboratory by means of a phytoplankton batch culture.

The influence of advection on the drift stations was judged from T-S time series, integral time series, and changes in the phytoplankton cell concentrations. Rough estimates of the relative amounts of spatial and temporal heterogeneity at each station are given.

The small-scale distribution of chlorophyll generally is very patchy, especially in the vertical direction. Contour plots of chlorophyll isolines reveal phytoplankton patches with enhanced chlorophyll concentrations in the vicinity of strong vertical density gradients. Embedded in homogeneous plankton layers, their sizes measure about 300 m long by 3 m high in the Kattegat. The associated diffusion coefficients are on the order of  $10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  horizontally, and  $5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , vertically.

Extrapolating from these results, a model of the development of spring bloom patches in stratified water is presented.

For future measurements of this kind, it is recommended to employ the fluorometer on a "Batfish", and to increase its measuring volume.

## 1. Kapitel: Einführung in das Thema

### 1.1. Einleitung

"Phytoplankton" nennt man den pflanzlichen Anteil der Lebensgemeinschaft im Süßwasser und im Meer, der zumeist ohne selbständige Fortbewegung frei mit der Wasserströmung umhertreibt.

Es sind mikroskopisch kleine einzellige Algen - der Durchmesser der meisten Arten liegt zwischen 1 und 100  $\mu\text{m}$  -, die mit Hilfe derselben Farbstoffe wie die Landpflanzen, z.B. dem Chlorophyll, das Sonnenlicht absorbieren und in chemische Energie zum Aufbau ihrer Körpersubstanz umwandeln.

Unter günstigen Umweltbedingungen - dazu gehören z.B. ausreichend Licht, Nährstoffe und eine optimale Temperatur - können sie sich durch maximal 2-3 Teilungen am Tag exponentiell vermehren und bis zu Konzentrationen von einigen Millionen Zellen pro Liter anwachsen.

Das pflanzliche Plankton stellt die Nahrungsgrundlage dar für alles Leben im Meer und ist der wichtigste Sauerstofflieferant der Erde.

Die Höhe der Primärproduktion organischer Substanz hängt weitgehend von den gegebenen hydrographischen Bedingungen ab und ist umso größer, je weniger Phytoplanktonzellen unter die obere, lichtdurchflutete Wasserschicht absinken. Das spezifische Gewicht der Algen ist nämlich mit ca.  $1.02$  bis  $1.06 \text{ g cm}^{-3}$  i.a. etwas größer als das des Meerwassers ( $1.023 \text{ g cm}^{-3}$  bei  $T = 10^\circ \text{ C}$ ,  $S = 30 \text{ ‰}$ ), so daß ein Absinken unvermeidlich ist, sofern dem nicht andere Mechanismen entgegenwirken, wie z.B. die Bildung von Gas, Fett oder speziellen Ionenansammlungen im Zellplasma. Darüber hinaus können bewegliche Phytoplanktonarten durch Vertikalwanderungen, die meist vom Tagesgang des Lichtes gesteuert werden, das Absinken verzögern.

Von der hydrographischen Situation her gesehen ist eine turbulent durchmischte obere Wasserzone über einer starken Dichte-

sprungschicht an der unteren Grenze der euphotischen Zone die günstigste Ausgangsbedingung für das Einsetzen einer Planktonblüte.

In einem solchen Fall hängt die Höhe der Primärproduktion im Verlauf der Zeit nur noch ab von dem Nachschub von Nährsalzen aus dem tieferen Wasser durch die Sprungschicht nach oben ("upwelling") bzw. von der Advektion nährstoffreichen Wassers aus benachbarten Gebieten ("fronts"). Die Menge der jeweils vorhandenen Phytoplanktonzellen wird dann begrenzt durch die Intensität der Freßtätigkeit des herbivoren Zooplanktons, welches die in den Algenzellen biochemisch gespeicherte Sonnenenergie weiterleitet an die höheren Glieder der Nahrungskette.

Während in Laborkulturen die Umweltbedingungen nach Belieben - u.U. sogar völlig naturentfremdet - simuliert werden können, entziehen sie sich im Freiland meist der experimentellen Kontrolle, wodurch die Interpretation der Meßergebnisse häufig sehr erschwert wird. Die gleichzeitige Messung möglichst vieler Parameter, deren störender Einfluß auf die interessierenden Vorgänge im Verlauf der Datenanalyse durch die Anwendung multivariater statistischer Verfahren wieder beseitigt wird, ist eine aufwendige und nicht immer leicht zu interpretierende Möglichkeit, dieses Problem zu lösen.

Die andere besteht darin, die Feldmessungen so geschickt vorzunehmen, daß innerhalb des Untersuchungszeitraums möglichst alle eventuellen Störgrößen als konstant angesehen werden können.

Nach diesem letzteren Konzept wurde in der vorliegenden Arbeit verfahren (vgl. 1.5 und 2.3.3.).

## 1.2. Meßmethoden

Der einzige direkte Weg, die Artenzusammensetzung und die Individuenzahl des pflanzlichen Planktons zu erfassen, ist die mikroskopische Methode von Utermöhl (1931, 1958). Als indirekte Methode hat sich demgegenüber die Messung des Chlorophyll-a-Gehaltes von Wasserproben durchgesetzt (Kreps und Verbinskaya, 1930), da diese routinemäßig schneller durchführbar ist und außerdem das Chlorophyll-a als Grundlage des Photosyntheseprozesses eine produktionsbiologisch und ökologisch sinnvolle Meßgröße darstellt.

Die Messung des Chlorophylls kann photometrisch oder fluorometrisch erfolgen. Beide Methoden werden in den nächsten beiden Abschnitten kurz beschrieben.

Die folgende Tabelle (1.1) gibt einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten des Einsatzes der Meßgeräte:

Tab. 1.1 Einsatzmöglichkeiten der Meßgeräte

Probennahme	Gerät zur Chlorophyllmessung		
	in vitro	in vivo	in situ
diskret (Wasserschöpfer)	Photometer, Fluorometer	Fluorometer	-
kontinuierlich	-	Pumpe + Fluorometer	Fluoreszenzsonde

In dieser Arbeit werden in erster Linie Meßergebnisse einer Fluoreszenzsonde vorgestellt, die anhand photometrischer Daten geeicht wurden. Die Phytoplanktonzählungen werden ausführlich in einer Diplomarbeit behandelt (Sperling, 1981).

### 1.2.1. Photometrie

Aus der Messung der optischen Dichte im Photometer kann man die Konzentration eines Photosynthesefarbstoffes in seinem

Lösungsmittel bestimmen (Mackinney, 1941; Smith und Benitez, 1955; Jeffrey, 1963). Bei gleichzeitiger Anwesenheit mehrerer Farbstoffe überschneiden sich die verschiedenen Absorptionsspektren und erschweren die genaue Bestimmung jeder einzelnen Komponente. Tatsächlich brauchte man für jede mögliche Farbstoffkombination einen eigenen Satz von Gleichungen zur Berechnung der individuellen Konzentrationen. Zum Glück sind im Meer nur sehr wenige dieser Kombinationen anzutreffen, so daß man sich mit einem der publizierten Verfahren behelfen kann, die alle bezüglich der Chlorophyll-a-Bestimmung nur unwesentlich ( $< 2.5 \%$ ) voneinander abweichen (SCOR-Unesco, 1966; Lorenzen, 1967a; Strickland und Parsons, 1968; Jeffrey und Humphrey, 1975).

Der gesamte Analysengang von der Filterung und Lagerung über die Extraktion und photometrische Messung bis zur Berechnung der Chlorophyllkonzentration im Probenwasser läßt so viele Variationsmöglichkeiten zu, daß hier kein Überblick über die vorhandene Literatur gegeben werden kann. Immer wieder finden Workshops statt, um die derzeit beste Lösung zu finden, wie in Cronulla, Australien (Lorenzen und Jeffrey, 1980) oder in Plön, (Rai und Marker, 1981) und Interkalibrierungstreffen, um die Analysenergebnisse verschiedener Labors miteinander zu vergleichen, wie in Stralsund, 1979.

In dieser Arbeit wurde nach der am Institut für Meereskunde Kiel üblichen Methode (vgl. Kap. 2.2.2.) verfahren, die von den Empfehlungen der Baltischen Marinen Biologen (Edler, 1979) abweicht in der Art der Homogenisation (Derenbach, 1969).

### 1.2.2. Fluorometrie

#### 1.2.2.1. Allgemeines

Die Bestrahlung von Chlorophyllen mit UV-Licht bei ca. 425 nm ruft ein rotes Fluoreszenzlicht bei ca. 665 nm hervor, dessen Intensität ein Maß für die Menge des im Meßvolumen vorhandenen Pigmentes ist.

Die in-vitro-Fluoreszenzanalyse von Chlorophyllextrakten (Goodwin, 1947; Holm-Hansen et al., 1965; Loftus und Carpenter, 1971) zeichnet sich gegenüber der photometrischen Analyse durch eine etwa 20-fach höhere Empfindlichkeit aus (Mindestmenge:  $0.01 \text{ mg m}^{-3}$ ), bei gleichem Arbeitsaufwand. Lebende Phytoplanktonzellen fluoreszieren dagegen etwa 10mal schwächer als ein Extrakt mit derselben Chlorophyllkonzentration (Lorenzen, 1966; Kiefer, 1973). Die Methode ist aber dennoch empfindlicher und weit weniger arbeitsintensiv als die Photometrie, kann außerdem - bei Verwendung einer Fluoreszenzsonde - für in-situ-Messungen eingesetzt werden (Herman, 1975; Herman und Denman, 1977) und hat den Vorteil, daß Chlorophyllabbauprodukte in vivo nur schwach fluoreszieren (Yentsch, 1974).

Fluoreszenzuntersuchungen an Pflanzenzellen wurden zunächst nur im Labor zur physiologischen Erforschung von Photosyntheseprozessen vorgenommen (Rabinowitch, 1945; Govindjee und Papageorgiou, 1971), da die Ausbeute und Wellenlänge des Fluoreszenzlichtes von vielen intra- und extrazellulären Faktoren abhängt. Angefangen bei der Absorption des Erregerlichtes, über die Weiterleitung der Strahlungsenergie innerhalb des Pigmentsystems, bis schließlich zur Emission des Fluoreszenzlichtes spielt dabei alles eine Rolle, was den momentanen physiologischen Zustand der lebenden Zelle charakterisiert oder im Verlauf der Messung beeinflusst (Kiefer, 1973; Loftus und Seliger, 1975; Samuelsson und Öquist, 1977; Slovacek und Hannan, 1977).

Demzufolge muß insbesondere die fluorometrische in-situ-Chlorophyllmessung in geeigneter Weise anhand von photometrischen Analysen geeicht werden.

#### 1.2.2.2. Die Eichung der Fluoreszenzsonde

Für unsere Messungen verwendeten wir eine Fluoreszenzsonde der Firma Electro Optics Suarez, Henstedt-Ulzburg, (Abb. 1.1, "EOS-Sonde"). Die Ausgangsspannung (Volt) der Son-

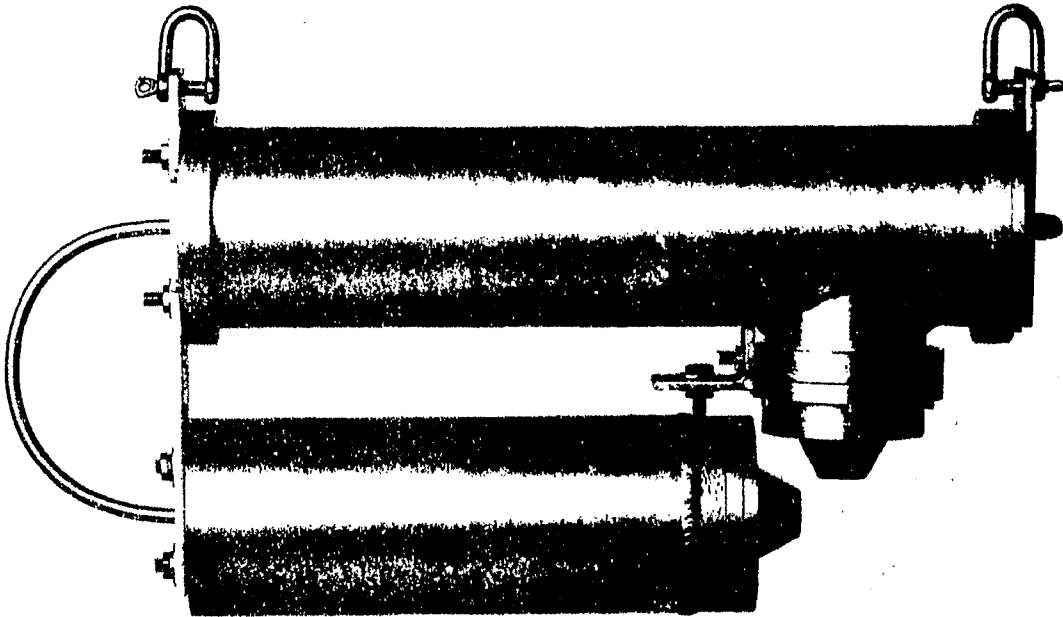


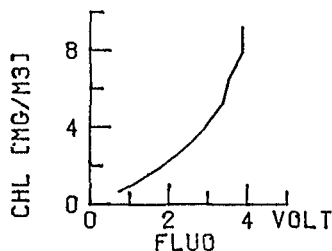
Abb. 1.1: Fluoreszenzsonde (Fa. Electro Optics Suarez)

de wurde folgendermaßen direkt in in-vivo-Chlorophyll-einheiten ( $\text{mg m}^{-3}$ ) übergeführt:

Zunächst wurde die Sonde in einer 20 l-Plastikwanne installiert, die mit filtriertem Nordseewasser ( $T = 23.5^{\circ} \text{C}$ ,  $S = 35 \text{ ‰}$ , beide konstant) gefüllt wurde. Vier Magnetrührer sorgten für eine gute Durchmischung. Dann wurden immer größere Mengen einer konzentrierten Algenmonokultur (Dunaliella sp.) hinzugegeben, bis das Meßbereichsende der Sonde erreicht war. Aus den Aufzeichnungen des angeschlossenen XY-Schreibers wurden die Daten für die Eich-tabelle (Anhang 3.2.) entnommen und in den Abb. 1.2 bis 1.5 graphisch dargestellt. Jede Abbildung enthält drei Kurven, die minimale, mittlere und maximale Anzeige der Fluoreszenzsonde bei den verschiedenen Chlorophyll-a-Konzentrationen.

Calibration of the Fluorescence Sonde  
(voltage → chlorophyll-a)

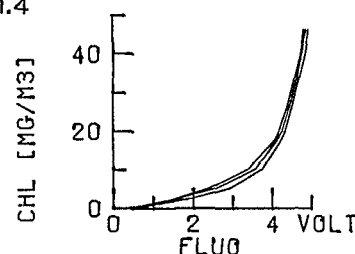
1.2



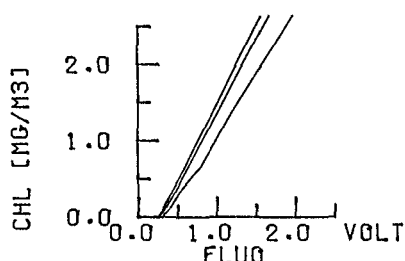
dissolved chlorophyll  
from spinach  
electronic noise max. 25mV  
≈ < 0.01mg Chl m<sup>-3</sup>  
(after Stienen, 1981)

total range: 0-50mg Chl m<sup>-3</sup>  
Y = aX<sup>6</sup>+bX<sup>5</sup>+cX<sup>3</sup>+dX+e

1.4

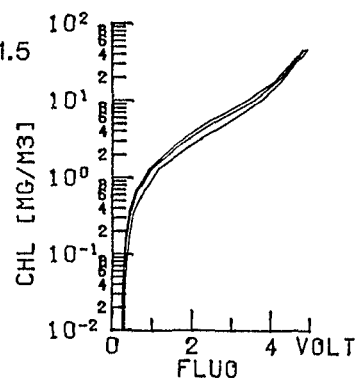


1.3



particulate chlorophyll  
from Dunaliella sp.  
noise max. 360mV  
≈ 0.2mg Chl m<sup>-3</sup>  
low range: 0-2.5mg Chl m<sup>-3</sup>  
Y = 1.9 · X - 0.5

1.5



Legende der Abb. 1.2 bis 1.5

1.2 Eichkurve für gelöstes (zuvor kristallines) Chlorophyll-a (nach Stienen, 1981).

Eichkurven für partikuläres Dunaliella-Chlorophyll-a:

1.3 a) unterer Meßbereich: 0-2.5 mg m<sup>-3</sup>; Y = 1.892X - 0.507

1.4 b) gesamter Meßbereich: 0-50 mg m<sup>-3</sup>; Y = aX<sup>6</sup>+bX<sup>5</sup>+cX<sup>3</sup>+  
dX + e

1.5 c) wie vor, halblogarithmische Darstellung

$$a = 0.01530844 \quad b = -0.07866062 \quad c = 0.4894151$$

$$d = 0.2835441 \quad e = 0.6498253$$

Es ist deutlich, daß das elektronische Rauschen der Sonde, so wie es bei der Eichung mit kristallinem Chlorophyll-a in Lösung in Erscheinung tritt (Abb. 1.2), vernachlässigbar klein ist. Es beträgt max. 25 mV ( ≈ < 0.01 mg Chl m<sup>-3</sup>) und liegt weit unterhalb der photometrischen Nachweisgrenze.

Das "partikelbedingte", ebenfalls hochfrequente Rauschen der Sonde während der Eichung mit Dunaliella (Abb. 1.3 bis 1.5) ist zwar mit max. 360 mV ( ≈ 0.2 mg Chl m<sup>-3</sup>) um eine Zehner-



potenz größer, für die hier vorgenommenen in-situ-Untersuchungen jedoch ebenfalls zu vernachlässigen.

Im Rahmen einer anderen Fragestellung wäre es jedoch interessant zu klären, wie dieses verstärkte Rauschen zustande kommt und warum es eine rechtssteile Verteilungsform aufweist. (Bei einer gegebenen Chlorophyllkonzentration treten Abweichungen vom mittleren Fluoreszenzsignal nach oben häufiger auf als nach unten.) Wenn man die Anwesenheit von Detritus in der verwendeten Algenkultur, die sich in der logarithmischen Wachstumsphase befand, ausschließt, kommen folgende Erklärungsmöglichkeiten in Betracht:

- 1) Inhomogene Verteilung der Algenzellen im Millimeterbereich durch die Bildung von Zellverbänden;
- 2) Unterschiedliche Zeitkonstanten bei Konzentrationszu- bzw. -abnahme.

An dieser Stelle möchte ich nur grob abschätzen, wieviele Dunaliellazellen bei der Eichung im Meßvolumen der Fluoreszenzsonde ( $\approx 1 \text{ cm}^3$ ) vorhanden waren. Nusch und Palme (1975) geben als durchschnittlichen Chlorophyllgehalt pro Zelle folgende Werte an:

in Kultur  $\approx 1.5 \cdot 10^{-10}$  mg; in Natur  $\approx 6.7 \cdot 10^{-10}$  mg.

Tab. 1.2 gibt für den Anfangs- und den Endwert der Eichreihe (Anhang 3.2.) die berechneten Zellzahlen im Meßvolumen wieder.

Tab. 1.2: Berechnete Zellzahlen im Meßvolumen der Fluoreszenzsonde während der Kalibrierung

Dunaliella- Eichkonzentration Chl-a [ $\text{mg cm}^{-3}$ ]	Zellzahl im Meßvolumen [ $\text{cm}^{-3}$ ]	
	"Kultur"	"Natur"
$17 \cdot 10^{-9}$ (Anfangswert)	113	25
$46 \cdot 10^{-6}$ (Endwert)	308000	69000

Die maximal mögliche Anzahl von Planktonzellen im Meßvolumen hängt von der artspezifischen Zellgröße ab (Tab. 1.3):

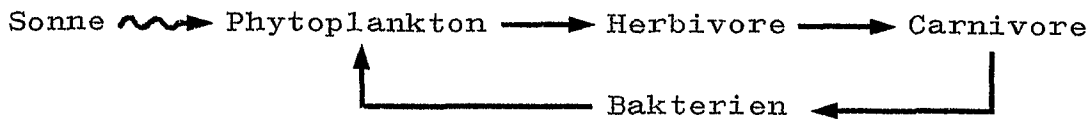
Max. Zellzahlen im Meßvolumen von  $1 \text{ cm}^3$  bei ver-  
 Tab. 1.3: schiedenen Durchmessern ( $V = d^3 \cdot \pi / 6$ )

Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Volumen [ $\text{cm}^3$ ]	max. Zellzahl [ $\text{cm}^{-3}$ ]
100	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^6$
10	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^9$
1	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{12}$

### 1.3. Phytoplankton-Verteilung

Der wichtigste Grund, die Verteilung des Phytoplanktons im Meer zu untersuchen, liegt - neben dem rein wissenschaftlich-ökologischen Interesse einerseits und dem gewachsenen Umweltbewußtsein andererseits - hauptsächlich in der Notwendigkeit begründet, die bestehenden Produktionsmodelle des pelagischen Ökosystems zu verbessern.

Diesen Modellen ist im allgemeinen folgende Grundstruktur gemeinsam:



Zumeist wurde nur die zeitliche Entwicklung betrachtet unter der Annahme der räumlichen Homogenität (Steele, 1974a; Horwood, 1976a; Jørgensen, 1976) oder aber nur die räumliche Strukturierung bei Zeitkonstanz (Walsh, 1975).

Dem ersten Modelltyp fehlt die ausdauernde Stabilität, die in der Natur zu existieren scheint, während dem zweiten Modelltyp die zeitliche Dynamik fehlt.

Da auch durch eine Erhöhung der Anzahl der Modellparameter keine befriedigende Verbesserung zu erzielen ist, scheint die einzig plausible Lösung in der Kombination beider Modelltypen zu bestehen, indem die räumliche Strukturierung in ein zeitliches Modell integriert wird (McAllister, 1970; Steele, 1974b; Radach und Maier-Reimer, 1975, Wroblewski, 1976; Platt

et al., 1977). Als wichtigste Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung der in-situ-Fluoreszenzmessung anzusehen (vgl. Tab. 1.1), die "quasisynoptisch" die Gewinnung großer Datensätze möglich macht.

### 1.3.1. Horizontalstudien

Lorenzen (1971) erhielt Meßwerte für die in-vivo-Chlorophyllfluoreszenz und die Temperatur, indem er Seewasser in die Durchflußküvette eines Laborfluorometers pumpt. Zwischen den Temperatur- und Chlorophyllfluoreszenzänderungen im Verlauf der Schiffsfahrt waren deutliche Zusammenhänge zu erkennen.

Ähnliche Untersuchungen nach demselben Meßprinzip wurden z.B. durchgeführt von Platt et al. (1970), Platt (1972), Denman (1975), Powell et al. (1975), Denman und Platt (1975), Fasham und Pugh (1976), Denman (1976) und Horwood (1976a,b). Die Daten wurden spektralanalytisch bearbeitet in dem Bemühen, die beobachtete Chlorophyllvariabilität aufzuteilen in einzelne Komponenten unterschiedlicher Frequenz oder Wellenzahl (Platt und Denman, 1975b). Durch die Berechnung der Kohärenz zwischen verschiedenen Meßgrößen lassen sich dann u.U. Gemeinsamkeiten erkennen für bestimmte Teile des Spektrums.

Platt (1972) zeichnete die Chlorophyllkonzentration in einer festen Tiefe über ca. 3 Std. auf, in der Annahme, daß die dort gemessene Strömung von ca.  $20 \text{ cm s}^{-1}$  im gesamten Zeitraum konstant sei. Das Spektrum hatte im Bereich von 0.3 bis 33 min ( $\hat{=}$  1000 bis 10 m) eine Steigung von  $^{-5}/3$ . Da dies auch für die Verteilung der kinetischen Energie im Meer zutrifft (Ozmidov, 1965, zitiert in Platt, 1972), lag die Vermutung nahe, daß die Varianz der Phytoplanktonkonzentration eine einfache Potenzfunktion der Längenskala sei und ausschließlich von der Turbulenz kontrolliert werde.

Denman und Platt (1975) berechneten Kohärenzspektren aus Chlorophyll- und Temperaturzeitreihen, gemessen nach demselben Verfahren. Danach war die Kohärenz für Skalen unterhalb 100 m

und oberhalb 1000 m nicht signifikant, so daß nur für den dazwischenliegenden Bereich ein Einfluß der Hydrographie auf die Planktonverteilung ("passive scalar") angenommen wurde. In ihrer theoretischen Arbeit von 1976 präsentieren die beiden Autoren auch eine Erklärung für den in ihrem Spektrum aufgetretenen "Knick", der die höheren Wellenlängen mit einer Steigung von -1 von den niederen Wellenlängen mit einer Steigung von -2 bis -3 trennt. In der Nähe der "kritischen Wellenzahl"  $K_c$ , beim Knick des Spektrums, haben die biologischen Prozesse (Wachstum) in etwa dasselbe Gewicht wie die hydrographischen Prozesse (Turbulenz):

$$\begin{array}{l}
 E(K) \propto K^{-\frac{5}{3}} \\
 E(K) \propto K^{-1} F(K/K_c) \\
 K_c \equiv (r^3/\epsilon)^{\frac{1}{2}}
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 E(K) = \text{Energie des Spektrums bei} \\
 \text{Wellenzahl } K \\
 K_c = \text{"Kritische Wellenzahl"} \\
 r = \text{Phytoplanktonreproduktionsrate} \\
 \epsilon = \text{Viskose Dissipationsrate}
 \end{array}
 \right.$$

Demgegenüber hat Horwood (1978) nur in einem von fünf Spektren einen Knick (bei 90 m) erhalten und Steigungen zwischen -2 und -1/2. Es ist wahrscheinlich, daß die biologischen Prozesse sich nur während der Wachstumsphasen, z.B. der Frühjahrsblüte, bemerkbar machen.

Die Spektren von Chlorophyll und der Strömungsgeschwindigkeit in der Arbeit von Powell et al. (1975) haben im hochfrequenten Bereich (unterhalb 100 m) eine ähnliche Form. Darüber, im niederfrequenten Teil, weichen sie voneinander ab.

Die bisher zitierten Arbeiten befaßten sich mit Messungen in jeweils einer festen Tiefe und ignorieren den Einfluß von internen Wellen, die besonders in Dichtegradienten zu beträchtlichen Vertikalbewegungen führen können. Auch vertikal kann die Phytoplanktonkonzentration im Längenbereich  $< 10$  m stark variieren (Strickland, 1968; Derenbach et al., 1979), wodurch zweidimensionale Messungen notgedrungen verfälscht werden. Direkten Einfluß nehmen auch der Wind und die von ihm induzierten Strömungen (Therriault et al., 1978), wobei die in übereinanderliegenden Wasserschichten vorhandenen Phytoplanktonpopulationen unabhängig voneinander bewegt werden und un-

tereinander keine Korrelation in den Zeitreihen aufweisen (Denman und Platt, 1975; Denman, 1976).

### 1.3.2. Vertikalstudien

Die Vertikalverteilung des Chlorophylls wurde schon von einer ganzen Reihe von Autoren in verschiedenen Teilen des Weltmeeres untersucht (Gessner, 1948; Steele und Yentsch, 1960; Steele, 1964; Yentsch, 1965).

Sie ist keineswegs homogen in der Deckschicht, sondern weist gewöhnlich ein Maximum am unteren Rand der euphotischen Zone auf, zumeist in einer Sprungschicht, seltener darüber (Lorenzen, 1967b). An derselben Stelle, oder ein wenig tiefer, findet sich ein Phaeopigmentmaximum; die Produktivität ist oberhalb des Chlorophyllmaximums am größten.

Ketchum und Corwin (1965) beobachteten während einer Planktonblüte das Absinken des Chlorophyllmaximums von 10 auf 25 m innerhalb von 10 Tagen, wofür entweder das Sinken der Zellen oder aber Wegfraß durch Zooplankton verantwortlich gemacht wurde.

Longhurst et al. (1967) fanden während einer fünftägigen Untersuchung in einem auftreibenden Wasserkörper mit zunehmender Stabilisierung eine Abnahme der Nährstoffe, bei hoher Produktivität und gleichbleibendem Chlorophyllgehalt. Es bildete sich ein Chlorophyllmaximum, wahrscheinlich durch die Freßaktivität des Zooplanktons in den benachbarten Wasserschichten. Dabei scheint das Zooplankton sich in erster Linie in der Zone höchster Produktivität zu betätigen und nicht dort, wo der Bestand am größten ist.

Strickland (1968) verglich Nährstoff- und Chlorophyllprofile aus diskreten und kontinuierlichen Probennahmen miteinander. Bei den Nährstoffprofilen traten Abweichungen bis zu 10 % auf; die Schätzungen der Gesamt- bzw. Durchschnittsmenge stimmten überein innerhalb der experimentellen Fehlergrenzen.

Bei den Chlorophyllprofilen jedoch traten erhebliche Abweichungen auf, die eine diskrete Probennahme (mit Wasserschöpfern) zumindest für Messungen der Vertikalstruktur als ungeeignet erscheinen lassen: Die Chlorophyllgesamtmenge hatte einen Fehler von bis zu 25 %, während die tiefenabhängige Chlorophyllkonzentration mehr als 100 % Fehler aufweisen konnte. Planktonschichten, die so dünn sind, daß sie genau zwischen zwei Wasserprobentiefen fallen, können mit Schöpferproben natürlich nicht entdeckt werden.

Echte in-situ-Messungen wurden erst mit der Entwicklung der Blitzlichtfluoreszenzsonde möglich (Frügel und Koch, 1976), die, zusammen mit anderen Meßgeräten auf einen "Batfish" (auch "Delphin" genannt) montiert, erstmals höher auflösende dreidimensionale Schnitte (Entfernung, Tiefe und Chlorophyllfluoreszenz oder anderes) ermöglichte (Herman, 1975).

Herman und Denman (1977) blitzten zu Testzwecken mit 10 oder 40 Hz und wählten folgende Batfishgeschwindigkeiten:  $3 \text{ m s}^{-1}$  horizontal und  $0.6 \text{ m s}^{-1}$  vertikal. Die Sonde wurde geeicht mit einer Kultur von Phaeodactylum tricornutum. Dabei stellte sich heraus, daß die Meßgenauigkeit beeinträchtigt wurde durch Schwankungen im Ausgangssignal (Empfängerrauschen) und durch Blitzinstabilitäten.

Mit derselben Apparatur verfolgten Denman und Herman (1978) sechs Tage lang die Entwicklung eines Phytoplanktonpatches über dem Schelfrand vor der kanadischen Atlantikküste. In einer "Linse" von relativ warmem, leichtem Oberflächenwasser wurde diese "Planktonanomalie" mit dem Gezeitenstrom hin- und herbewegt, wobei die Chlorophyllkonzentration allmählich abnahm, vermutlich durch Advektion. Darauf ließen jedenfalls die Strukturen in den Temperatur- und Salzgehaltsisolinien schließen, die - um den Einfluß der internen Wellen zu eliminieren - gegen die Dichte gezeichnet wurden. In den Chlorophyllisolinien traten derartige Strukturen allerdings nicht auf.

Das Verhältnis von Chlorophyll zu Fluoreszenz blieb während der gesamten Untersuchung konstant und unabhängig von der Wassertiefe.

Die Batfishtechnik ermöglichte in der Folge die Untersuchung von hydrographischen Fronten und deren Einfluß auf die Primärproduktion (Pingree et al., 1975; Savidge, 1976; Herman und Denman, 1979).

Eine Front entsteht dort, wo ein geschichteter und ein durchmischter Wasserkörper aufeinandertreffen. Auf der geschichteten Seite beobachtet man häufig eine Planktonblüte innerhalb der euphotischen Zone, die ihre hohe Produktion aufrecht erhalten kann, da sie mit Nährstoffen aus dem durchmischten Wasserkörper versorgt wird. Die Lebensbedingungen für das Phytoplankton sind in einem solchen Fall offensichtlich besonders günstig, da das Absinken durch den starken Dichtegradienten verhindert wird und stets genügend Licht und Nährstoffe zur Verfügung stehen.

Die Feinstruktur der vertikalen Phytoplanktonverteilung (Bornholm-Becken, Mai 1975) wurde von Derenbach et al. (1979) untersucht. Das Fluorometer und ein Thermistor waren auf einer freifallenden Sonde installiert, die mit ca.  $15 \text{ cm s}^{-1}$  an einem Führungsdraht durch das Wasser absank. Im allgemeinen nahm die Variabilität des Chlorophylls mit der Tiefe zu. Die höchsten Phytoplanktonkonzentrationen wurden innerhalb oder knapp unter der Temperatursprungschicht gefunden - sofern eine solche vorhanden war. Ansonsten, d.h. bei fehlender Schichtung, wurden keine derartigen Chlorophyllansammlungen beobachtet. Die vertikale Ausdehnung der Planktonschichten lag bei max. 1 m; in ihnen überstiegen die Chlorophyllkonzentrationen das vertikale Mittel um das 10- bis 20fache.

Die Arbeit von Denman (1977) über die kurzzeitige Variabilität der vertikalen Chlorophyllstruktur kommt dem in Kapitel 1.5. beschriebenen Konzept meiner Arbeit am nächsten. Denman zeichnete über 26 h insgesamt 104 Vertikalprofile von Temperatur und in-vivo-Chlorophyllfluoreszenz in 15 Min.-Abständen auf. Da dies ortskonstant durchgeführt wurde, erklärte sich ein Großteil der Variabilität aus der Gezeitenadvektion und internen Wellen. Als wichtigste charakteristische Meßgrößen erwiesen sich der mittlere und der maximale Wert der Chlorophyllkonzentration, berechnet aus den einzelnen Profilen. Es wurde deutlich, daß eine einzelne Probentiefe in einer Zeitreihe nicht repräsentativ sein kann, am wenigstens, wenn sie im Bereich einer Dichtesprungschicht liegt. Denman verwendete eine

Seewasserpumpe und ein Laborfluorometer mit Durchflußküvette. Es ist bekannt, daß die in-situ-Feinstruktur aller so gemessenen Parameter durch die Vermischung im Schlauch zerstört wird. Denman schätzt, daß dadurch in seinen Profilen nur Strukturen mit einer vertikalen Ausdehnung von über 2 m erhalten blieben.

#### 1.4. Zusammenfassung und Hypothesen

Die Versuche, die zeitabhängige Phytoplanktonverteilung zu analysieren, waren bislang nur eingeschränkt erfolgreich. Das lag z.T. an der Eigendynamik des Phytoplanktons: Wachstum, Wegfraß, Absinken, Wanderung, Veränderung des physiologischen Zustands und hauptsächlich aber an der Variabilität der hydrographischen Verhältnisse: interne Wellen, Langmuirzirkulation, Gezeiten, Seiches, täglicher Temperaturgang in der Deckschicht und dazu meteorologische Prozesse.

Eine wesentliche Verbesserung gegenüber der diskreten Probenahme mit Wasserschöpfern wurde möglich durch die Verwendung von Fluoreszenzsonden, insbesondere beim Einsatz auf dem Batfish. Die Auswertung von Schnitten aus solchen Untersuchungen zeigte jedoch, daß auch hier die räumlichen und die zeitlichen Komponenten der Variabilität nicht klar voneinander zu trennen waren.

Als einzige Alternative zu den bisherigen Eulerschen, d.h. ortskonstanten Untersuchungen bieten sich Lagrangesche, d.h. "wasserkonstante" Untersuchungen an. Zu diesem Zweck muß der zu beobachtende Wasserkörper mit einer Driftboje markiert werden. Die Messungen werden dann in unmittelbarer Nähe der Boje vorgenommen (vgl. Hickel, 1972).

Es wäre z.B. denkbar, einen Schnitt mit dem Batfish nicht bei festen geographischen Positionen (wie Herman und Denman, 1979), sondern entlang einer Kette von Driftbojen durchzuführen, weil dadurch vermutlich die unkontrollierte Advektion "fremden" Wassers vermieden würde. In geschichtetem Wasser kann allerdings mit einem Schiff jeweils nur ein Wasserkörper pro Schnitt vermessen werden (außer bei vernachlässigbarer Stromscherung).



Was die turbulenzabhängige Verteilung des Planktons anbelangt, können folgende Hypothesen aufgestellt werden:

- 1) Von einem bestimmten "oberen Schwellenwert" der Turbulenzintensität an aufwärts wird das Plankton homogen in der Wassersäule verteilt.
- 2) Darunter, im "mittleren Turbulenzbereich", findet eine Fraktionierung des Planktons in Gruppen unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit statt. In den physikalischen Parametern bildet sich eine Schichtung aus.
- 3) Von einem bestimmten "unteren Schwellenwert" der Turbulenz an abwärts sinkt das Plankton ab und wird erst von einem genügend starken Dichtegradienten aufgehalten.

Die Dicke der durchmischten Zone bestimmt, ob die Photosynthesebilanz positiv oder negativ ist (Sverdrup, 1953), da diese von der Lichtintensität abhängt, welche mit der Wassertiefe abnimmt. Die Tiefenposition (Lichtintensität) und die Nährstoffzufuhr beeinflussen deshalb die Entwicklung eines Phytoplanktonpatches am meisten.

### 1.5. Arbeitsziel

In dieser Arbeit will ich versuchen, die kleinräumige Vertikalverteilung des Phytoplanktons von 0.1 bis 100 m und ihre kurzfristige Veränderlichkeit im Minuten- bis Stundenbereich zu analysieren.

Die Messungen sollten so vorgenommen werden, daß möglichst viele Störgrößen während des Untersuchungszeitraums konstant bleiben.

Ein Wasserkörper mit relativ hoher Phytoplanktendichte wird mit einer Driftboje markiert und nach der Methode des "burst sampling" (Webster, 1967) vermessen: Etwa 15 Std. lang sollen zu jeder Stunde etwa 5 Profile kurz hintereinander genommen werden.

- 1) Änderungen der Chlorophyllprofile im Minutenabstand sind bedingt durch kleinräumige horizontale Patchiness, da die Sonde nicht jedesmal in ganz genau demselben Wasser mißt. Es wird angenommen, daß in dieser Zeit keine biologischen Veränderungen stattfinden.
- 2) Die Veränderungen der mittleren stündlichen Profile schließlich sollten im Idealfall nur die tatsächliche zeitliche Entwicklung in dem markierten Wasserkörper repräsentieren.

Ob diese angestrebten Bedingungen erfüllt wurden, kann erst nach den Messungen aus der Zeitreihe der T/S-Beziehung abgeschätzt werden. Außerdem sollten der Wärmeinhalt [ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$ ] und die Salzmenge [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ] des Wasserkörpers konstant bleiben. Die integrierte Chlorophyllmenge [ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ] kann sich verändern durch Wachstum oder Absinken in einen anderen Wasserkörper; die Möglichkeit des Wegfraßes durch Zooplankton soll ausgeschlossen werden, indem die Beobachtungen im Frühjahr zu Beginn der ersten Phytoplanktonblüte durchgeführt werden, noch bevor die Entwicklung des Zooplanktons einsetzt.

In einer Frühjahrsblüte sind gewöhnlich nur sehr wenige Arten vertreten, deren physiologischer Zustand, und damit das Chlorophyll-Fluoreszenzverhältnis, sich während der 15 Std. nicht wesentlich ändern sollte (Savidge, 1976; Denman und Herman, 1978; Herman und Denman, 1979).

#### Definitionen

- 1) Phytoplanktonschicht: Ansammlung von Phytoplankton, deren horizontale Ausdehnung (räumlich und/oder zeitlich) im Rahmen des Untersuchungszeitraums nicht erkennbar ist.\*
- 2) Phytoplanktonpatch: In sich abgeschlossene Ansammlung von Phytoplankton.\*

(\* mit einer Chlorophyllkonzentration, die mindestens  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  über der Umgebungskonzentration liegt.)

## 2. Kapitel: Datengewinnung und -verarbeitung

Die Daten für die vorliegende Arbeit wurden gesammelt während der Forschungsreise Nr. 38/2 des FS "Poseidon" vom 19.-26. und 27.-30. März 1979.

### 2.1. Meeresgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfaßte Stationen im Skagerrak, Kattegat und in der westlichen Ostsee bis nach Bornholm.

#### 2.1.1. Stationskarte

Die Stationskarte (Abb. 2.1 ) enthält nur die in dieser Arbeit behandelten Driftstationen. Im Anhang (1.) befindet sich eine Liste über die Anordnung sämtlicher Stationen, deren Ergebnisse an anderer Stelle veröffentlicht werden sollen.

#### 2.1.2. Allgemeine Hydrographie

Der Süßwasserüberschuß der Ostsee führt im langzeitigen Mittel zu einem Ausstrom salzarmen Oberflächenwassers durch das Kattegat in die Nordsee, während salzreiches Nordseewasser in Bodennähe einströmt (Siedler und Hatje, 1974; Kobe, 1934).

Das Wasser ist demzufolge im Kattegat stark geschichtet (Abb. 2.2), wird aber dennoch wegen der meist hohen Stromscherung turbulent vermischt, was einen allmählichen Ausgleich der Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede bewirkt. Die Dichte ist fast nur vom Salzgehalt abhängig; die Temperatur hängt an der Oberfläche hauptsächlich von der Lufttemperatur ab, in der Tiefe von der Temperatur des Nordseewassers und dem Grad der erfolgten Vermischung.

Kurzfristig sind - in Abhängigkeit von atmosphärischen Vorgängen - die Stromlage und die Oberflächentemperatur starken Veränderungen unterworfen (geringe Wassertiefe, geringes Volumen!).

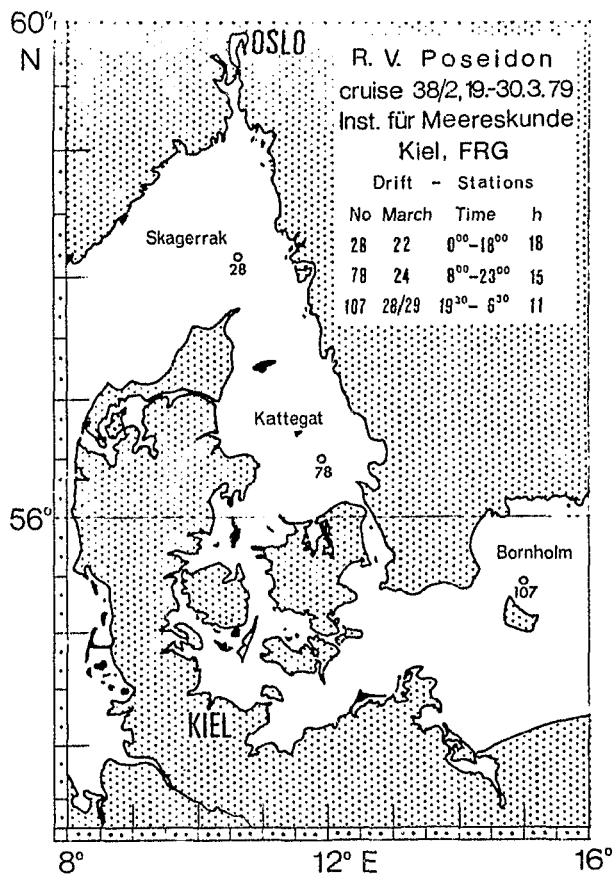


Abb. 2.1: Stationskarte (nur Driftstationen der Fahrt 38/2)

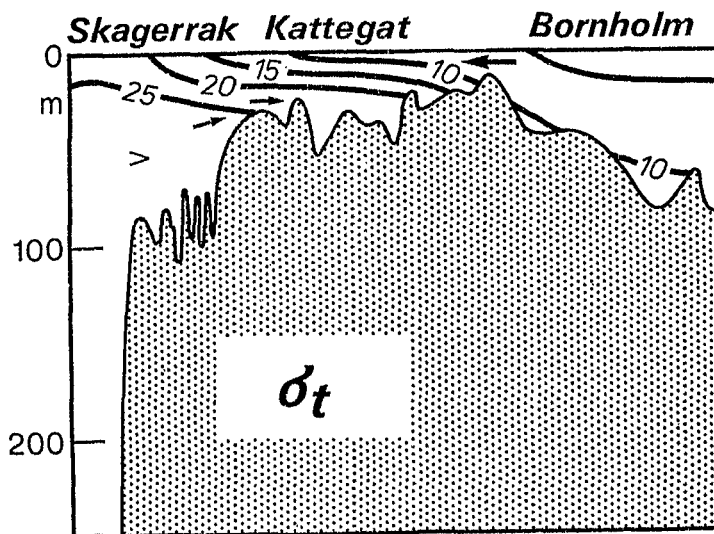


Abb. 2.2: Die allgemeine Hydrographie im Untersuchungsgebiet (nach Siedler und Hatje, 1974)

2.1.3. Wetter

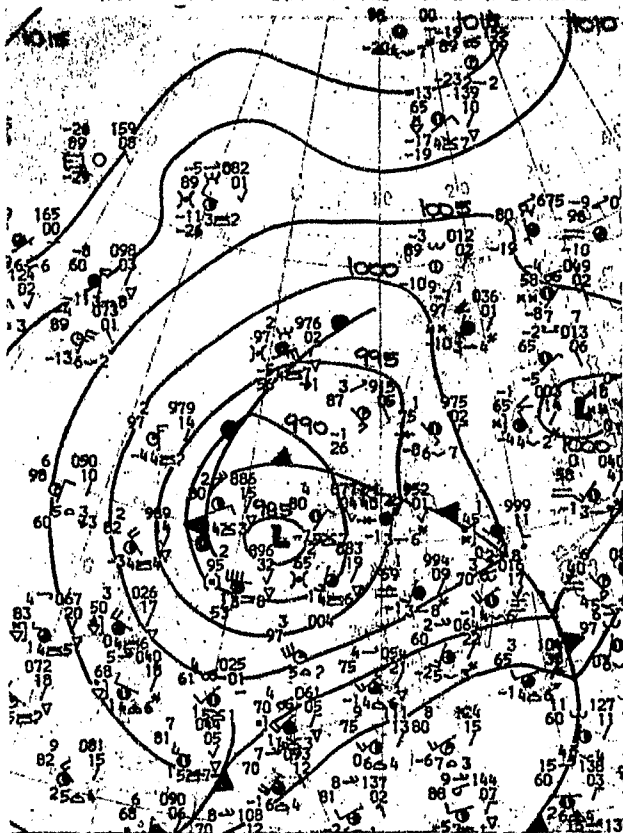
Die Großwetterlage zur Zeit der Dauerstationen ist aus den Wetterkarten (Abb. 2.3) auf der folgenden Seite ersichtlich (Europäischer Wetterbericht, 1979).

Die nachfolgende Tabelle (Tab.2.1) gibt einige meteorologische Daten wieder, die während der Dauerstationen auf der Schiffsbrücke notiert wurden. Die Wetterangaben beziehen sich auf den Zeitraum von 6 Stunden bis zur angegebenen Uhrzeit.

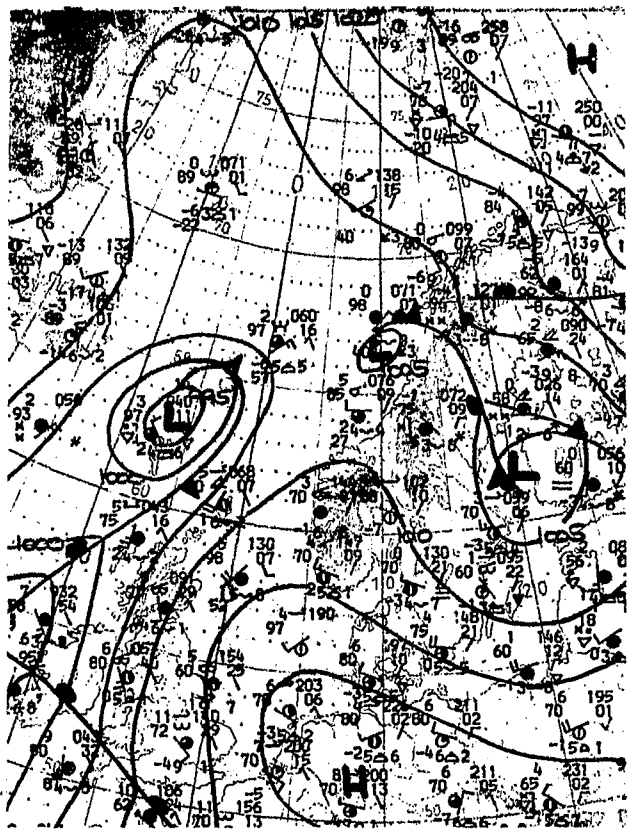
Tab. 2.1: Meteorologische Daten zu den Dauerstationen

Stat. Nr.	Datum 1979	Uhrzeit [MEZ]	Wind		Wetter (Sicht)	Temp. [°C]	Luft Druck [mbar]
			Richtung	Stärke [Bft.]			
28 SKA	22.3.	00.00	S	3	Nebel	1	996.5
		06.00	umlf.	1-2	bed.,Nebel	1	994.0
		12.00	S/SE	5	bed.,wolkig	4	996.5
		18.00	SW	6	bed.	6	997.0
78 KAT	24.3.	06.00	W	5	bed.	2	1008.0
		12.00	W	4	wolkig	5	1014.0
		18.00	W	2	wolkig	6	1016.0
		24.00	W-lich	2	unbew.	2	1018.0
107 BOR	28.3.	18.00	E/NE	3-4	bed./diesig	3	997.0
		24.00	NE	3	bed./neblig	2	999.0
	29.3.	06.00	E/NE	3	bed./neblig	2	999.0
		12.00	NE	6	diesig	3	1000.0
87 KAS	25.3.	12.00	SE	7	bedeckt	3	1005.0
		18.00	SSE	4-5	bedeckt	4	1000.0
		24.00	SSE	4-5	bed./diesig	5.5	997.0

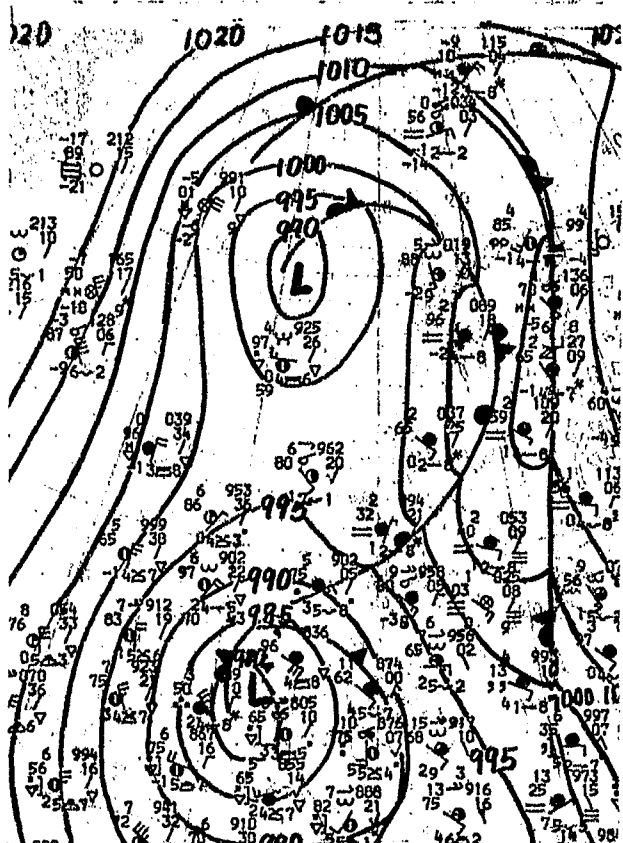
Alle Daten beziehen sich auf den Zeitraum von 6 Std. bis zur angegebenen Uhrzeit.



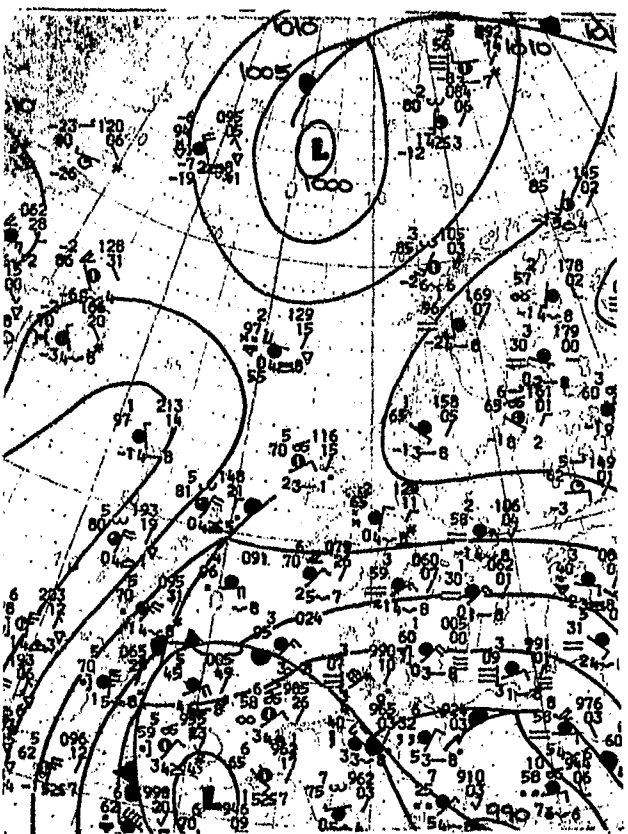
22.3.79 (Skagerrak)



24.3.79 (Kattegat)



28.3.79 (Bornholm 1)



29.3.79 (Bornholm 2)

Abb. 2.3: Großwetterlage zur Zeit der Dauerstationen  
Stereogr.Proj. 1:30 Mio., 60°N, 12 GMT, Oberfläche.  
(Europäischer Wetterbericht, 1979)

## 2.2. Planktologische Messungen

### 2.2.1. Entnahme der Wasserproben

Alle Wasserproben wurden mit einer 12 V-Bilge-Membranpumpe gewonnen, deren Förderleistung ca. 13 l/min betrug. Dabei entstand - in Abhängigkeit von der Länge des Schlauches (Durchmesser = 3/4 Zoll, Länge = 50-100 m) - eine Zeitverzögerung von 1 bis 2 min.

Zur Probenentnahme wurde ein Schlauchende am Gestell der Multi-sonde (MS) befestigt, so daß sich die Eintrittsöffnung nur wenige Zentimeter von den Meßvolumina der Fluoreszenzsonde (EOS) und der Attenuationssonde entfernt befand (vgl. Kap. 2.3.1.).

Die Tiefenstufen wurden für jede Station individuell anhand der aktuellen MS-Profile von Salzgehalt und Fluoreszenz bzw. Attenuation bestimmt und mit Hilfe der MS angesteuert. Auch während des Pumpens wurde die MS-Registrierung weitergeführt (vgl. Abb. 3.1). Insgesamt wurden 134 Wasserproben auf 27 Stationen entnommen, bei 3 bis 7 Probentiefen je Station (vgl. Abb. 3.2 und 3.3 ).

Aus jeder Probentiefe wurde eine 200 ml-Utermöhlflasche abgefüllt und mit 3 Tropfen Lugollösung bis zur späteren mikroskopischen Untersuchung der Phytoplanktonarten konserviert.

Für die Nährstoffbestimmung wurde eine 100 ml-Plastikflasche mit 50 ml Seewasser gefüllt, mit 50 ml Ammoniakpuffer (pH 8.5) konserviert und tiefgefroren (- 18° C).

Außerdem wurden jeweils 5 Parallelproben zu 0.5 oder 1.0 l (je nach Chlorophyllgehalt) abgemessen und durch Glasfaserfilter (Whatman GF/C, 2.5 cm Durchmesser) bei 500-600 torr Unterdruck filtriert.

Drei der Filter wurden photometrisch auf Chlorophyll und Phaeophytin analysiert. Dies geschah zum Teil noch während der Schiffsfahrt. Nach dem Ausfall eines Homogenisators mußten die Filter jedoch bei -18° C tiefgefroren werden.

Die restlichen beiden Filter wurden zur späteren Bestimmung des Sestongewichtes im Labor tiefgefroren, ebenfalls bei  $-18^{\circ}$  C.

### 2.2.2. Phytopigmente

Filter, die nicht schon an Bord weiterverarbeitet worden waren, wurden im Labor nach längstens einem Monat Lagerzeit aufgetaut und nach folgender Methode lichtgeschützt analysiert:

- 1) Zugabe von 3 g Glasperlen (Durchmesser = 1 mm) und 10 ml 90 %igem Aceton zu den Filtern in 12 ml-Plastikröhrchen
- 2) 5 min Homogenisierung in einem Schüttelgerät
- 3) 15 min Zentrifugieren bei 5000 U/min (vgl. Derenbach, 1969).
- 4) Messung der optischen Dichte der dekantierten Lösung gegen 90 %iges Aceton im Spektralphotometer Zeiss PM6 (bzw. PMQ3) in 5 cm-Küvetten bei 750, 663, 645 und 630 nm
- 5) Ansäuern der Lösung mit 2-3 Tropfen 1 N HCl
- 6) Erneute Messung der opt. Dichte bei 750 und 663 nm
- 7) Berechnung von Chlorophyll-a, -b, -c nach Jeffrey & Humphrey (1975) und von Chlorophyll-a und Phaeopigment nach Lorenzen (1967a), vgl. Anhang ( 2.3).

### 2.2.3. Phytoplanktonzellzahlen

Die Utermöhlproben wurden von Chr. Sperling mikroskopisch ausgewertet, der dann Korrelationen der Phytoplanktonzellzahl und des -volumens mit den Coulter-Counter-Partikelzahlen (H. Baumann) derselben Wasserproben berechnete (Sperling, 1981).

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur ein kleiner Teil der mikroskopischen Ergebnisse analysiert, soweit er sich auf die drei Driftstationen bezieht.



#### 2.2.4. Nährstoffe

Die Nährstoffe  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  und  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  wurden nach der bei Graßhoff (1976) genannten Methode analysiert.

### 2.3. Ozeanographische Messungen

#### 2.3.1. Multisonde

Die mitgeführte Multisonde war bestückt mit Sensoren für Druck, Temperatur, -differenz, Leitfähigkeit, Beschleunigung, Sauerstoff, Attenuation (670 nm), Lichtstreuung und Chlorophyllfluoreszenz.

Zwei wählbare Meßgrößen konnten on-line auf XY-Schreiber gezeichnet werden. Die Abfragerate betrug 250 msec, wobei anschließend je zwei Werte zu einem Mittelwert zusammengefaßt und auf Magnetband gespeichert wurden (2 Werte/sec). Die meisten der verwendeten Sensoren sind seit längerer Zeit erprobt und bewährt; technische Einzelheiten sind von Kroebel et al. (1975) veröffentlicht. Die Eichung der Fluoreszenz in Chlorophyll-einheiten wurde schon in 1.2.22 beschrieben.

Alle Parameter der Multisonde waren einwandfrei gemessen und aufgezeichnet worden bis auf die Temperatur, die aus ungeklärtem Grund - meist in Wassertiefen zwischen 10 und 20 m - Meßfehler aufwies. Nach einem automatischen Korrekturversuch war in manchen Fällen noch eine Interpolation fehlerhafter Werte "per Hand" nötig. Anschließend wurden folgende Schritte ausgeführt: Korrektur für die Zeitkonstante des Temperatursensors (60 msec), Monotonisierung bezüglich des Druckes, Berechnung der Dichte, gleitendes Mittel über je zwei Werte (Endauflösung ca. 1 Wert/sec entspr. 2-3 dm in der Vertikalen).

#### 2.3.2 Driftkörper

Die Driftkörper (Abb. 2.4) bestanden aus einem 5 x 1.4 m großen Segeltuchkreuz, welches über ein beliebig langes Seil mit der Boje an der Wasseroberfläche verbunden wurde.

Während das große Treibsegel von dem zu markierenden Wasserkörper mitgeführt wurde, war der Einfluß des Windes und der Oberflächenbewegungen auf den kleinen Auftriebskörper und das Verbindungsseil zu vernachlässigen.

Die Decca-Positionsbestimmungen der ausgesetzten Drifter wurden auf der Schiffsbrücke protokolliert und später umgerechnet in geographische Längen- und Breitenangaben. Daraus konnte der Driftweg, die -geschwindigkeit und der Winkel gegen Nord berechnet werden.

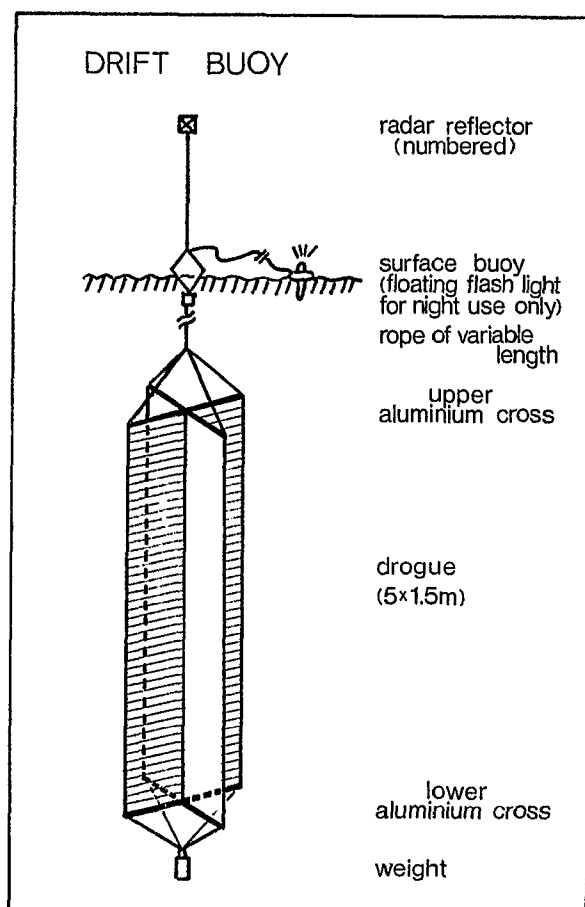


Abb. 2.4: Driftboje (Abt. Theoret. Ozeanogr., Inst. f. Meeresk. Kiel)  
Die Drifftiefe wird bestimmt durch die Länge des Verbindungsseils zwischen dem Treibsegel und der Oberflächenboje.

### 2.3.3. Arbeitsprogramm "Driftstation"

In Kapitel 1.5. habe ich schon die meinen Messungen zugrundeliegende "Philosophie" erläutert. Im folgenden wird nun beschrieben, inwieweit sie sich auf der Fahrt als durchführbar erwies:

Auf jeder Driftstation wurde anhand des Temperatur- und des Salzgehaltprofiles die aktuelle Wasserschichtung ermittelt und danach die Drifttiefen festgelegt. Um die lokalen Strömungsverhältnisse kennenzulernen, wurden schon vor dem Beginn des eigentlichen Meßprogramms probeweise einige Drifter ausgesetzt (meist 3-4 in der oberen und 1-2 in der unteren Schicht) und deren Versetzungen in eine Decca-Ausschnittskarte eingezeichnet. Da nun selbst Drifter in derselben Wasserschicht sich nicht immer gleichsinnig bewegten, war es nahezu unmöglich, mehr als zwei Drifter im Auge zu behalten, wenn die stündlichen MS-Messungen pünktlich ausgeführt werden sollten.

Durch die in den verschiedenen Schichten sehr unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten entfernten sich die Driftkörper meist so schnell voneinander, daß der "tiefere" nach einigen Stunden aufgenommen und in der Nähe des "oberen" wieder ausgesetzt werden mußte.

Dieses Verfahren wird allerdings nicht als Nachteil gewertet, da die MS-Profile immer in unmittelbarer Nähe des Oberflächendrifters durchgeführt wurden, wo dann auch die Stromscherung zur Unterschicht abgeschätzt werden konnte.

Sofort nach einer Positionsbestimmung des Oberflächendrifters (stündlich) wurden 5-6 MS-Profile im Abstand von ca. 3 min gefahren (Abb.2.5 ) und danach die Position des unteren Drifters bestimmt. Wasserproben - bei laufender MS-Registrierung - wurden insgesamt dreimal, nämlich zu Beginn, in der Mitte und am Ende einer Dauerstation gepumpt.

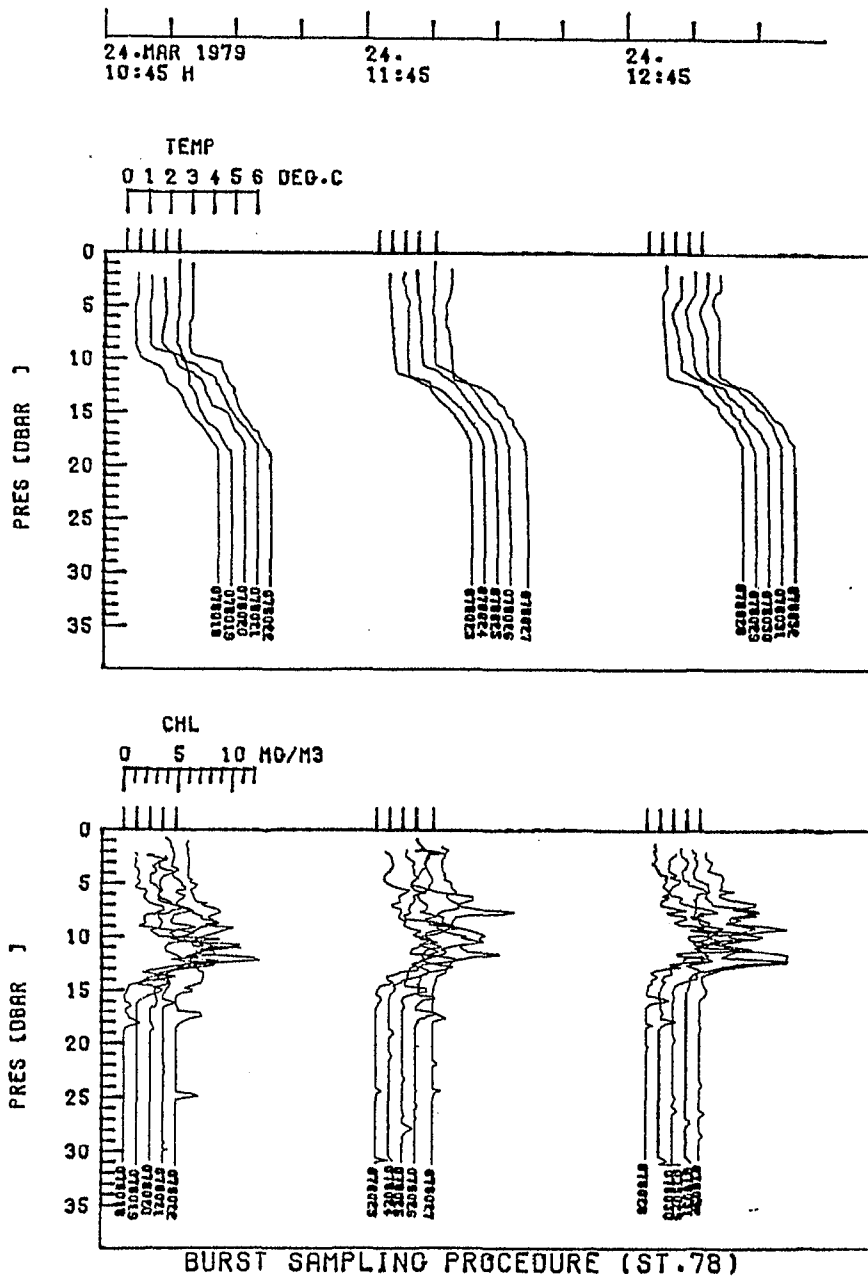


Abb. 2.5: Meßprogramm mit der Multisonde am Beispiel von Temperatur- und Chlorophyllprofilen. Stündliche Serien von je 5 Profilen im 3 min Abstand. (Fiergeschwindigkeit meist  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ )

#### 2.3.4. Ankerstation 87, Kattegat

Außerhalb des geplanten Meßprogramms ergab sich während einer kurzen Fahrtunterbrechung die Möglichkeit, auf der Ankerstation 87 im Kattegat (25.3.1979, 19<sup>43</sup> bis 20<sup>25</sup>, 55° 28.2'N, 10° 52.9'E) eine Serie von 15 MS-Profilen im Dreiminutenabstand zu fahren. Mit einem Rotor-Strömungsmesser (Fa. Hydro Products) wurden die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung vor Beginn der MS-Messungen in 6 Wassertiefen und während der MS-Messungen in einer konstanten Tiefe aufgezeichnet.

Aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit soll später (3.2.7.) die räumliche Entfernung zwischen den MS-Profilen dieses kleinräumigen Schnittes berechnet werden.

Obgleich das Schiff sehr ruhig vor Anker lag, waren die Schwoibewegungen im Meßsignal des Strömungsmessers deutlich zu erkennen. Die Schwoiperiode wurde aus der Dauerregistrierung in 15 m Tiefe (ca. 20<sup>00</sup> - 20<sup>30</sup>) bestimmt zu  $6.2 \pm 0.6$  min bei 5 Perioden.

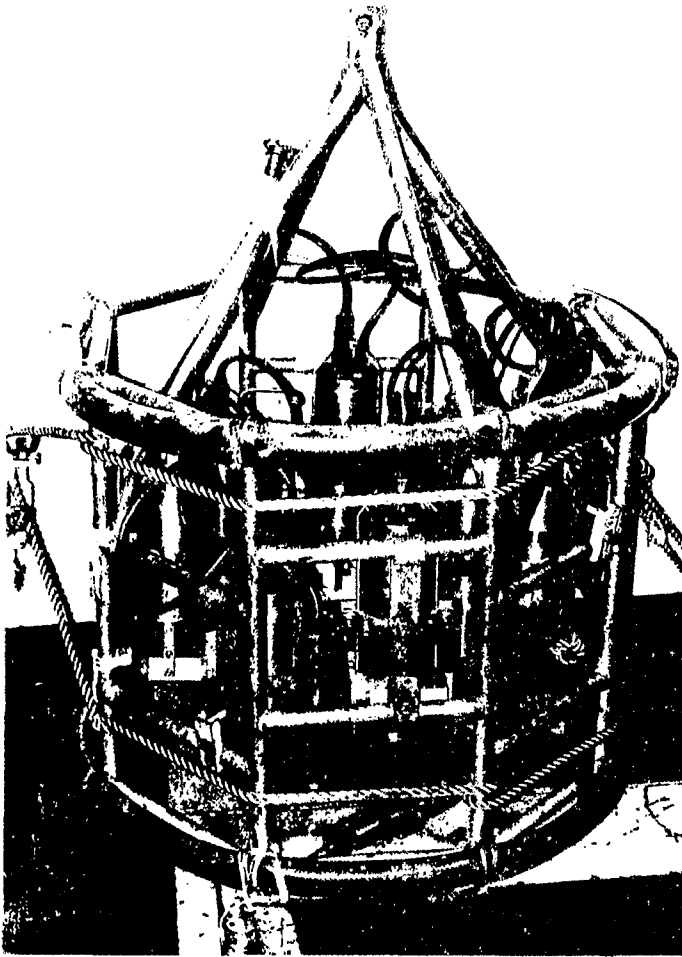
Der Fehler der wahren Geschwindigkeit  $u_w$  in den Querkomponenten  $u$  und  $v$  wurde für den ermittelten Schwoiwinkel von  $18^\circ$  und für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $1 \text{ cm s}^{-1}$  berechnet:

$$\begin{aligned} |\alpha| &= 0(18^\circ) & ; & \quad u = |u_w| \cdot \cos 18^\circ = 0 (0.95 \text{ cm s}^{-1}); \quad 5 \% \text{ Fehler} \\ |u_w| &= 1 \text{ cm s}^{-1} & ; & \quad v = |u_w| \cdot \sin 18^\circ = 0 (0.31 \text{ cm s}^{-1}). \end{aligned}$$

(Die Meßunsicherheit des Rotors liegt bei  $\pm 1 \text{ cm s}^{-1} \hat{=} 0.2 \text{ kn}$ )

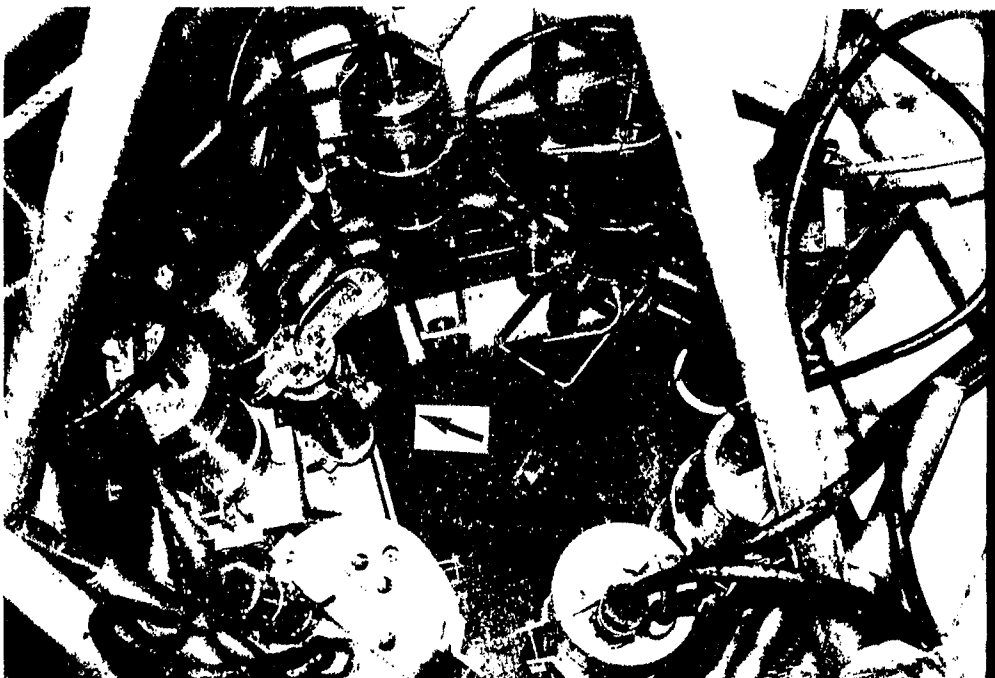
Die Kieler Multisonde

← Gesamtansicht



Anordnung der Sensoren

Fluoreszenzsonde ( ↘ )



3. Kapitel: Ergebnisübersicht

3.1. Chlorophyll-Fluoreszenz

3.1.1. MS-Profile und Wasserproben

Die Abb. 3.1 zeigt am Beispiel der Station 78c (Kattegat, Hievprofil) ein Chlorophyllfluoreszenzprofil, das während einer Wasserprobenentnahme (vgl. Kap. 2.2.1.) gewonnen wurde.

Die horizontale kleinräumige Phytoplanktonverteilung war besonders in den drei oberen Probentiefen sehr fleckenhaft, wie aus der starken Schwankungsbreite der Registrierung ersichtlich ist. Die vertikale Auslenkung der MS - bedingt durch die Schiffsbewegungen - betrug max. 30 cm. Für jede Probentiefe ( $\pm 0.5$  m) wurden der fluorometrische Chlorophyllmittelwert ( $\textcircled{1}$ ) und die -standardabweichung berechnet und den drei photometrischen Parallelanalysen ( $\blacktriangle$ ) zugeordnet.

Tab. 3.1 Fluoreszenz und Wasserproben, Station 78c

Vergleich von 3 photometr. Parallelproben und 1 fluorometr. Mittelwert

Tiefe [m]	C h l o r o p h y l l - a [mg m <sup>-3</sup> ]						
	Photometer				Fluorometer		
	1	2	3	Mittel	Mittel	Std.abw.	N
3.7	2.7	2.7	2.7	2.70	3.43	1.47	69
7.8	3.1	3.2	3.1	3.13	3.59	1.41	45
12.3	2.8	2.8	2.9	2.83	3.51	2.37	61
16.9	0.4	0.4	0.4	0.40	0.09	0.28	30
23.1	0.3	0.4	0.3	0.33	-	-	-

Abb. 3.2 gibt eine Übersicht über alle verfügbaren Wasserprobenstationen, die fluorometrischen Chlorophyllprofile und die photometrischen Mittelwerte. Es fehlen die Stationen 1, 2 und 3, wo die MS-Registrierung der Fluoreszenzsonde defekt war.

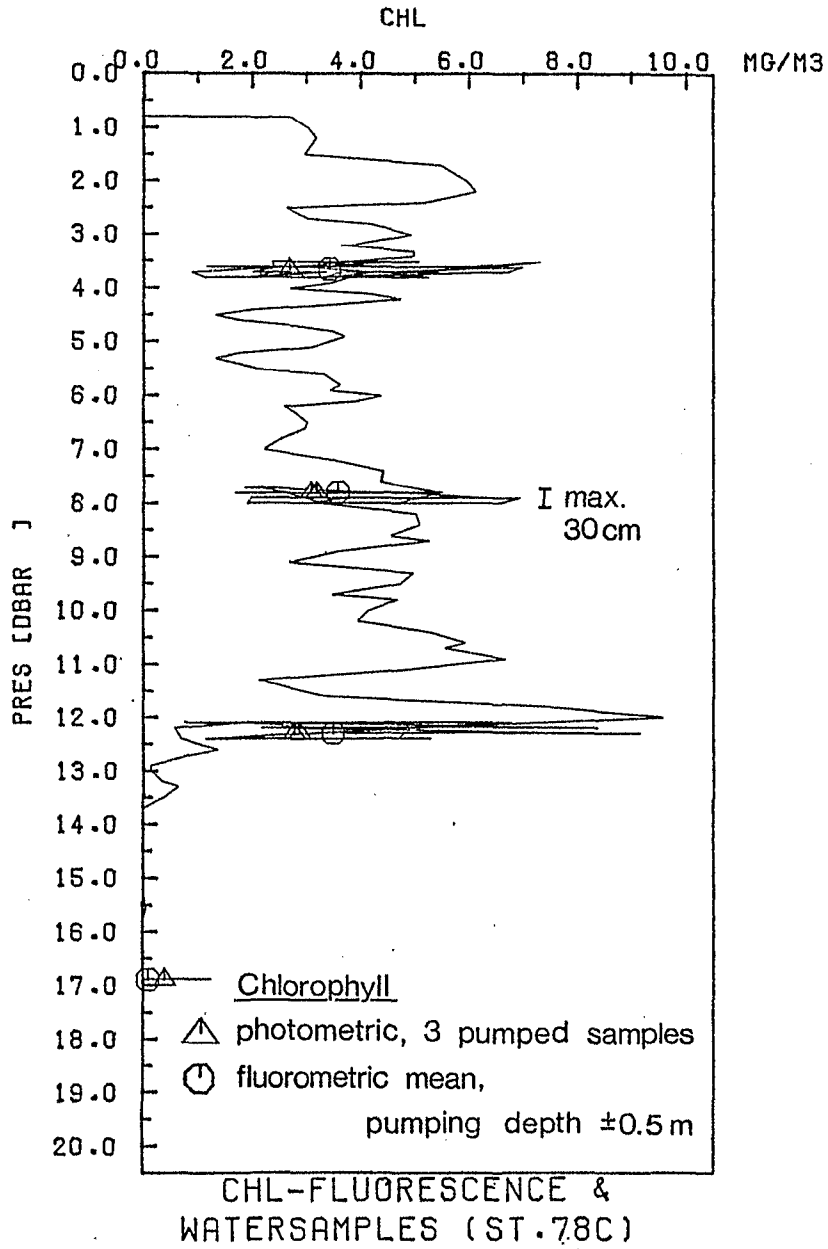


Abb. 3.1: Chlorophyll-Hievprofil der Fluoreszenzsonde im Vergleich mit photometrischem Chlorophyll aus gepumpten Wasserproben.



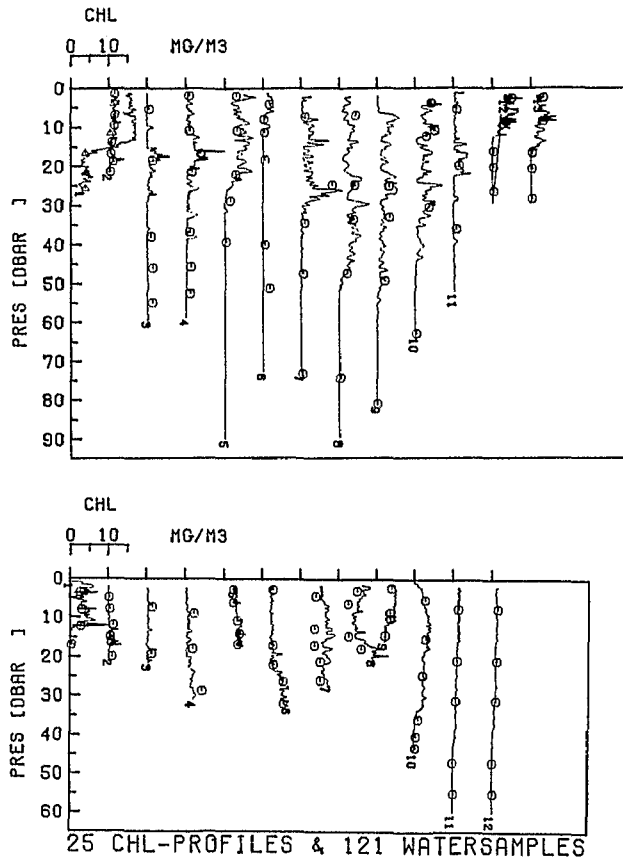


Abb. 3.2: Übersicht über alle Chlorophyllfluoreszenzprofile und photometrischen Chlorophyllbestimmungen der Fahrt 38/2.

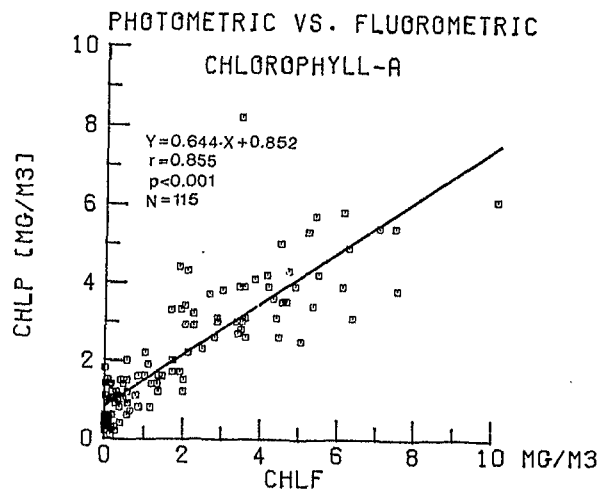


Abb. 3.3: Streudiagramm aller fluorometrischen und photometrischen Wertepaare aus der Abb. 3.2.

In den Fällen, wo ein MS-Profil während der Wasserprobennahme nicht auf Magnetband aufgezeichnet worden war, habe ich stattdessen das zeitlich nächstgelegene Profil der betreffenden Station verwendet.

Die in der Abb. 3.2 enthaltenen Wertepaare, fluorometrische und photometrische Mittelwerte, wurden in ein Streudiagramm (Abb. 3.3) eingetragen. Die Berechnung der linearen Regression lieferte folgende Ergebnisse:

$$\text{Chl}_{\text{FL}} = \text{Chl}_{\text{PH}} \cdot 1.08683 - 0.35493; N = 115; r = 0.85 \quad ; \quad ***$$

$$\text{Chl}_{\text{PH}} = \text{Chl}_{\text{FL}} \cdot 0.64423 + 0.85237; N = 115; r = 0.85 \quad ; \quad ***$$

### 3.1.2. Statistische Analyse

Die lineare Regression zwischen den fluorometrischen und photometrischen Mittelwerten zeigt, daß eine hohe Korrelation zwischen den beiden Meßgrößen besteht. Es soll nun noch statistisch geprüft werden, ob die beiden Meßmethoden Photometrie und Fluorometrie innerhalb ihrer Genauigkeit dieselben Ergebnisse liefern.

Je Wasserprobe haben wir drei photometrische und einen fluorometrischen Meßwert (vgl. Tab. 3.1).

Zum Vergleich von je zwei verbundenen Stichproben bietet sich der t-Test an mit der Nullhypothese, die Differenz sei im Mittel gleich Null.

$$H_0: x_{\text{PHOT}} - x_{\text{FLUO}} = 0 \quad (H_1: x_{\text{PHOT}} - x_{\text{FLUO}} \neq 0; \text{zweiseitig} \\ p \leq 0.01)$$

---

$\text{Chl}_{\text{FL}}$  = Chlorophyll-a, fluorometrisch gemessen.

$\text{Chl}_{\text{PH}}$  = Chlorophyll-a, photometrisch gemessen.

N = Anzahl der Datenpaare

r = Korrelationskoeffizient

p = statistische Sicherheit

Signifikanzniveau von p \*: 0.95; \*\*: 0.99; \*\*\*: 0.999

Tab. 3.2 Mittlere Differenz  $\pm$  Std.abwchg. u. Signifikanzniveau

	FLUO	PHOT	PHO1	PHO2	PHO3
FLUO	-	0.215	0.123	0.312	0.608
PHOT	- 0.134 $\pm$ 1.156	-	0.079	0.606	0.321
PHO1	- 0.170 $\pm$ 1.173	- 0.032 $\pm$ 0.195	-	0.220	0.081
PHO2	- 0.109 $\pm$ 1.150	0.012 $\pm$ 0.239	0.043 $\pm$ 0.382	-	0.874
PHO3	- 0.061 $\pm$ 1.216	0.021 $\pm$ 0.221	0.058 $\pm$ 0.344	0.007 $\pm$ 0.423	-

Die vorstehende Tabelle zeigt, daß die Differenzen zwischen den Analysenergebnissen nicht signifikant von Null verschieden sind. Die Nullhypothese muß beibehalten werden. Die beobachteten Differenzen erklären sich aus der Art der Probenahme und ggfs. aus dem lokalen Fluoreszenzverhalten der Algen.

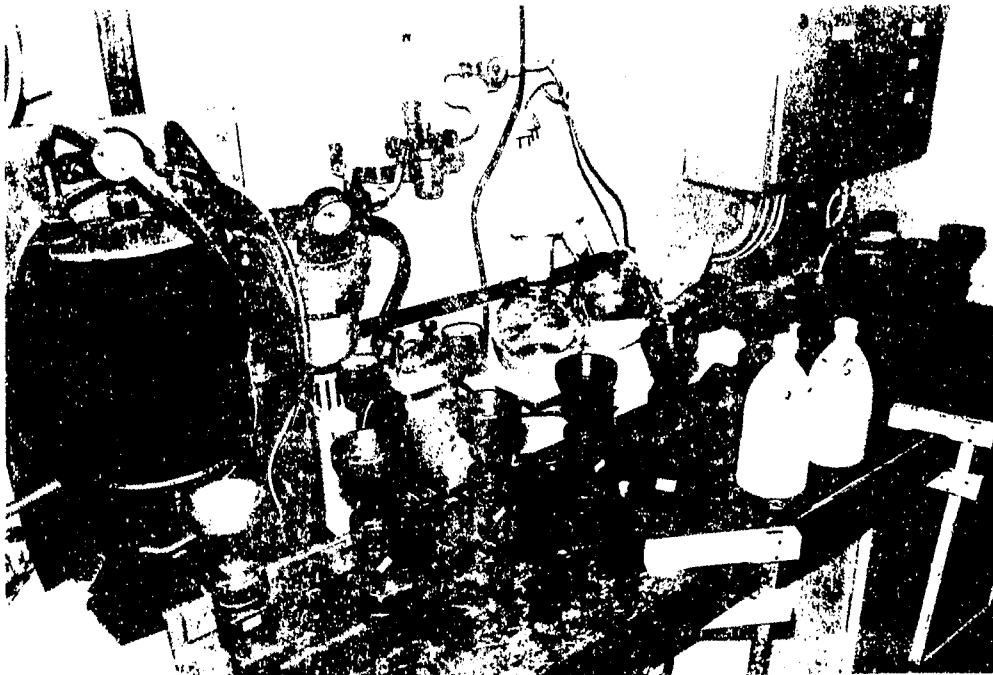
Zwischen den photometrischen Parallelproben besteht eine geringere Streuung der Differenz als zwischen den photometrischen und den fluorometrischen Werten. Dies läßt sich dadurch erklären, daß für die Photometrie gut durchmischtes Wasser aus derselben Flasche verwendet wurde, während die Fluoreszenzmessung in situ erfolgte.

### 3.1.3. Schlußfolgerungen

Die vorgenommenen Fluoreszenzmessungen können als zuverlässig gelten, insbesondere, wenn man relative Veränderungen in der Phytoplanktonverteilung untersuchen will. Um dem lokalen Fluoreszenzverhalten Rechnung tragen zu können, müßte man die Fluoreszenzprofile anhand von mindestens 5 bis 10 photometrischen Parallelproben je Tiefenstufe nachzeichnen.



Das Planktonlabor auf FS "Poseidon"



Filtrierapparatur für Chlorophyllproben

### 3.2. Driftstationen und Ankerstation

#### 3.2.1. T/S-Charakteristik

Das T/S-Diagramm, Abb. 3.4, enthält die mittleren stündlichen Temperatur- und Salzgehaltswerte der drei Driftstationen. (An den Dichtelinien, die fast parallel zur Temperaturachse verlaufen, kann man erkennen, daß die Dichte fast ausschließlich vom Salzgehalt abhängt.)

Insgesamt lassen sich 5 charakteristische Wassermassen unterscheiden mit folgenden mittleren T/S-Werten:

Typ	Region	Vorkommen	Temperatur	Salzgehalt
A	Skagerrak/Kattegat	Boden	6.0° C	35 ‰
B	Bornholm	Boden	5.6°	14
C	Skagerrak	Oberfläche	0.2°	27
D	Kattegat	Oberfläche	0.8°	21
E	Bornholm	Oberfläche	0.0°	9.5

Die T/S-Punkte konzentrieren sich auf jeder Station

- a) in der Oberschicht bei niedrigen Temperaturen und
- b) in der Unterschicht bei höheren Temperaturen.

Das Mischwasser, das in der Sprungschicht entsteht, liefert nur wenige T/S-Werte auf den Verbindungslinien  $\overline{AC}$ ,  $\overline{AD}$  und  $\overline{BE}$ . Die Abweichungen der stündlichen T/S-Profile voneinander sind i.a. gering; eine größere Streuung tritt besonders im Oberflächenwasser der Kattegatstation auf.

#### 3.2.2. Mittlere Profile, Phytoplanktonarten und Nährstoffe

Um einen Eindruck von der mittleren Situation auf jeder der drei Driftstationen für den gesamten Beobachtungszeitraum zu bekommen, wurde jede Variable a) über die Zeit und b) innerhalb von 0.5 m Tiefenintervallen gemittelt. Die Abb. 3.5 bis 3.8 enthalten für jede Station die mittleren Profile von Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll gegen den Druck (Wassertiefe). Im

BORNHOLM

KATTEGAT

SKAGERRAK

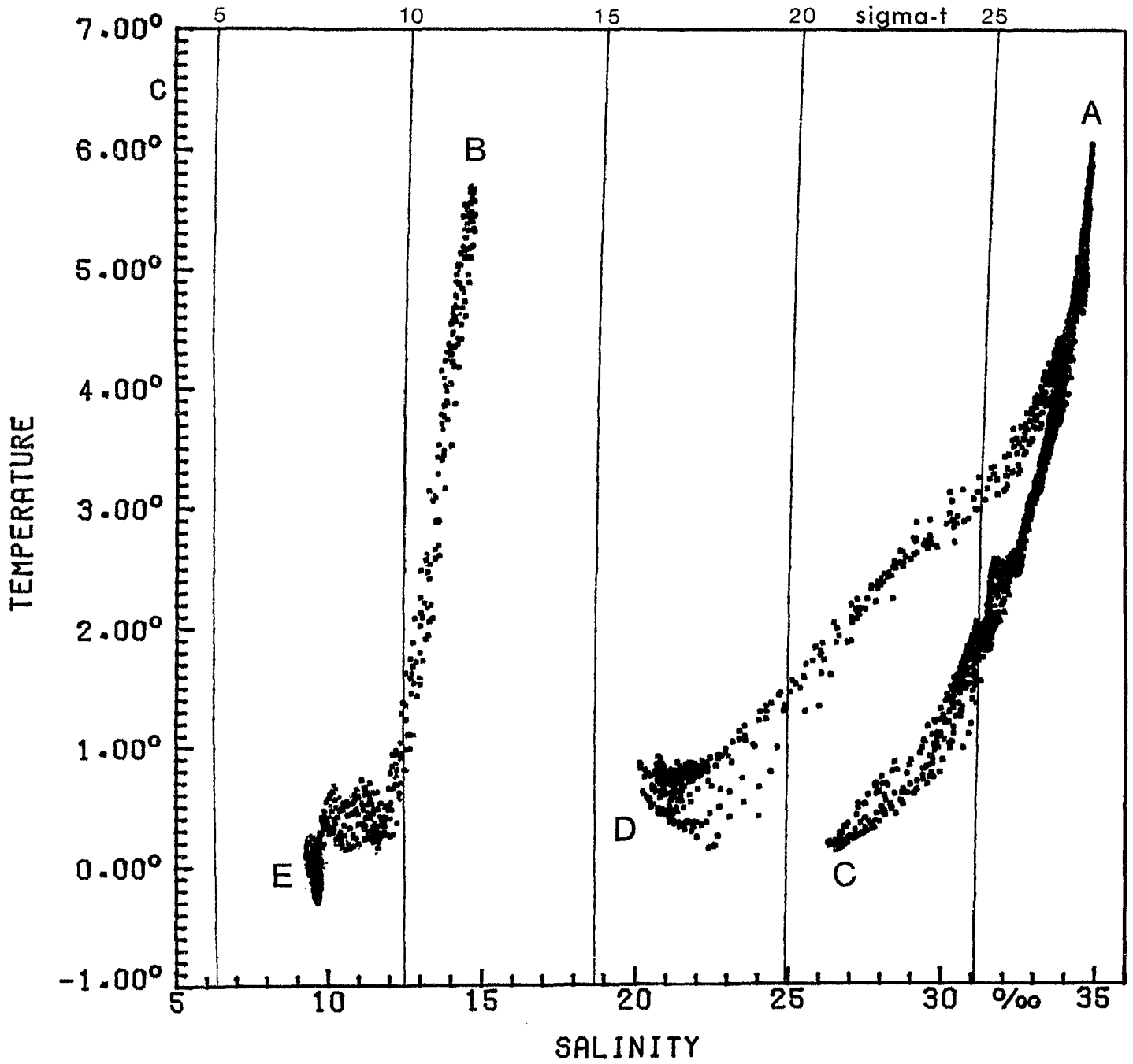


Abb. 3.4a: T/S-Diagramm mit den Hauptwassermassen A-E.

unteren Teil der Abbildungen sind jeweils die Standardabweichungen der genannten Parameter und die Anzahl der Datenpunkte im Mittelungsintervall wiedergegeben.

Die Wendepunkte in den Temperaturprofilen wurden zur Abgrenzung übereinanderliegender Wasserschichten benutzt (Tab. 3.3). Die Chlorophyllschichtung weist - selbst nach Mittelung von ca. 100 Werten je Intervall - noch soviel Feinstruktur auf, daß Phytoplanktonschichten zunächst etwas willkürlich zwischen lokalen Minima definiert werden mußten (Tab. 3.4).

In den Tab. 3.5 bis 3.7 sind die Ergebnisse der Phytoplanktonzählungen als "vereinfachte Tiefenprofile" unter Verwendung aller Probentiefen jeder Driftstation dargestellt (28a,b,c; 78a,b,c; 107a,b). Die Zellzahlen [ $\text{Liter}^{-1}$ ] wurden in 7 Häufigkeitsklassen (Zehnerpotenzen, logarithmischer Abstand) eingeteilt. Jeder Klasse wurde ein Symbol (.:+\*X) zugeordnet. Die Codeliste der insgesamt 69 identifizierten Arten (Pankow, 1976) in den 69 Spalten der "X-Achse" befindet sich im Anhang 4, zusammen mit den einzelnen Probenahmen der Dauerstationen.

Auf allen Stationen stellen die Flagellaten (Code 36) mit über 1 Mio. Zellen pro Liter die zahlenmäßig größte Gruppe dar. Wegen ihrer unspezifischen Verteilung, ihrer geringen Größe ( $< 6 \mu\text{m}$ ) und dem damit verbundenen geringen Gesamtvolumen wollen wir sie im folgenden außer acht lassen.

In den Frühjahrsblüten der drei Untersuchungsgebiete waren weit mehr Arten vorhanden als erwartet: 24 im Skagerrak, 25 im Kattegat und 11 in Bornholm. (Dazu noch Arten, die nur in jeweils einer Probe und in geringer Anzahl gefunden wurden: 11, 4 und 3 Arten.)

Wegen dieser Vielfalt der Phytoplanktonarten mit den verschiedensten, sich überlagernden Verteilungsmustern ist es auch nicht möglich, die in den mittleren Chlorophyllprofilen vorhandenen Peaks einzelnen dominanten Arten zuzuordnen. Der Chlorophyllgehalt korreliert zudem enger mit dem Phytoplanktonvolumen als mit der Zellzahl.

Die Ergebnisse der Nährstoffanalysen sind in den Abb. 3.8 bis 3.10 zusammen mit den mittleren Profilen von Chlorophyll und Sigma-t wiedergegeben. (Nitrit, Phosphat und Silikat sind alle in demselben Maßstab gezeichnet, Nitrat wegen des größeren Wertebereichs vergleichsweise im halben Maßstab.)

Genau wie bei den Phytoplanktonzählungen wurden alle Proben-tiefen jeder Driftstation in einer Zeichnung vereinigt. Strukturen, die sich durch unterschiedliche Meßwerte aus den verschiedenen Probennahmen einer Station - in etwa der gleichen Tiefe - ergeben, sind keine echten Vertikalstrukturen, sondern deuten auf horizontale Unterschiede in der Nährstoffverteilung hin.

Eine individuelle Interpretation der einzelnen Nährstoffprofile halte ich nicht für lohnend, da diese keine Beziehung zu den mittleren Chlorophyllprofilen aufweisen, sondern im wesentlichen parallel zu den mittleren Dichteprofilen verlaufen (siehe insbes.  $\text{NO}_3$  im Kattegat). Im allgemeinen zeigt sich eine gleichmäßige Zunahme der Nährstoffe mit der Tiefe. Im Kattegat und bei Bornholm weicht die Silikatverteilung von dieser Regel ab, ohne daß eine Ursache dafür zu erkennen wäre.



Tab. 3.3 Wasserschichten

Station	Wasser- schicht	Schichttiefe [m]		Schicht- dicke [m]	Temp. [°C]	Salz [°/∞]
		Anfang	Mitte Ende			
SKA	1	0.0	6.0 11.0	11.0	0.2 0.7 1.6	27.0 28.2 30.7
	2	11.0	17.5 24.5	13.5	1.6 2.2 2.2	30.7 31.5 32.0
	3	24.5	35.0 41.0	16.5	2.2 2.9 3.3	32.0 33.0 33.5
	4	41.0	55.0 70.0	29.0	3.3 4.9 5.5	33.5 34.5 34.8
KAT N ≈ 165	1	1.0	10.0 13.0	12.0	0.8 0.8 2.4	21.0 23.0 28.0
	2	13.0	17.0 31.0	18.0	2.4 4.2 4.3	28.0 34.0 34.0
BOR N ≈ 95	1	1.0	25.0 41.0	40.0	0.0 0.2 0.0	9.5 9.5 9.5
	2	41.0	48.0 56.0	15.0	0.0 -0.2 0.2	9.5 9.7 9.7
	3	56.0	60.0 66.0	10.0	0.2 0.4 0.7	9.7 10.5 12.0
	4	66.0	68.0 69.0	3.0	0.7 2.3 3.2	12.0 13.3 13.5
KAS N ≈ 35	1	1.0	14.5 16.0	15.0	0.6 0.6 0.9	17.2 18.4 21.0
	2	16.0	17.5 26.0	10.0	0.9 1.5 2.3	21.0 23.8 26.6

Zur Abgrenzung der übereinanderliegenden Wasserschichten wurden die Wendepunkte in den mittleren Temperaturprofilen (Abb. 3.5 bis 3.8) benutzt. Die T/S-Werte rechts beziehen sich auf Anfang, Mitte und Ende der links angegebenen Schichten. N = mittlere Anzahl Datenpunkte je 0.5 m - Mittelungsintervall.

Tab. 3.4 Phytoplanktonsschichten

Station	Plankton- schicht	Schichttiefe [m]		Schicht- dicke [m]	Chl-Konzentration [mg m <sup>-3</sup> ]		
		Anfang	Ende		Anfang	Maximum	Ende
SKA	1	0.0	11.0	19.0	0.2	4.4 ± 1.8	1.9 ± 1.0
	2	19.0	25.0	30.0	1.9 ± 1.0	3.3 ± 1.8	2.3 ± 1.3
	3	30.0	35.0	40.0	2.3 ± 1.3	2.7 ± 1.6	1.5 ± 0.8
	(4)	40.0	41.0	55.0	1.5 ± 0.8	1.5 ± 0.9	0.0
KAT	1	1.0	11.0	19.0	2.0 ± 1.5	4.2 ± 1.8	0.0
BOR	1	0.0	13.0	69.0	1.1 ± 0.2	1.4 ± 0.3	0.0
KAS	1	1.0	13.5	15.5	2.1 ± 1.1	3.1 ± 1.0	2.2 ± 0.6
	2	15.5	21.5	26.0	2.2 ± 0.6	1.5 ± 0.4	2.9 ± 0.8

Die Enden der Phytoplanktonsschichten sind durch die lokalen Minima der mittleren Chlorophyllprofile (Abb. 3.5 bis 3.8) definiert. Die Chl-Konzentrationen (± Standardabweichung) beziehen sich auf Anfang, Maximum und Ende der Schichten. Anzahl der Datenpunkte wie in Tab. 3.3

Skagerrak ("SKA") Abb. 3.5

Die Temperatur- und Salzgehaltprofile verlaufen gleichsinnig, wobei die Schichtung im Temperaturprofil deutlicher zu erkennen ist ("Doppel-S-Kurve"). Es lassen sich vier Wasserkörper unterscheiden. Auffallend ist die Regelmäßigkeit in der Temperaturvariabilität (Standardabweichung "STEM"), deren lokale Maxima fast stets in den Wasserschichtmitten liegen. In der Tiefe von 7 m variieren Temperatur und Salzgehalt am stärksten, vermutlich durch Vertikalbewegungen infolge interner Wellen.

Die Chlorophyllverteilung zeigt drei deutliche Phytoplanktonschichten und eine vierte, deren Grenzen nicht klar zu definieren sind. Die Schichtdicken und die maximalen Chlorophyllkonzentrationen nehmen mit der Wassertiefe ab. Die Chlorophyllmaxima fallen - mit Ausnahme des dritten - mit den Grenzen der Wasserschichten zusammen und zeigen dort auch die höchste Variabilität.

Tab. 3.5

Die Phytoplanktonblüte im Skagerrak besteht hauptsächlich aus 6 zentrischen und 2 pennaten Diatomeen. *Thalassiosira nordenskioeldii* ist mit fast  $10^6$  Zellen pro Liter die häufigste Art. Sie kommt hauptsächlich in der dritten Wasserschicht (< 41 m) vor. Überwiegend in der zweiten Wasserschicht befinden sich *Chaetoceros socialis* und *Chaetoceros debilis*, *Thalassionema nitzschioides* und *Gymnodinium simplex* mit fast  $10^5$  Zellen pro Liter. Nur in wenigen Fällen beschränken sich Arten auf einen einzigen Wasserkörper, so z.B. *Chaetoceros spec.* im 3. Wasserkörper und *Rhizosolenia delicatula* im 1. Wasserkörper. *Amphidinium longum* ist als einzige Art ausschließlich in den tieferen Schichten (3. und 4. Wasserkörper).

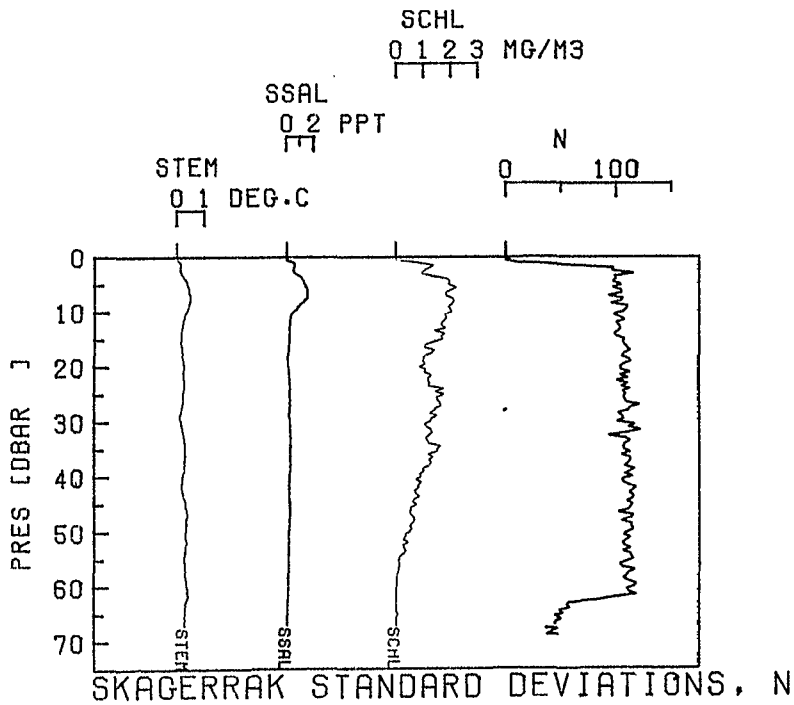
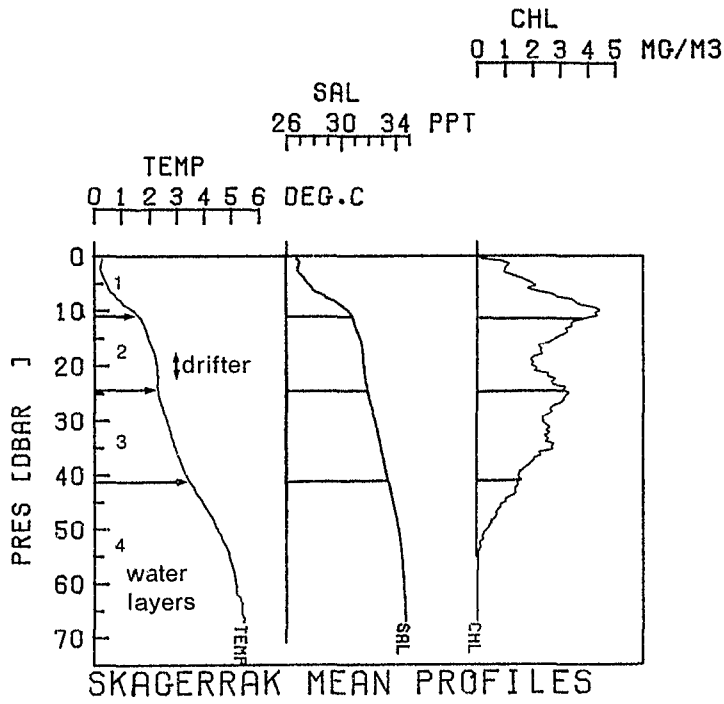


Abb. 3.5: SKAGERRAK, mittlere Profile und Wasserschichten Standardabweichungen und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar).



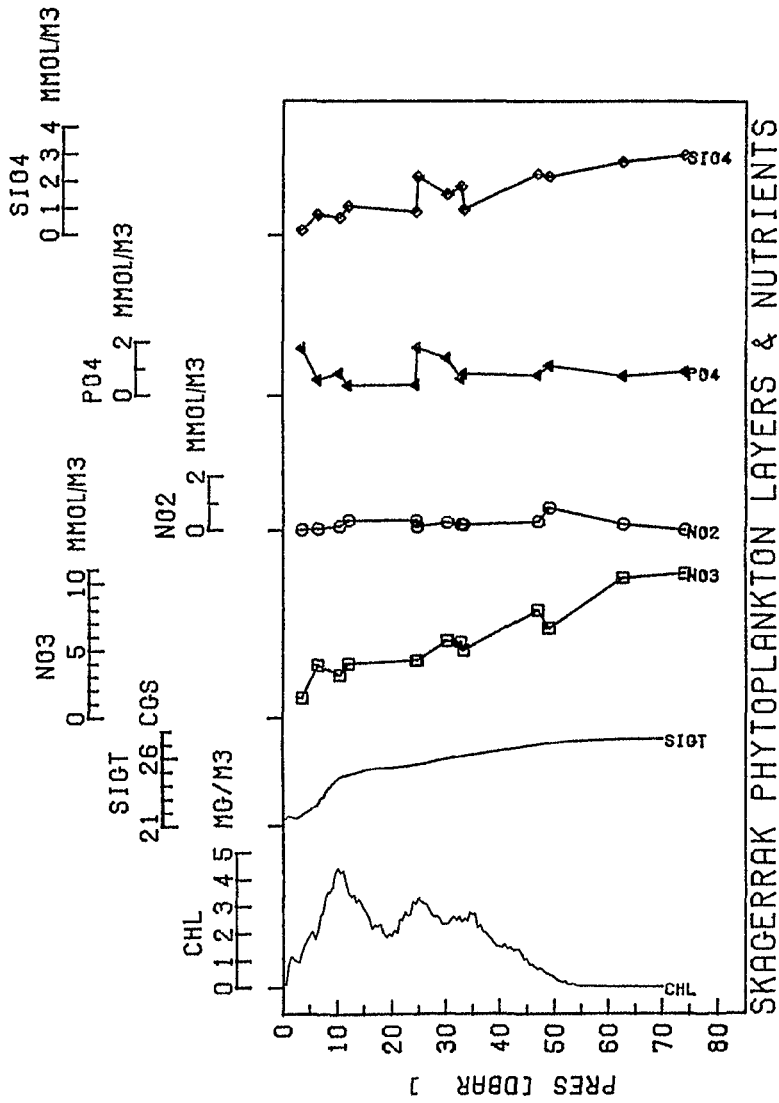


Abb. 3.8: SKAGERRAK, Nährstoffverteilung (St. 28a,b,c) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.

Kattegat ("KAT") Abb. 3.6

Das Ostseewasser ( $T \approx 0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $S \approx 21 \text{ ‰}$ ) an der Oberfläche ist durch eine sehr starke Sprungschicht

$$\left( \frac{\Delta T}{\Delta Z} \approx 0.47^{\circ}\text{C m}^{-1}, \quad \frac{\Delta S}{\Delta Z} \approx 2 \text{ ‰ m}^{-1} \right)$$

vom Nordseewasser ( $T \approx 4.3^{\circ}\text{C}$ ,  $S \approx 34 \text{ ‰}$ ) getrennt. Die höchste Variabilität von Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll findet sich in 11 m Tiefe, wo die Stabilität im starken Dichtegradienten am größten ist.

Dort liegt auch das Chlorophyllmaximum, welches offenbar zustande kommt durch Anreicherung aus den darüberliegenden Schichten, von denen man - zumindest andeutungsweise - vier erkennen kann.

Tab. 3.6

Auch im Kattegat ist *Thalassiosira nordenskiöldii* mit  $4 \cdot 10^6$  Zellen pro Liter in der Deckschicht die häufigste Art, zusammen mit *Detonula confervacea*, die im Skagerrak nicht angetroffen wurde. Zu den dominanten Arten zählen noch 3 weitere zentrische Diatomeen, *Chaetoceros socialis*, *Rhizosolenia delicatula* und *Rhizosolenia setigera*, sowie 3 pennate Diatomeen, *Thalassionema nitzschioides*, *Navicula spec.* und *Navicula vanhoeffenii*. Von den 3 Dinoflagellaten *Gymnodinium simplex*, *Gymnodinium lohmannii* und *Amphidinium longum* ist letzterer zusammen mit der Cyanophyte *Aphanizomenon flos-aquae* die einzige, nur auf die untere Wasserschicht beschränkte Phytoplanktonart. Alle anderen zusammen bilden die große Phytoplanktonansammlung in der Deckschicht mit max.  $4.2 \text{ mg Chl m}^{-3}$  (vgl. Abb. 3.6).

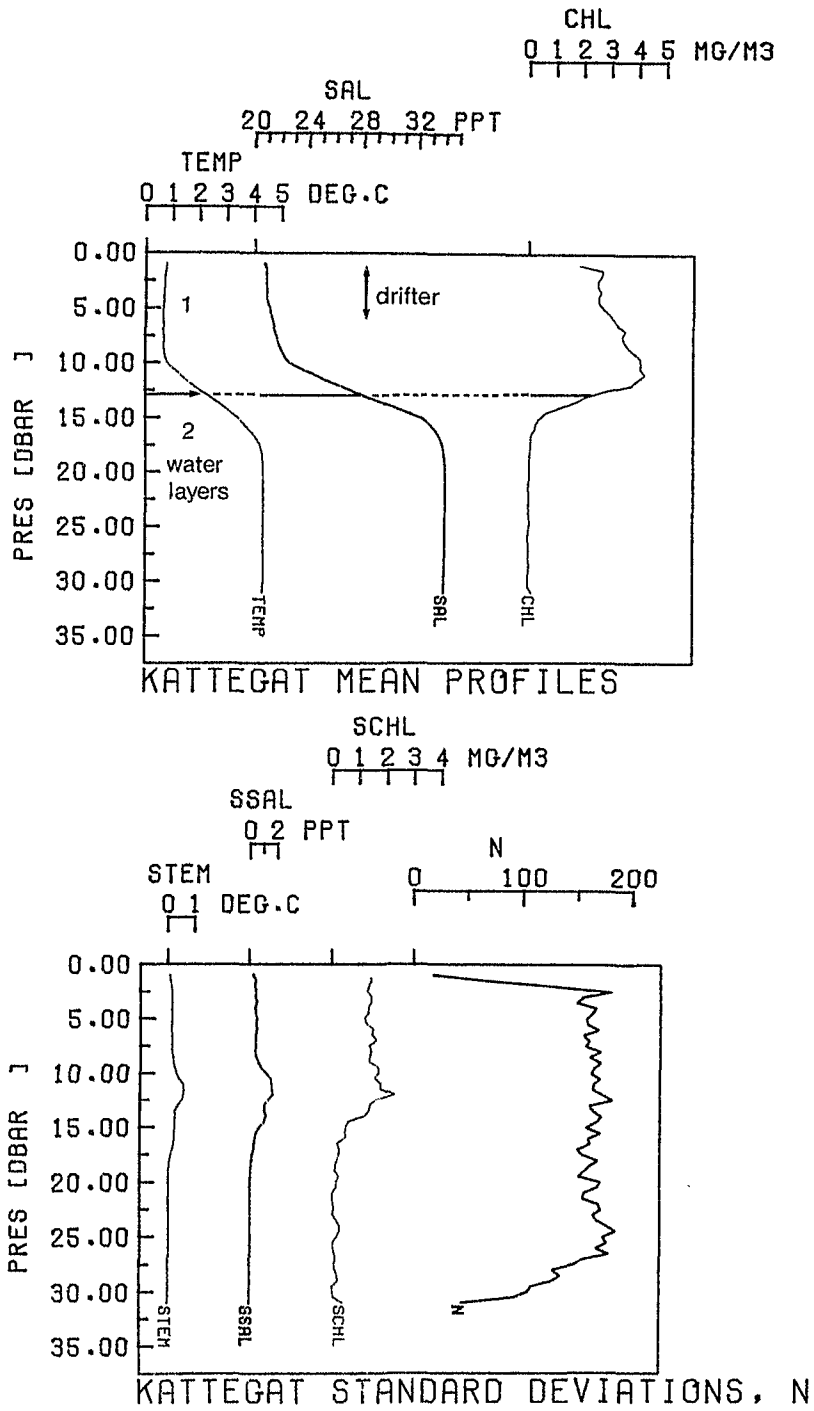


Abb. 3.6: KATTEGAT, mittlere Profile und Wasserschichten, Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar)



TAB. 3.6: KATTEGAT, VEREINFACHTE PHYTOPLANKTON-TIEFENPROFILE

TIEFE	P	H	Y	T	D	P	L	A	N	K	T	D	N	-	C	O	D	E
00000000	111111	111111	111111	222222	222222	333333	333333	444444	444444	444444	555555	555555	555555	555555	555555	555555	555555	666666
1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890
2.1	::	.	+	.	*	::	X::+	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
2.2	::	.	+	.	::	X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
3.2			+		+	X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
7.6	.		+	.	-	X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
8.1			+	.	::	X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
8.3			+	.	::	X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
11.9			+	.	::	X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
16.0				.		X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
16.3				.		X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
16.5				.		X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
20.1				.		X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
20.3				.		X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
23.1				.		X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
26.3				.		X-+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-
28.0				.		X::+	--	--	::	.	.	::	-	::	-	-	-	-

IN DEN 69 SPALTEN WERDEN DIE DATEN DER UTERMUEHLANALYSE  
JE NACH IHRER GROESSE DURCH VERSCHIEDENE SYMBOLE DARGESTELLT:

SYMBOLE    \*::\*    :::::    -----    +++::+    \*\*\*\*\*    XXXXXXXX  
 FP-ZAHL    < 10 < 100 < 1.000 < 10.000 < 100.000 < 1.000.000 > 1 MID.

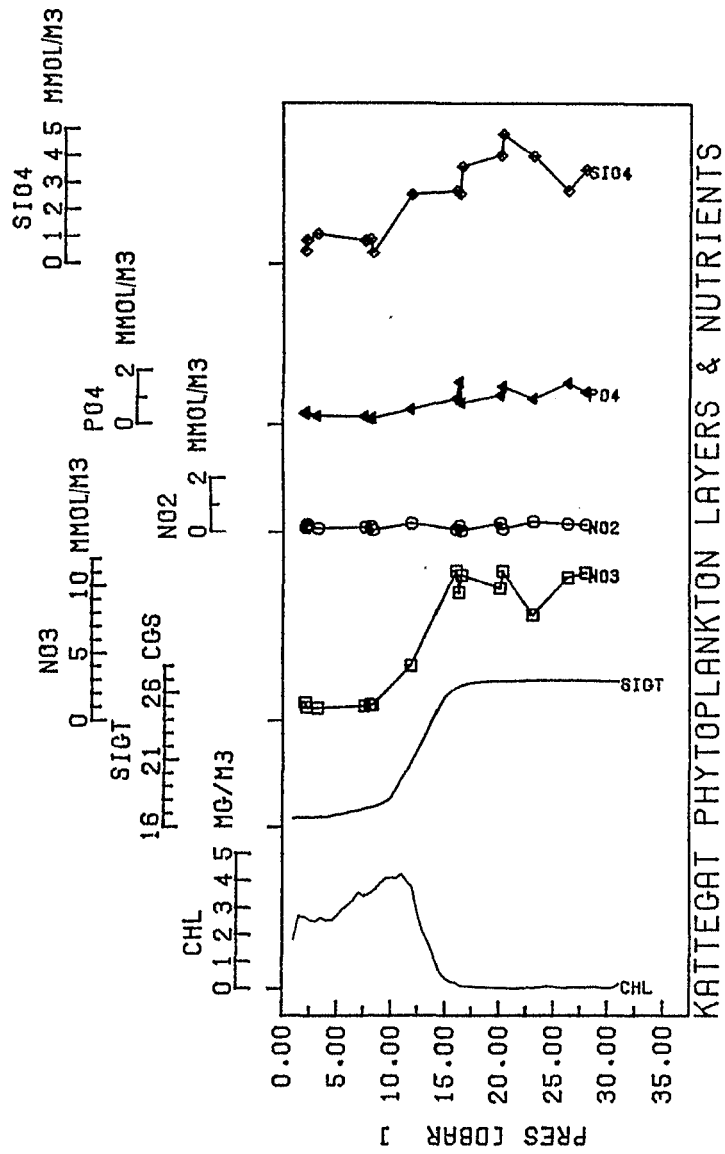


Abb. 3.9: KATTEGAT, Nährstoffverteilung (St. 78a,b,c) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.

Bornholm ("BOR") Abb. 3.7

Bis in 40 m Tiefe ist die Wassersäule homogen. Darunter ist ein Einschub etwas kälteren und salzreicheren Wassers zu erkennen, der bis 56 m Tiefe reicht. Eine ausgeprägte Sprungschicht findet sich bezügl. der Temperatur erst kurz über dem Boden zwischen 66 und 69 m, bezügl. des Salzgehaltes zwischen 56 und 69 m Tiefe. Die Variabilität ist gering, in der Temperatur beträgt sie max.  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  in 45 m,  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  in 60 m und  $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$  in 68 m Tiefe.

Die Phytoplanktonverteilung beschränkt sich im wesentlichen auf die oberen beiden Wasserkörper und hat dort ein einziges Maximum von  $1.4 \text{ mg Chl m}^{-3}$  in 13 m Tiefe.

Tab. 3.7

Die Zellkonzentrationen liegen im Bornholmgebiet ca. 1 Zehnerpotenz niedriger als auf den beiden anderen Driftstationen und sind am höchsten in Tiefen zwischen 20 und 55 m. Es sind nur zwei zentrische Diatomeen vorherrschend, die schon im Kattegat vertretene *Detonula confervacea* und *Actinocyclus crassus*, sowie eine pennate Diatomee, *Navicula vanhoeffenii*. An Dinoflagellaten sehen wir wieder den "allgegenwärtigen" *Gymnodinium simplex* und, als typische Ostseeart, *Peridinium pellucidum*. Hinzu kommen noch eine Euglenophyte, *Eutreptia lanowii* und eine Chlorophyte, *Oocystis pelagica*.

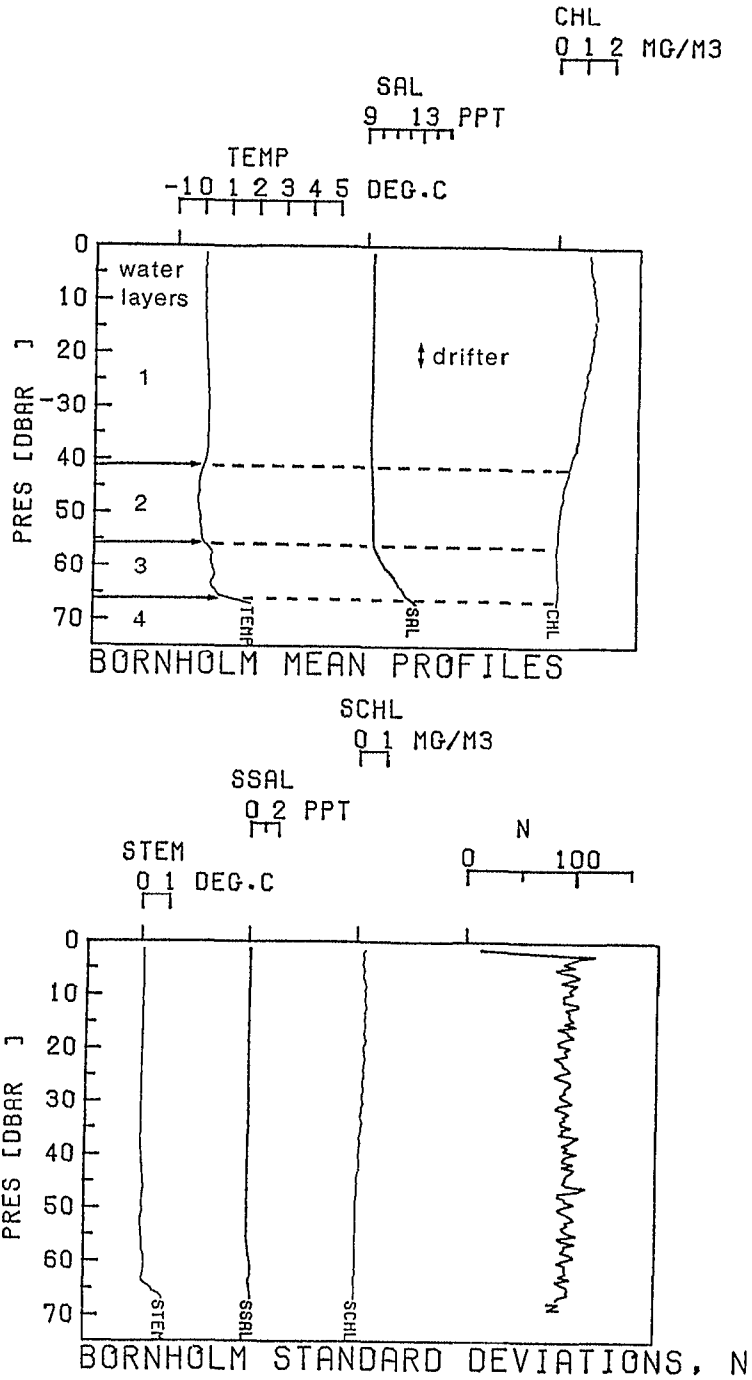


Abb. 3.7: BORNHOLM, mittlere Profile und Wasserschichten, Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar)



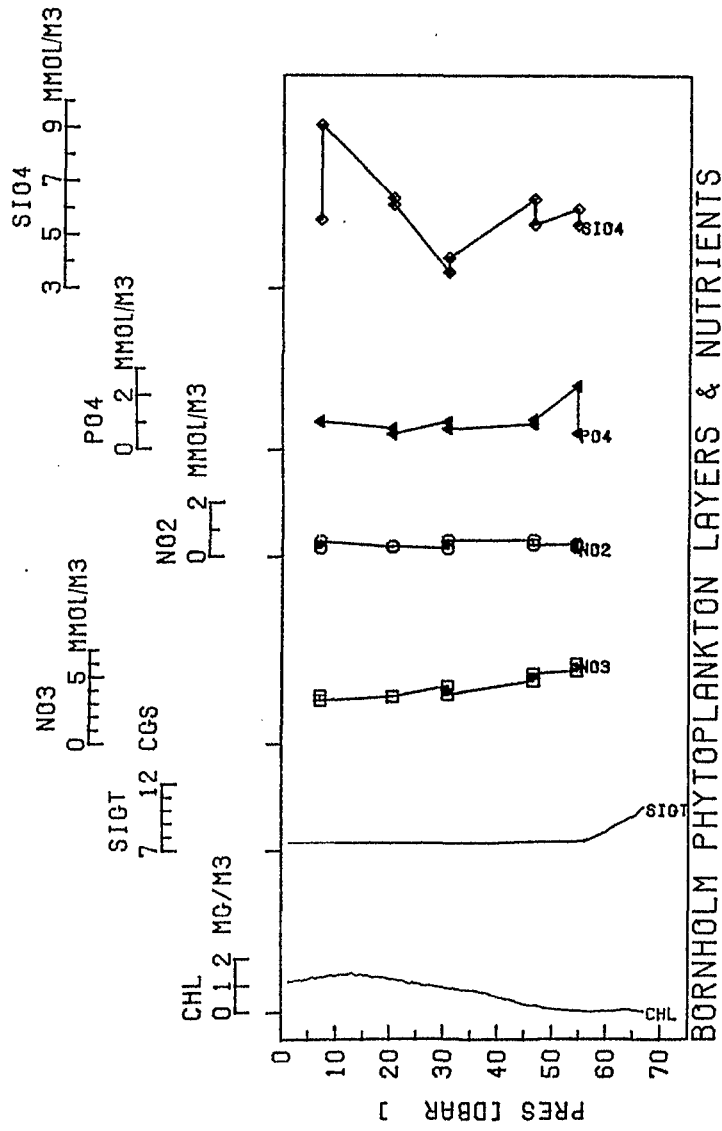


Abb. 3.10: BORNHOLM, Nährstoffverteilung (St. 107a,b) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.

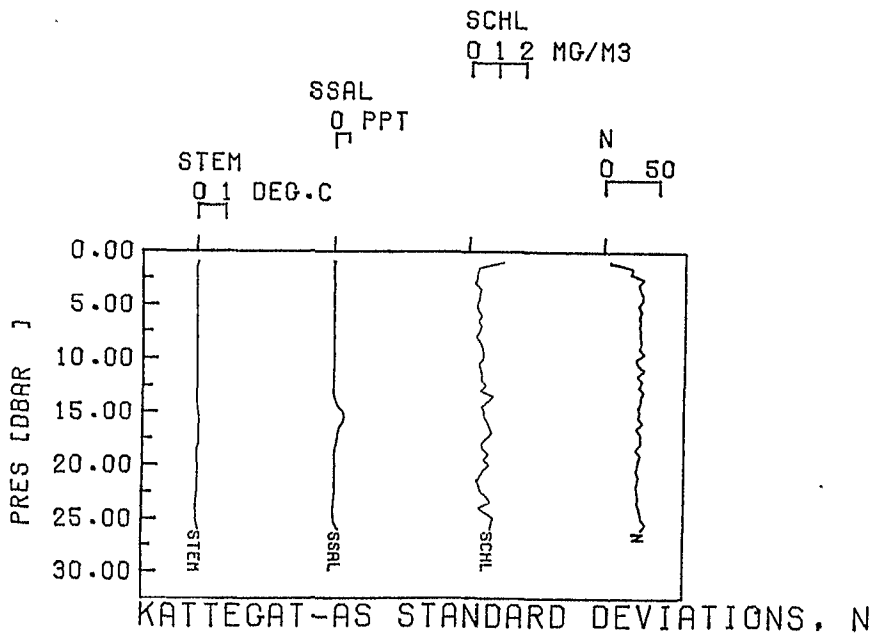
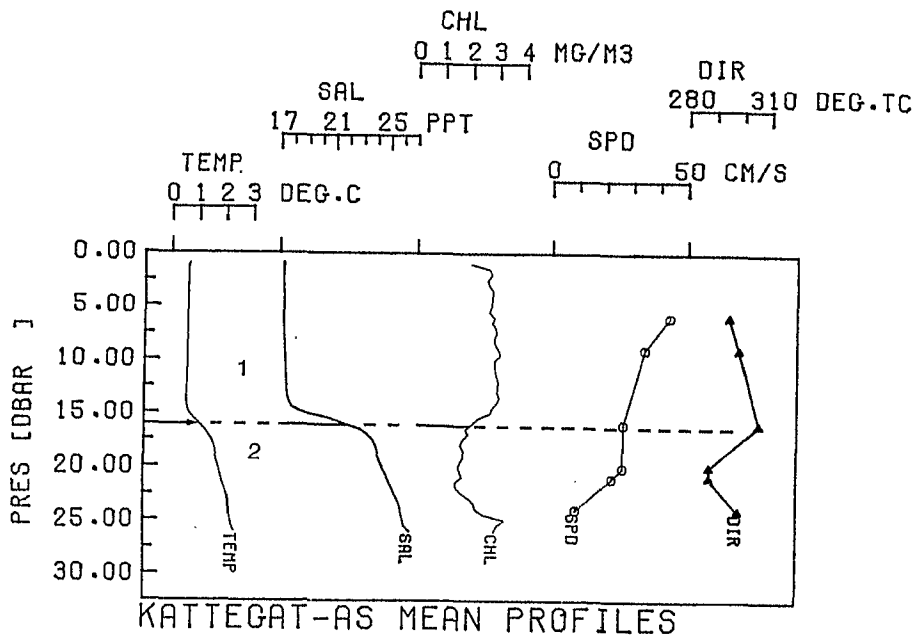
Kattegat-Ankerstation ("KAS") Abb. 3.11

Bis zu einer Tiefe von 15 m sind Temperatur und Salzgehalt konstant (Ostseewasser). Die darauffolgende Sprungschicht ist sehr viel schwächer als auf der Kattegat-Driftstation. Der Wasserkörper unterhalb von 17.5 m ist nicht homogen und weist eine schwache "Treppenstruktur" auf (Mischwasser). Die Variabilität in der Sprungschicht ist mit  $\pm 0.9 \text{ ‰}$  im Salzgehalt sehr viel größer als in der Temperatur. Im Chlorophyllprofil beträgt sie max.  $1 \text{ mg m}^{-3}$ .

Die Chlorophyllkonzentration steigt mit der Tiefe leicht an bis zu einem Maximum kurz oberhalb der Sprungschicht. Darunter nimmt sie weiter ab bis auf 22 m. Ein zweites Maximum befindet sich wenige Meter über dem Meeresboden.

Abb. 3.11: KATTEGAT- mittlere Profile und Wasserschichten  
AS Standardabweichung und Meßwertzahl  
( $\Delta p = 0.5 \text{ dbar}$ )







Tab. 3.8: Bearbeitung der Multisonden-Profile

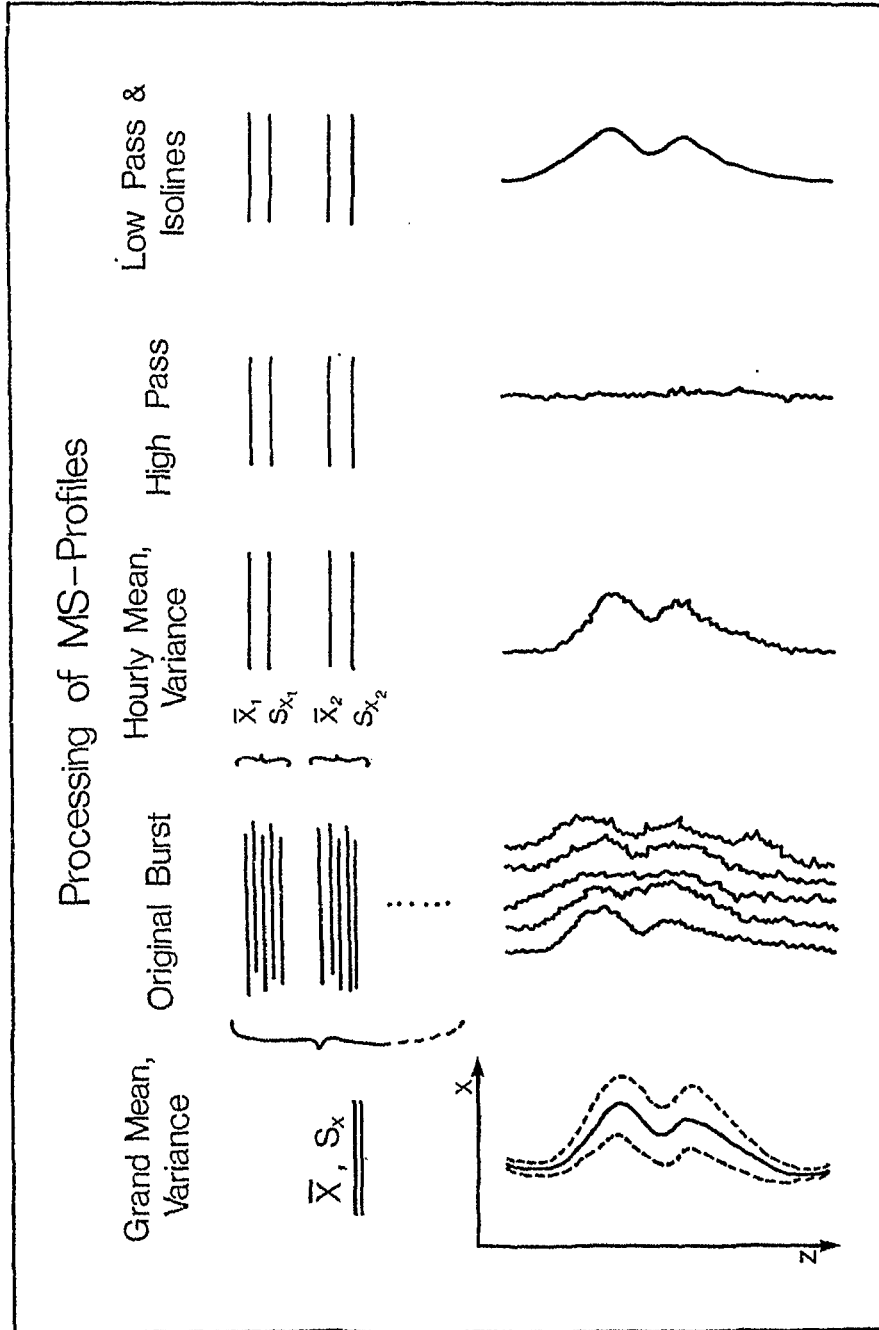
Gesamtmittel  
-varianz

Original-  
daten

Stundenmittel  
-varianz

Hochpaß-  
daten

Tiefpaßdaten  
(→Isolinien)



### 3.2.3. Bearbeitung der MS-Profile (Tab. 3.8)

Die Abb. 3.12 gibt einen Überblick über die Bearbeitung aller MS-Parameter am Beispiel der Chlorophyllfluoreszenz (Skagerrak):

A) In den Originaldaten kann man - selbst zwischen den 3-Min-Profilen - nur sehr selten lokale Chlorophyllmaxima in der Zeit verfolgen. Ob diese kleinräumigen Strukturen als statistisches Rauschen (durch ein zu kleines Meßvolumen) anzusehen sind oder aber die tatsächliche Phytoplanktonverteilung wiedergeben, muß noch untersucht werden (vgl. Abb. 2.5).

B) Zunächst wurden die zusammengehörigen 3-Min-Profile zu mittleren stündlichen Profilen ( $\Delta z = 0.5 \text{ m}$ ) zusammengefaßt. Für die Fluoreszenz entspricht dies in etwa einer "nachträglichen" Vergrößerung des Meßvolumens. (Bei diesem Verfahren muß in Kauf genommen werden, daß die räumliche Auflösung im Bereich der Sprungschicht durch interne Wellen etwas verschlechtert wird.)

Eine Inspektion der neuen, gemittelten Profilsreihe führte zu der Erkenntnis, daß selbst Phytoplanktonflecken mit einer vertikalen Ausdehnung  $\leq 2.5 \text{ m}$  nicht mit Sicherheit von einem Profil zum nächsten in der Zeit verfolgt werden konnten. Um das Gesamtbild noch weiter zu vereinfachen, wurden diese kleineren Strukturen weggefiltert (Gleitendes Mittel über 11 Werte =  $5.5 \text{ m}$ ).

C) Die geglätteten Profile enthalten nur noch die - vertikal gesehen - großräumigen, "dicken" Chlorophyllschichten, die unter den gegebenen Versuchsbedingungen innerhalb des Beobachtungszeitraumes registriert wurden.

D) Diese Werte wurden außerdem gegen die Zeit und den Druck als Isoliniengezeichnet und geben einen verallgemeinerten Überblick ohne störende Details (Abb. 3.13 ).

Die Chlorophyllprofile der restlichen Stationen (KAT, BOR, KAS) sind in den Abb. 3.14 bis 3.20 dargestellt. Die Isolinien der Variablen Temperatur, Salzgehalt und Dichte sind aus Platzgründen und zur besseren Übersicht im Anhang 5. untergebracht.

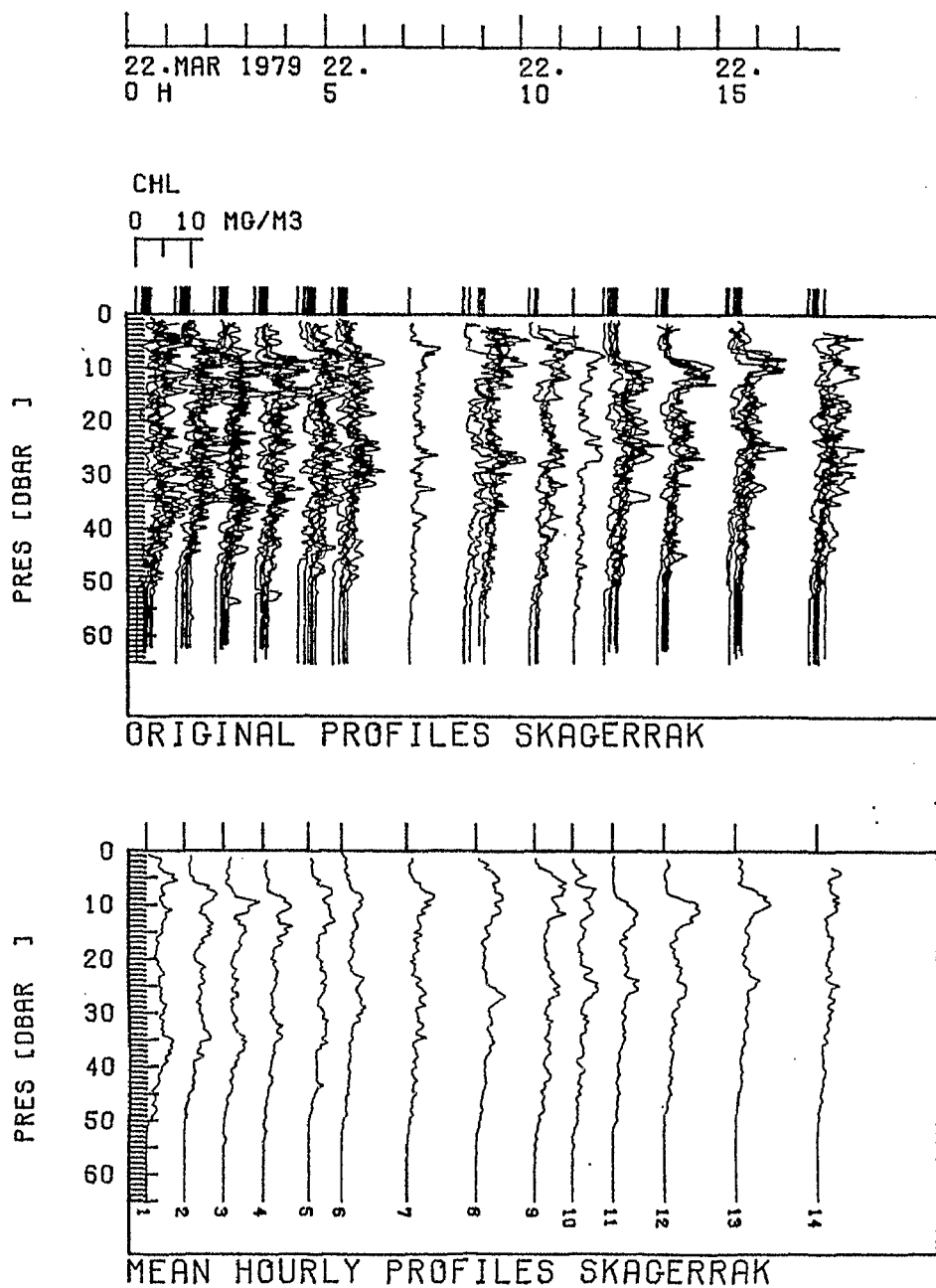


Abb. 3.12: SKAGERRAK, Bearbeitung der Multisondenprofile,  
(Bsp. Chlorophyll)  
A Originaldaten  
B Stundenmittel

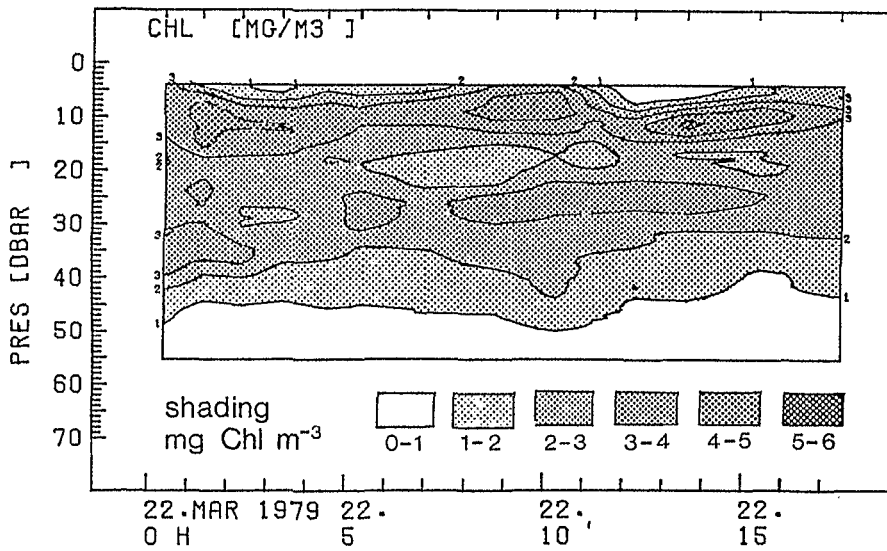
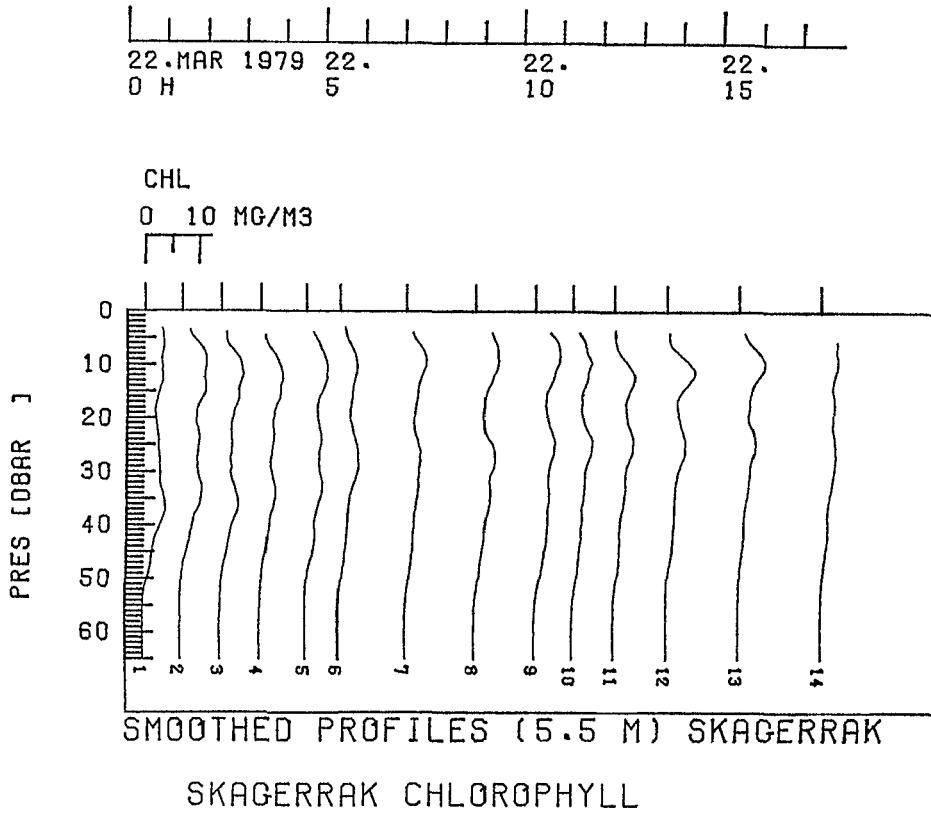


Abb. 3.13: SKAGERRAK, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien

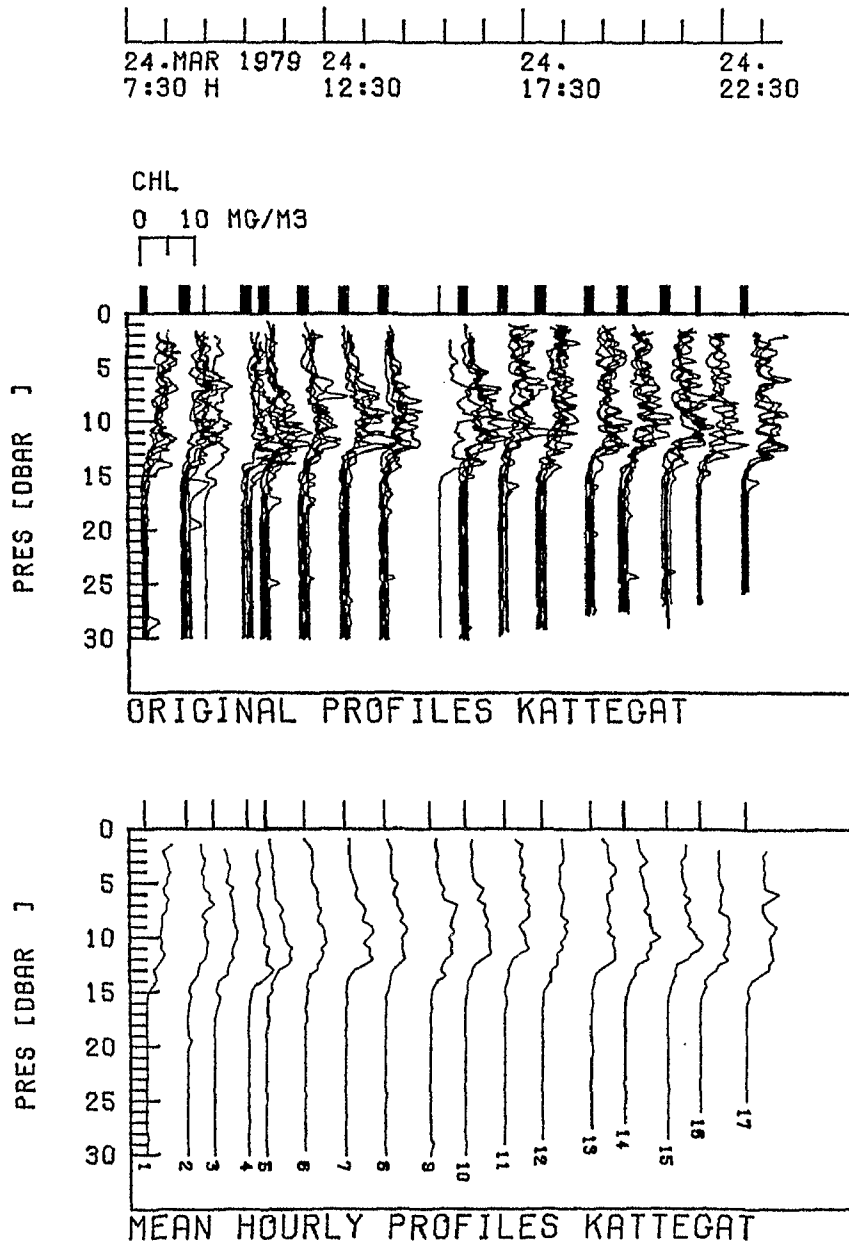


Abb. 3.14: KATTEGAT, Bearbeitung der Multisondenprofile,  
(Bsp. Chlorophyll)  
A Originaldaten  
B Stundenmittel

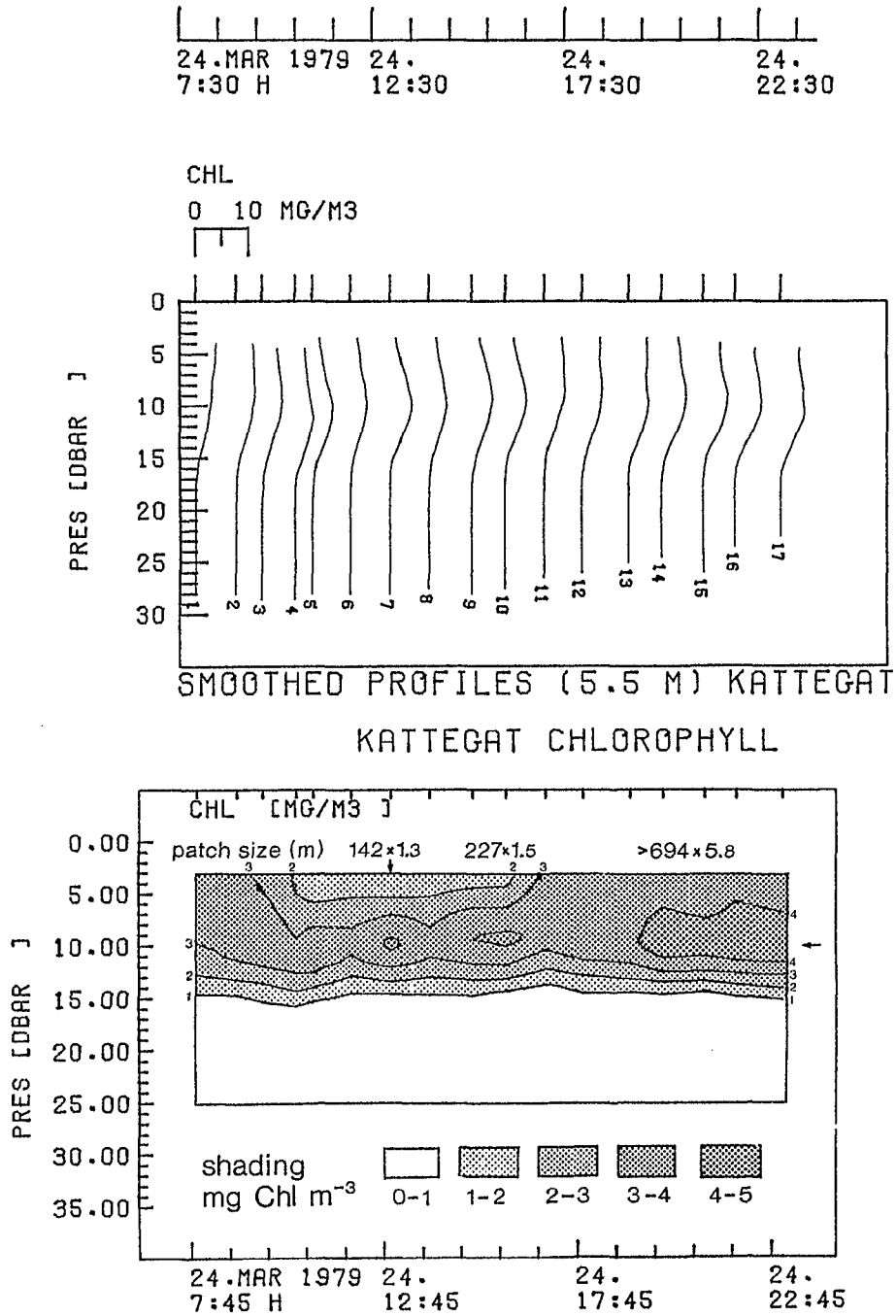


Abb. 3.15: KATTEGAT, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien und Patchgrößen

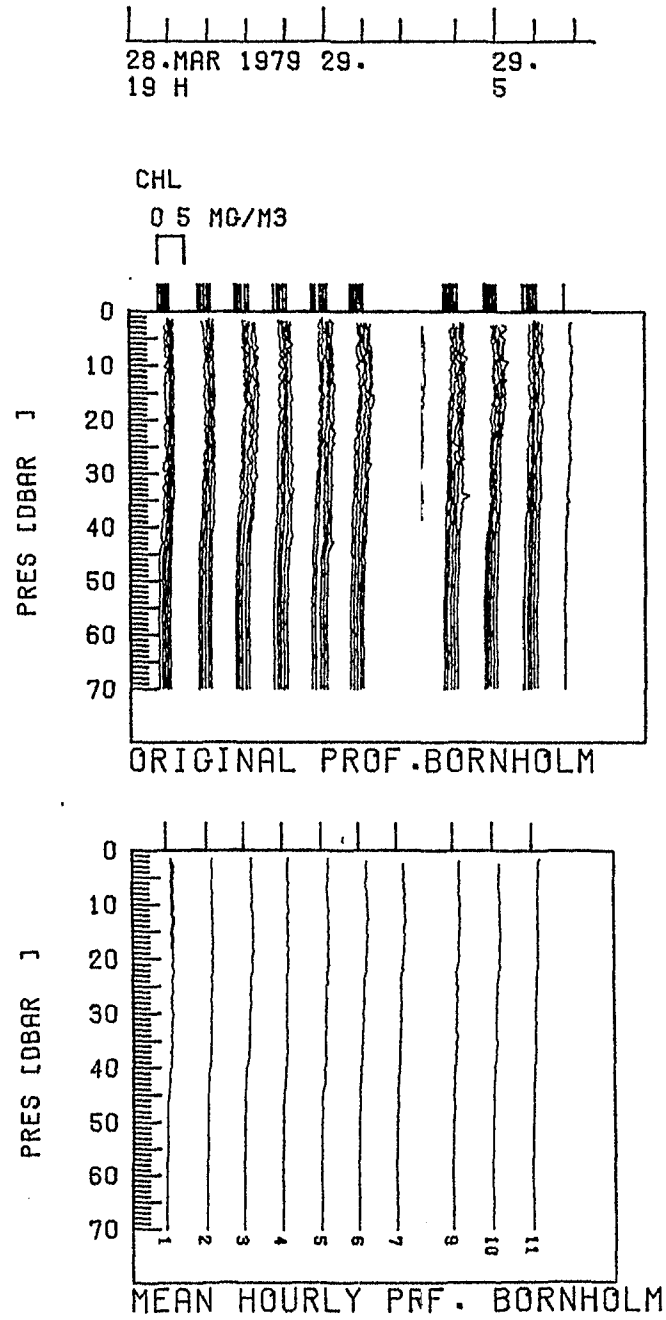


Abb. 3.16: BORNHOLM, Bearbeitung der Multisondenprofile,  
(Bsp. Chlorophyll)  
A Originldaten  
B Stundenmittel

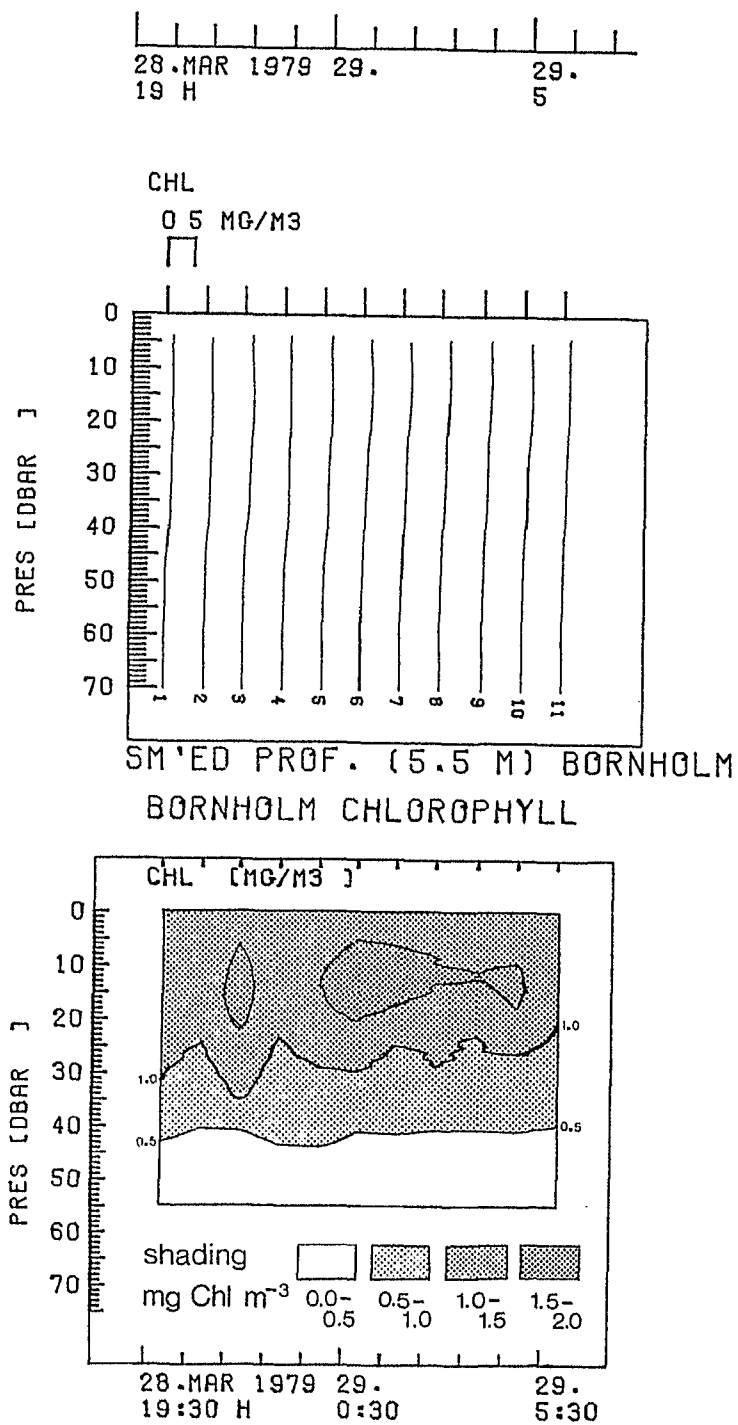


Abb. 3.17: BORNHOLM, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien



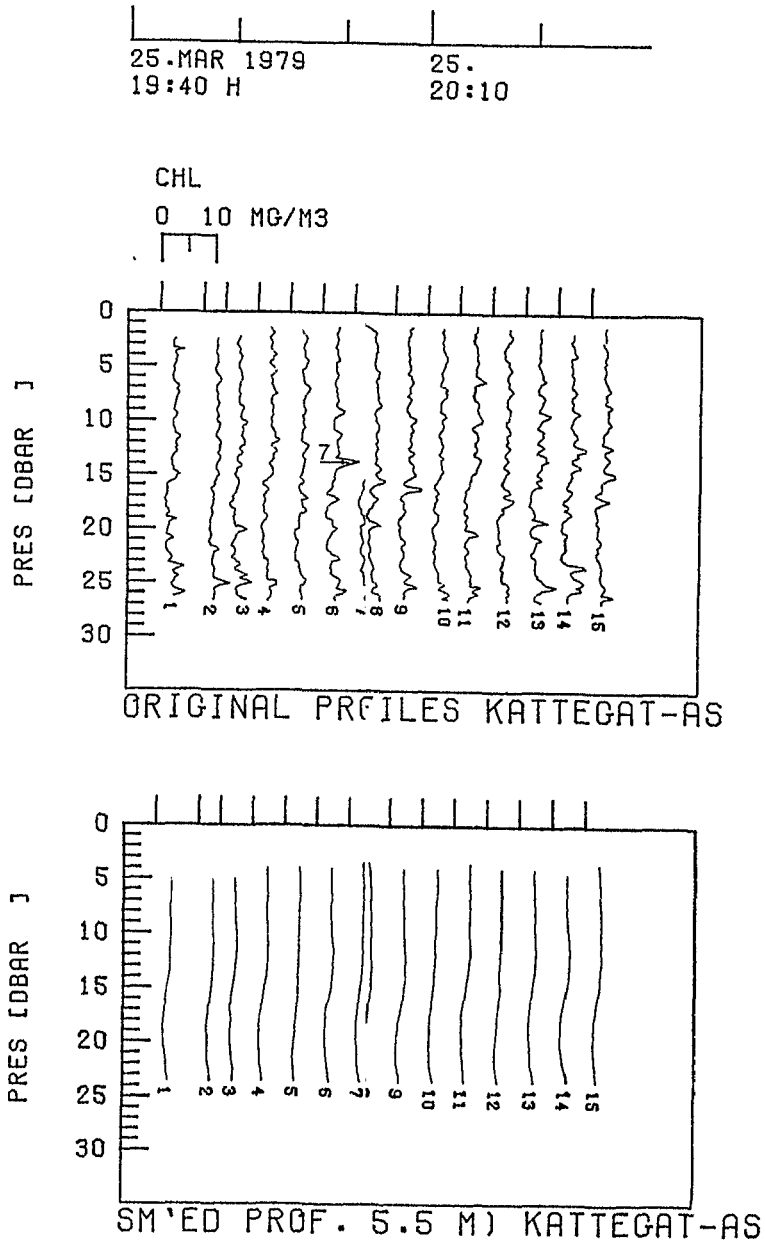


Abb. 3.18: KATTEGAT- A Originalprofile Chlorophyllfluoreszenz  
AS B Geglätete Profile

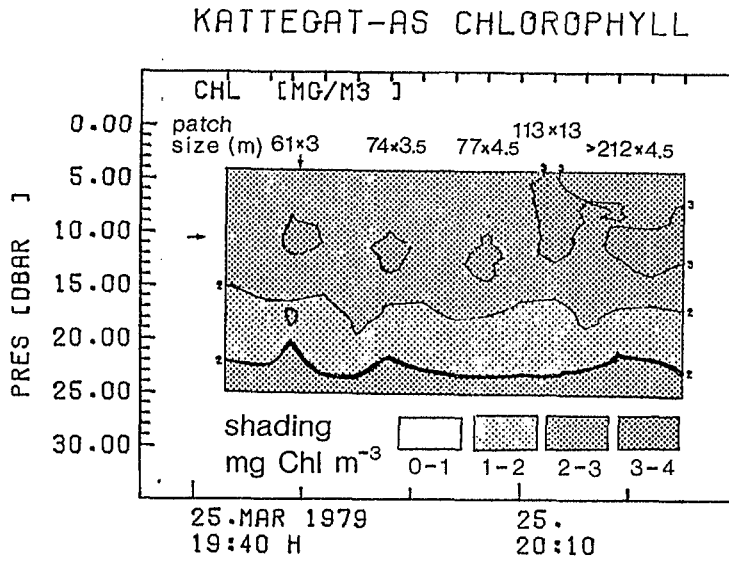


Abb. 3.19: KATTEGAT- Chlorophyll-Isolinien und Patchgrößen AS

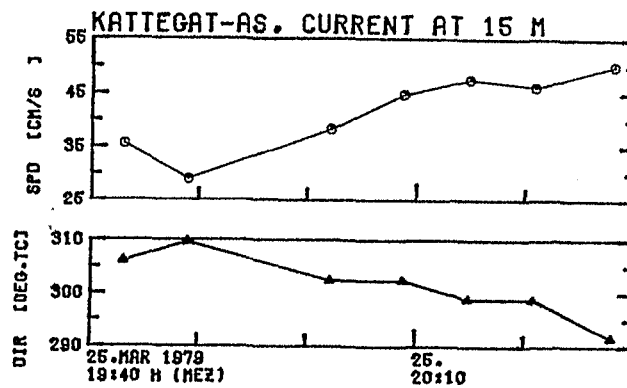


Abb. 3.20: KATTEGAT- Strömungsgeschwindigkeit und -richtung AS während der MS-Messungen in 15 m Tiefe.

### 3.2.4. Zeitreihen der integrierten Meßgrößen

Die Variablen Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll wurden zunächst einmal über die gesamte Wassersäule integriert. Für jede Station wurde die Anfangs- und Endtiefe so gewählt, daß alle Profile denselben Tiefenbereich umfassen; die integrierten Werte sind somit untereinander vergleichbar.

Die Integrale und Mittelwerte der mittleren Profile (3.2.2.) sind in den Tab. 3.9 und 3.10 aufgeführt. Zur Veranschaulichung der zeitlichen Variabilität der integrierten Meßgrößen wurden zusätzlich aus den Originalprofilen (Symbole:  $\square$ ) und aus den mittleren Stundenprofilen (durchgezogene Kurven) die Integrale berechnet und in den Abb. 3.21 bis 3.24 gegen die Zeit gezeichnet. Auf der rechten Seite jeder Zeichnung wurde jeweils der Mittelwertsbereich hinzugefügt (Mittelwert = Integral/Tiefenintervall).

Anschließend wurde die Korrelation berechnet zwischen der Zeit - in Stunden nach Meßbeginn - und den integrierten Werten der Temperatur (ITEM), des Salzgehaltes (ISAL) und des Chlorophylls (ICHL). Die Ergebnisse sind in der Tab. 3.11 zusammengefaßt und außerdem am rechten Rand der Zeichnungen vermerkt, z.B. als "SIG.<" für "signifikant zunehmend".

Bei der Interpretation dieser Integralzeitreihen ist zu bedenken, daß die Integration über mehrere Wasserkörper hinweg nur den allgemeinen Trend wiedergeben kann.

- 1) Eine Steigung  $\cdot 0$  zeigt den Optimalfall (Lagrangesche Bedingungen) an, wenn sich während der Beobachtungsperiode keiner der Wasserkörper ändert. Eine solche Situation kann aber auch vorgetäuscht werden, wenn sich nämlich zwei oder mehrere Wasserkörper gleichzeitig, aber gegenläufig ändern.
- !) Für den Extremfall, daß sich alle Wasserkörper im gleichen Sinne ändern, wäre eine Kurve mit extremer Steigung zu erwarten.
- ) Die meisten Fälle in der "freien Natur" liegen - wie hier - irgendwo zwischen den oben genannten Randsituationen.

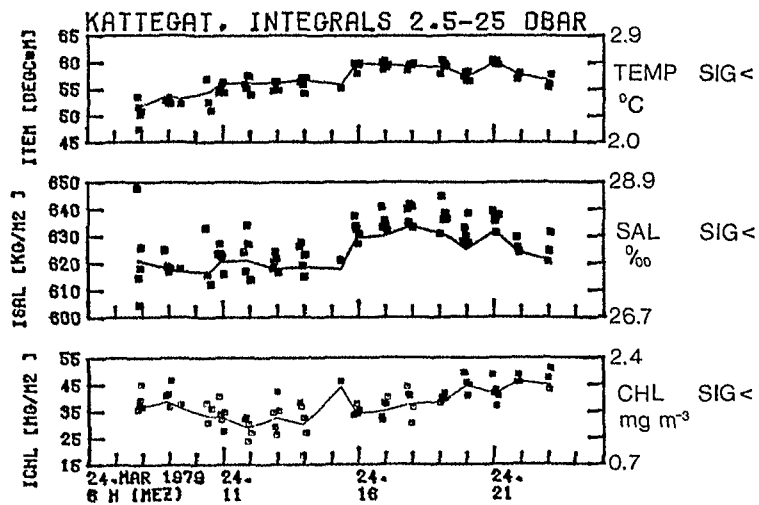
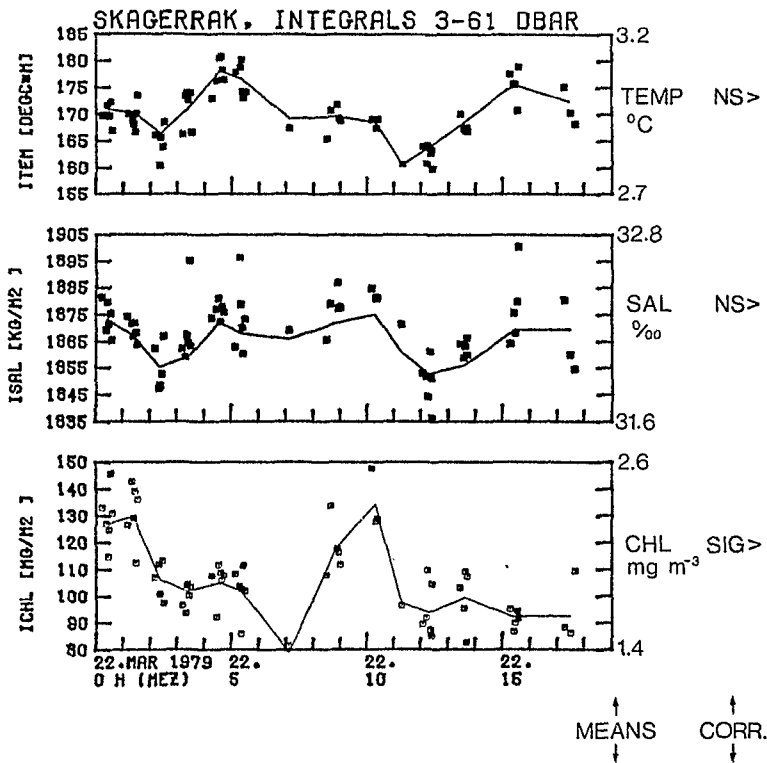


Abb. 3.21: SKAGERRAK Integralzeitreihen des Wärmehalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)

Abb. 3.22: KATTEGAT

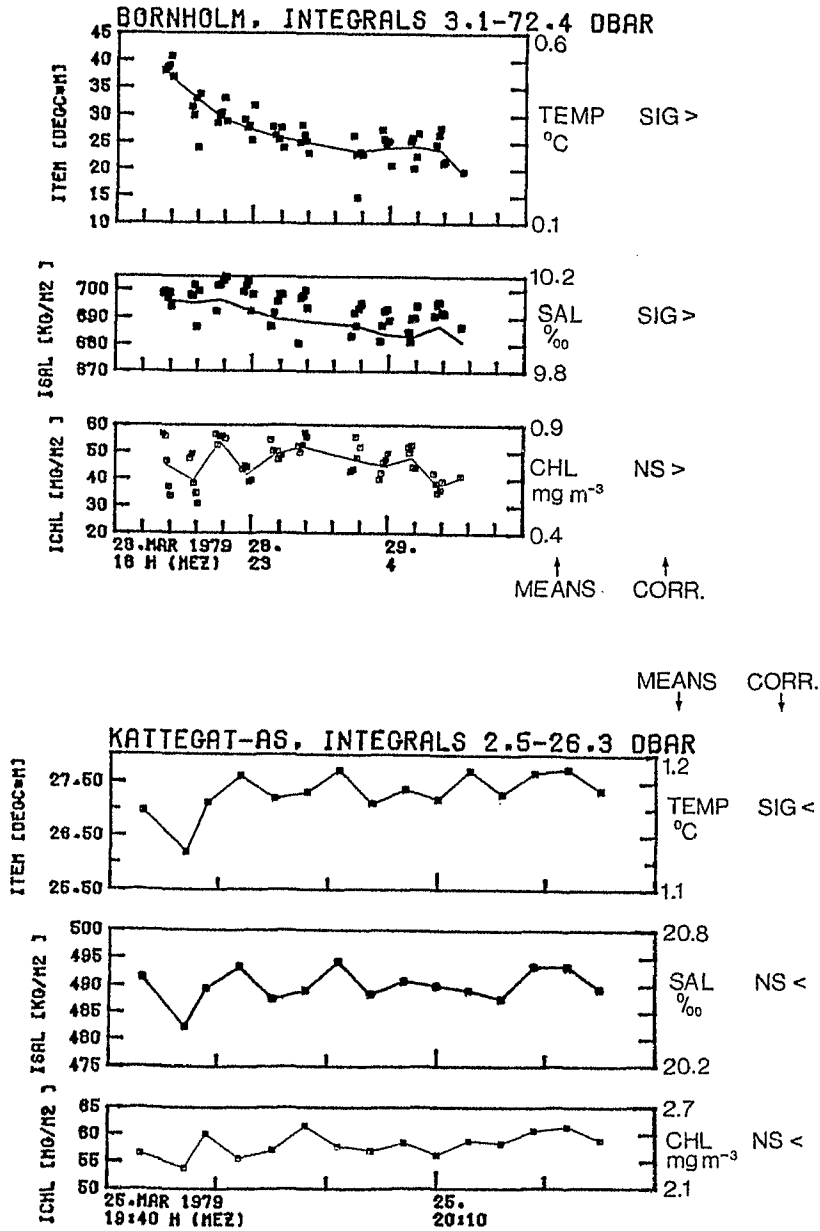


Abb. 3.23: BORNHOLM Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)

Abb. 3.24: KATTEGAT-AS Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG <": signifikante Korrelation, zunehmend mit der Zeit)

Tab. 3.9 Integrierte Werte

Station	Tiefenbereich [m]	Wärmeinhalt [°C m]	Salzmenge [kg m <sup>-2</sup> ]	Chlorophyll [mg m <sup>-2</sup> ]
SKA	3 - 61	171	1870	107
KAT	2.5 - 25	57	624	37
BOR	3.1 - 72.4	27	690	46
KAS	2.5 - 26.3	27	477	57

Tab. 3.10 Mittelwerte

Station	Tiefenbereich [m]	Temperatur [°C]	Salzgehalt [‰]	Chlorophyll [mg m <sup>-3</sup> ]
SKA	3 - 61	2.9	32.2	1.8
KAT	2.5 - 25	2.5	27.7	1.6
BOR	3.1 - 72.4	0.4	10.0	0.7
KAS	2.5 - 26.3	1.1	20.0	2.4

Tab. 3.11 Korrelation der integrierten Meßgrößen mit der Zeit (Spearman Rangkorrelationskoeffizient  $r_s$ )

Station	Variab- le	ORIGINALPROFILE			STUNDENMITTEL		
		N	$r_s$	Signif.	N	$r_s$	Signif.
SKA	ITEM	64	-0.010	-	14	-0.130	-
	ISAL		-0.091	-		-0.090	-
	ICHL		-0.553	***		-0.631	*
KAT	ITEM	70	0.729	***	17	0.787	***
	ISAL		0.548	***		0.659	**
	ICHL		0.486	***		0.610	**
BOR	ITEM	51	-0.771	***	11	-0.936	***
	ISAL		-0.580	***		-0.918	***
	ICHL		-0.182	-		-0.255	-
KAS	ITEM	15	0.600	*			
	ISAL		0.193	-			
	ICHL		0.507	-			

### Zusammenfassung

Die Integrale bzw. Mittelwerte wurden berechnet, um abzuschätzen, ob sich die allgemeine Situation auf den Stationen während der Messungen mit der Zeit verändert hat.

Dies trifft - was die gesamte Wassersäule anlangt - sicherlich zu für die Stationen Kattegat (zunehmende Werte) und Bornholm (abnehmende Werte).

Die Kurven von Wärmeinhalt und Salzmenge verlaufen stets gleichsinnig. Auf den Stationen Skagerrak und Kattegat-Ankerstation ändert sich die Chlorophyllmenge parallel zu den hydrographischen Veränderungen, im Kattegat jedoch entgegengesetzt. Die Station Bornholm weist zunächst eine Chlorophyllzunahme auf bei Zunahme der Salzmenge und stetiger Abnahme des Wärmeinhalts (am 28. März, 21-22 Uhr), dann eine Chlorophyllabnahme bei Zunahme der Salzmenge und des Wärmeinhalts (am 29. März, 5-6 Uhr).

Die Ursachen für diese komplexen Prozesse können an dieser Stelle noch nicht geklärt werden, da hierfür zunächst einmal die Veränderungen in den einzelnen Wasserkörpern untersucht werden müssen.

Die Differenzen zwischen den Integralen aus den Originalprofilen und denen der gemittelten Profile können herrühren von

- 1) kleinräumiger horizontaler Patchiness (individuelle Abweichungen der Originalprofile vom Stundenmittel),
- 2) reduzierter Feinstruktur in den gemittelten Profilen,
- 3) kurzfristigen Veränderungen in den Originalprofilen infolge von Grenzflächenwellen.



### 3.2.5. Zeitreihe der T/S-Beziehung

Die in Kap. 3.2.1., Abb. 3.4<sub>b</sub>, übereinandergezeichneten T/S-Profile sind in den Abb. 3.25 bis 3.27 in ihrer zeitlichen Anordnung dargestellt.<sup>a</sup> Die Ankerstation wurde in der Abb. 3.28 vollständigshalber hinzugenommen. Während in der Übersichtszeichnung die Schwankungsbreite der T/S-Profile leichter erkennbar ist, kann man in den Zeitreihen die Veränderung einzelner Phänomene besser verfolgen.

Die Bedeutsamkeit der beobachteten Änderungen läßt sich zwar nicht unmittelbar quantifizieren, jedenfalls nicht ohne eine genaue Definition der einzelnen Wasserkörper und der darin "zulässigen" T/S-Variabilität.

Die Frage der "Wasserkörperkonstanz" (vgl. Kap. 1.5) innerhalb der verschiedenen Schichten soll deshalb erst später beantwortet werden (Kap. 4.5.3.).

### Skagerrak

Die T/S-Beziehung der Wasserkörper an der Oberfläche und in Bodennähe bleibt konstant, in den mittleren Wasserschichten jedoch nicht. Dies ist besonders gut zu beobachten an der Struktur, die in den Profilen 1-6 bei  $T \approx 2.5^{\circ} \text{C}$  eine Zunahme des Salzgehaltes um ca.  $0.8 \text{ ‰}$  auf  $32.6 \text{ ‰}$  anzeigt. Diese Zunahme bleibt konstant, während die Temperatur ab Profil 8 bis Profil 12 auf ca.  $2^{\circ} \text{C}$  abnimmt und dann wieder zum Ausgangswert zurückkehrt (Profil 14). Die Form der Struktur variiert von anfänglich "doppel-S" zu überwiegend "einfach-S" in den späteren Profilen. Daß es sich hierbei nicht um eine allmähliche Vermischung handelt, sieht man am besten in der

---

a) Aus technischen Gründen mußte die Temperaturachse mit nach unten zunehmenden Werten gezeichnet werden. Da die Wassertemperaturen hier im allgemeinen mit der Tiefe zunehmen, liegen in der Abb. 3.4<sub>b</sub> die Oberflächenwerte im unteren Bildteil, in den Abb. 3.25 bis 3.28 dagegen im oberen Bildteil. Fehlerhafte Werte sind nur im SKA, Profil 13 und im KAT, Profil 1 zu erkennen.

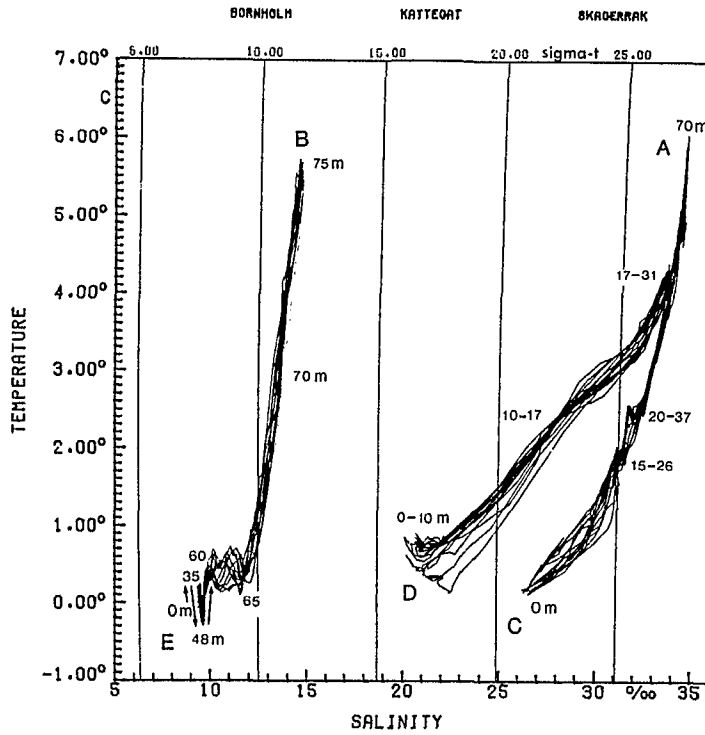


Abb. 3.4b: T/S-Diagramm mit den Hauptwassermassen A-E.

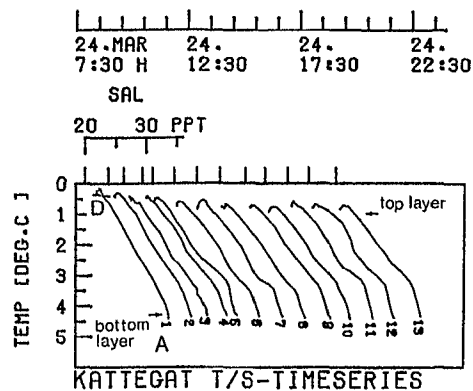
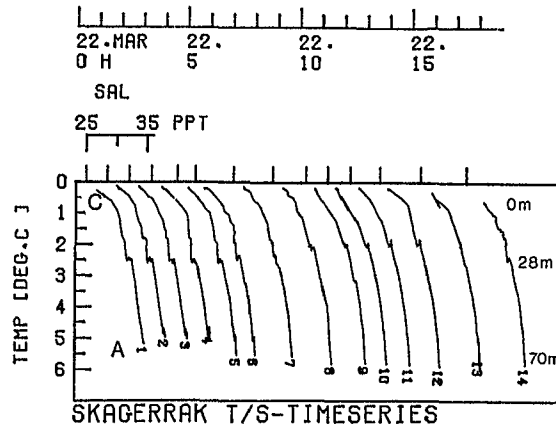


Abb. 3.25: SKAGERRAK

Abb. 3.26: KATTEGAT

T/S-Zeitreihe mit Tiefenangaben und Hauptwassermassen (vgl. Kap. 3.2.1.)

Abb. 3.4<sub>b</sub>, wo in den Tiefenbereichen 15-26 m und 20-37 m zwei deutlich unterschiedene Wasserkörper zu erkennen sind mit Salzgehalten zwischen 31 und 32.5 ‰. Daraus geht hervor, daß zumindest in dieser Tiefenzone das angestrebte Ziel Lagrangescher Bedingungen nicht erreicht wurde. (Die Driftfahne war in 20 m positioniert.)

### Kattegat

Die starke Schichtung im Kattegat (vgl. Abb. 3.6a und Tab. 3.3) führt zu einer Häufung der T/S-Punkte in der relativ homogenen Deckschicht ( $T \leq 0.8^{\circ} \text{C}$ ) und in der ebenfalls homogenen Unterschicht ( $T \geq 4.2^{\circ} \text{C}$ ). Die Deckschicht wurde durch die Sonneneinstrahlung in den oberen 10 m so stark erwärmt, daß eine Wasserkörperanalyse hier nicht möglich ist. Die Abnahme des Salzgehaltes von ca. 22.3 auf ca. 21 ‰ weist aber auf Advektionsvorgänge hin, die bei der Verwendung von nur einem Drifter und bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten von durchschnittlich  $27 \text{ cm s}^{-1}$  in der Deckschicht nicht kontrolliert werden konnten. Die T/S-Zeitreihe im Bereich der Sprungschicht ( $1^{\circ} \text{C} < T < 4^{\circ} \text{C}$ ) spiegelt sicherlich keine ortskonstanten zeitlichen Vermischungsprozesse wider (Drifttiefe 1-6 m), sondern dokumentiert den Zustand der zwischen Ober- und Unterschicht erfolgten Vermischung an verschiedenen Orten (vgl. Kap. 3.2.6.). Der Wasserkörper unterhalb der Sprungschicht ( $z \geq 20 \text{ m}$ ,  $T \geq 4.2^{\circ} \text{C}$ ) war im gesamten Untersuchungszeitraum in seinen Temperatur- und Salzgehaltsqualitäten konstant.

### Bornholm

In den oberen beiden Wasserkörpern der Bornholm-Driftstation (vgl. Abb. 3.7a) bis zu einer Tiefe von 56 m liegt der Salzgehalt konstant bei 9.5 ‰. Erst darunter nimmt er zu. Die Temperaturschichtung bleibt zumindest in den oberen 35 m unverändert (Drifttiefe 20 m). Die Tiefstwerte in der 2. Schicht ("Winterwasser") schwanken zwischen  $-0.16$  und  $-0.34^{\circ} \text{C}$ . Die

größten Schwankungen in der T/S-Beziehung treten auf zwischen 60 und 65 m, in der 3. Schicht, während die Bodenschicht unterhalb 66 m nur in der Lage ihrer Temperatur- und Salzgehaltgradienten variiert.

Kattegat-Ankerstation

Die hydrographische Situation auf der Ankerstation ähnelt sehr der auf der Kattegat-Driftstation. Die Oberschicht ist homogen bei Temperaturen zwischen 0.6 und 0.9° C. Die Sprungschicht ist etwas schwächer als auf der Driftstation. Sie unterscheidet sich in der T/S-Zeitreihe kaum von der Unterschicht, da diese auch einen, wenn auch schwächeren Gradienten aufweist.

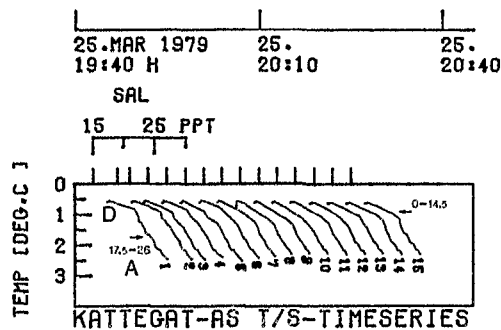
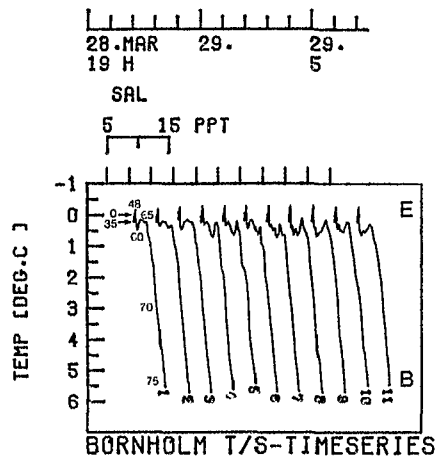


Abb. 3.27: BORNHOLM T/S-Zeitreihe mit Tiefenangaben und Hauptwassermassen (vgl. Kap. 3.2.1.)  
Abb. 3.28: KATTEGAT-AS

### 3.2.6. Driftkörperversetzung

In den Abb. 3.29-3.31 sind die Ergebnisse der Driftexperimente wiedergegeben. Die dicken Pfeile ( ← ) verbinden die während des Experimentes gemessenen Positionen des Oberflächen-drifters miteinander und kennzeichnen so den Weg des von ihm markierten Wasserkörpers. Darunter sind äquidistant die Tageszeiten angegeben, so daß man gleichzeitig einen Eindruck von der Driftgeschwindigkeit bekommt: je größer der Abstand zwischen zwei Zeitmarken, desto größer die Geschwindigkeit auf dieser Strecke.

Die mittelstarken Pfeile ( ← ) bezeichnen die Driftpositionen des tieferen Drifters. Sie bilden keine zusammenhängende Linie, da dieser Driftkörper mehrmals aufgenommen und in der Nähe des Oberflächendrifters erneut ausgesetzt wurde (vgl. Kap. 2.3.3.). Die Geschwindigkeit der tieferen Wasserschicht war sehr viel geringer als die der Oberschicht.

Die dünnen Pfeile ( ← ) kennzeichnen die Strecken, die das Schiff während der MS-Messungen verdriftete. Die Richtung und Geschwindigkeit wurden dabei vom Wind (vgl. Tab.2.1 ) und der Oberflächenströmung bestimmt.

Abb. 3.29: SKAGERRAK, Driftkörperversetzung →

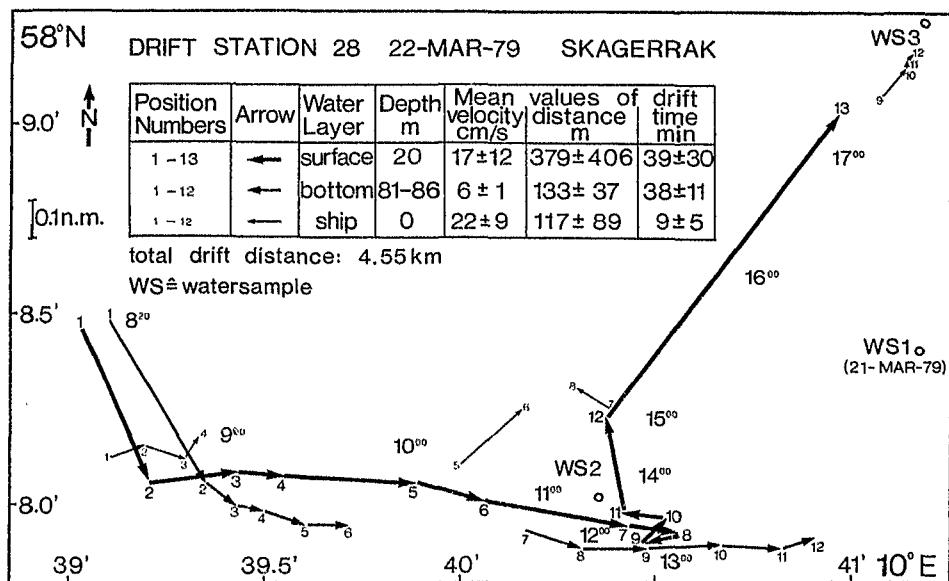
Skagerrak (Abb. 3.29)

Bedingt durch das schlechte Wetter war es zunächst, am 21.3.79, sehr schwierig, die Driftkörper zu verfolgen. Die Sicht war des öfteren durch Schneeschauer stark eingeschränkt und auch auf dem Radarschirm konnten die Radarreflektoren der Bojen (vgl. Abb. 2.4) wegen der starken Seegangsechos nicht identifiziert werden, so daß ein Driftkörper verlorenging.

Am folgenden Tag, dem 22.3.79, wurde das Experiment mit besserem Erfolg wiederholt. Der Oberflächendrifter (20 m) bewegte sich von 8<sup>20</sup> bis ca. 12<sup>00</sup> mit konstanter Geschwindigkeit ( $17 \text{ cm s}^{-1}$ ) nach Osten. Von 15<sup>00</sup> an setzte er seinen Weg in NE-Richtung fort, nachdem er sich in einer engen, achtförmigen Bewegung gedreht hatte (Positionen 8-11).

Der Tiefendrifter (84 m) war vermutlich erst bei Position 2 (9<sup>00</sup>) ins tiefe Wasser abgesunken. Mit etwa 1/3 der Geschwindigkeit der Oberflächenströmung trieb er bis zum Versuchsende nach Osten.

Die Schiffsdrift während der MS-Hols war meist nach NE gerichtet, als Resultat der E-Strömung und des SE-Windes. Ihre Geschwindigkeit war dabei etwas größer als die des Oberflächenstroms.



Kattegat (Abb. 3.30)

Ganz anders die Situation im Kattegat: Bei ruhiger See und im Tagesverlauf abnehmender Bewölkung und abnehmender Windstärke hätten leicht mehrere Drifter gleichzeitig beobachtet werden können, wenn die Oberflächenströmung ( $27 \text{ cm s}^{-1}$ , nach SSW) nicht so stark gewesen wäre.

In den 20 Stunden des Experimentes legte der obere Drifter fast 20 km zurück, der untere bei ca.  $8 \text{ cm s}^{-1}$  in gleicher Richtung nur etwa 6 km, so daß die durch die Sprungschicht getrennten Wasserkörper sich 14 km voneinander entfernt hatten.

Das Schiff verdriftete vor dem Wind mit ca.  $14 \text{ cm s}^{-1}$  während der MS-Messungen nach Osten.

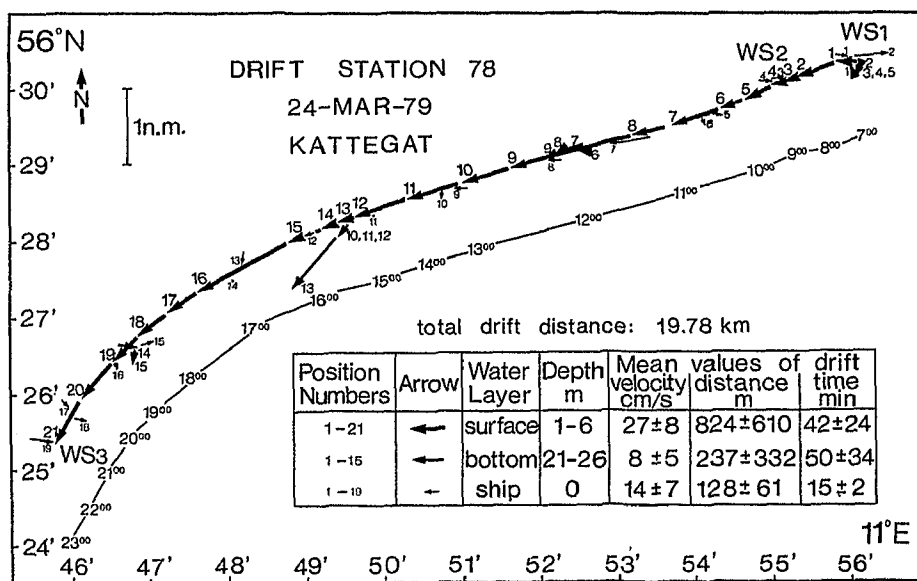


Abb. 3.30: KATTEGAT, Driftkörperversetzung

Bornholm (Abb. 3.31)

Da im Bornholmbecken die Wassersäule im Bereich der größten Planktonansammlung homogen bezüglich der Temperatur und des Salzgehaltes war, wurde nur ein Driftkörper in 20 m Tiefe ausgebracht. Im Verlauf der ersten 8 Stunden des Experiments legte er insgesamt nur 1.6 km zurück und mußte dann in der Nacht wegen sich verschlechternder Sicht wieder aufgenommen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt war das Schiff während der MS-Messungen jedesmal mit etwa  $48 \text{ cm s}^{-1}$  - fünfmal schneller als die Oberflächenströmung - vor dem Wind nach Westen verdriftet.

Angesichts dieses Geschwindigkeitsverhältnisses und der unregelmäßigen Bewegungen des Drifters (Positionen 1-10) erschien es gerechtfertigt, die weiteren MS-Hols bis zum Ende der Driftstation an einer festen geographischen Position durchzuführen. Das Schiff driftete im folgenden während jeder Meßphase an dieser Position vorbei und kehrte dann wieder zum Ausgangspunkt zurück.

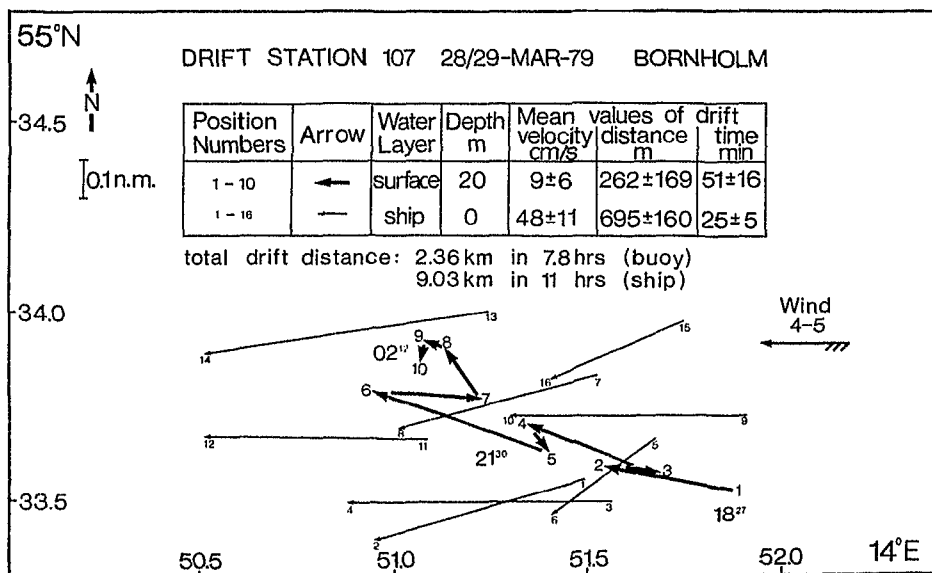


Abb. 3.31: BORNHOLM, Driftkörperversetzung



### 3.2.7. Ankerstation Kattegat

Das Strömungsprofil, gemessen am 25.3.1979 zwischen 19<sup>10</sup> und ca. 19<sup>30</sup>, ist in der Abb. 3.11 zusammen mit dem mittleren MS-Profil der Ankerstation dargestellt (DIR = Richtung in Grad gegen magnetisch Nord; SPD = Geschwindigkeit in  $\text{cm s}^{-1}$ ).

Die Strömungsgeschwindigkeit war im oberen Wasserkörper bei 6 m mit  $44 \text{ cm s}^{-1}$  am größten und nahm mit der Tiefe ab auf  $9 \text{ cm s}^{-1}$  in 24 m Tiefe. Die Strömungsrichtung variierte kaum mit der Tiefe; sie lag zwischen  $288^\circ$  und  $306^\circ$ .

Es fällt auf, daß im Geschwindigkeitsprofil die stärkste Änderung nicht bei 15 m, in der Sprungschicht, sondern erst bei 20 m registriert wurde. Vermutlich ist allein die zeitliche Verzögerung zwischen der Aufnahme des Strömungsprofils und den MS-Messungen der Grund dafür. Aus den ersten Testprofilen, die gleich nach Ankunft auf der Station gemessen worden waren, war bekannt, daß die Lage der Sprungschicht in diesem hydrographisch unruhigen Gebiet sehr variabel war: sie lag zuerst bei ca. 10 m und verlagerte sich dann offenbar immer weiter in die Tiefe.

Die Zeitreihe der Strömungsmessungen ist in der Abb. 3.20 dargestellt. Die Richtung veränderte sich wiederum kaum, während die Geschwindigkeit innerhalb von 40 min von 29 auf  $50 \text{ cm s}^{-1}$  zunahm. Im Mittel betrug sie  $42 \pm 8 \text{ cm s}^{-1}$ . Bei Berücksichtigung des 3 min-Meßabstandes der MS ergeben sich folgende horizontale Entfernungen zwischen den Einsatz-tiefen der MS-Profile:

52 m bei 19<sup>20</sup> und 90 m bei 20<sup>25</sup>. Die mittlere horizontale Entfernung betrug  $75 \pm 14 \text{ m}$  in 15 m Wassertiefe.

Mit diesen Angaben kann man jedoch - wie man an der Variabilität des Stromprofils sieht - nur die Größenordnung des wahren Horizontalabstandes abschätzen. Da dieser sich weder linear mit der Zeit noch linear mit der Tiefe änderte, habe ich auf eine Überführung der zeitabhängigen Darstellung in eine räumliche verzichtet.

### 3.3. Zusammenfassende Diskussion

#### 3.3.1. Die Chlorophyll-Fluoreszenz-Beziehung

Wie die Abb. 3.2 und 3.3 deutlich zeigen, wurde auch im vorliegenden Datenmaterial die Fluoreszenz des Phytoplanktonchlorophylls noch von anderen Faktoren bestimmt als nur vom Chlorophyllgehalt der Pflanzenzellen. Es ist nicht das Ziel dieser Arbeit, die Ursachen dieses - physiologisch oder umweltbedingten - Fluoreszenzverhaltens der Algen zu untersuchen. Daher wurde statistisch getestet, ob die Differenz zwischen photometrisch und fluorometrisch gemessenen Chlorophyllkonzentrationen im Mittel signifikant von Null abweicht. Dies ist nicht der Fall.

Die Chlorophyllfluoreszenzdaten der Multisonde konnten somit ohne eine aufwendige dreidimensionale Nachzeichnung der Profile ( $\text{Chl} = f(\text{Tiefe, Zeit, Fluoreszenz})$ ) weiter ausgewertet werden, insbesondere für eine Analyse der relativen zeitlichen Veränderungen in der vertikalen Phytoplanktonverteilung.

#### 3.3.2. Ankerstation "Kattegat-AS"

Die MS-Profilserie der Ankerstation KAS im 3 min-Abstand sollte anhand der gleichzeitig durchgeführten Strömungsmessungen in einen räumlichen hydrographischen Schnitt überführt werden. Dies war nicht möglich, da das Stromprofil sich zu schnell und unkontrolliert veränderte und deshalb die in 15 m Tiefe gemessene Geschwindigkeit nicht für andere Tiefenstufen extrapoliert werden konnte. (Sie betrug im Mittel  $42 \pm 8 \text{ cm s}^{-1}$ , was zu einem mittleren horizontalen Profilabstand von  $75 \pm 14 \text{ m}$  führt.)

Dennoch scheint es mir erlaubt, die Ausdehnung der Phytoplanktonpatches größenordnungsmäßig abzuschätzen, besonders für solche, die sich in unmittelbarer Nähe des Strömungsmessers befanden.

Feinstruktur:

In den Originaldaten (Abb. 3.18) können keine individuellen Peaks von einem Profil zum nächsten verfolgt werden. Der größte Peak (19<sup>58</sup>, Prof. Nr. 6, 14 m Tiefe) erreicht eine max. Chlorophyllkonzentration von  $7 \text{ mg m}^{-3}$  und eine vertikale Dicke von 1 m. Die umgebende Chlorophyllkonzentration beträgt  $2.5 \text{ mg m}^{-3}$ . Bei der aktuellen Stromgeschwindigkeit von  $35 \text{ cm s}^{-1}$  muß er horizontal kürzer als 126 m gewesen sein.

Grobstruktur (Tab. 3.12):

In der Abb. 3.19 heben sich fünf Phytoplanktonflecken mit Chlorophyllkonzentrationen zwischen 3 und  $4 \text{ mg m}^{-3}$  klar hervor aus ihrer Umgebung, die nur 2 bis  $3 \text{ mg Chl m}^{-3}$  aufweist. Die horizontale Ausdehnung dieser Flecken wurde abgeschätzt anhand ihrer "zeitlichen Ausdehnung" und der jeweils herrschenden Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Abb. 3.20).

Tab. 3.12: Größe von 5 Phytoplanktonflecken mit 3-4 mg Chl  $\text{m}^{-3}$ .

Länge berechnet aus der Zeitskala (Abb. 3.19) und der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit (Abb. 3.20).

Kattegat-Ankerstation

Flecken	1	2	3	4	5
Zeit	19 <sup>49</sup>	19 <sup>58</sup>	20 <sup>07</sup>	20 <sup>13</sup>	20 <sup>22</sup>
Strömungsgeschw. [ $\text{cm s}^{-1}$ ]	29	35	43	47	47
Länge [m]	61	74	77	113	>212
Höhe	3	3.5	4.5	13	4.5

3.3.3. Driftstationen

Die drei Driftstationen Skagerrak, Kattegat und Bornholm unterscheiden sich sehr stark in hydrographischer, wie auch in biologischer Hinsicht. Da die dynamischen, zeitabhängigen Aspekte im 4. Kapitel abgehandelt werden sollen, beschränke ich mich hier auf die Darstellung der mittleren biologisch-hydrographischen Situation, deren wichtigste Merkmale in der Tab. 3.13. zusammengefaßt sind:

Tab. 3.13: Wichtigste Merkmale zur Charakterisierung der biologischen und hydrographischen Situation auf den Driftstationen

	Skagerrak	Kattegat	Bornholm
Chlorophyll-Konzentration			
Mittel [mg m <sup>-3</sup> ]	1.8 ± 0.3	1.7 ± 0.2	0.7 ± 0.1
Maximum [mg m <sup>-3</sup> ]	4.4 ± 1.8	4.2 ± 1.8	1.4 ± 0.3
- Menge [mg m <sup>-2</sup> ]	105.6 ± 16.0	37.4 ± 5.3	45.5 ± 5.3
Phytoplankton -			
Arten	24	25	11
Schichten	4	1	1
Nährstoffkonzentrationen im Mittel [m Mol m <sup>-3</sup> ]			
Nitrat	5.8 ± 2.7	6.2 ± 4.6	4.4 ± 1.0
Nitrit	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.1
Phosphat	1.0 ± 0.5	0.8 ± 0.5	1.1 ± 0.5
Silikat	1.7 ± 0.9	2.4 ± 1.5	5.8 ± 1.5
Wasserschichten	4	2	4
Temperatur [° C]	2.9	2.5	0.4
Wärmeinhalt [° C m]	171	57	27
Salzgehalt [°/oo]	37.2	27.7	10.0
Salzmenge [kg m <sup>-2</sup> ]	1870	624	690
Wassertiefe [m]	270	35	75

Auch innerhalb einer Station gibt es enorme Unterschiede zwischen den Oberflächen- und den Bodenwerten, in der Temperatur bis zu  $5.3^{\circ}\text{C}$  (SKA), im Salzgehalt maximal  $13\text{ }^{\circ}/\text{oo}$  (KAT).

Anhand der mittleren Profile können für jede Station übereinanderliegende Wasser- bzw. Chlorophyllschichten definiert werden (Tab. 3.3, 3.4).

Außer im Bornholm Becken finden sich die größten Chlorophyllkonzentrationen immer im Bereich der stärksten Dichtegradienten. (Deshalb stimmen die Tiefen der einzelnen Wasserschichten nicht überein mit den Tiefen der Phytoplanktonschichten.) Eine Untergliederung der Wassersäule in möglichst viele Schichten im Bereich der euphotischen Zone ist offenbar besonders günstig für die Entwicklung der Phytoplanktonblüte.

Im Skagerrak finden wir diese Situation mit vier Schichten verwirklicht, in denen ca.  $106\text{ mg Chl m}^{-2}$  produziert wurden. Im Kattegat - bei nur zwei Schichten - beträgt die Gesamtmenge Chlorophyll nur  $37\text{ mg m}^{-2}$ . Dort ist der Dichtegradient sogar so stark, daß das in der Deckschicht gebildete Phytoplankton nicht in die untere Wasserschicht absinken kann.

Trotz der niedrigen Temperaturen ist auch bei Bornholm Ende März 1979 die Phytoplanktonblüte schon in vollem Gange. Die Chlorophyllkonzentrationen und Zellzahlen sind dort zwar bedeutend niedriger als im Skagerrak und Kattegat, das liegt aber nicht an der Primärproduktion - wie die Gesamtmenge von  $46\text{ mg Chl m}^{-2}$  deutlich zeigt -, sondern am Fehlen einer wirksamen Schichtung innerhalb der euphotischen Zone. Die durchmischte Deckschicht reicht hier so tief, daß das in Oberflächennähe gebildete Phytoplankton durch Vertikalzirkulation in einem großen Wasservolumen verteilt und "verdünnt" wird.

Die Nährstoffprofile verlaufen i.a. parallel zu den Dichteprofilen, ohne eine erkennbare Beziehung zur Phytoplanktonverteilung. Die Konzentrationen nehmen mit der Wassertiefe zu. Sie unterscheiden sich zwischen den drei Stationen nur

unwesentlich, bis auf den Silikatgehalt, der bei Bornholm ca. dreimal größer ist als auf den beiden anderen Stationen. Es wäre denkbar, daß dieser Unterschied durch die Aktivität der silikataufnehmenden Diatomeen hervorgerufen wird, die bei Bornholm nur in vergleichsweise wenigen Arten und geringer Zellzahl vorhanden sind.

In den Tab. 3.14 bis 3.16 sind die häufigsten Phytoplanktonarten jeder Station zusammengestellt entsprechend ihres Vorkommens in den verschiedenen Wasser- und Planktonschichten. Dieser Extrakt aus den Tab. 3.5 bis 3.7 berücksichtigt für jede Spezies nur die jeweils höchsten Zellkonzentrationen, deren Anzahl in der gesamten Wassersäule gleich 100 % gesetzt wurde. Durch dieses Verfahren soll für jede Art der Schwerpunkt ihrer Verteilung ermittelt werden. (Die in den einzelnen Schichten unterschiedliche Anzahl von Proben wurde durch eine Gewichtung ausgeglichen.)

Während im Kattegat kaum ein Unterschied besteht bezüglich der Artenverteilung zwischen den beiden biologischen und den beiden hydrographischen Schichten und im Bornholm Becken ein solcher Vergleich überhaupt nicht möglich ist, sind im Skagerrak einzelne Abweichungen vorhanden: z.B. finden wir das Maximum der häufigsten Art, *Thalassiosira nordenskioeldii*, hauptsächlich in der 3. Wasserschicht, aber zu gleichen Anteilen in der 2. und 3. Chlorophyllschicht. *Thalassionema nitzschioides* und *Gymnodinium simplex* haben ihr Konzentrationsmaximum vermutlich im unteren Teil der 2. Planktonschicht. Deutliche Schwerpunkte haben *Rhizosolenia delicatula* in der 1. und *Chaetoceros spec.* in der 3. Schicht, ohne jedoch ausschließlich auf diese Schichten beschränkt zu sein (vgl. Tab. 3.5).

Neben der Gruppe der Flagellaten, die in allen Wasserproben in mehr als 1 Mio. Zellen pro Liter auftritt, gibt es nur eine einzige Art, den Dinoflagellaten *Gymnodinium simplex*, die ebenfalls auf allen drei Driftstationen vorkommt (Tab. 3.16). Im Skagerak finden wir zwei "endemische" Arten,

die zentralen Diatomeen *Chaetoceros debilis* und *Chaetoceros spec.* , im Kattegat eine Art, *Aphanizomenon flos-aquae*, und bei Bornholm gleich vier Arten aus verschiedenen Gruppen, *Eutreptia lanowii*, *Actinocyclus crassus*, *Peridinium pellucidum* und *Oocystis pelagica*.

Tab. 3.14: SKAGERRAK, häufigste Phytoplanktonarten

Zellzahl [l <sup>-1</sup> ]	WASSERSCHICHTEN				PLANKTONSCHICHTEN				Art- Grup- Code pe*	Artname		
	1 (Häufigk. %)	2 (Häufigk. %)	3 (Häufigk. %)	4 (Häufigk. %)	1 (Häufigk. %)	2 (Häufigk. %)	3 (Häufigk. %)	4 (Häufigk. %)				
> 10 <sup>6</sup>	25	25	25	25	25	25	25	25	x x x x	36	FL	Flagellaten
< 10 <sup>6</sup>	18	27	55	0	*				*	69	CD	Thalassiosira nordenskiöldii
< 10 <sup>5</sup>	40	40	20	0	+	+	+	+		22	CD	Chaetoceros socialis
	28	41	31	0	+					16	CD	" debilis
	35	26	39	0	+					67	PD	Thalassionema nitzschioides
	21	32	47	0	+	+	+	+		38	DF	Gymnodinium simplex
	0	0	100	0	+				+	23	CD	Chaetoceros spec.
< 10 <sup>4</sup>	13	39	39	8	-	-	-	-		43	PD	Navicula spec.
	22	33	33	13	-	-	-	-		37	DF	Gymnodinium lohmannii
	0	0	24	76	-	-	-	-		4	DF	Amphidinium longum
	57	0	43	0	-	-	-	-		65	CD	Rhizosolenia setigera
	100	0	0	0	-	-	-	-		62	CD	" delicatula

\* CD = zentrische Diatomeen, PD = pennate Diatomeen, DF = Dinoflagellaten, FL = Flagellaten



Tab. 3.15: KATEGAT, häufigste Phytoplanktonarten

Zell- zahl [l <sup>-1</sup> ]	WASSERSCHICHTEN			PLANKTONSCHICHTEN			Art- Code	Grup- pe*	Artenname
	1 (Häufigk.%)	2 (Häufigk.%)	1 2 (Maximum)	1 (Häufigk.%)	2 (Häufigk.%)	1 2 (Maximum)			
> 10 <sup>6</sup>	50	50	x x	50	50	x x	36	FL	Flagellaten
< 10 <sup>6</sup>	100	0	*	100	0	*	69	CD	Thalassiosira nordenskiöldii
< 10 <sup>5</sup>	100	0	*	100	0	*	30	CD	Detonula confervacea
	57	43	+	63	38	+	38	DF	Gymnodinium simplex
	100	0	+	100	0	+	22	CD	Chaetoceros socialis
< 10 <sup>4</sup>	62	38	-	71	29	-	67	PD	Thalassionema nitzschioides
	100	0	-	100	0	-	65	CD	Rhizosolenia setigera
	100	0	-	100	0	-	43	PD	Navicula spec.
	70	30	-	100	0	-	37	DF	Gymnodinium lohmannii
	100	0	-	100	0	-	42	PD	Navicula vanhoeffenii
	100	0	-	100	0	-	62	CD	Rhizosolenia delicatula
	0	100	-	11	89	-	4	DF	Amphidinium longum
	0	100	-	33	67	-	6	CY	Aphanizomenon flos-aquae

\* CD = zentrische Diatomeen, PD = pennate Diatomeen, DF = Dinoflagellaten, FL = Flagellaten, CY = Cyanophyta

Tab. 3.16: BORNHOLM, häufigste Phytoplanktonarten

Zell- zahl [l <sup>-1</sup> ]	WASSERSCHICHTEN				Art- Code	Grup- pe*	Artname
	1 (Häufig- keit %)	2	1 (Maxim.)	2			
>10 <sup>6</sup>	50	50	x	x	36	FL	Flagellaten
<10 <sup>5</sup>	25	75		+	30	CD	Detonula confervacea
	18	82		+	38	DF	Gymnodinium simplex
<10 <sup>4</sup>	25	75		-	35	EU	Eutreptia lanowii
	0	100		-	42	PD	Navicula vanhoeffenii
<10 <sup>3</sup>	40	60		:	1	CD	Actinocyclus crassus
	0	100		:	57	DF	Peridinium pellucidum
	100	0		:	47	CL	Oocystis pelagica

\*CD = zentrische Diatomeen, PD = pennate Diatomeen, DF = Dinoflagellaten, FL = Flagellaten, EU = Euglenophyten, CL = Chlorophyten

Tab. 3.17: Vorkommen der häufigsten Phytoplanktonarten

SKA	KAT	BOR	Code	Gruppe*	Artname
+			16	CD	Chaetoceros debilis
+			23	CD	Chaetoceros spec.
*	*		69	CD	Thalassiosira nordenskiöldii
+	+		22	CD	Chaetoceros socialis
+	-		67	PD	Thalassionema nitzschioides
-	-		62	CD	Rhizosolenia delicatula
-	-		65	CD	Rhizosolenia setigera
-	-		43	PD	Navicula spec.
-	-		37	DF	Gymnodinium lohmannii
-	-		4	DF	Amphidinium longum
+	+	+	38	DF	Gymnodinium simplex
	-		6	CY	Aphanizomenon flos-aquae
	*	+	30	CD	Detonula confervacea
	-	-	42	PD	Navicula vanhoeffenii
		-	35	EU	Eutreptia lanowii
		:	1	CD	Actinocyclus crassus
		:	57	DF	Peridinium pellucidum
		:	47	CL	Oocystis pelagica

#### 4. Kapitel: Raum- und Zeitabhängigkeit der Wasser- und Phytoplanktonkörper

##### 4.1. Verfahren

Nach der ausführlichen Diskussion der zur Verfügung stehenden Daten im vorigen Kapitel<sup>a</sup> möchte ich nun versuchen zu entscheiden, ob die Bemühungen, während der Driftstationen - zumindest in der jeweils gewählten Drifftiefe - einen ungestörten einheitlichen Wasserkörper zu beobachten, erfolgreich waren oder nicht. Zur Beantwortung dieser Frage können mehrere qualitative Verfahren herangezogen werden: die Zeitreihen der T/S-Beziehung und der Integrale, sowie die Driftkörperversetzungen und die Änderungen in der Phytoplanktongemeinschaft, und ein quantitatives Verfahren, die Varianzanalyse der Variablen Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll in den einzelnen Wasserschichten.

Um festzustellen, welche der Phytoplanktonarten ihre Zellkonzentrationen in den Wasserschichten änderten im Verlauf der Driftstationen, habe ich die Zellzahlen der einzelnen Teilprobennahmen miteinander verglichen, z.B. für das Skagerrak die Stationsteile a, b und c. (Aus Platzgründen im Anhang 4. nur Größenklassen.) Es wurden nur solche Änderungen als Hinweis auf Advektionsvorgänge angesehen, die nicht durch das Zusammenwirken der folgenden Faktoren entstanden sein konnten: vertikale Variabilität, Vermehrung im Beobachtungszeitraum und Zählfehler. Der Wegfraß durch Zooplankton dürfte zu Beginn der Frühjahrsblüte vernachlässigbar sein. Die maximale Variabilität in jeder Wasserschicht wurde den mittleren Chlorophyllprofilen entnommen; die Vermehrungsrate wurde auf max. eine Teilung pro Tag geschätzt; die Zeitspanne zwischen den Probennahmen entnimmt man Anhang 6.1.; der Fehler der Utermöhlzählungen betrug etwa 20 %.

---

a Die generellen Unterschiede zwischen den 3 Stationen wurden schon in Kap. 3.3.3. herausgestellt. Hier soll jede Station für sich besprochen werden, da sie in ihren hydrographischen, biologischen und meteorologischen Gegebenheiten allzu verschieden sind, und auch die Beobachtungszeiträume in unterschiedliche Tagesabschnitte fallen.

Die Tab. 4.1. gibt einen Überblick über die Berechnung des Endfaktors aus seinen Komponenten. Die Zellkonzentration einer Phytoplanktonart wurde als "im Lagrangeschen Sinne unverändert" angesehen, wenn sie nach Multiplikation mit dem entsprechenden Endfaktor kleiner oder gleich der Zellkonzentration der nachfolgenden Probennahme war. Dieses "halbquantitative" Verfahren hat zwar offensichtlich einige Schwachstellen, bekommt aber dadurch zusätzliche Sicherheit, daß je Station rund ein Dutzend Phytoplanktonarten bewertet werden können.

(Im Skagerrak und Kattegat wurden alle Arten berücksichtigt mit Zellkonzentrationen  $> 1000 \text{ l}^{-1}$ , in Bornholm solche mit  $> 100 \text{ Zellen l}^{-1}$ . Da nur auf der Bornholm-Station die Wasserproben immer aus denselben Tiefen entnommen worden waren, mußte in den anderen Fällen interpoliert werden.)

Tab. 4.1.: Faktoren zur Berechnung der maximal zulässigen Variabilität der Phytoplanktonzellkonzentrationen unter Lagrangeschen Bedingungen (keine Advektion).

Zählfehler $\approx 20\%$ ; → Faktor 1 = 1.2		Vermehrungsrate $\approx 1/24$ h;				Wegfraßrate = 0;	
		SKAGERRAK		KATTEGAT		BORNHOLM	
Wasser-		1	2	3	4	1	2
schichten							
vertikale	s	2.3	1.8	1.7	0.9	2.3	1.4
Variabilität	x	2.0	4.3	3.2	1.6	3.4	1.5
[mg Chl m <sup>-3</sup> ]							
→ Faktor 2		2.15	1.42	1.53	1.56	1.68	1.93
							0.3 0.0
							1.4 0.0
							1.21 1.0
Zeitspanne [h]	a-b			13	13	1.5	1.5
zwischen	a-c	20	20	7	7	14	14
Teilstationen	b-c						
→ Faktor 3		1.78	1.78	1.57	1.57	1.05	1.05
				1.27	1.27	1.62	1.62
							14 14
							1.62 1.62
Endfaktor	a-b			2.88	2.94	2.12	2.44
	a-c	4.60	3.04			3.28	3.76
	b-c			2.34	2.39		
							2.36 1.95

s = max. Standardabweichung des mittleren Chlorophyllprofils (Kap. 3.2.2.)  
 x = dazugehörige Chlorophyllkonzentration; Faktor 2 = (s + x) / x  
 Faktor 3 = 2 (Zeit/24)

#### 4.2. Skagerrak

Nur in der oberen und in der unteren Schicht bleibt die T/S-Beziehung konstant. Sie ändert sich deutlich in den Tiefen zwischen 15 und 37 m, also auch im Bereich des Driftkörpers in 20 m.

Bei der Integration von 3 bis 61 m, über die oberen 4 Wasserkörper, fallen diese Änderungen in Temperatur und Salzgehalt offenbar nicht ins Gewicht, denn nur die Chlorophyllmenge ist mit der Zeit korreliert.

Der Drifter im 2. Wasserkörper zeigt dort mit ca.  $17 \text{ cm s}^{-1}$  eine etwa dreimal so hohe Geschwindigkeit an wie der im 4. Wasserkörper. Die Strömungsrichtungen waren in beiden Wasserkörpern bis ca.  $13^{\text{00}}$  nach Osten, danach bog der obere nach Nordost ab. Die übrigen Wasserkörper konnten nicht beobachtet werden; es ist aber zu vermuten, daß wegen des starken Windes die Strömung an der Oberfläche am stärksten war und mit der Tiefe in jeder Wasserschicht weiter abnahm.

Von den 12 häufigsten Phytoplanktern weist nur eine Art, *Chaetoceros diadema*, erhebliche Änderungen ihrer Zellkonzentrationen in den beiden oberen Wasserschichten auf. Da in diesen beiden schnellströmenden Schichten advective Prozesse nicht ausgeschlossen werden können (vgl. T/S-Zeitreihen), so ist vermutlich die Zusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaft im Skagerrak auch in solchen oberflächennahen Wasserkörpern recht einheitlich, die sich in ihrer T/S-Beziehung voneinander unterscheiden.

Unterhalb der Drifftiefe, in den tieferen, langsamer fließenden Wasserschichten, ändern sich etwa die Hälfte bis zwei Drittel der Phytoplanktonzellkonzentrationen (Tab.4.2). Bei der beobachteten hohen horizontalen Patchiness und verschiedenen Sinkgeschwindigkeiten der einzelnen Arten wäre dieser Befund zu erklären durch einen regional unterschiedlichen Nachschub abgesunkener Phytoplankter aus den oberen Wasserschichten.

Tab. 4.2: Skagerrak, Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen

Wasser- schicht (* Drifter)	P H Y T O P L A N K T O N - A R T E N (Zellkonz. > 1000 l <sup>-1</sup> , Code-Liste Anhang 4.4)											Anzahl der Arten				
	4	16	19	22	23	27	38	43	62	65	67	69	Σ	%		
1	4	16	19	22	23	27	38	43	62	65	67	69	1	11	8	92
*2	4	16	19	22	23	37	38	43	62	65	67	69	1	11	8	92
3	4	16	19	22	23	37	38	43	62	65	67	69	9	3	75	25
4	4	16	19	22	23	37	38	43	62	65	67	69	5	7	42	58

*kursiv: erhebliche Veränderungen, vermutlich durch Advektion*

gerade: Veränderungen im Rahmen der definierten Faktoren (Tab. 4.1)

#### 4.3. Kattegat

Die Abnahme des Salzgehaltes um ca.  $1.3 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$  in der homogenen Deckschicht läßt auf Advektionsvorgänge schließen, besonders in Anbetracht der hohen Strömungsgeschwindigkeit von  $27 \text{ cm s}^{-1}$ . Die über Ober- und Unterschicht, von 2.5 bis 25 m integrierten Meßgrößen Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll weisen zudem eine hohe Korrelation mit der Zeit auf, obwohl die T/S-Beziehung unterhalb 20 m konstant bleibt.

Die Strömungsgeschwindigkeit ist mit  $8 \text{ cm s}^{-1}$  in der Unterschicht jedoch etwa um ein Drittel niedriger, so daß bei etwa gleicher Strömungsrichtung die beiden Wasserkörper sich 14 km voneinander entfernten.

Die Wasserproben im Kattegat lassen eine Unterteilung der Deckschicht in zwei Schichten zu: Der Driftkörper befand sich im Bereich des homogenen oberen Teils 1a (Tab. 4.3); dort blieben die Zellkonzentrationen bei 9 von 11 Arten konstant. Darunter, im Teil 1b ( $z > 7 \text{ m}$ ) stieg die Dichte allmählich an, während die Strömungsgeschwindigkeit vermutlich in demselben Maße abnahm (vgl. Ankerstation Kattegat). In dieser Zone, wo die Chlorophyllkonzentration ihr Maximum erreicht, aber auch am stärksten variiert, bleiben die Zellkonzentrationen nur bei 4 von 11 Arten konstant, sie ändern sich bei zwei Drittel der Phytoplanktonpopulation (vgl. Chlorophyllisolines, Abb. 3.15).

In der bodennahen Wasserschicht ist das Verhältnis genau umgekehrt, zwei Drittel bleiben unverändert. Von diesen 7 unveränderten Konzentrationen sind aber 5 gleich Null, was besagt, daß diese Arten nicht durch den starken Dichtegradienten absinken konnten.



Tab. 4.3: Kattogat, Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen

Wasser- schicht (* Drifter)	P H Y T O P L A N K T O N - A R T E N (Zellkonz. > 1000 l <sup>-1</sup> , Codeliste Anh.4.4.)										Anzahl der Arten				
	4	22	30	37	38	42	43	62	65	67	69	verän- dert	Σ unver- ändert	verän- dert	% unver- ändert
a*	4	22	30	37	38	42	43	62	65	67	69	2 7	9 4	18 41 64	82 36
b	4	22	30	37	38	42	43	62	65	67	69	7	13	59	36
1	4	22	30	37	38	42	43	62	65	67	69	4	7	36	64
2	4	22	30	37	38	42	43	62	65	67	69	4	7	36	64

*kursiv: erhebliche Veränderungen, vermutlich durch Advektion*

gerade: Veränderungen im Rahmen der definierten Faktoren (Tab. 4.1)

1a\* oberer Teil der Deckschicht, mit Driftkörper

1b unterer Teil der Deckschicht, Beginn der Sprungschicht

Der Einfluß der Advektion ist also in den oberen 7 m am geringsten, aber dennoch nicht zu vernachlässigen. Die Abwärtsbewegungen der Chlorophyllisolinien (Abb. 3.15, 9<sup>45</sup>-16<sup>45</sup>) deute ich deshalb als Ausdruck advektiver Prozesse und nicht etwa als Fluoreszenzabnahme durch Lichtinhibition; gleich zwei solcher planktonarmer Wasserkörper sind im Skagerrak zu sehen, einer davon zur Nachtzeit (Abb. 3.13, 0<sup>00</sup>-8<sup>00</sup>, 10<sup>45</sup>-15<sup>30</sup>). Außerdem ist aus den Abb. 5.10 und 5.11 deutlich zu entnehmen, daß Vertikalverlagerungen der Dichteschichtung auch die Planktonschichten in demselben Maß erfassen.

Unterhalb von 7 m dominieren Eulersche Bedingungen. Die Zeitskala der Abb. 3.15 kann somit in eine räumliche überführt werden, um die Ausmaße der drei Phytoplanktonflecken mit Chlorophyllkonzentrationen zwischen 4 und 5 mg m<sup>-3</sup> in ca. 10 m Tiefe abzuschätzen (Tab. 4.5). Die Strömungsgeschwindigkeit in 10 m ( $v'_{10\text{ m}}$ ) kann - relativ zur Oberflächenströmung ( $v'_{3.5\text{ m}}$ ) - aus den beiden Driftgeschwindigkeiten ( $v_{3.5\text{ m}}$ ;  $v_{23.5\text{ m}}$ ) interpoliert werden. Die resultierenden horizontalen Patchlängen von ca. 140 bis >700 m sind 2-3 mal so groß wie auf der Ankerstation KAS (Tab. 3.12), dabei allerdings nur etwa halb so hoch.

Tab. 4.5: Größe von 3 Phytoplanktonflecken mit 4-5 mg Chl m<sup>-3</sup> in 10 m Tiefe. Die Länge wurde berechnet aus der KATTEGAT-Driftstation Zeitskala (Abb. 3.15) und der für 10 m interpolierten Stromgeschwindigkeit, relativ zum Oberflächenstrom ( $v'_{3.5\text{ m}}$ )

Fleck	1	2	3
Uhrzeit	ca.13 <sup>00</sup>	15 <sup>00</sup> -16 <sup>00</sup>	19 <sup>30</sup> -22 <sup>45</sup>
Zeit [min]	25	74	>222
$v_{3.5\text{ m}}$ [cm s <sup>-1</sup> ]	33.4	30.0	21.9
$v_{23.5\text{ m}}$ "	3.9	14.2	6.0
$v'_{3.5\text{ m}}$ "	0.0	0.0	0.0
$v'_{23.5}$ "	-29.5	-15.8	-15.9
$v'_{10\text{ m}}$ "	- 9.6	- 5.1	- 5.2
Länge [m]	142	227	> 694
Höhe	1.25	1.50	< 5.75

#### 4.4. Bornholm

Wegen der langsamen und unregelmäßigen Bewegungen des Oberflächendrifiers (20 m) und schlechter Sichtverhältnisse wurde der 2. Teil der Driftstation an einer festen geographischen Position durchgeführt. Die Bewegungen der unteren Wasserschichten wurden nicht registriert, weil dort kein Plankton zu finden war.

Die T/S-Beziehung bleibt in den oberen beiden Wasserkörpern konstant. Nennenswerte Änderungen erfolgen erst weit unterhalb der Planktonblüte und des Drifters, zwischen 60 und 65 m, wo Temperatur und Salzgehalt mit der Zeit abnehmen. Sie werden von den zwischen 3.1 und 72.4 m integrierten Werten von Salzgehalt und Temperatur mit erfaßt und korrelieren nur aus diesem Grund mit der Zeit; das integrierte Chlorophyll tut dies nicht.

Dennoch treten in der Zone zwischen 5 m und 20 m, also im Bereich des Drifters, zwei Phytoplanktonpatches auf (Abb. 3.17, 28.3.79, 22<sup>00</sup> und 29.3.79, 0<sup>00</sup>-5<sup>00</sup>), die in ihren Chlorophyllkonzentrationen um  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$  höher liegen als die homogene Umgebung mit  $1.0-1.5 \text{ mg m}^{-3}$ .

Diese größere Variabilität in der Drifttiefe ist auch in der Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen (Tab. 4.4) nachweisbar: dort ändern sich von den sieben Phytoplanktonarten mit mehr als 100 Zellen pro Liter drei Arten, darüber und darunter nur je zwei.

Die Proben aus der zweiten Wasserschicht (41-56 m) weisen eine bzw. zwei Änderungen auf.

Tab. 4.4: Bornholm, Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen

Wasser- schicht (* Drifter)	Tiefe [m]	Phytoplankton-Arten (Zellkonz. > 100 l <sup>-1</sup> , Codelliste Anhang 4.4.)						Anzahl der Arten %				
		1	30	35	38	42	47	57	veränd.	Σ unver.	veränd.	unver.
a.	7.2	1	30	35	38	42	47	57	2 } 5 } 29 } 71	7 } 4 } 14 } 33 } 67	3 } 4 } 14 } 33 } 67	2 } 5 } 29 } 71
1 b*	20.5	1	30	35	38	42	47	57	2 } 5 } 29 } 71	3 } 4 } 14 } 33 } 67	3 } 4 } 14 } 33 } 67	2 } 5 } 29 } 71
c	30.8	1	30	35	38	42	47	57	2 } 5 } 29 } 71	3 } 4 } 14 } 33 } 67	3 } 4 } 14 } 33 } 67	2 } 5 } 29 } 71
a	46.6	1	30	35	38	42	47	57	1 } 6 } 14 } 86	3 } 5 } 29 } 71	3 } 5 } 29 } 71	1 } 6 } 14 } 86
2	54.6	1	30	35	38	42	47	57	1 } 6 } 14 } 86	3 } 5 } 29 } 71	3 } 5 } 29 } 71	1 } 6 } 14 } 86

*kursiv: erhebliche Veränderungen, vermutlich durch Advektion*  
 gerade: Veränderungen im Rahmen der definierten Faktoren (Tab. 4.1)

#### 4.5. Zusammenfassende Diskussion

##### 4.5.1. Größe von Phytoplanktonpatches

In dieser Arbeit bin ich von der verbreiteten Hypothese ausgegangen, daß wegen der vergleichsweise geringen Eigenbeweglichkeit des Phytoplanktons im allgemeinen die hydrographischen Vorgänge im Meer den größten Einfluß auf die Phytoplanktonverteilung haben.

Nakata und Ishikawa (1975) und Powell et al. (1975) haben Fluktuationen in Zeitreihen der Chlorophyllkonzentration und der Strömungsgeschwindigkeit spektralanalytisch miteinander verglichen und festgestellt, daß auf Längenskalen unterhalb 100 m im Energiedichtespektrum beide Parameter dem  $-5/3$ -Gesetz (Kolmogorov, 1941) folgten. Erst ab einer Größe von ca. 100 m an aufwärts waren Phytoplanktonpatches unabhängig von turbulenten Prozessen.

Anhand des vorliegenden Datenmaterials kann die Größe von Phytoplanktonpatches direkt ermittelt werden aus den Isolinienendarstellungen der Chlorophyllprofilserien. Durch die Auswahl der Isolinien in Schritten von 1.0 (bzw. 0.5) mg Chl  $m^{-3}$  ist dieses Verfahren sicherlich etwas willkürlich. Es erscheint mir jedoch erlaubt angesichts des gleitenden Übergangs zwischen Turbulenzabhängigkeit und -unabhängigkeit.

Die so gefundenen Patchgrößen decken sich durchaus mit den Angaben in der Literatur:

Die auf der Ankerstation Kattegat in ca. 10 m Tiefe beobachteten Chlorophyllflecken hatten Längen zwischen 60 und >200 m (Höhe ca. 4 m; 3-4 mg Chl  $m^{-3}$ ; vgl. Kap. 3.3.2., Tab. 3.12).

Auch auf der Driftstation Kattegat lassen sich die Größen von drei Chlorophyllflecken, ebenfalls in 10 m Tiefe, abschätzen: sie liegen zwischen 140 und >700 m (Höhe ca. 1.50 m; 4-5 mg Chl  $m^{-3}$ ; vgl. Kap. 4.3., Tab. 4.5).

Selbst im turbulenzunabhängigen Skalenbereich muß die Wachstumsrate der Phytoplankter innerhalb eines Patches ausreichend hoch sein, um den Konzentrationsverlust durch Diffusion an die Umgebung auszugleichen (Kierstead und Slobodkin, 1953; Skellam, 1951). Die Länge des Patches muß dazu einen unteren Schwellenwert  $L_c$  überschreiten, der sich für den ein-dimensionalen Fall berechnet nach:

$$(1) L_c = \pi * (D_h/a)^{1/2}$$

$L_c$  = kritische Länge [L]  
 $\pi$  = 3.1416  
 $D_h$  = horizontale Diffusion [ $L^2T^{-1}$ ]  
 $a$  = Wachstumsrate [ $T^{-1}$ ]

Im zweidimensionalen Fall gilt für die kritische Höhe  $H_c$ :

$$(2) H_c = \gamma * (D_v/a)^{1/2}$$

$H_c$  = kritische Höhe [L]  
 $D_v$  = vertikale Diffusion [ $L^2T^{-1}$ ]  
 $\gamma$  = 4.8096

In beiden Fällen wird das Fließgleichgewicht erreicht nach der Zeit  $T_c$ :

$$(3) T_c = L_c^2 / (8 * \pi^2 * D) \quad T_c = \text{kritische Zeit [T]}$$

Dieses "KISS"-Modell (Bezeichnung nach Okubo, 1980, aus den Anfangsbuchstaben der Urheber) wurde von mehreren Autoren aufgegriffen (z.B. Platt und Denman, 1975a; Wroblewski et al., 1975) und z.B. für den Effekt des Zooplanktongrazing erweitert, der hier vernachlässigt werden soll.

Diffusionskoeffizienten können beträchtlich variieren (Schweimer, 1978). Kullenberg (1974b) hat in verschiedenen Seegebieten, u.a. auch im Kattegat, Koeffizienten berechnet für verschiedene hydrographische Situationen, die durch die Väisäläfrequenz, Richardsonzahl, Windgeschwindigkeit und Stromscherung charakterisiert sind. Der vertikale Diffusionskoeffizient  $D_v$  liegt dabei zwischen  $0.04$  und  $60 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Horizontale Koeffizienten variieren noch stärker. Als Anhaltspunkt mag

$D_h \approx 10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  gelten (Okubo, 1971) für eine Längenskala von 100 m.

Da aus unserem Datenmaterial weder Wachstumsraten noch Diffusionskoeffizienten unmittelbar hervorgehen zur Berechnung kritischer Patchgrößen, sollen hier zum Vergleich aus den "KISS"-Formeln Diffusionskoeffizienten für drei verschiedene Wachstumsraten berechnet werden (Tab. 4.6, 4.7). Dies geschieht unter der Annahme, die beobachteten Phytoplanktonpatches befänden sich im Gleichgewicht mit ihrer Umgebung (nach der Zeit  $T_c$ ) und ihre Maße entsprächen lokalen Werten der kritischen Größen  $L_c$  und  $H_c$ .

Die Ergebnisse liegen größenordnungsmäßig im Rahmen der Literaturwerte. Unter der Annahme einer Wachstumsrate von 1 Teilung pro Tag liegt die kritische Patchlänge im Kattegat vermutlich bei ca. 300 m. Nur eine längere Beobachtung der kleineren Patches (mittlere Lebensdauer) könnte zeigen, ob auch diese sich gegen die Austauschprozesse behaupten können.

Die vertikale Diffusion hängt sehr stark ab vom Dichtegradienten und von der Stromscherung, die in 10 m Tiefe auf der Ankerstation ca.  $2.1 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  betrug und auf der Driftstation zwischen  $1.6$  und  $3.0 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Unter den im Kattegat vorherrschenden Verhältnissen ist der vertikale Austauschkoeffizient um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als der horizontale. Dies führt dazu, daß die räumliche Heterogenität der Chlorophyllverteilung vertikal sehr viel größer ist als horizontal und auch eine längere Zeit zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes braucht.

#### 4.5.2. Hypothetische Entwicklung eines Phytoplanktonpatches

Während das KISS-Modell von der Voraussetzung ausgeht, daß die Phytoplankter außerhalb ihres Patches nicht überleben können, betrachten wir hier solche Patches, die sich nur durch eine gegenüber der Umgebung höhere Chlorophyllkonzentration

Tab. 4.6: Horizontale Diffusionskoeffizienten  $D_h$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ] im Kattegat, berechnet für die min. und max. Phytoplanktonpatchlängen

Wachstumsraten $a$ [ $\text{Tag}^{-1}$ ]	K A T T E G A T			Gleichgewicht Zeit $T_c$ [h]
	Ankerstation Phytoplanktonpatchlänge 61	Dauerstation Phytoplanktonpatchlänge >212	Dauerstation $L_c$ [m] 142	
0.5	$2.2 \cdot 10^1$	$>2.6 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^2$	$>2.8 \cdot 10^3$ 6.0
1.0	$4.3 \cdot 10^1$	$>5.3 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^2$	$>5.6 \cdot 10^3$ 3.0
2.0	$8.7 \cdot 10^1$	$>1.1 \cdot 10^3$	$4.7 \cdot 10^2$	$>1.1 \cdot 10^4$ 1.5
$D_h = L_c^2 * a / \pi^2 \quad T_c = L_c^2 / (8\pi^2 * D_h)$ (Kierstead und Slobodkin, 1953)				

Tab. 4.7: Vertikale Diffusionskoeffizienten  $D_v$  [ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ] im Kattegat, berechnet für die min. und max. Phytoplanktonpatchhöhen

Wachstumsraten $a$ [ $\text{Tag}^{-1}$ ]	K A T T E G A T			Gleichgewicht Zeit $T_c$ [h]
	Ankerstation Phytoplanktonpatchhöhe 3	Dauerstation Phytoplanktonpatchhöhe 13	Dauerstation $H_c$ [m] 1.25	
0.5	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-1}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$<8.3 \cdot 10^{-2}$ 14
1.0	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$8.5 \cdot 10^{-1}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$<1.7 \cdot 10^{-1}$ 7
2.0	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^0$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$<3.3 \cdot 10^{-1}$ 3.5
$D_v = H_c^2 * a / 23.13 : T_c = H_c^2 / (8\pi^2 * D_v)$ (Kierstead und Slobodkin, 1953)				



auszeichnen. Scharfabgegrenzte Patches bestehend aus Arten mit denselben Lebensansprüchen und derselben ökologischen Toleranz in einer planktonfreien Umgebung und sind vermutlich in der Natur nicht zu finden. Auch nicht zu Beginn der Frühjahrsblüte (Abb. 4.1, A), wenn ein Patch - ausgehend von wenigen "zum Leben erwachten" Planktonzellen - unter günstigen Lebensbedingungen durch ein exponentielles Wachstum expandiert (B). Zunächst wird er, bis die kritische Größe erreicht ist, sehr viel Material an die Umgebung abgeben (C). Dies geschieht besonders stark horizontal wegen des in dieser Ebene höheren Austausches; in Anwesenheit eines starken Dichtegradienten (oder sonst durch Lichtmangel) wird die Ausbreitung auch nach unten hin begrenzt, so daß zum Schluß ein Patch eingebettet ist in relativ homogene Planktonschichten (D).

Dies ist natürlich eine idealisierte Darstellung, die in der Natur durch die Überlagerung der verschiedensten Prozesse modifiziert wird, z.B. durch interne Grenzflächenwellen, Advektion, meteorologische Ereignisse, durch das Vorhandensein mehrerer Planktonarten mit unterschiedlichen Wachstumsraten und Lebensansprüchen, durch Verschmelzen benachbarter Patches, durch Zooplanktonaktivität und Nährstofflimitation. Aus diesem Grund ist eine ungestörte langfristige Beobachtung eines Phytoplanktonpatches nur unter sehr günstigen Bedingungen denkbar.

In Abhängigkeit von der Länge und der kleinräumig-horizontalen Heterogenität eines Patches können Vertikalprofile der Chlorophyllverteilung u.U. eine zu hohe Variabilität vortäuschen, die nur durch eine geringfügige Verschiebung des Meßortes verursacht wird. Die so entstandene "Patchiness" ist in Wirklichkeit eine Meßunsicherheit, die nur durch eine Mittelung bzw. Glättung der Profile beseitigt werden kann (vgl. Kap. 5).

Das beste Meßverfahren wäre m.E. die Markierung eines Phytoplanktonpatches mit einem Fluoreszenzfarbstoff und eine anschließende großflächige Dauerregistrierung des umgebenden

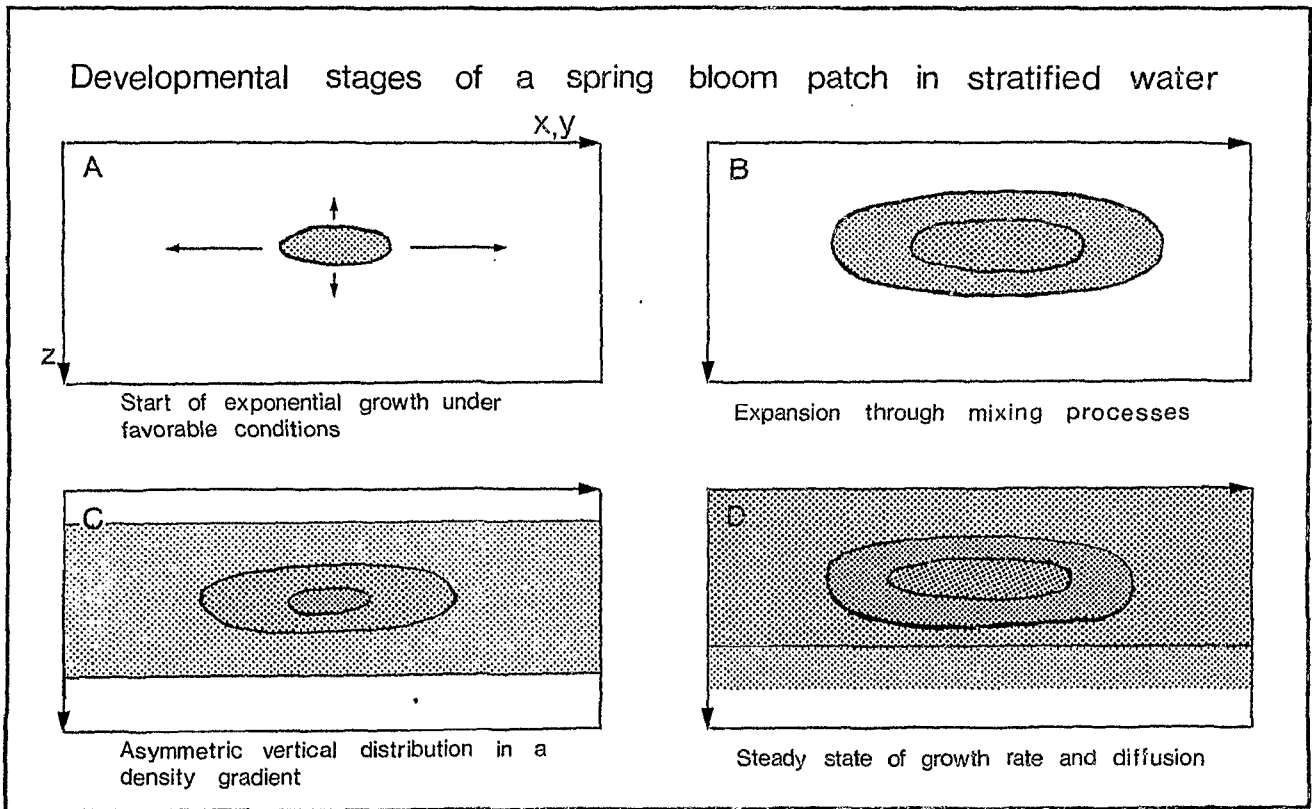


Abb. 4.1: Entwicklung der Frühjahrsblüte in geschichtetem Wasser (Hypothetische Rekonstruktion aus den bisherigen Ergebnissen, Erklärungen im Text)

Wasserkörpers mit zwei Fluoreszenzsonden auf einem Batfish. Vielleicht könnte man auf diese Weise die Entwicklung einer Planktonblüte über einen längeren Zeitraum verfolgen, den ich für die in Abb. 4.1 angedeuteten Stadien auf ca. 1 Woche beziffern würde.

#### 4.5.3. Raum- und Zeitabhängigkeit

Wir haben gesehen, daß bei dem Versuch, die zeitliche Entwicklung eines Phytoplanktonpatches ungestört in situ verfolgen zu können, weder der Wasserkörper noch der Phytoplanktonpatch durch advektive Prozesse beeinträchtigt werden dürfen (Kap. 4.1. ff.). Im Idealfall sollte sich der T/S-Bereich des jeweiligen Wasserkörpers während des Untersuchungszeitraumes nicht ändern, und er sollte am besten mit Hilfe der Toleranzgrenzen seiner Planktonbewohner definiert werden, was aber in der Praxis (überlappende Bereiche einer Mischpopulation mit unterschiedlichen physiologischen Zuständen) nur schwer zu realisieren ist. Im übrigen ist ein Wasserkörper ja schon durch seine spezielle Planktonpopulation - solange sie sich so passiv verhält wie z.B. ein Farbstoff - besser gekennzeichnet als durch seine T/S-Charakteristik.

Die Tabelle 4.8 faßt die Ergebnisse der in den Kap. 4.2.-4.4. erörterten Untersuchungsmethoden zusammen in einer Gesamtbeurteilung des Einflusses der Advektion auf Wasserkörper und Planktongemeinschaften, und zwar getrennt für die Drifttiefen und den restlichen Tiefenbereich.<sup>a</sup> Danach erscheinen die hydrographisch unruhigen Gebiete Skagerrak und Kattegat unter den gegebenen Umständen und für die behandelte Fragestellung als ungeeignet.

---

a Die Ergebnisse einer Varianzanalyse zum Vergleich der zeitlichen Schwankungen von Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll mit dem Gesamtmittel und der Gesamtvarianz in den einzelnen Wasserschichten bestätigen die übrigen Befunde und werden deshalb hier nicht noch zusätzlich angeführt.

Tab. 4.8: Beurteilung des Advektionseinflusses auf den Driftstationen

	keine Änderung: -		Advektion: +	
	Wasserkörper		Phytoplanktongemeinschaft	
	Drift tiefe	sonstige Tiefen	Drifttiefe	sonstige Tiefen
Skagerrak	++	-	+	++
Kattegat	+	-	+	++
Bornholm	-	+	++	+

Allein im Bornholm Becken hätte bei etwas besserem Wetter eine 100 %ig zeitorientierte Profilserie zustande kommen können. Womöglich sind auch die beiden in der Abb. 3.17 getrennt erscheinenden Phytoplanktonpatches (21<sup>45</sup> und 0<sup>00</sup>-4<sup>45</sup>) in Wirklichkeit nur ein einziger, der im Zeitverlauf von der Multisonde an unterschiedlichen räumlichen Stellen getroffen wurde. Eine längerfristige Untersuchung mit dem Ziel, die zeitliche Entwicklung eines Patches zu registrieren, könnte bei günstigem Wetter in diesem Gebiet Erfolg haben (vgl. Kap. 4.5.2.).

In der Abb. 4.2 wurde der Versuch unternommen, den Anteil der räumlich bzw. zeitlich bedingten Heterogenität in den Isoliniendarstellungen der Chlorophyll-Profilzeitreihen anhand der bisherigen Befunde abzuschätzen.

Für die Ankerstation Kattegat (A) wird unter der Annahme der Taylorschen "frozen pattern"-Theorie (Tennekes und Lumley, 1972) eine 100 %ig räumliche Heterogenität angenommen.

Das Gegenstück von 100 %ig zeitlicher Heterogenität steht uns nicht als Meßergebnis zur Verfügung, sondern muß als hypothetisches Schema (B) konstruiert werden. Dargestellt ist die Entstehung eines Phytoplanktonpatches, bis zum Stadium "B" (vgl. Abb. 4.1), kurz bevor die kritische Größe erreicht wird.

Die prozentmäßige Einstufung der drei Driftstationen ist selbstverständlich nur eine grobe Abschätzung, wie sie mir aber aus den Resultaten der Kap. 4.2. bis 4.4. plausibel erscheint.

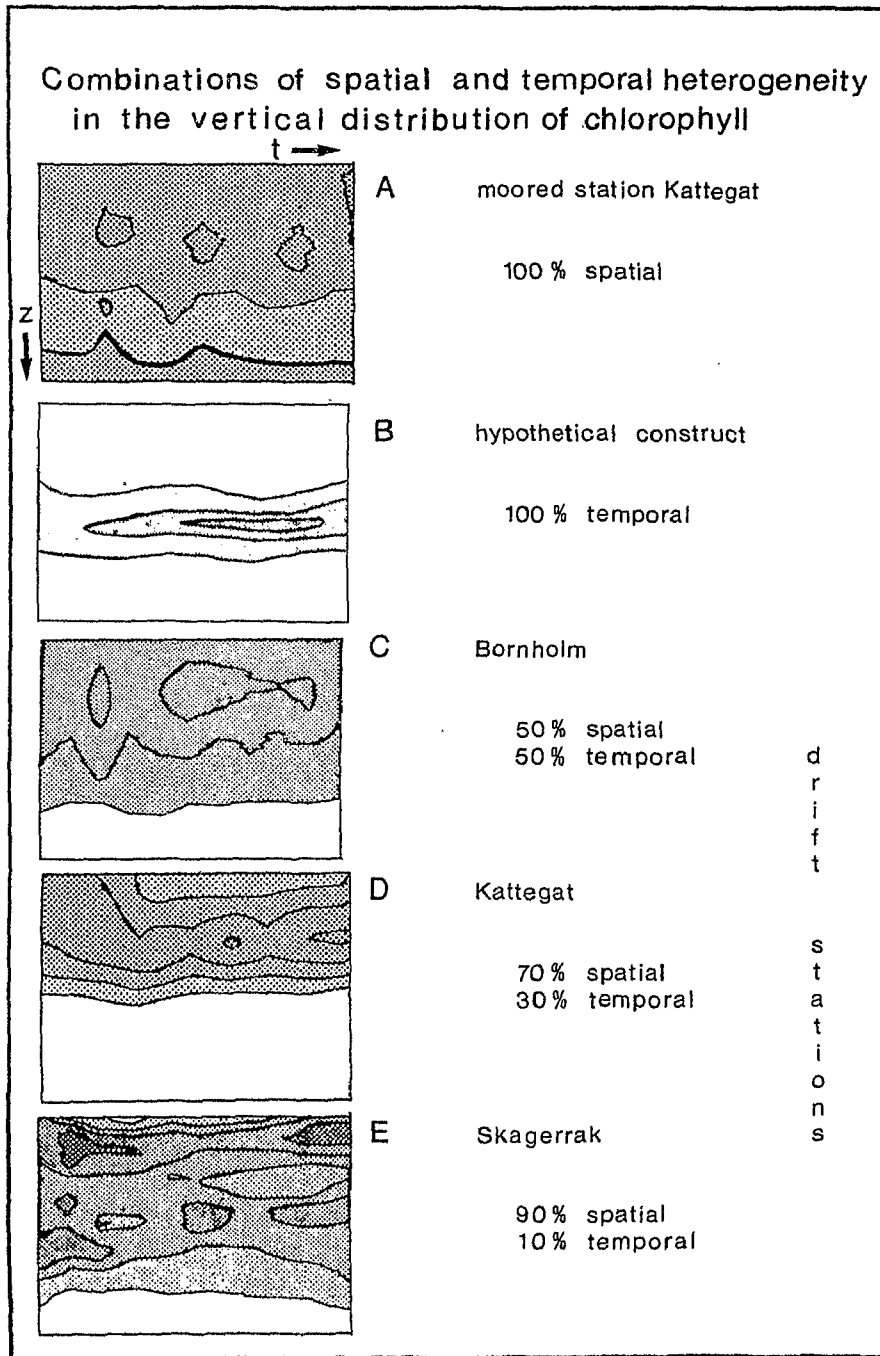


Abb. 4.2: Grobe Abschätzung der Anteile räumlicher und zeitlicher Heterogenität in den Chlorophyllisolinen der Driftstationen (vgl. Abb. 3.13d, 3.15d, 3.17d, 3.19)

## 5. Kapitel: Die Phytoplanktonschichtung

In diesem Kapitel werden einige Themen besprochen, bei denen der üblicherweise störende Einfluß von Advektionsvorgängen keine Bedeutung hat. In diesem Sinne sind die abgebildeten Profilserien zwar zeitlich angeordnet, sollen aber keine kontinuierliche Entwicklung dokumentieren.

### 5.1. Kleinräumig-horizontale Patchiness

Es wurde schon erwähnt (Kap. 3.2.3.), daß die Chlorophylloriginalprofile stark voneinander abweichen. In den Abbildungen des 3. Kapitels ist dies wegen der Überlappung der Einzelprofile nicht im Detail zu erkennen, wohl aber in der Abb. 5.1, die exemplarisch einen Ausschnitt von 5 Originalprofilen der Kattegat-Driftstation wiedergibt. (Dieser "Burst" wurde in den Stundenmitteln (Abb. 3.14b) zu Profil Nr. 7 zusammengefaßt.)

Die kleinskaligen Strukturen der Chlorophyllprofile in Abb. 5.1 erinnern an ähnliche Strukturen in der Wasserschichtung ("sheets", Woods und Wiley, 1972; Kullenberg, 1974a).

Sie sollen hier "Chlorophyllpeaks" genannt werden, zur Abgrenzung gegenüber den dickeren Schichten ("layers"). Keine dieser Strukturen kann mit Sicherheit vom ersten bis zum letzten Profil eines Bursts verfolgt werden, da sich sowohl die lokalen Maximalkonzentrationen, als auch die Dicken und die Tiefenlagen ändern.

Im Zusammenhang mit Labortests der Fluoreszenzsonde (Astheimer und Haardt, in Vorber.) ergibt sich, daß diese hohe Variabilität im vorliegenden Fall (Fiergeschwindigkeit =  $0.4 \text{ m s}^{-1}$ ) sowohl durch das kleine Meßvolumen der Sonde bedingt ist (für Peakdicken  $< 0.4 \text{ m}$  mit  $< 4$  Meßwerten), als auch durch eine hohe horizontale Patchiness des Phytoplanktons (für Peakdicken  $> 1.0 \text{ m}$  mit  $> 10$  Meßwerten).

Die vertikalen Peakdicken wurden aus den Tiefen- bzw. Druckunterschieden zwischen lokalen Minima der Chlorophyllkonzentration bestimmt und für die Profile der Abb. 5.1 in der Tab. 5.1 aufgelistet. Die mittlere Dicke beträgt etwa 1 m.

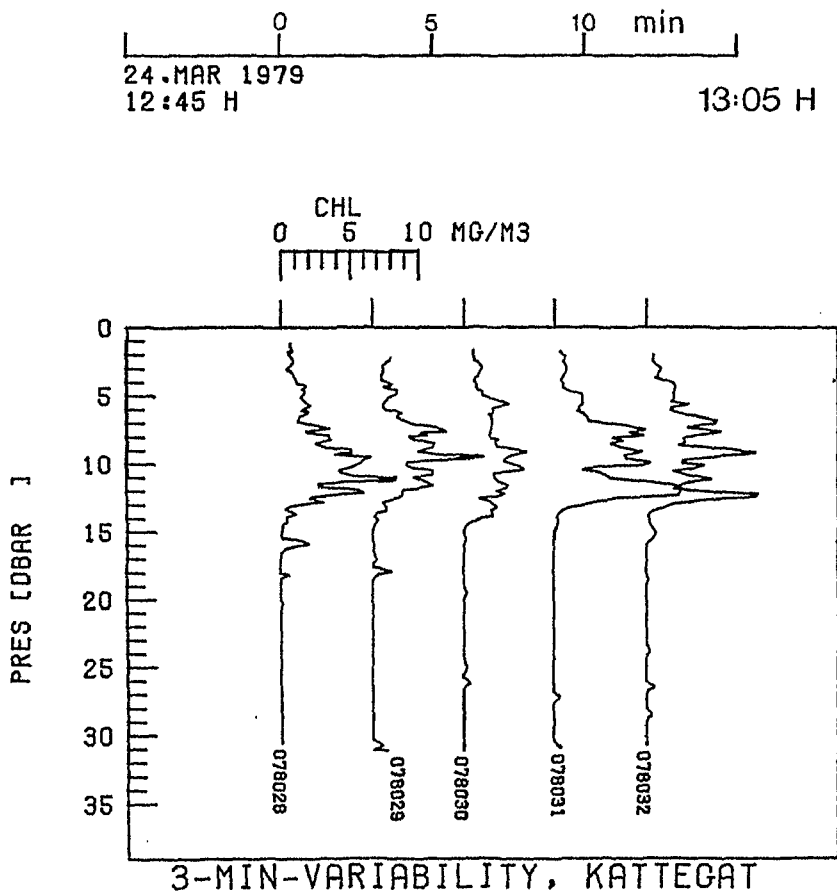


Abb. 5.1: Kleinräumig-horizontale Variabilität der Chlorophyllschichtung in den Originalprofilen der Kattegat-Driftstation

Tab. 5.1: Chlorophyll-Schichtdicken in den Originalprofilen an einem Beispiel der KATTEGAT-Driftstation (Abb. 5.1)

	SCHICHTDICKEN $\Delta p$ [dbar]				
	Profilnummern der Kattegat-Driftstation 078				
Peak Nr.	028	029	030	031	032
1	1.2	0.6	1.2	1.4	1.2
2	0.4	1.4	1.2	0.4	1.8
3	0.6	0.8	1.2	1.6	0.6
4	1.0	1.4	0.8	0.8	1.2
5	0.4	1.2	1.4	0.4	0.8
6	0.8	1.0	0.6	0.4	0.6
7	1.0	1.0	0.8	0.8	1.2
8	0.8	1.0	1.4	1.0	0.8
9	1.2	1.2	0.8	3.6	1.4
10	1.2	1.0	0.8	0.8	2.0
11	1.0		1.2	0.8	2.4
12	0.8		0.8		0.6
13	0.6				0.8
14	0.4				0.8
15	1.2				0.6
16	0.4				
17	0.2				
Mittel	0.776	1.060	1.017	1.091	1.120
Std. abw.	$\pm$ 0.338	$\pm$ 0.250	$\pm$ 0.276	$\pm$ 0.918	$\pm$ 0.565

Gesamtmittel:  $\Delta p = 1.013$  dbar



## 5.2. Zeitreihen der kleinräumig-horizontalen Patchiness

Als Maß für die kleinräumig-horizontale Patchiness, wie sie in den Originalprofilen eines Bursts zum Ausdruck kommt, kann die Standardabweichung der Chlorophyllkonzentration ("SCHL") verwendet werden. Sie wurde - genau wie die mittleren stündlichen Profile (z.B. Abb. 3.14b) - für Druckintervalle von 0.5 dbar berechnet (vgl. Kap. 3.2.3.) und in den Abb. 5.2 bis 5.5 tiefenabhängig dargestellt ("SD-Profile").

Genaugenommen ist in den SD-Profilen der Driftstationen auch ein Anteil vertikaler Variabilität enthalten, da die Auflösung der Originalprofile mit 0.1 - 0.2 dbar höher ist als das Mittelungsintervall. Von den 5 - 6 Originalprofilen eines Bursts fallen deshalb in jedes 0.5 dbar-Intervall meist mehr als nur die 5 - 6 "Horizontalwerte". Aus diesem Grund wurden zum Vergleich die 15 Originalprofile der Kattegat-Ankerstation einzeln nach derselben Methode behandelt. Da hier kein Burstsampling durchgeführt worden war, geben diese SD-Profile (Abb. 5.5) ausschließlich den Grad der vertikalen Patchiness (im Bereich  $\leq 0.5$  dbar) wieder. Die höchsten Chlorophyllschwankungen liegen hier bei  $0.7 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-3}$ , in einer Tiefe von  $19 \pm 4 \text{ m}$ .

Außer im Bornholmgebiet, wo die horizontale Patchiness (Abb. 5.4) sehr gering ist, liegt sie auf den beiden anderen Driftstationen bei höheren Chlorophyllkonzentrationen auch deutlich höher: Im Skagerrak, meist in Tiefen unter 10 m, beträgt sie im Mittel höchstens  $1.8 \pm 0.3 \text{ mg Chl m}^{-3}$ , im Kattegat, in etwa  $11 \pm 3 \text{ m}$  Tiefe bei maximal  $1.7 \pm 0.5 \text{ mg Chl m}^{-3}$ .

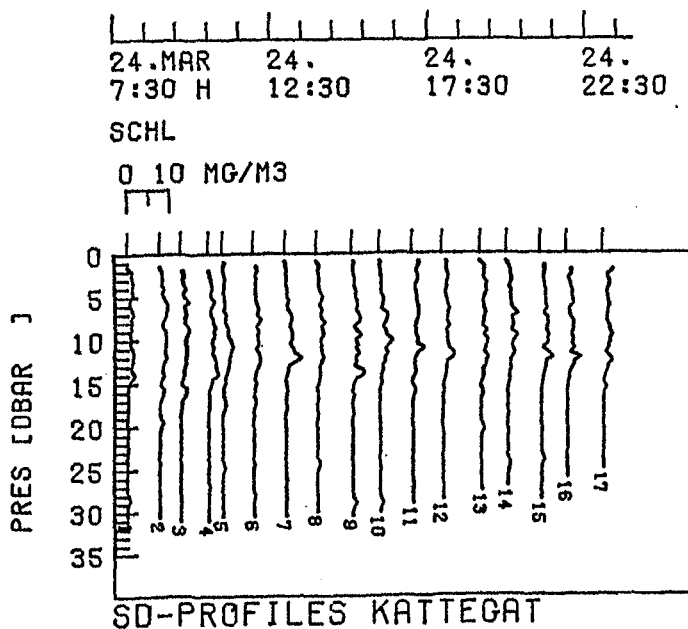
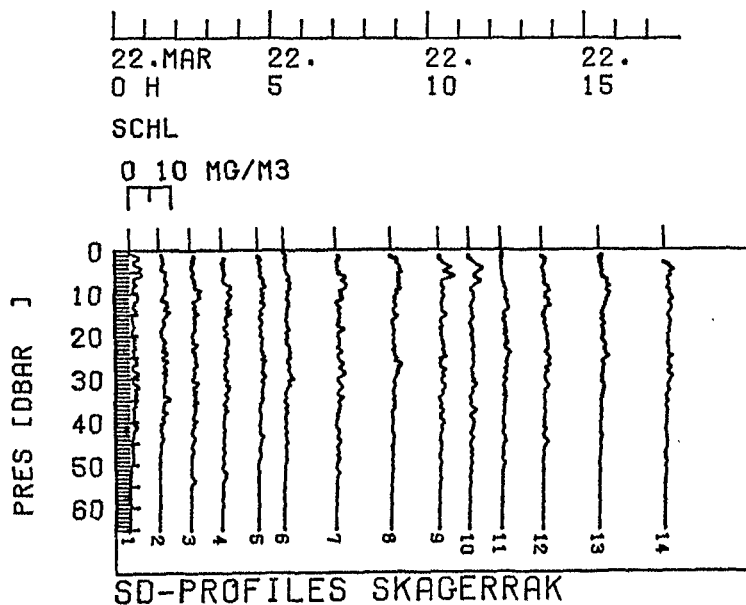


Abb. 5.2: SKAGERRAK Kleinräumig-horizontale Patchiness, dargestellt als Standardabweichung (SD) der Originalprofile eines Bursts,  $\Delta p = 0.5$  dbar  
Abb. 5.3: KATTEGAT

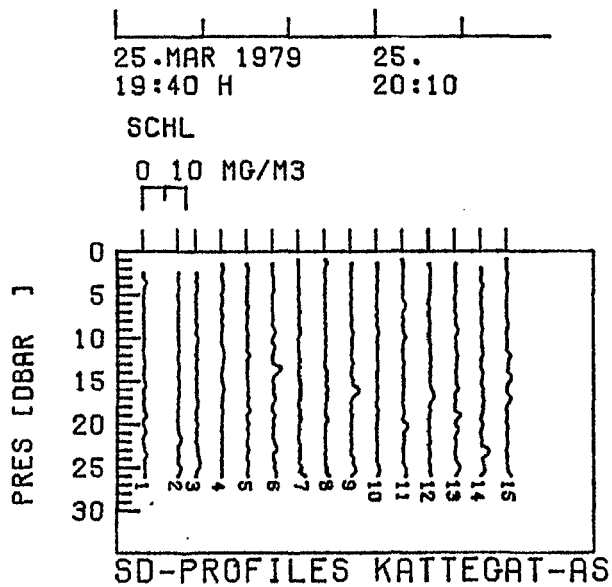
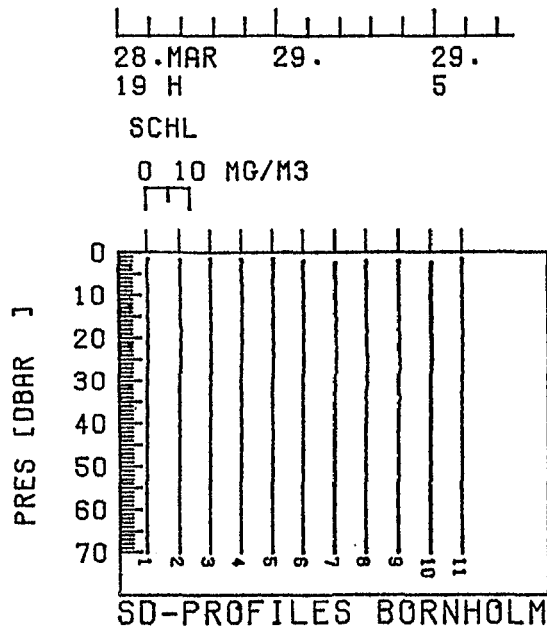


Abb. 5.4: BORNHOLM Kleinräumig-horizontale Patchiness,  
Abb. 5.5: KATTEGAT-AS dargestellt als Standardabweichung  
(SD) der Originalprofile eines Bursts,  
 $\Delta p = 0.5$  dbar

### 5.3. Lage der Phytoplanktonschichten im Dichtefeld

Aus den mittleren Profilen der Driftstationen (Kap. 3.2.2.) war schon ersichtlich, daß lokale Chlorophyllansammlungen vor allem in starken Dichtegradienten entstehen (Skagerrak, Kattegat), da hier das Absinken des Phytoplanktons verlangsamt wird. Die Veränderlichkeit der Wasserschichtung - und damit auch der Phytoplanktonschichtung - im Verlauf der Multisondenmessungen veranschaulichen die Abb. 5.10 und 5.11. Hier wurden die mittleren stündlichen Chlorophyllprofile (Abb. 3.13c, 3.15c) kombiniert mit den Dichte-Isolinien (Anhang 5.1, 5.2). Zum Vergleich sind darunter noch einmal die Chlorophyll-Isolinien (Abb. 3.13d, 3.15d) abgebildet.

#### Skagerrak (Abb. 5.10, Tab. 5.2)

Die Grenzen zwischen den vier in der Tab. 3.3 (S. 42) definierten Wasserschichten werden in etwa durch die  $\sigma_t$ -Isolinien 24.5, 25.5 und 26.5 gekennzeichnet. (Erstere verläuft in ca. 10 m Tiefe genau durch die Mitten der drei Phytoplanktonpatches von 4-5 mg Chl  $m^{-3}$ .)

In den oberen 15 m verlaufen die Isolinien von Chlorophyll und  $\sigma_t$  annähernd parallel zueinander. Dies ist besonders gut zu beobachten am Beispiel der beiden "Linsen" leichten und chlorophyllarmen Wassers zwischen 0<sup>00</sup>-8<sup>00</sup> und 10<sup>45</sup>-15<sup>30</sup> Uhr.

Bis zu einer Tiefe von ca. 35 m laufen die  $\sigma_t$ -Isolinien parallel zueinander, in den größeren Wassertiefen ( $\sigma_t \geq 27$ ) schwingt die Schichtung gegenläufig zur Oberfläche. Die Minimal- und Maximaltiefen der Dichteschichten sind in der Tab. 5.2 enthalten. Die maximale Auslenkung im Bereich der Drifttiefe liegt bei ca. 4.5 m.

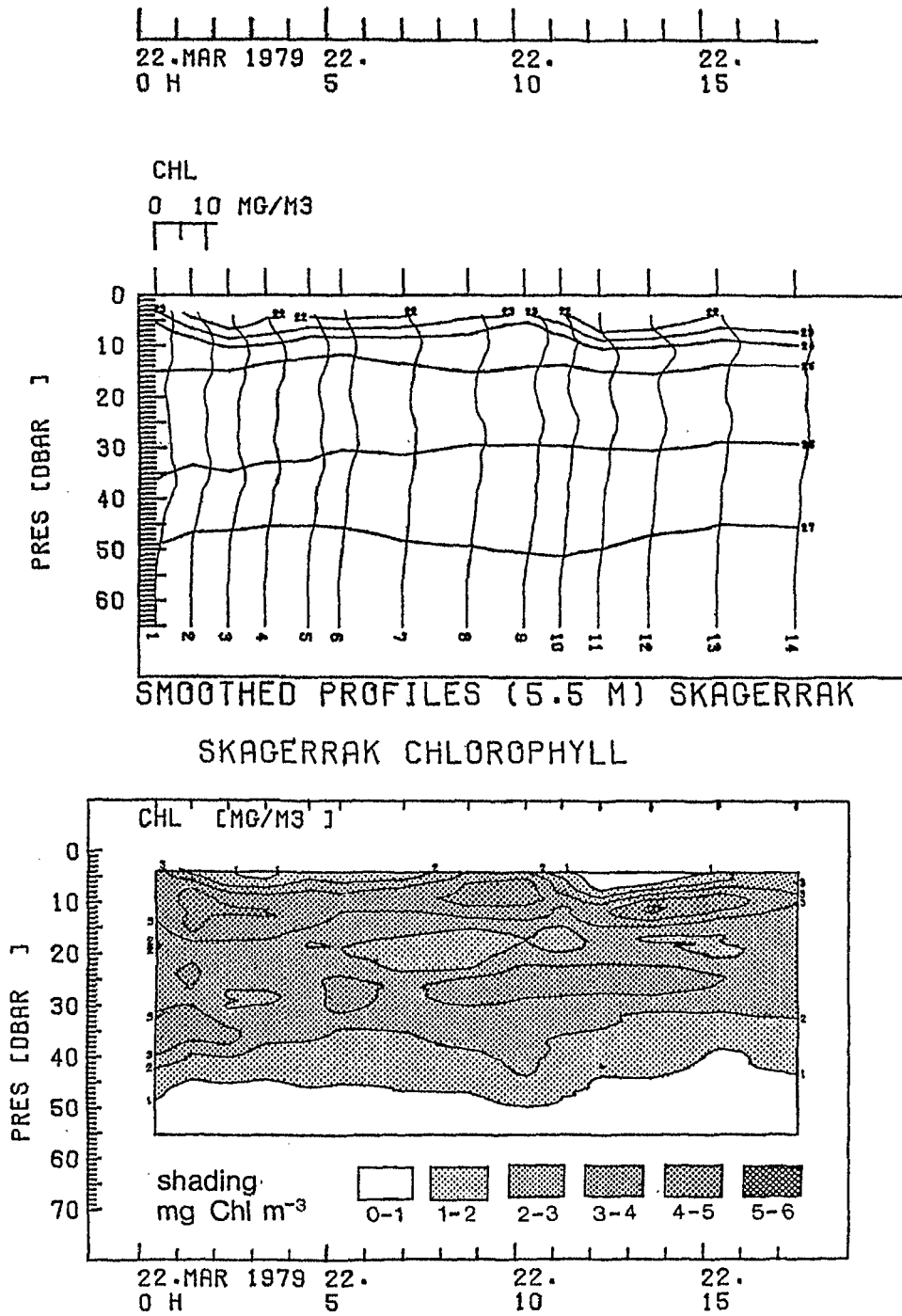


Abb. 5.10: SKAGERRAK Lage der Chlorophyllschichten im Dichtefeld (Geglättete Chlorophyllprofile und Sigma-t-Isolinien)

Tab. 5.2 Tiefenlage [m] der  $\sigma_t$ -Isolinien im Skagerrak

$\sigma_t$	$z_{\min}$	$z_{\max}$	$\Delta z$
22	4	7	3
23	4	8.5	4.5
24	5.5	10	4.5
25	12	15	3
26	29	36	7
27	44.5	51	6.5

$z_{\min}$  = Minimaltiefe

$z_{\max}$  = Maximaltiefe

$\Delta z$  = max. Auslenkung

Kattegat (Abb. 5.11, Tab. 5.3)

Die Isolinie von  $\sigma_t = 22$  bildet die Mitte der Sprungschicht (vgl. Tab. 3.3, S. 42) im stark geschichteten Wasser des Kattegat. Sie verläuft in ca. 13 m Tiefe in der Phytoplanktonschicht mit 2-3 mg Chl  $m^{-3}$ . Die Phytoplanktonpatches mit den höchsten Chlorophyllkonzentrationen (4-5 mg  $m^{-3}$ ) befinden sich darüber, im Anstieg des Dichtegradienten bei  $\sigma_t = 18$ . Unterhalb von 15 m ( $\sigma_t \geq 24$ ) sind die Chlorophyllkonzentrationen kleiner als 1 mg  $m^{-3}$ .

Die Vertikalverlagerungen der Phytoplanktonschichten in Abhängigkeit von denen der Dichteschichtung sind hier schlechter zu erkennen als im Skagerrak, da die Vertikalbewegungen insgesamt geringer sind.

Tab. 5.3 Tiefenlage [m] der  $\sigma_t$ -Isolinien im Kattegat

$\sigma_t$	$z_{\min}$	$z_{\max}$	$\Delta z$
17	3.5	8	4.5
18	7	10	3
20	10	11.5	1.5
22	12	13	1
24	13	14.5	1.5
26	15	17	2

$z_{\min}$  = Minimaltiefe;  $z_{\max}$  = Maximaltiefe;  $\Delta z$  = max. Auslenkung

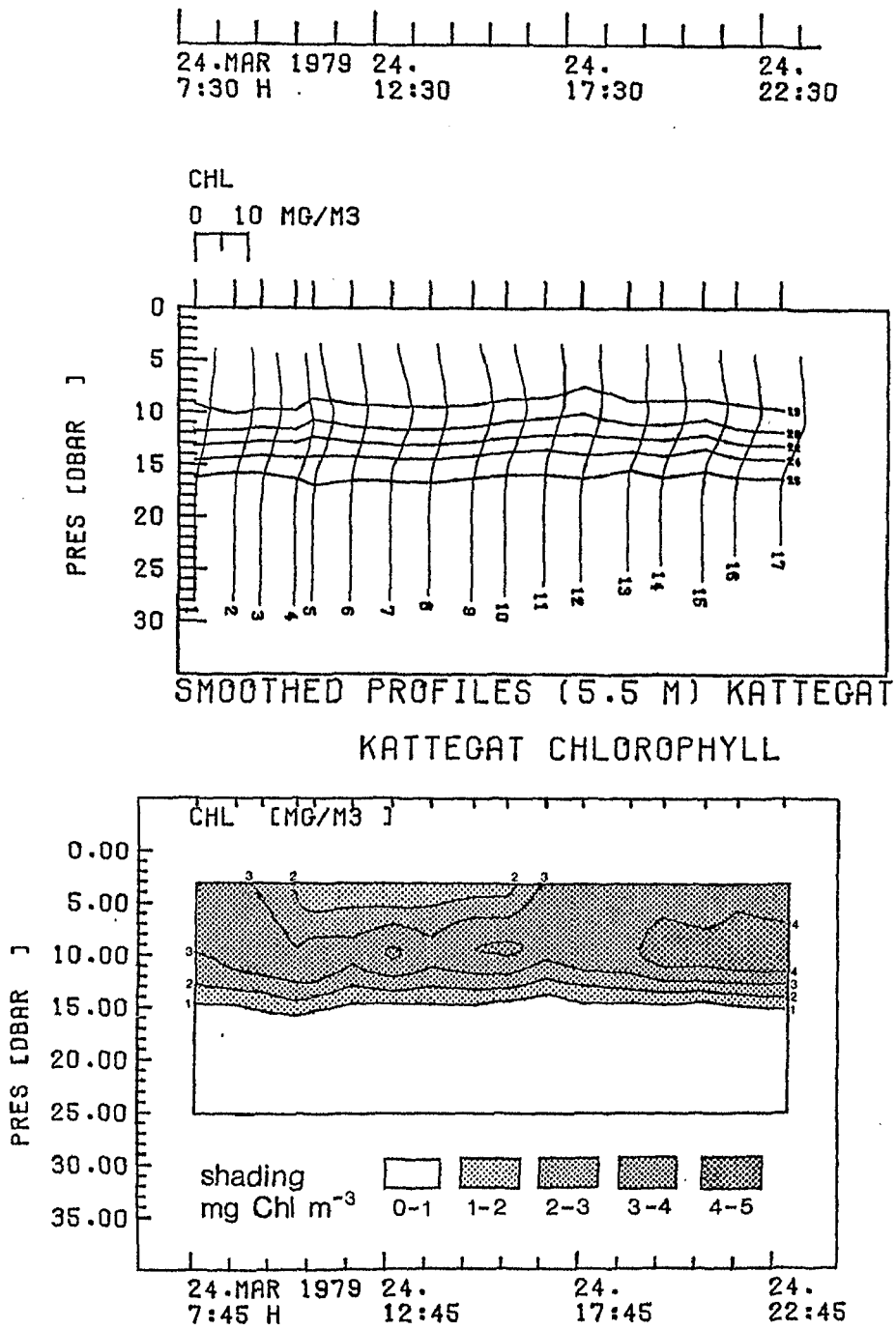


Abb. 5.11: KATTEGAT Lage der Chlorophyllschichten im Dichtefeld (Geglättete Chlorophyllprofile und Sigma-t-Isolinien)

#### 5.4 Zeitreihen der vertikalen Feinstruktur

Die Feinstruktur der vertikalen Chlorophyllverteilung auf den vier Stationen ist aus den Hochpaßprofilen der Abb. 5.6-5.9 ersichtlich. Diese wurden durch Subtraktion der geglätteten Profile von den mittleren stündlichen Profilen gewonnen (vgl. Tab. 3.8, S. 58). Sie enthalten demnach nur solche Chlorophyllstrukturen, die vertikal kleiner als 2.75 m sind und nur in ganz seltenen Fällen (z.B. Skagerrak, Abb. 5.6, Profile 2-4, Tiefe 6-12 m) in aufeinanderfolgenden Profilen wiedergefunden werden können. Bei dem hier gewählten Abbildungsmaßstab ist es sicher, daß die erkennbaren Strukturen mit einer ausreichend großen Anzahl von Datenpunkten belegt sind.

Die "HP-Profile" geben also die vertikale Feinstruktur wieder, die sich der "Grobstruktur" (Chlorophyllisolines in Kap. 3.2.3.) überlagert. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Profilen sind - auch im Bereich der Oberflächendriftkörper - bedingt durch horizontale Patchiness auf Längenskalen  $> 100$  m (im Gegensatz zu den Profilen in Kap. 5.1, 5.2).

Ihre Bedeutung bzw. Entstehungsweise kann hier nicht geklärt werden. Es fällt jedoch auf, daß neben einem gleichmäßigen "Rauschen" in bestimmten Tiefenzonen größere Abweichungen vom Mittel häufiger auftreten: im Skagerrak in ca. 10 m, 25 m (Profile 6, 8-14) und in 35 m (Profile 1-5); im Kattegat in 10-15 m (Profile 4,5,7,8,10,11,13-17); auf der Ankerstation in 15-20 m (Profile 1,3,6,8,9,12-15); auf der Bornholm-Station ist keine Feinstruktur erkennbar, vielleicht in Ermangelung eines stärkeren Dichtegradienten.



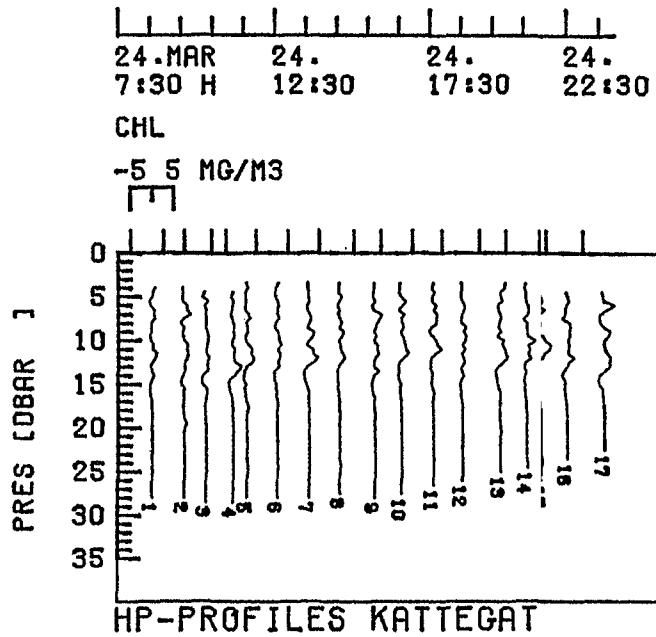
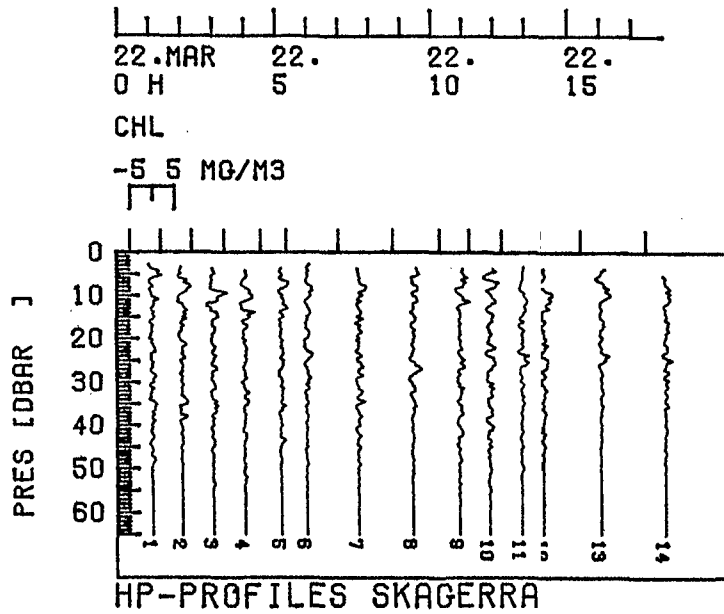


Abb. 5.6: SKAGERRAK Feinstruktur der vertikalen Chlorophyll-  
Abb. 5.7: KATTEGAT verteilung. (Hoopaßdaten der mittleren  
Stundenprofile, gl. Tab. 3.8)

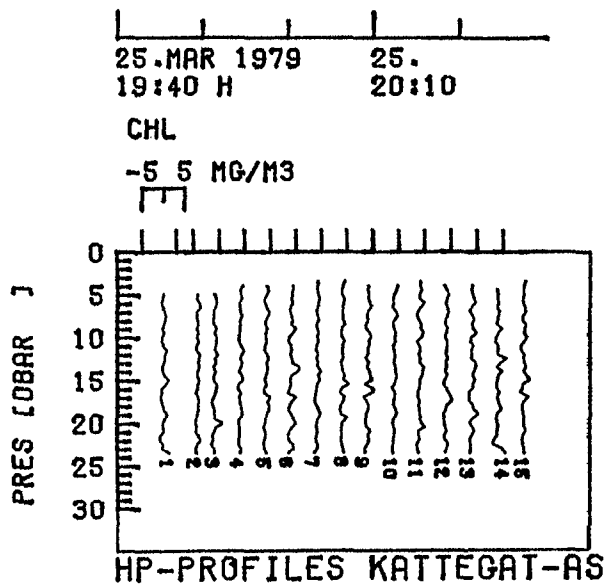
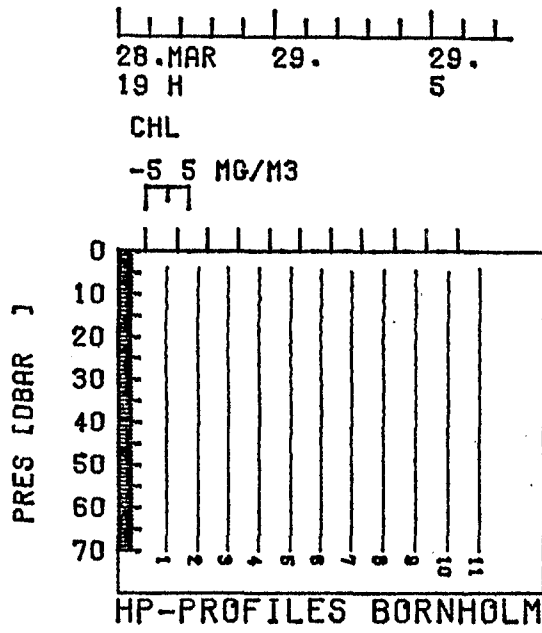


Abb. 5.8: BORNHOLM Feinstruktur der vertikalen Chlorophyll-  
Abb. 5.9 KATTEGAT-AS verteilung. (Hochpaßdaten der mittleren  
Stundenprofile, vgl. Tab. 3.8)

Anmerkung des Verfassers

Abweichend von der sonst üblichen Form habe ich in dieser Arbeit die Ergebnisse der verschiedenen Teilaspekte des Themas gleich im Anschluß an ihre Präsentation diskutiert:

- 1) Chlorophyll-Fluoreszenz-Beziehung: Kap. 3.3.1.
- 2) Mittlere Situation auf den 4 Stationen: Kap. 3.3.2. und  
Kap. 3.3.3.
- 3) Raum- und Zeitabhängigkeit der Wasser- und Phytoplanktonkörper: Kap. 4.5.

Dies geschah - hoffentlich mit Erfolg -, um eine größere Übersichtlichkeit und Kontinuität zu erreichen.

L I T E R A T U R

- Denman, K.L. (1975):  
Spectral analysis: a summary of the theory and techniques.  
Fish. Mar. Serv. Tech. Rep. 539, 28 pp.
- Denman, K.L. (1976):  
Covariability of chlorophyll and temperature in the sea.  
Deep-Sea Res. 23(6), 527-538.
- Denman, K.L. (1977):  
Short term variability in vertical chlorophyll structure.  
Limnol. Oceanogr. 22(3), 434-441.
- Denman, K.L. and A.W. Herman (1978):  
Space-time structure of a continental shelf ecosystem  
measured by a towed porpoising vehicle.  
J. Mar. Res. 36(4), 693-713.
- Denman, K.L., A. Okubo and T. Platt (1977):  
The chlorophyll fluctuation spectrum in the sea.  
Limnol. Oceanogr. 22(6), 1033-1038.
- Denman, K.L. and T. Platt (1975):  
Coherences in the horizontal distributions of phytoplankton  
and temperature in the upper ocean.  
Mém. Soc. r. Sci. Liège Sér. 6(8), 19-30.
- Derenbach, J.B. (1969):  
Zur Homogenisation des Phytoplanktons für die Chlorophyll-  
bestimmung.  
Kiel. Meeresforsch. 25(1), 166-171.
- Derenbach, J.B., H. Astheimer, H.P. Hansen and H. Leach (1979):  
Vertical microscale distribution of phytoplankton in  
relation to the thermocline.  
Mar. Ecol. Prog. Ser. 1, 187-193.
- Edler, L. (ed.) (1979):  
Recommendations on methods for marine biological studies in  
the Baltic Sea: phytoplankton and chlorophyll.  
The Baltic Marine Biologists, publ. 5, 38 pp.
- Fasham, M.J. and P.R. Pugh (1976):  
Observations on the horizontal coherences of chlorophyll-a  
and temperature.  
Deep-Sea Res. 23(6), 539-550.
- Früingel, F. and C. Koch (1976):  
Practical experience with the Variosens equipment in  
measuring chlorophyll concentrations and fluorescent tracer  
substances, like Rhodamine, Fluorescein, and some new sub-  
stances.  
IEEE J. Ocean. Eng. 1, 21-32.

- Gessner, F. (1948):  
The vertical distribution of the phytoplakton and the thermocline.  
Ecology 29, 386-389.
- Goodwin, R.H. (1947):  
Fluorometric method for estimating small amounts of chlorophyll-a.  
Analyt. Chem. 19, 789-794.
- Govindjee and G. Papageorgiou (1971):  
Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: Fluorescence transients.  
In: Giese, A.C. (ed.): Photophysiology VI  
Academic Press, New York, London, pp. 1-4.
- Grasshoff, K. (1976):  
Methods of seawater analysis.  
Verlag Chemie, Weinheim, New York, 317 pp
- Herman, A.W. (1975):  
Chlorophyll and dye detection with the Variosens fluorometer.  
Bedford Inst. Oceanogr. Rep. Ser., BI-R-7-2, 37 pp.
- Herman, A.W. and K.L. Denman (1977):  
Rapid underway profiling of chlorophyll with an in situ fluorometer mounted on a Batfish vehicle.  
Deep-Sea Res. 24, 385-397.
- Herman, A.W. and K.L. Denman (1979):  
Intrusions and vertical mixing at the shelf/slope water front south of Nova Scotia.  
J. Fish. Res. Bd Can. 36(12), 1445-1453.
- Hickel, W. (1972):  
Kurzzeitige Veränderungen hydrographische Faktoren und der Sestonkomponenten in driftenden Wassermassen in der Helgoländer Bucht.  
Helgoländer Wiss. Meeresunters. 23, 383-392.
- Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes and J.D.H. Strickland (1965):  
Fluorometric determination of chlorophyll.  
J. Cons. perm. int. Explor. Mer 30(1), 3-5.
- Horwood, J.W. (1976a):  
A model of primary and secondary production in Loch Strivian and its stability.  
In: Persoone, G. and E. Jaspers (eds.):  
Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Marine Biology Symposium.  
Universa Press, Wetteren, Belgium, pp. 297-307.

- Horwood, J.W. (1976b):  
A critical investigation of small scale variability in  
phytoplankton.  
ICES C.M. Papers and Reports, L. 7, 6 pp.
- Horwood, J.W. (1978):  
Observations on spatial heterogeneity of surface chlorophyll  
in one and two dimensions.  
J. Mar. Biol. Ass. U.K. 58(2), 487-502.
- Jeffrey, S.W. (1963):  
Purification and properties of chlorophyll-c from *Sargassum  
flavicans*.  
Biochem. J. 86, 313-318.
- Jeffrey, S.W. and G.F. Humphrey (1975):  
New spectrophotometric equations for determining chloro-  
phylls a, b, c<sub>1</sub> and c<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural  
phytoplankton.  
Biochem. Physiol. Pflanzen 167, 191-194.
- Jørgensen, S.E. (1976):  
A eutrophication model for a lake.  
Ecol. Modelling 2, 147-165.
- Ketchum, B.H. and N. Corwin (1965):  
The cycle of phosphorus in a plankton bloom in the Gulf  
of Maine.  
Limnol. Oceanogr. 10 (Suppl.), R148-R161.
- Kiefer, D.A. (1973):  
Fluorescence properties of natural phytoplankton  
populations.  
Mar. Biol. 22, 263-269.
- Kierstead, H. and L.B. Slobodkin (1953):  
The size of water masses containing plankton blooms.  
J. Mar. Res. 12, 141-147.
- Kobe, G. (1934):  
Der hydrografische Aufbau und die dadurch bedingten Strö-  
mungen im Skagerrak.  
Veröff. Inst. Meeresk. Univ. Berl. 26, 79 pp.
- Kolmogorov, A.N. (1941):  
The local structure of turbulence in incompressible  
viscous fluid for very large Reynold's numbers.  
Comptes Rend. Acad. Sci. USSR 30, 301-305.
- Kreps, E. and N. Verbinskaya (1930):  
Seasonal changes in the Barents Sea.  
J. Cons. perm. int. Explor. Mer 5, 329-346.

- Kroebel, W., P. Diehl, L. Ginzkey, K.-H. Mahrt,  
J. Rathlev, R. Siara, Th. Schulz (1976):  
Die Kieler Multisonde der Jahre 1975/76, ihre Sensoren,  
Parameter mit Ergebnissen von Datenaufnahmen und Perspek-  
tiven für ihre Auswertungen.  
Inter-Ocean '76 Kongress-Berichtswerk (2), 1034-1046.
- Kullenberg, Gunnar (1974a):  
Investigations of small-scale vertical mixing in relation  
to the temperature structure in stably stratified waters.  
Adv. Geophys. 18A, 339-351.
- Kullenberg, Gunnar (1974b):  
Investigations on dispersion in stratified vertical shear  
flow.  
Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer 167, 86-92.
- Loftus, M.E. and J.H. Carpenter (1971):  
A fluorometric method for determining chlorophylls a,  
b, and c.  
J. mar. Res. 29(3), 319-338.
- Loftus, M.E. and H.H. Seliger (1975):  
Some limitations of the in vivo fluorescence technique.  
Chesapeake Science 16(2), 79-92.
- Longhurst, A.R., C.J. Lorenzen and W.H. Thomas (1967):  
The role of pelagic crabs in the grazing of phytoplankton.  
Ecology 48, 190-200.
- Lorenzen, C.J. (1966):  
A method for the continuous measurement of in vivo  
chlorophyll concentration.  
Deep-Sea Res. 13, 223-227.
- Lorenzen, C.J. (1967a):  
Determination of chlorophyll and phaeo-pigments:  
spectrophotometric equations.  
Limnol. Oceanogr. 12, 343-346.
- Lorenzen, C.J. (1967b):  
Vertical distribution of chlorophyll and phaeopigments:  
Baja California.  
Deep-Sea Res. 14, 735-745.
- Lorenzen, C.J. (1971):  
Continuity in the distribution of surface chlorophyll.  
J. Cons. perm. int. Explor. Mer 34, 18-23.
- Lorenzen, C.J. and S.W. Jeffrey (1980):  
Determination of chlorophyll in seawater.  
Unesco Techn. Paper No. 35, 20 pp.

- Mackinney, G. (1941):  
Absorption of light by chlorophyll solutions.  
J. Biol. Chem. 140, 315-322.
- McAllister, C.D. (1970):  
Zooplankton relations, phytoplankton mortality and the estimation of marine production.  
In: Steele, J.H. (ed.): Marine Foodchains.  
Oliver and Boyd, Edinburgh, pp. 419-457.
- Nakata, K. and K. Ishikawa (1975):  
Fluctuation of local phytoplankton abundance in coastal waters.  
Jap. J. Ecol. 25, 201-205.
- Nusch, E.A. und G. Palme (1975):  
Biologische Methoden für die Praxis der Gewässeruntersuchung.  
Bestimmung des Chlorophyll-a- und Phaeopigmentgehaltes in Oberflächenwasser.  
gfw-wasser/abwasser 116(12), 562-565.
- Okubo, A. (1971):  
Oceanic diffusion diagrams.  
Deep-Sea Res. 18, 789-802.
- Okubo, A. (1980):  
Diffusion and ecological problems: Mathematical models.  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 254 pp.
- Pankow, H. (1976):  
Algenflora der Ostsee, II. Plankton.  
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 493 pp.
- Pingree, R.D., P.R. Pugh, P.M. Holligan and G.R. Forster (1975):  
Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel.  
Nature 258, 672-677.
- Platt, T. (1972):  
Local phytoplankton abundance and turbulence.  
Deep-Sea Res. 19 (3), 183-188.
- Platt, T. and K.L. Denman (1975):  
Spectral analysis in ecology.  
Ann. Rev. Ecol. Syst. 6, 189-210.
- Platt, T., K.L. Denman, and A.D. Jassby (1977):  
Modeling the productivity of phytoplankton.  
In: Goldberg, E.D. (ed.): The Sea, VI. Marine Modelling.  
John Wiley & Sons, New York, pp. 807-856.



- Platt, T., L.M. Dickie, and R.W. Trites (1970):  
Spatial heterogeneity of phytoplankton in a near-shore environment.  
J. Fish. Res. Bd Can. 27, 1453-1473.
- Powell, T.M., T.J. Richardson, T.M. Dillon, B.A. Agee, B.J. Dozier, D.A. Godden and L.O. Myrup (1975):  
Spatial scales of current speed and phytoplankton biomass fluctuations in Lake Tahoe.  
Science 189, 1088-1090.
- Rabinowitch, E. (1945):  
Photosynthesis and related processes.  
Interscience I, 599 pp.
- Radach, G. and E. Maier-Reimer (1975):  
The vertical structure of phytoplankton growth dynamics: A mathematical model.  
Mém. Soc. r. Sci. Liège Sér. 6(7), 113-146.
- Rai, H. and A.F.H. Marker (eds.) (1981):  
Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Workshop on the Measurement of Photosynthetic Pigments in Freshwaters and Standardization of Methods.  
Arch. Hydrobiol., in press.
- Samuelsson, G. and G. Öquist (1977):  
A method for studying photosynthetic capacities of unicellular algae based on in vivo chlorophyll fluorescence.  
Physiol. Plant. 40, 315-319.
- Savidge, G. (1976):  
A preliminary study of the distribution of chlorophyll-a in the vicinity of fronts in the Celtic and Western Irish Seas.  
Estuar. Coast. Mar. Sci. 4, 617-625.
- Schweimer, M. (1978):  
Physikalisch-ozeanographische Parameter in der westlichen Ostsee - Eine Literaturstudie.  
Ber. Inst. Meeresk. Kiel 61, 139 pp.
- Scor-Unesco (1966):  
Determination of photosynthetic pigments in seawater.  
Monogr. Oceanogr. Methodol. 1, 11-18.
- Siedler, G. and G. Hatje (1974):  
Temperatur, Salzgehalt und Dichte.  
In: Magaard, L. and G. Rheinheimer (eds.): Meereskunde der Ostsee.  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, pp. 43-50.

- Skellam, J.G. (1951):  
Random dispersal in theoretical populations.  
Biometrika 38, 196-218.
- Slovacek, R.E. and P.J. Hannan (1977):  
In vivo fluorescence determinations of phytoplankton  
chlorophyll-a.  
Limnol. Oceanogr. 22(5), 919-925.
- Smith, J.H.C. and A. Benitez (1955):  
Chlorophylls: analysis in plant materials.  
In: Paech, K. and M. Tracey (eds.): Modern methods of  
plant analysis.  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, pp. 142-196.
- Sperling, C. (1981):  
Zum Zusammenhang zwischen Artenzusammensetzung und summa-  
rischen Meßverfahren für die Erfassung des Phytoplankton-  
bestandes.  
Diplomarbeit Univ. Kiel, 24 pp.
- Steele, J.H. (1964):  
A study of production in the Gulf of Mexico.  
J. Mar. Res. 22, 211-222.
- Steele, J.H. (1974a):  
The structure of Marine Ecosystems.  
Harvard University Press, Cambridge, Mass., 128 pp.
- Steele, J.H. (1974b):  
Spatial heterogeneity and population stability.  
Nature 248, 83.
- Steele, J.H. and C.S. Yentsch (1960):  
The vertical distribution of chlorophyll.  
J. Mar. Biol. Ass. U.K. 39, 217-226.
- Stienen, C. (1981):  
Die Anwendung von optischen in-situ-Meßmethoden für pro-  
duktionsbiologische Fragestellungen.  
Diplomarbeit Univ. Kiel, 97 pp.
- Strickland, J.D.H. (1968):  
A comparison of profiles of nutrient and chlorophyll con-  
centrations taken from discrete depths and by continuous  
recording.  
Limnol. Oceanogr. 13, 388-391.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons (1968):  
A practical handbook of seawater analysis.  
Bull. Fish. Res. Bd Can. 167, 185-206.
- Sverdrup, H.U. (1953):  
On conditions for the vernal blooming of phytoplankton.  
J. Cons. perm. int. Explor. Mer 18, 287-295.

- Tennekes, H. and J.L. Lumley (1972):  
A first course in turbulence.  
Cambridge, Mass.: The MIT press, 300 pp.
- Therriault, J.-C. and T. Platt (1978):  
Spatial heterogeneity of phytoplankton biomass and related factors in the near-surface waters of an exposed coastal embayment.  
Limnol. Oceanogr. 23(5), 888-899.
- Utermöhl, H. (1931):  
Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons.  
Verh. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol. 5(:), 567-596.
- Utermöhl, H. (1958):  
Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik.  
Mitt. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol. 9, 1-38.
- Walsh, J.J. (1975):  
A spatial simulation model of the Peru upwelling ecosystem.  
Deep-Sea Res. 22, 201-236.
- Webster, F. (1967):  
A scheme for sampling deep-sea currents from moored buoys.  
Transactions, 2nd Int. Buoy Technol. Symp., Int. Technol. Soc., Washington D.C., 419-431.
- Wroblewski, J.S. (1976):  
A model of the spatial structure and productivity of phytoplankton populations during variable upwelling off the coast of Oregon.  
Technical Report, Mesoscale Air-Sea Interaction Group, 116 pp.
- Wroblewski, J.S., J.J. O'Brien, and T. Platt (1975):  
On the physical and biological scales of phytoplankton patchiness in the ocean.  
Mém. Soc. r. Sci. Liège, 7, 43-57.
- Woods, J.D. and R.L. Wiley (1972):  
Billow turbulence and microstructure.  
Deep-Sea Res. 19, 87-121.
- Yentsch, C.S. (1965):  
Distribution of chlorophyll and phaeophytin in the open ocean.  
Deep-Sea Res. 12, 653-666.
- Yentsch, C.S. (1974):  
Some aspects of the environmental physiology of marine phytoplankton: a second look.  
Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 12, 41-75.
- Yentsch, C.S. and D.W. Menzel (1963):  
A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence.  
Deep-Sea Res. 10, 221-231.

ANHANG1. Stationsanordnung Fahrt 38/2, FS Poseidon, März 1979

Stat. Nr.	Ort	Stationsart
1	Kieler Bucht	Teststation
2,3	Großer Belt	Teststation
4-17	Kattegat	N/S-Schnitt
18-27	Skagerrak	Dreieck
28	Skagerrak	driftende Dauerstation
29-35	Skagen	N/S-Schnitt
36-40	Kattegat	E/W-Schnitt
41-77	Kattegat	Meßnetz, 36 Stat. in 6 x 6 sm
78	Kattegat	driftende Dauerstation
79-86	Kattegat	N/S-Schnitt
87	Kattegat	Ankerstation
88-106	westliche Ostsee	E/W-Schnitt
107	Bornholm	driftende Dauerstation
108	Arcona	Teststation

## 2. Tabellen zur Photometrie

Alle Angaben für 90 %-Acetonlösungen!

### 2.1. Absorptionsmaxima in nm

(nach Loftus und Carpenter, 1971)

<u>Pigment</u>	<u>Chlorophyll</u>	<u>Phaeopigment</u>	<u>max. acid ratio</u>
a	663-665	667-669	1.70
b	647-649	653-655	1.49
c	630-633	595-597	1.80

### 2.2. Extinktionskoeffizienten

(nach SCOR-Unesco, 1966 und Jeffrey und Humphrey, 1975)

<u>Pigment</u>	<u><math>\lambda</math>[nm]</u>	<u>E[l/g/cm]</u>
Chl-a	664	87.67
	645	19.32
	630	14.40
Chl-b	647	51.36
	663	9.75
	630	15.22
Chl-c	631	42.60
	663	0.47
	645	3.48
Chl-c <sub>1</sub>	631	44.80
Chl-c <sub>2</sub>	631	40.40
Chl-id-a	664	60.34
Phaeophorbid a	667	74.25

2.3. Berechnung der Pigmentkonzentration aus der optischen Dichte (OD) (nach Jeffrey und Humphrey, 1975)

$$\begin{array}{l} \text{Chl-a} \quad [\mu\text{g}] = 11.85 \cdot \text{OD}_{664} - 1.54 \cdot \text{OD}_{647} - 0.08 \cdot \text{OD}_{630} \\ \text{Chl-b} \quad \quad \quad = -5.43 \quad \quad \quad +21.03 \quad \quad \quad - 2.66 \quad \quad \quad \\ \text{Chl-c} \quad \quad \quad = -1.67 \quad \quad \quad - 7.60 \quad \quad \quad + 24.52 \quad \quad \quad \end{array}$$

Bedingungen:  $\text{OD}_{750} < 0.005/\text{cm}$

$\text{OD}_{664} < 0.800$

in der Probe: 1 - 10  $\mu\text{g}$  Chlorophyll

Acetonmenge  $\pm$  0.1 ml

(nach Lorenzen, 1967)

$$\text{Chl-a} \quad [\mu\text{g}] = 26.73 \cdot (\text{OD}_{664a} - \text{OD}_{664b})$$

$$\text{Phaeo} \quad \quad \quad = 26.73 \cdot (1.7 \cdot (\text{OD}_{664b} - \text{OD}_{664a}))$$

a: vor Ansäuern, b: nach Ansäuern

### 3. Tabellen zur Fluorometrie

#### 3.1. Anregung und Emission: $\lambda$ [nm]

Pigment	Anregung → Emission in vitro		Anregung → Emission in vivo	
	1) Chl-a	425 <sup>±</sup> 75	676	440
2) Chl-b	"	660	367	800-900
3) Chl-c	"	642		
4) Phe-a	"	676		
5) Phe-b	"	662		
6) Phe-c	"	665		
7) Phytopl.			450	670
8) EOS-Filter			380-500	670-700

- Quellen: 1) - 6) Loftus und Carpenter, 1971  
 7) Yentsch und Menzel, 1963  
 8) Suarez, pers. Mitt.

#### 3.2. Eich-tabelle der EOS-Fluoreszenzsonde

Dunaliella sp. Chl-a: 316.02 mg m<sup>-3</sup>, Chl-b: 31.18 mg l<sup>-3</sup>,  
 Chl-c: 89.63 mg l<sup>-3</sup>

Algen [ml]	Chl-a [mg m <sup>-3</sup> ]	EOS-Sonde [Volt]		
		Min.	Mittel	Mx.
Luft	-	0.008	0.020	0.032
0	0.000	0.252	0.268	0.00
1	0.017	0.260	0.272	0.10
2	0.033	0.260	0.276	0.20
3	0.055	0.280	0.292	0.40
4	0.067	0.280	0.300	0.50
5	0.083	0.288	0.304	0.60
10	0.167	0.320	0.360	0.20
20	0.333	0.420	0.460	0.20
40	0.665	0.600	0.640	0.00
80	1.327	0.92	0.98	1.6
160	2.640	1.56	1.66	1.6
320	5.24	2.40	2.56	2.2
640	10.3	3.40	3.58	3.6
1140	17.9	4.08	4.14	4.4
1280	19.9	4.16	4.24	4.2
1780	27.0	4.40	4.46	4.2
2280	33.7	4.56	4.62	4.8
2780	40.1	4.72	4.78	4.4
3280	46.2	4.80	4.86	4.2





ANHANG 4.2.: KATTEGAT

STATION 78.1

TIEFE [M]	P	H	Y	T	O	P	L	A	N	K	T	O	N	-	C	O	D	E
2.2	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
8.3	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
16.0	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
20.1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
26.3	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

STATION 78.2

TIEFE [M]	P	H	Y	T	O	P	L	A	N	K	T	O	N	-	C	O	D	E
2.1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
8.1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
16.3	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
20.3	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
28.0	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

STATION 78.3

TIEFE [M]	P	H	Y	T	O	P	L	A	N	K	T	O	N	-	C	O	D	E
3.2	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
7.6	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
11.9	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
16.5	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
23.1	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

SYMBOL  $< 10 < 100 < 1,000 < 10,000 < 100,000 < 1,000,000 > 1 \text{ MIO./ LITER}$  \*\*\*\*\* XXXXXXXX

ANHANG 4.3.: BORNHOLM  
=====

STATION 107.1  
=====

	P	H	Y	T	O	P	L	A	N	K	T	O	N	-	C	O	D	E	
0000000000	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6
01234567890	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TIEFE [MJ]	7.2	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	20.5	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	30.8	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	46.6	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	54.6	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!

STATION 107.2  
=====

	P	H	Y	T	O	P	L	A	N	K	T	O	N	-	C	O	D	E	
0000000000	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	
01234567890	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TIEFE [MJ]	7.2	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	20.5	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	30.8	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	46.6	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!
	54.6	!	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	!

SYMBOLE      \*...:    ::::    :-----    ++++++    \*\*\*\*\*    XXXXXXXX  
 PP-ZAHL    < 10 < 100 < 1,000 < 10,000 < 100,000 < 1,000,000 > 1 MID./ LITER

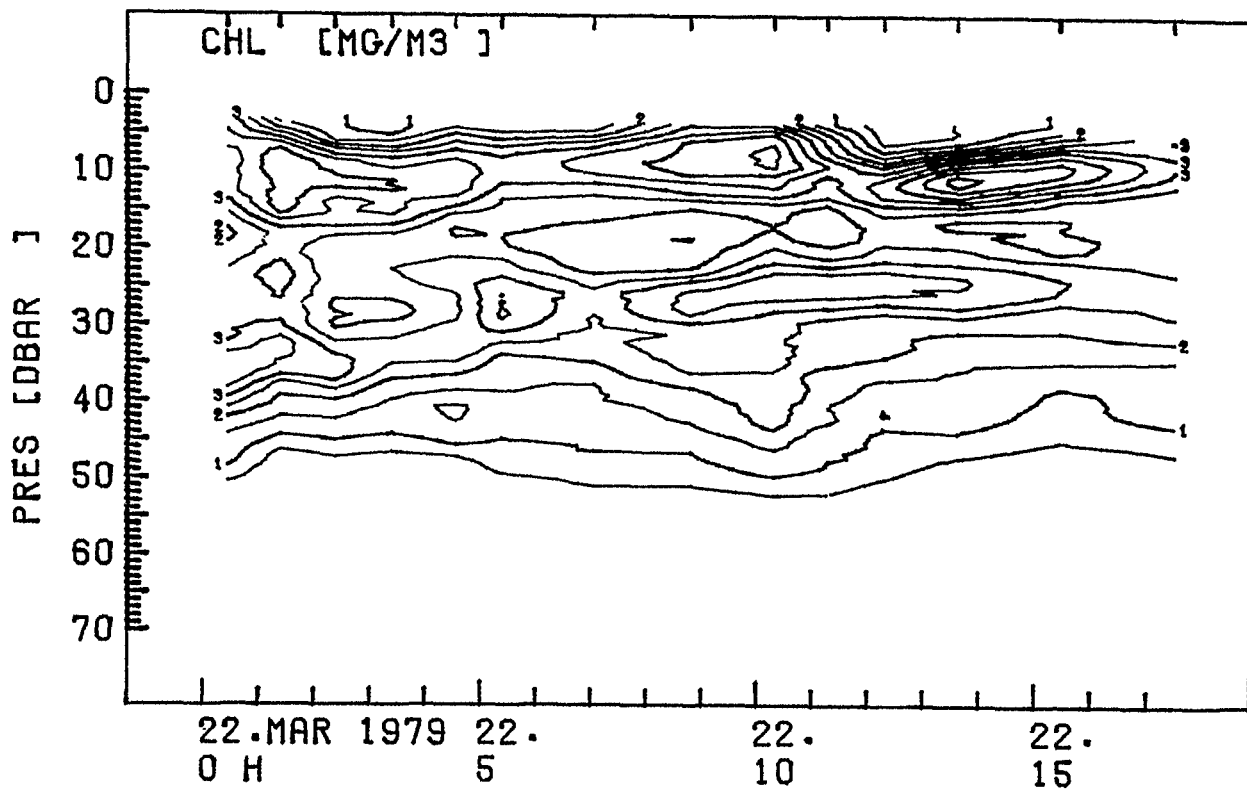
ANHANG 4.4.: PHYTOPLANKTON-CODELISTE

1	ACTINOCYCLUS	CRASSUS
2	ACTINOCYCLUS	OCTONARIUS
3	ACTINOPTYCHUS	SENARIUS
4	AMPHIDIINIUM	LONGUM
5	AMPHORA	SPEC.
6	APHANIZOMENON	FLOS-AQUAE
7	BIDDULPHIA	AURITA
8	CERATIUM	FUSUS
9	CERATIUM	LINEATUM
10	CERATIUM	LONGIPES
11	CERATIUM	TRIPOS
12	CHAETOCEROS	BOREALIS
13	CHAETOCEROS	CRINITUS
14	CHAETOCEROS	CURVISETUS
15	CHAETOCEROS	DANICUS
16	CHAETOCEROS	DEBILIS
17	CHAETOCEROS	DECIPIENS
18	CHAETOCEROS	DENSUS
19	CHAETOCEROS	DIADEMA
20	CHAETOCEROS	EIBENII
21	CHAETOCEROS	MITRA
22	CHAETOCEROS	SOCIALIS
23	CHAETOCEROS	SPEC.
24	COSCINODISCUS	CONCINNUS
25	COSCINODISCUS	ECCENTRICUS
26	COSCINODISCUS	GRANII
27	COSCINODISCUS	RADIATUS
28	COSCINODISCUS	SPEC.
29	COSCINOSIRA	POLYCHORDA
30	DETONULA	CONFERVACEA
31	DINOPHYSIS	BALTICA
32	DINOPHYSIS	NORVEGICA
33	DIPLOPELTOPSIS	MINOR
34	EUGLENA	PROXIMA
35	EUTREPTIA	LANOWII
36	FLAGELLATEN	
37	GYMNODINIUM	LOHMANNII
38	GYMNODINIUM	SIMPLEX
39	GYMNODINIUM	VESTIFICII
40	MELOSIRA	NUMMULOIDES
41	MELOSIRA	SULCATA
42	NAVICULA	VANHOEFFENII
43	NAVICULA	SPEC.
44	NITZSCHIA	LONGISSIMA
45	NITZSCHIA	SERIATA
46	NODULARIA	SPUMIGENA
47	OOCYSTIS	PELAGICA
48	PERIDINIUM	BALTICUM
49	PERIDINIUM	BREVIPES
50	PERIDINIUM	CONICUM

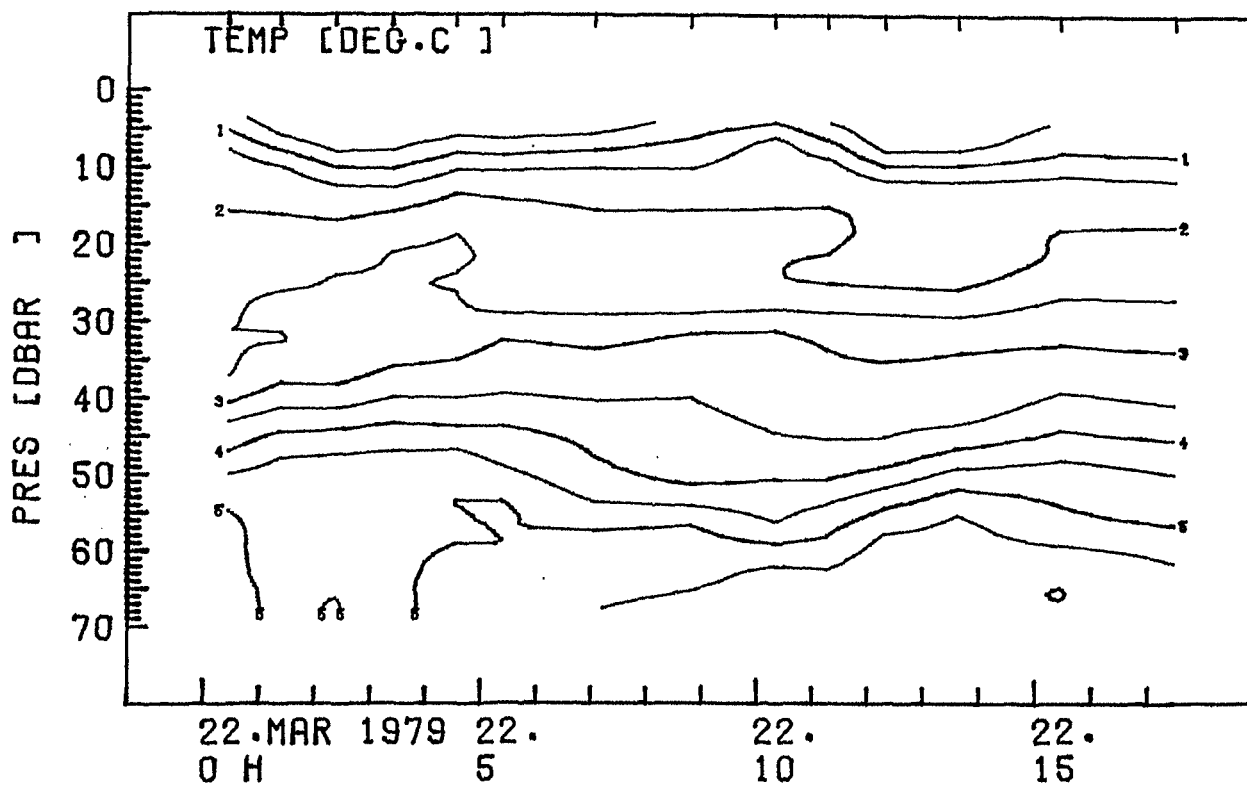
51 PERIDINIUM DEPRESSUM  
52 PERIDINIUM DIVERGENS  
53 PERIDINIUM GRANII  
54 PERIDINIUM GRENLANDICUM  
55 PERIDINIUM LONGISPINUM  
56 PERIDINIUM OVATUM  
57 PERIDINIUM PELLUCIDUM  
58 PEDIASTRUM BORYANUM  
59 PLEUROSIGMA SPEC.  
60 PROROCENTRUM MICANS  
61 RHIZOSOLENIA ALATA  
62 RHIZOSOLENIA DELICATULA  
63 RHIZOSOLENIA FRAGILISSIMA  
64 RHIZOSOLENIA HEBETATA  
65 RHIZOSOLENIA SETIGERA  
66 SCELETONEMA COSTATUM  
67 THALASSIONEMA NITZSCHIOIDES  
68 THALASSIOSIRA BALTICA  
69 THALASSIOSIRA NORDENSKIOELDII

5.1. Skagerrak

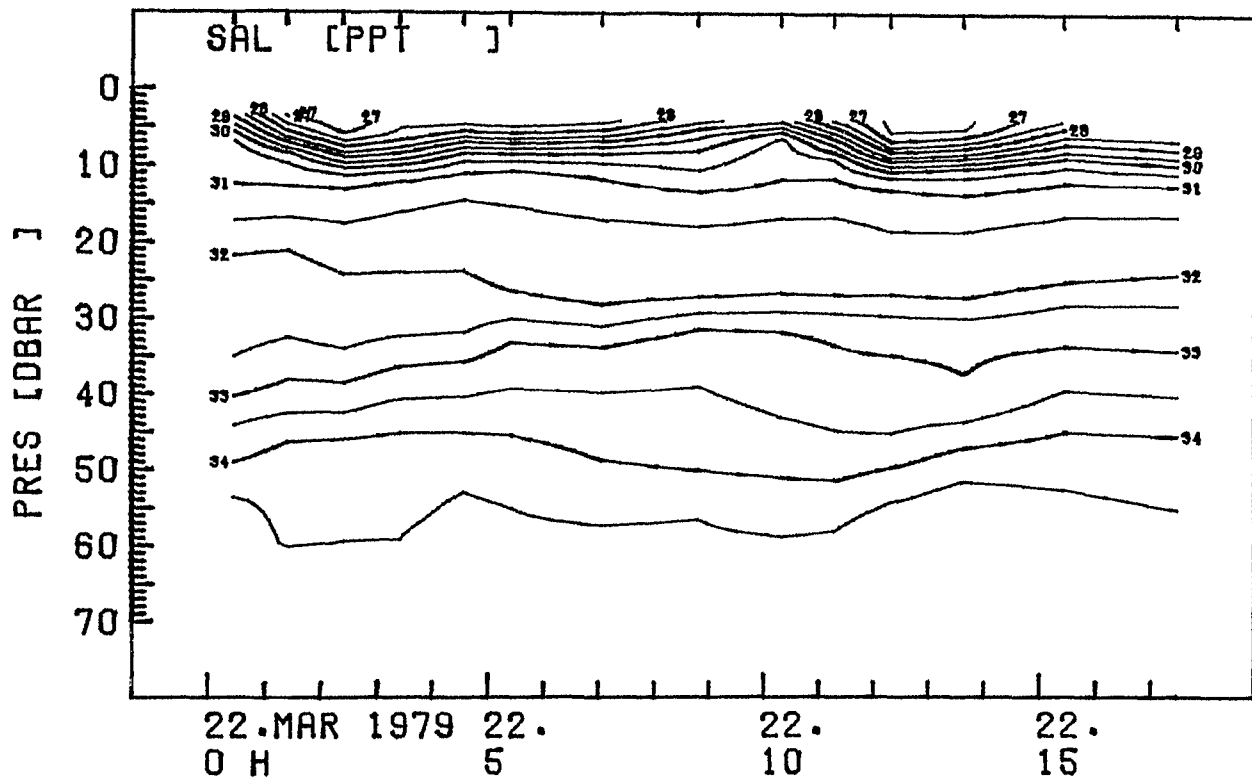
SKAGERRAK CHLOROPHYLL



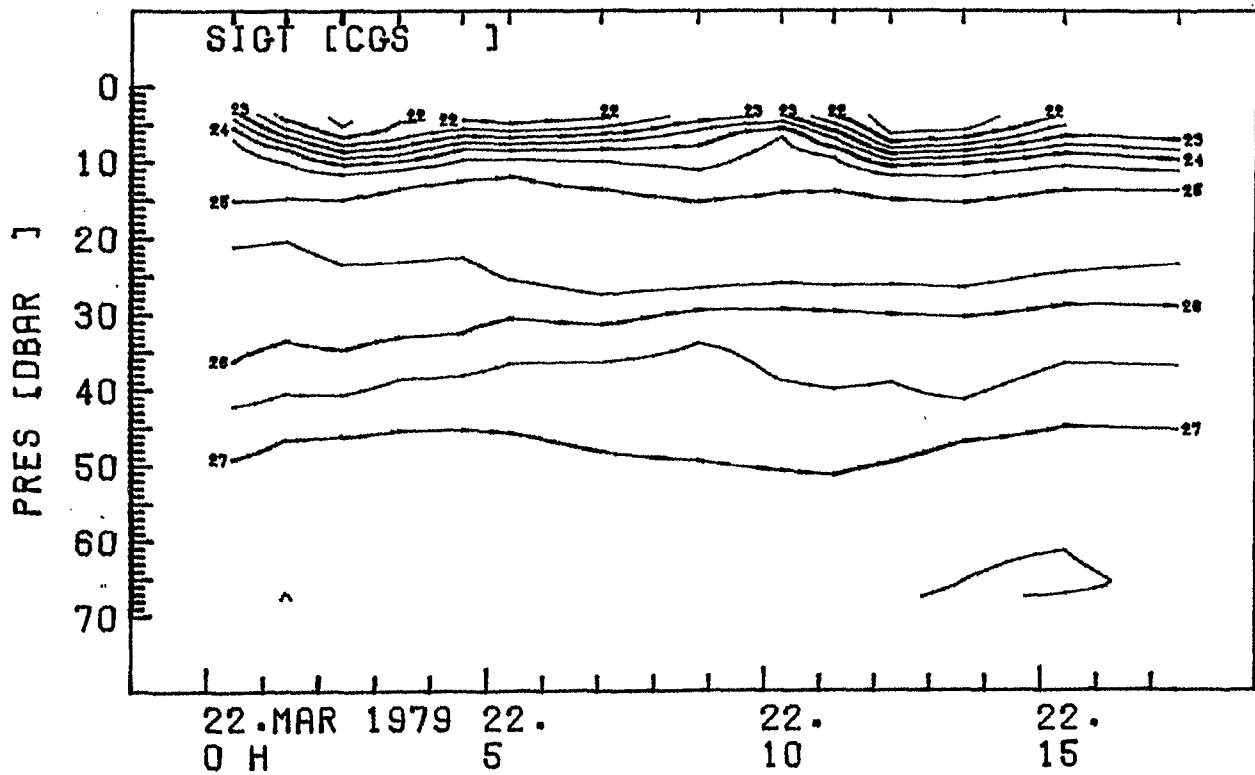
SKAGERRAK TEMPERATURE



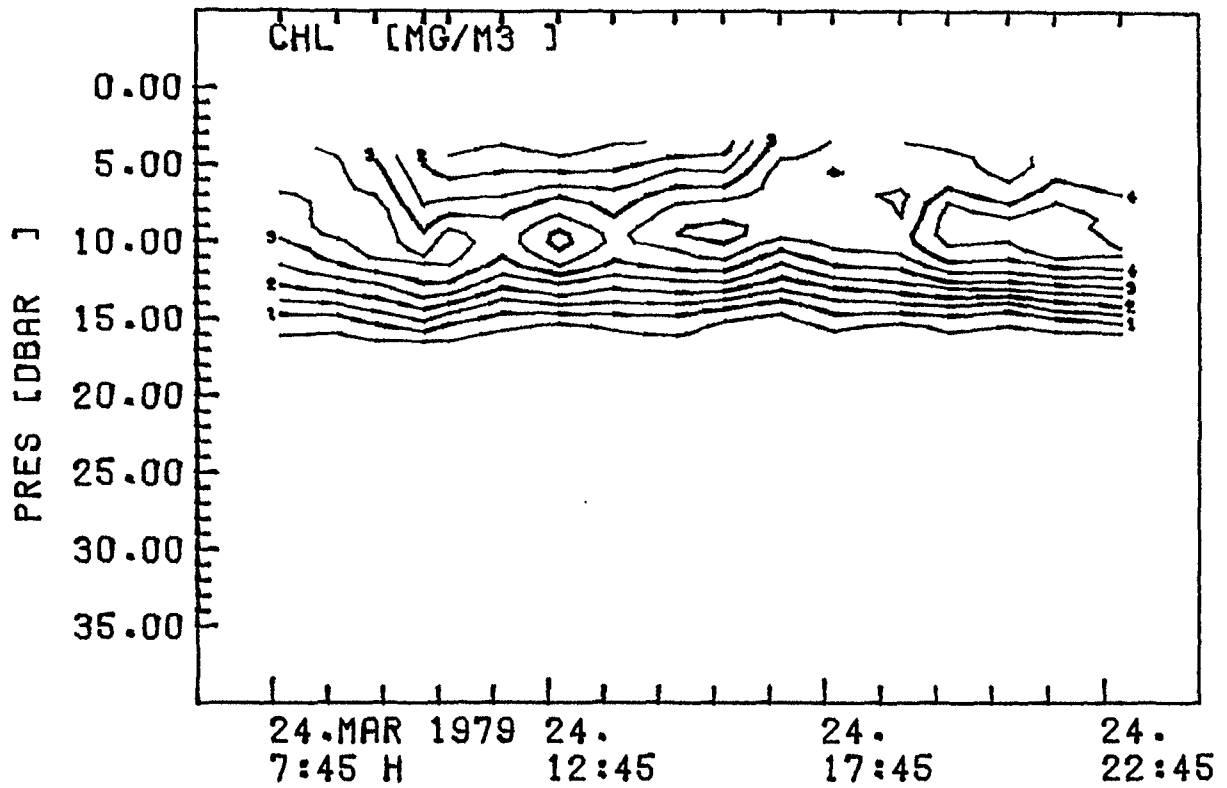
# SKAGERRAK SALINITY



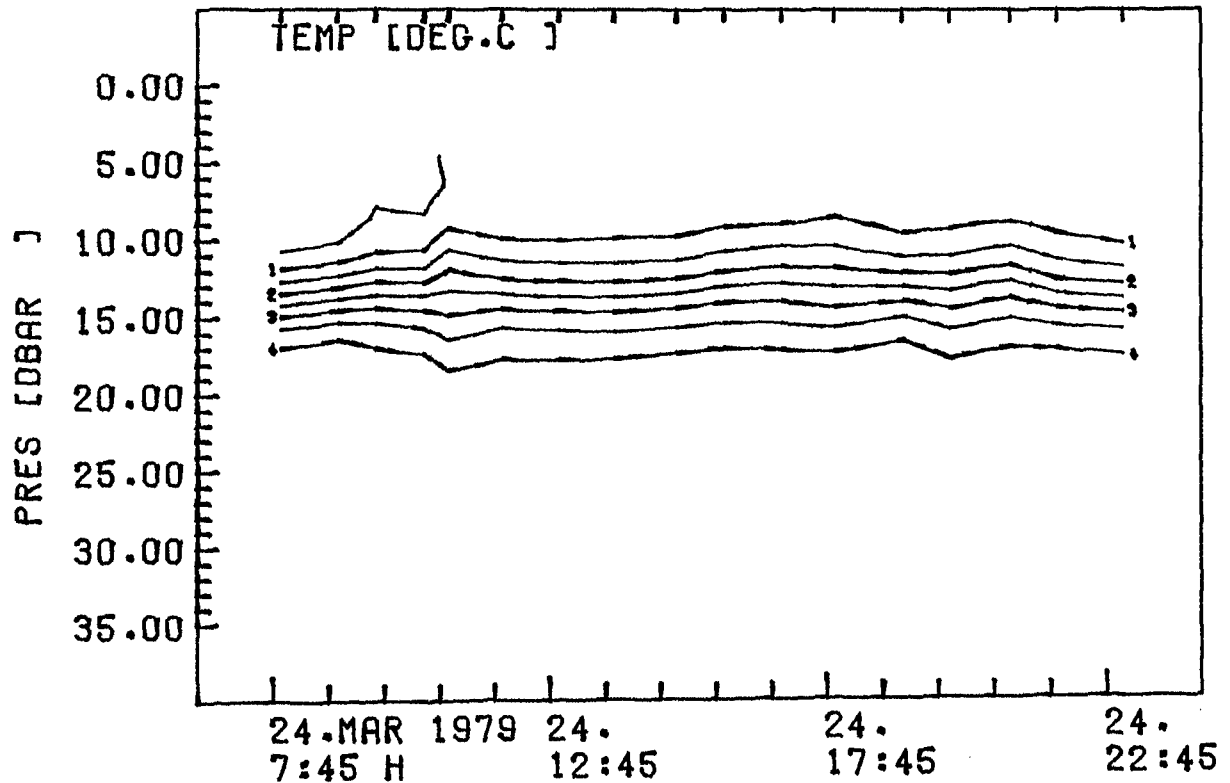
# SKAGERRAK SIGMA-T



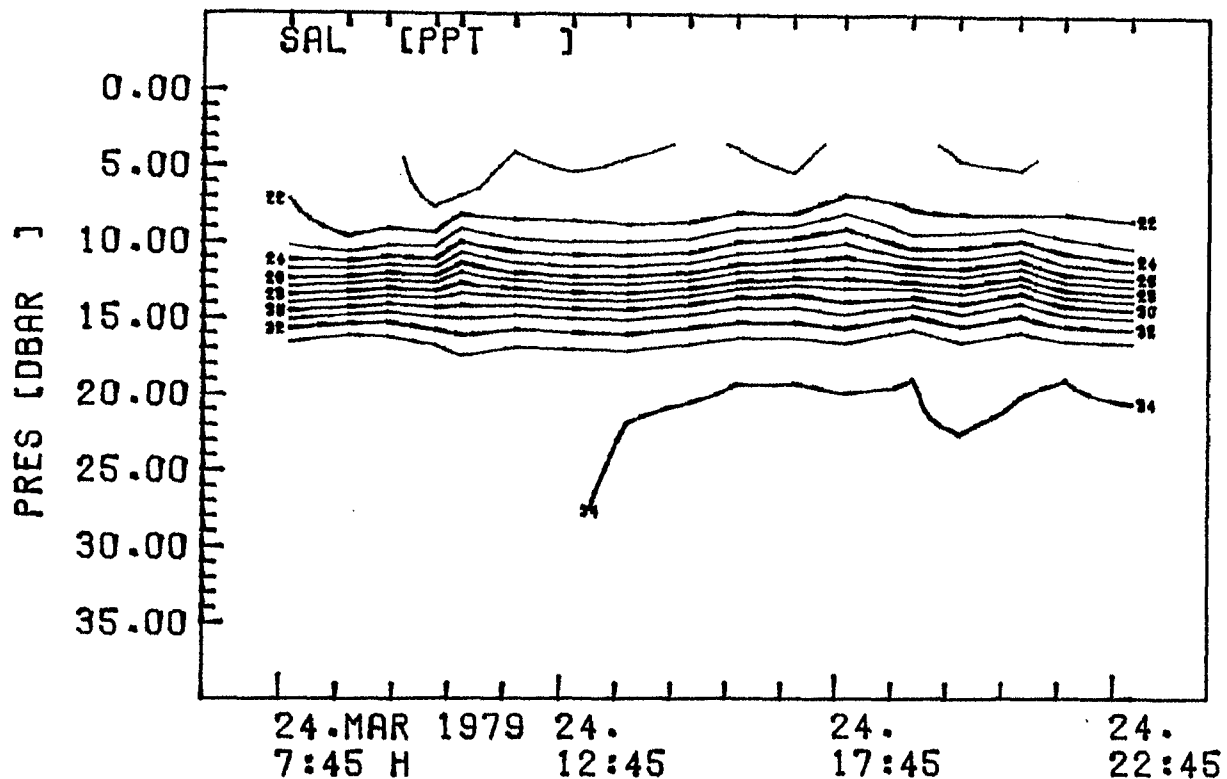
### KATTEGAT CHLOROPHYLL



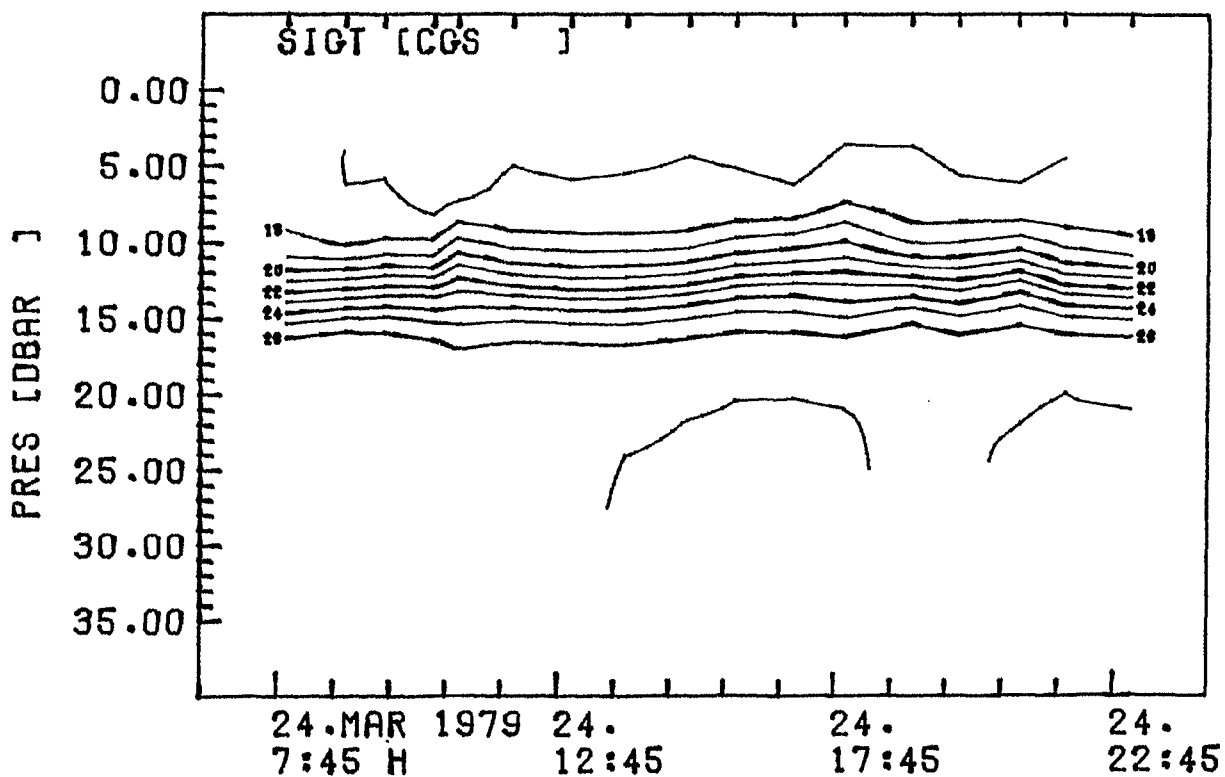
### KATTEGAT TEMPERATURE



# KATTEGAT SALINITY

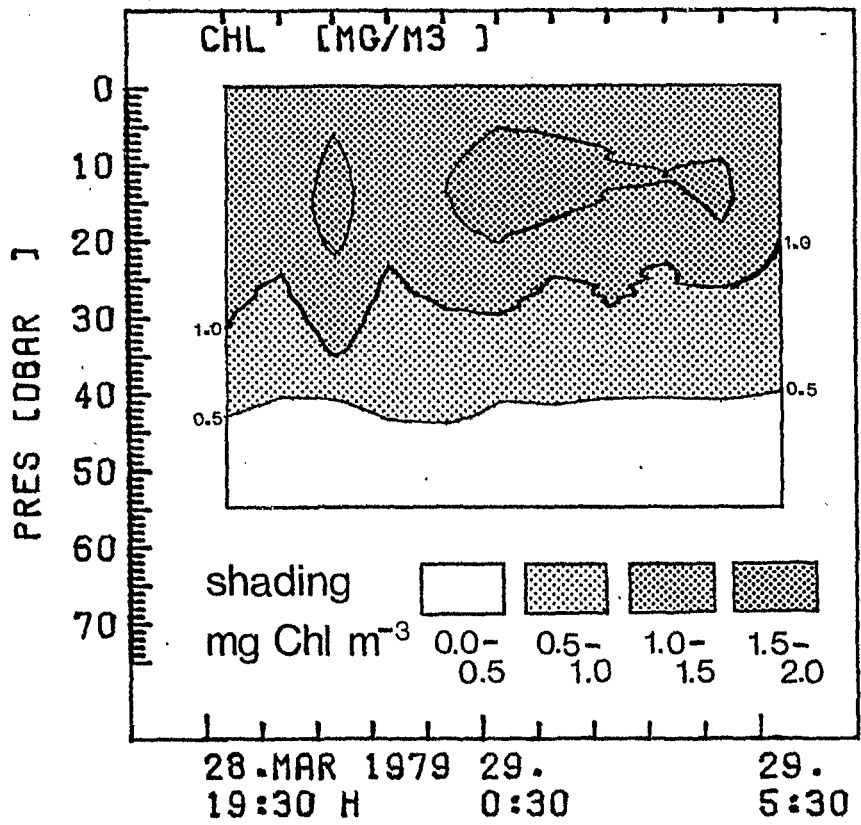


# KATTEGAT SIGMA-T

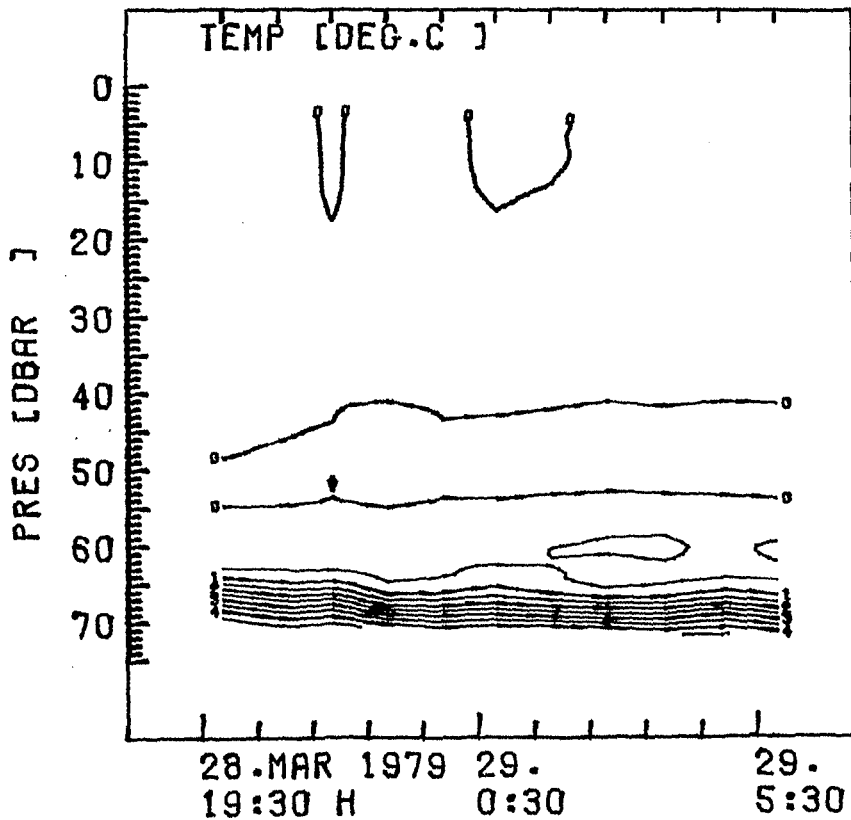




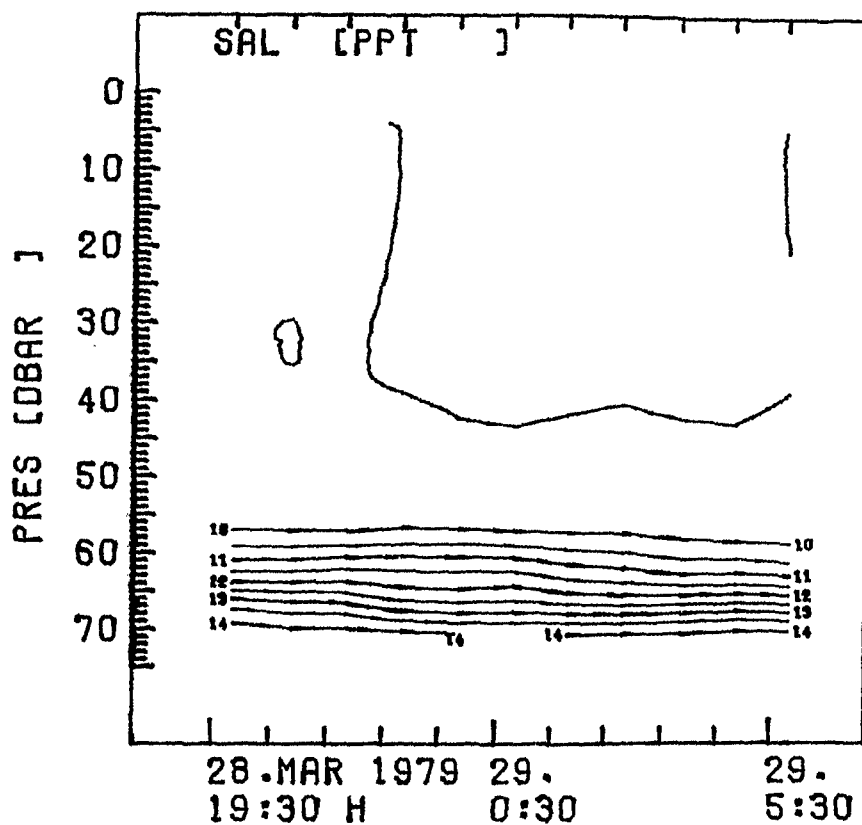
### BORNHOLM CHLOROPHYLL



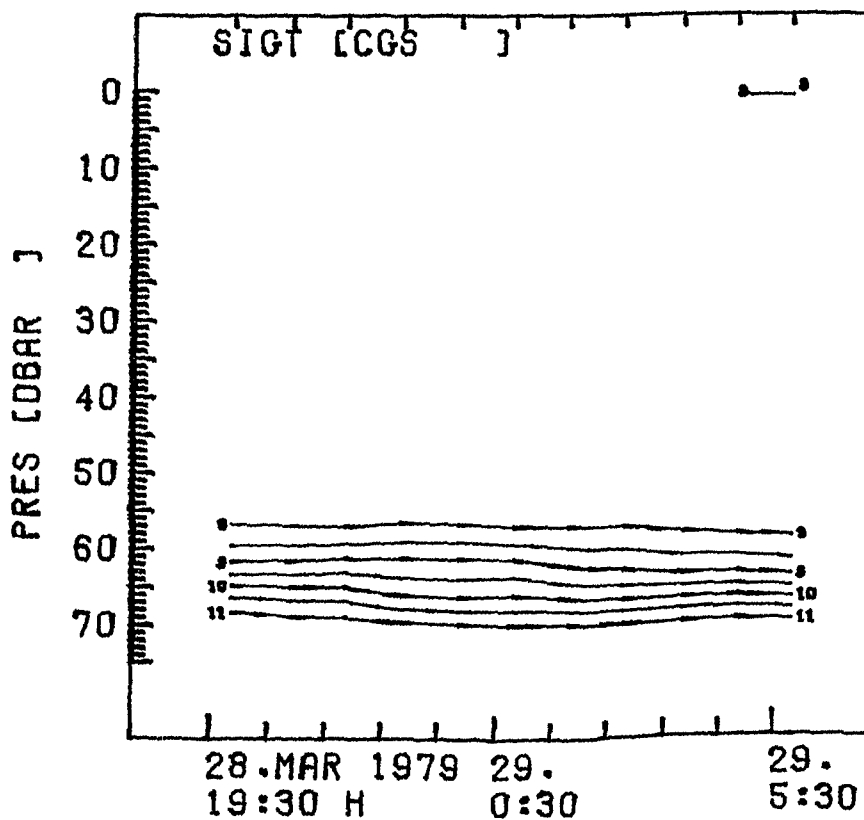
### BORNHOLM TEMPERATURE



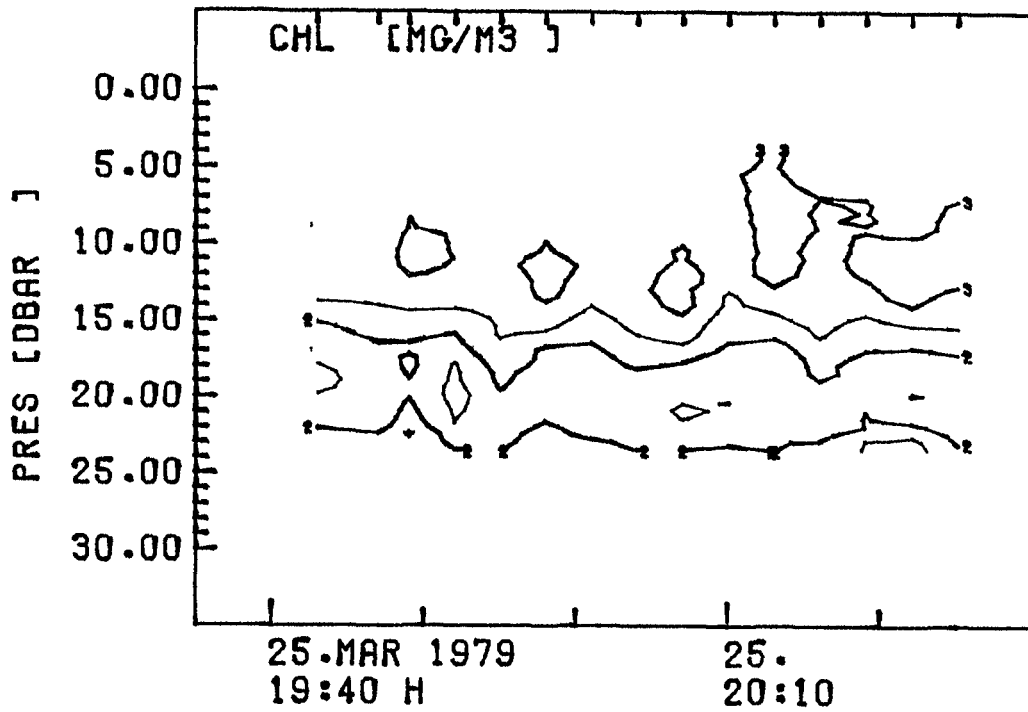
# BORNHOLM SALINITY



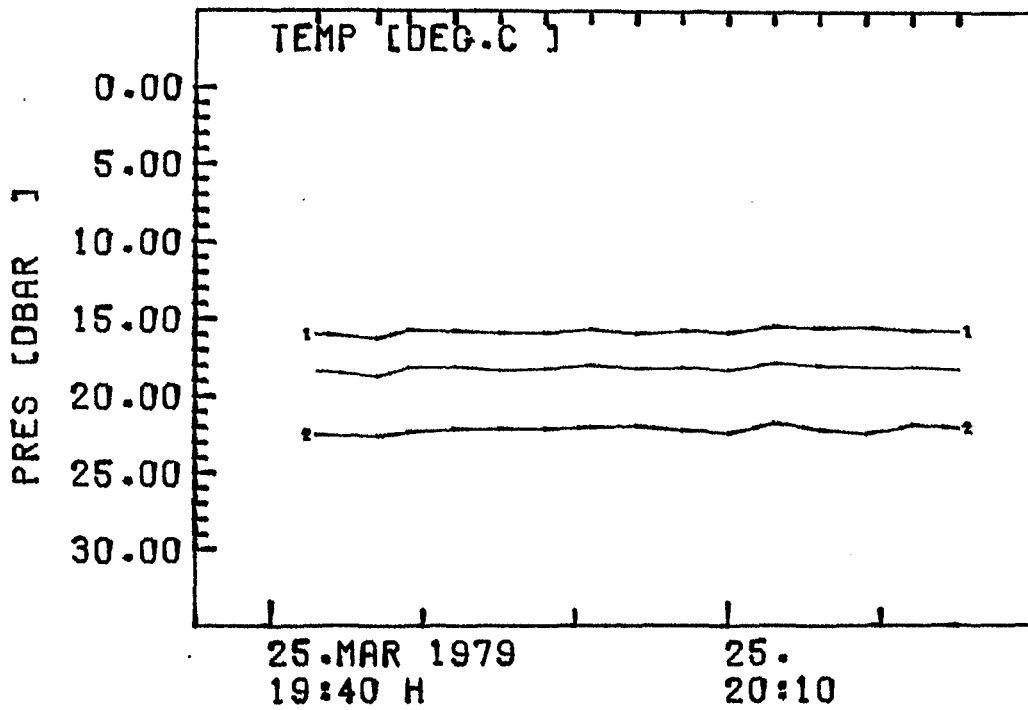
# BORNHOLM SIGMA-T



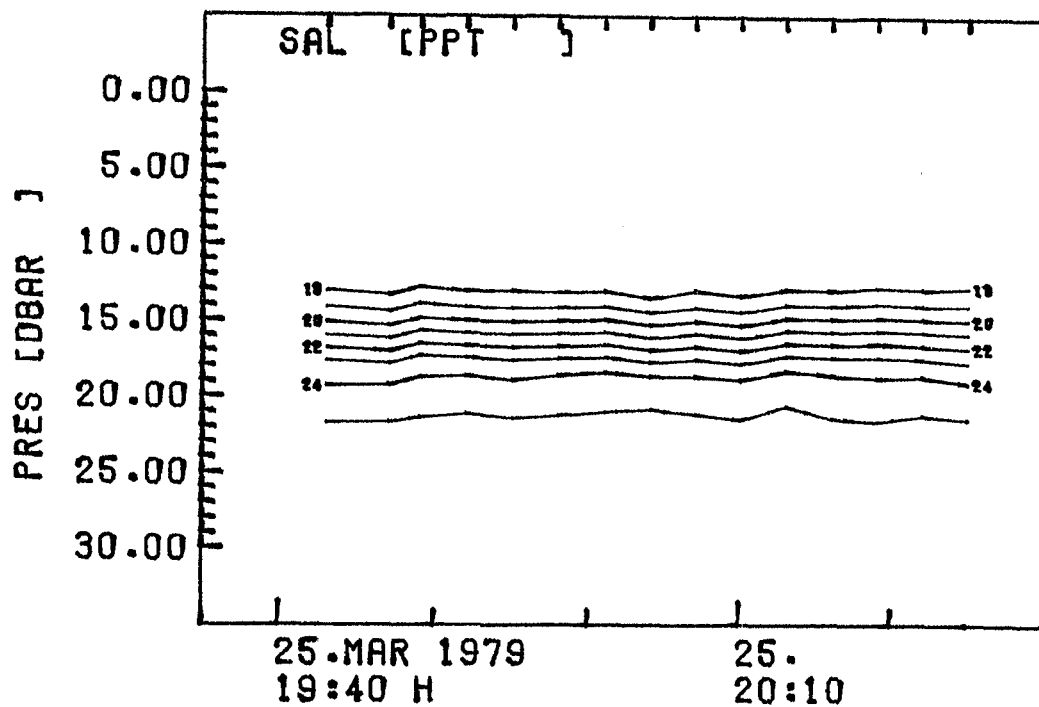
### KATTEGAT-AS CHLOROPHYLL



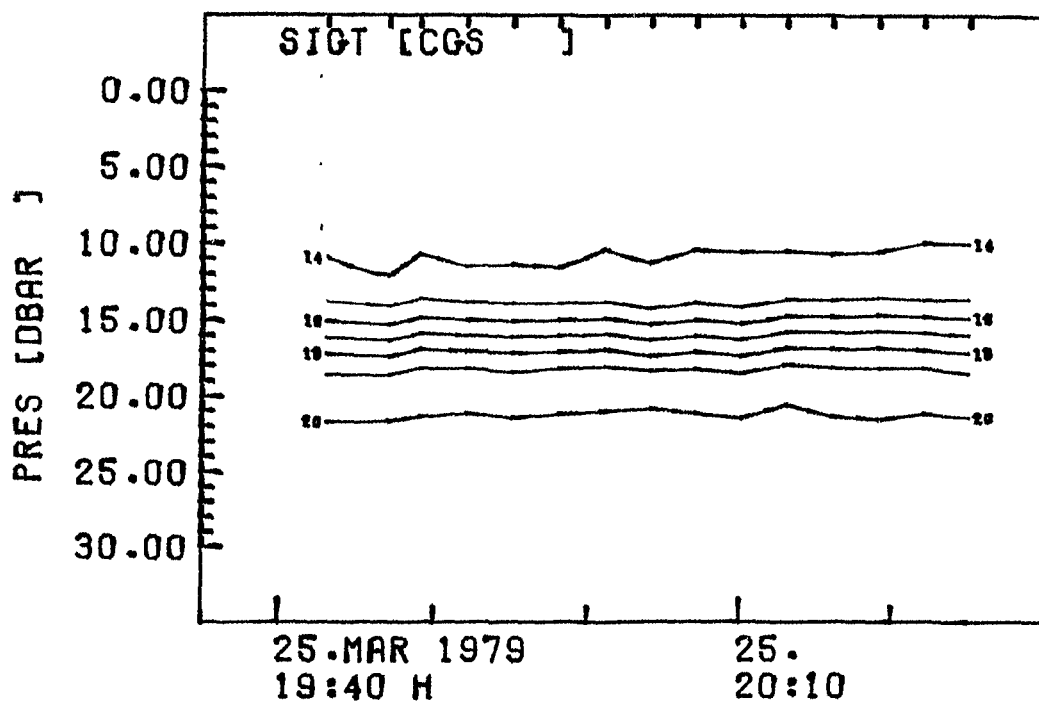
### KATTEGAT-AS TEMPERATURE



# KATTEGAT-AS SALINITY



# KATTEGAT-AS SIGMA-T



RUNNING AVERAGE; INTERVAL= 11 SAMPLES

HIGH PASS

Anhang 6.1: Filterresponse,

AMPLITUDE RESPONSE FOR DT=1

Hochpaß

NO	CYCLES	PERIOD	AMPLITUDE
0	0.00000E+00	0.10000E+38	0.0000
1	0.36364E-02	0.27500E+03	0.0026
2	0.72727E-02	0.13750E+03	0.0104
3	0.10909E-01	0.91667E+02	0.0233
4	0.14545E-01	0.68750E+02	0.0412
5	0.18182E-01	0.55000E+02	0.0640
6	0.21818E-01	0.45833E+02	0.0914
7	0.25455E-01	0.39286E+02	0.1231
8	0.29091E-01	0.34375E+02	0.1590
9	0.32727E-01	0.30556E+02	0.1985
10	0.36364E-01	0.27500E+02	0.2415
11	0.40000E-01	0.25000E+02	0.2875
12	0.43636E-01	0.22917E+02	0.3361
13	0.47273E-01	0.21154E+02	0.3868
14	0.50909E-01	0.19643E+02	0.4393
15	0.54545E-01	0.18333E+02	0.4930
16	0.58182E-01	0.17187E+02	0.5475
17	0.61818E-01	0.16176E+02	0.6023
18	0.65455E-01	0.15278E+02	0.6569
19	0.69091E-01	0.14474E+02	0.7110
20	0.72727E-01	0.13750E+02	0.7641
21	0.76364E-01	0.13095E+02	0.8157
22	0.80000E-01	0.12500E+02	0.8654
23	0.83636E-01	0.11957E+02	0.9130
24	0.87273E-01	0.11458E+02	0.9579
25	0.90909E-01	0.11000E+02	1.0000
26	0.94545E-01	0.10577E+02	1.0389
27	0.98182E-01	0.10185E+02	1.0745
28	0.10102E+00	0.98214E+01	1.1064
29	0.10545E+00	0.94828E+01	1.1346
30	0.10909E+00	0.91667E+01	1.1590
31	0.11273E+00	0.88710E+01	1.1795
32	0.11636E+00	0.85937E+01	1.1959
33	0.12000E+00	0.83333E+01	1.2085
34	0.12364E+00	0.80882E+01	1.2172
35	0.12727E+00	0.78571E+01	1.2221
36	0.13091E+00	0.76389E+01	1.2234
37	0.13455E+00	0.74324E+01	1.2212
38	0.13818E+00	0.72368E+01	1.2157
39	0.14182E+00	0.70513E+01	1.2072
40	0.14545E+00	0.68750E+01	1.1960
41	0.14909E+00	0.67073E+01	1.1822
42	0.15273E+00	0.65476E+01	1.1663
43	0.15636E+00	0.63953E+01	1.1485
44	0.16000E+00	0.62500E+01	1.1292
45	0.16364E+00	0.61111E+01	1.1087
46	0.16727E+00	0.59783E+01	1.0873
47	0.17091E+00	0.58511E+01	1.0654
48	0.17455E+00	0.57292E+01	1.0434
49	0.17818E+00	0.56122E+01	1.0215
50	0.18182E+00	0.55000E+01	1.0000

RUNNING AVERAGE; INTERVAL= 11 SAMPLES

LOW PASS

Anhang 6.2: Filterresponse,

AMPLITUDE RESPONSE FOR DT=1

Tiefpaß

NO	CYCLES	PERIOD	AMPLITUDE
0	0.00000E+00	0.10000E+38	1.0000
1	0.36364E-02	0.27500E+03	0.9974
2	0.72727E-02	0.13750E+03	0.9896
3	0.10909E-01	0.91667E+02	0.9767
4	0.14545E-01	0.68750E+02	0.9588
5	0.18182E-01	0.55000E+02	0.9360
6	0.21818E-01	0.45833E+02	0.9086
7	0.25455E-01	0.39286E+02	0.8769
8	0.29091E-01	0.34375E+02	0.8410
9	0.32727E-01	0.30556E+02	0.8015
10	0.36364E-01	0.27500E+02	0.7585
11	0.40000E-01	0.25000E+02	0.7125
12	0.43636E-01	0.22917E+02	0.6639
13	0.47273E-01	0.21154E+02	0.6132
14	0.50909E-01	0.19643E+02	0.5607
15	0.54545E-01	0.18333E+02	0.5070
16	0.58182E-01	0.17187E+02	0.4525
17	0.61818E-01	0.16176E+02	0.3977
18	0.65455E-01	0.15278E+02	0.3431
19	0.69091E-01	0.14474E+02	0.2890
20	0.72727E-01	0.13750E+02	0.2359
21	0.76364E-01	0.13095E+02	0.1843
22	0.80000E-01	0.12500E+02	0.1346
23	0.83636E-01	0.11957E+02	0.0870
24	0.87273E-01	0.11458E+02	0.0421
25	0.90909E-01	0.11000E+02	0.0000
26	0.94545E-01	0.10577E+02	-0.0389
27	0.98182E-01	0.10185E+02	-0.0745
28	0.10182E+00	0.98214E+01	-0.1064
29	0.10545E+00	0.94828E+01	-0.1346
30	0.10909E+00	0.91667E+01	-0.1590
31	0.11273E+00	0.88710E+01	-0.1795
32	0.11636E+00	0.85937E+01	-0.1959
33	0.12000E+00	0.83333E+01	-0.2085
34	0.12364E+00	0.80882E+01	-0.2172
35	0.12727E+00	0.78571E+01	-0.2221
36	0.13091E+00	0.76369E+01	-0.2234
37	0.13455E+00	0.74324E+01	-0.2212
38	0.13818E+00	0.72368E+01	-0.2157
39	0.14182E+00	0.70513E+01	-0.2072
40	0.14545E+00	0.68750E+01	-0.1960
41	0.14909E+00	0.67073E+01	-0.1822
42	0.15273E+00	0.65476E+01	-0.1663
43	0.15636E+00	0.63953E+01	-0.1485
44	0.16000E+00	0.62500E+01	-0.1292
45	0.16364E+00	0.61111E+01	-0.1087
46	0.16727E+00	0.59783E+01	-0.0873
47	0.17091E+00	0.58511E+01	-0.0654
48	0.17455E+00	0.57292E+01	-0.0434
49	0.17818E+00	0.56122E+01	-0.0215
50	0.18182E+00	0.55000E+01	0.0000

## 7. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1.1: Fluoreszenzsonde (Fa. ElectroOptics Suarez)
- Abb. 1.2 - 1.5: Eichkurven der EOS-Sond  
- gelöstes Chlorophyll- (Abb. 1.2 nach Stienen, 1981)  
- partikuläres Chl-a, uterer Bereich (Abb. 1.3)  
- " " gesamter Bereich (Abb. 1.4)  
- wie vor, halblogarithmisch (Abb. 1.5)
- Abb. 2.1: Stationskarte (nur Driftstativen der Fahrt 38/2)
- Abb. 2.2: Die allgemeine Hydrographie i Untersuchungsgebiet (nach Siedler und Hatje, 1974)
- Abb. 2.3: Wetterkarten zur Zeit der Daurstationen (Europäischer Wetterbericht, 979)
- Abb. 2.4: Driftboje (Abt. Theoret. Ozeogr., Inst. f. Meeresk. Kiel)  
Die Drifttiefe wird bestimmt urch die Länge des Verbindungsseils zwischen demTreibsegel und der Oberflächenboje.
- Abb. 2.5: Meßprogramm mit der Multisond am Beispiel von Temperatur- und Chlorophyllprofilen. Stündliche Serien von je 5 Profilen im 3min Abstand.
- Abb. 3.1: Chlorophyll-Hievprofil der Fluoreszenzsonde im Vergleich mit photometrischemChlorophyll aus gepumpten Wasserproben.
- Abb. 3.2: Übersicht über alle Chlorophyllfluoreszenzprofile und photometrischen Chlorophyllbestimmungen der Fahrt 38/2.
- Abb. 3.3: Streudiagramm aller fluorometischen und photometrischen Wertepaare aus derAbb. 3.2.
- Abb. 3.4a: T/S-Diagramm mit den Hauptwassermassen A-E.
- Abb. 3.4b: T/S-Diagramm mit den Hauptwassermassen A-E.
- Abb. 3.5: SKAGERRAK, mittlere Profile und Wasserschichten Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar).
- Abb. 3.6: KATTEGAT, mittlere Profile und Wasserschichten, Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar)
- Abb. 3.7: BORNHOLM, mittlere Profile und Wasserschichten, Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar)
- Abb. 3.8: SKAGERRAK, Nährstoffverteilung (St. 28a,b,c) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.

- Abb. 3.9: KATTEGAT, Nährstoffverteilung (St. 78a,b,c) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.
- Abb. 3.10: BORNHOLM, Nährstoffverteilung (St. 107a,b) und mittlere Profile von Chlorophyll und Sigma-t.
- Abb. 3.11: KATTEGAT- AS mittlere Profile und Wasserschichten Standardabweichung und Meßwertzahl ( $\Delta p = 0.5$  dbar)
- Abb. 3.12: SKAGERRAK, Bearbeitung der Multisondenprofile, (Bsp. Chlorophyll)  
A Originaldaten  
B Stundenmittel
- Abb. 3.13: SKAGERRAK, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien
- Abb. 3.14: KATTEGAT, Bearbeitung der Multisondenprofile, (Bsp. Chlorophyll)  
A Originaldaten  
B Stundenmittel
- Abb. 3.15: KATTEGAT, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien und Patchgrößen
- Abb. 3.16: BORNHOLM, Bearbeitung der Multisondenprofile, (Bsp. Chlorophyll)  
A Originaldaten  
B Stundenmittel
- Abb. 3.17: BORNHOLM, C Geglättete Stundenmittel  
D Isolinien
- Abb. 3.18: KATTEGAT- AS A Originalprofile Chlorophyllfluoreszenz  
B Geglättete Profile
- Abb. 3.19: KATTEGAT- AS Chlorophyll-Isolinien und Patchgrößen
- Abb. 3.20: KATTEGAT- AS Strömungsgeschwindigkeit und -richtung während der MS-Messungen in 15 m Tiefe.
- Abb. 3.21: SKAGERRAK Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)
- Abb. 3.22: KATTEGAT Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)
- Abb. 3.23: BORNHOLM Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)
- Abb. 3.24: KATTEGAT- AS Integralzeitreihen des Wärmeinhalts (ITEM), der Salzmenge (ISAL) und der Chlorophyllmenge (ICHL). Am rechten Rand: Mittelwerte und die Zeitabhängigkeit (z.B. "SIG >": signifikante Korrelation, abnehmend mit der Zeit)



- Abb. 3.25: SKAGERRAK T/S-Zeitreihe mit Tiefenangaben  
und Hauptwassermassen (vgl. Kap. 3.2.1.)
- Abb. 3.26: KATTEGAT
- Abb. 3.27: BORNHOLM T/S-Zeitreihe mit Tiefenangaben  
und Hauptwassermassen (vgl. Kap. 3.2.1.)
- Abb. 3.28: KATTEGAT-AS
- Abb. 3.29: SKAGERRAK, Driftkörperversetzung
- Abb. 3.30: KATTEGAT, Driftkörperversetzung
- Abb. 3.31: BORNHOLM, Driftkörperversetzung
- Abb. 4.1: Entwicklung der Frühjahrsblüte in geschichtetem  
Wasser (Hypothetische Rekonstruktion aus den bis-  
herigen Ergebnissen, Erklärungen im Text)
- Abb. 4.2: Grobe Abschätzung der Anteile räumlicher und zeit-  
licher Heterogenität in den Chlorophyllisolinien  
der Dauerstationen (vgl. Abb. 3.13d, 3.15d,  
3.17d, 3.19)
- Abb. 5.1: Kleinräumig-horizontale Variabilität der Chloro-  
phyllschichtung in den Originalprofilen der  
Kattegat-Driftstation
- Abb. 5.2: SKAGERRAK Kleinräumig-horizontale Ptchiness,  
dargestellt als Standardabweichung
- Abb. 5.3: KATTEGAT (SD) der Originalprofile in es Bursts,  
 $\Delta p = 0.5$  dbar
- Abb. 5.4: BORNHOLM Kleinräumig-horizontale Ptchiness,  
dargestellt als Standardabweichung
- Abb. 5.5: KATTEGAT-AS (SD) der Originalprofile in es Bursts,  
 $\Delta p = 0.5$  dbar
- Abb. 5.6: SKAGERRAK Feinstruktur der vertikalen Chlorophyll-  
verteilung. (Hochpaßdatender mittleren  
Stundenprofile, vgl. Tab. 3.8)
- Abb. 5.7: KATTEGAT
- Abb. 5.8: BORNHOLM Feinstruktur der vertikalen Chlorophyll-  
verteilung. (Hochpaßdatender mittleren  
Stundenprofile, vgl. Tab. 3.8)
- Abb. 5.9: KATTEGAT-AS
- Abb. 5.10: SKAGERRAK Lage der Chlorophyllschichten im Dichte-  
feld (Geglättete Chlorophyllprofile  
und Sigma-t-Isolinien)
- Abb. 5.11: KATTEGAT Lage der Chlorophyllschichten im Dichte-  
feld (Geglättete Chlorophyllprofile  
und Sigma-t-Isolinien)
- Abb. 9.99: "Die Wissenschaft steckt voller Wunde!"

## Anhang 8. Verzeichnis der Tabellen im Text

- 1.1 Einsatzmöglichkeiten der Meßgeräte
- 1.2 Berechnete Zellzahlen bei EOS-Eichung
- 1.3 Berechnete max. Zellzahlen in 1 ccm
  
- 2.1 Wassertabelle
  
- 3.1 Fluoreszenz und Wasserprobenchlorophyll, Stat. 78c
- 3.2 Ergebnisse des T-Tests Fluo/Phot
- 3.3 Wasserschichten
- 3.4 Phytoplanktonschichten
- 3.5 Phytoplanktonarten, Skagerrak
- 3.6 Phytoplanktonarten, Kattegat
- 3.7 Phytoplanktonarten, Bornholm
- 3.8 Processing of MS-Profiles
- 3.9 Integrale
- 3.10 Mittelwerte
- 3.11 Korrelation der Integrale mit der Zeit
- 3.12 Geschätzte Patchgrößen, Kattegat-AS
- 3.13 Wichtigste Merkmale der Dauerstationen
- 3.14 Häufigste Phytoplanktonarten, Skagerrak
- 3.15 Häufigste Phytoplanktonarten, Kattegat
- 3.16 Häufigste Phytoplanktonarten, Bornholm
- 3.17 Vorkommen der häufigsten Phytoplanktonarten
  
- 4.1 Variabilitätsfaktoren der Phytoplanktonzellkonzentrationen
- 4.2 Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen, Skagerrak
- 4.3 Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen, Kattegat
- 4.4 Entwicklung der Phytoplanktonzellkonzentrationen, Bornholm
- 4.5 Geschätzte Patchgrößen im Kattegat
- 4.6 Horizontale Diffusionskoeffizienten im Kattegat
- 4.7 Vertikale Diffusionskoeffizienten im Kattegat
- 4.8 Advektion auf den Dauerstationen
  
- 5.1 Chlorophyll-Schichtdicken in den Originalprofilen, Kattegat
- 5.2 Tiefenlage der  $\sigma_t$ -Isolinien im Skagerrak
- 5.3 Tiefenlage der  $\sigma_t$ -Isolinien im Kattegat

# BÖRNHOLM-ÖKOSYSTEM

