

BERICHTE  
aus dem  
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE  
an der  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT KIEL

Nr. 168  
1987

EIN VERFAHREN ZUR AUSWERTUNG VON ZOOPLANKTONFELDPROBEN  
MITTELS DER QUANTITATIVEN AUTOMATISCHEN BILDANALYSE  
AM BEISPIEL VON MATERIAL DER  
"METEOR - ÄQUATOREXPEDITION 1979"

von  
MANFRED ROLKE

DOI 10.3289/IFM\_BER\_168

Institut für Meereskunde  
Abt. Marine Planktologie  
Düsternbrookerweg 20  
D-2300 Kiel 1, FRG

ISSN 0341-8561

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. J. Lenz für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes, seine fachlichen Anregungen und seine ständige Diskussionsbereitschaft.

Herrn K.-A. Swoboda und Frau S. Ulmer sei für die Hilfeleistung bei der Umsetzung meiner Ideen in Computerprogramme gedankt.

Insbesondere gilt mein Dank Frau U. Passow und Frau P. Ringeltaube für die hilfreiche Unterstützung bei der Vorsortierung der Planktonproben.

Herrn Dr. M. Meyer möchte ich für die Ratschläge zur Durchführung der Clusteranalysen danken.

Herrn A. Eisele verdanke ich Ratschläge für die Erstellung der Abbildungen. Frau U. Junghans danke ich für die Ausführung von Zeichenarbeiten und Frau E. Mempel für die Durchführung von Photoarbeiten.

Für die Anfertigung von technischen Hilfsmitteln für das Bildanalyseverfahren danke ich Herrn W. Rook und den Mitarbeitern der Zentralwerkstatt des Instituts für Meereskunde, Kiel.

Ferner gilt mein Dank all den Mitarbeitern des Instituts für Meereskunde, Kiel, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Der Besatzung von F.S. "Meteor" und den Mitstreitern der Arbeitsgruppe Zooplankton danke ich für die Beteiligung an der Probennahme.

Nicht zuletzt danke ich Frau P. Swoboda, Herrn I. Eisemann und allen Freunden, die mir, vor allem während der Endphase der Arbeit, Unterstützung gewährten.

## Abstract

With the present thesis a method for the analysis of zooplankton field samples by means of quantitative automated image analysis is introduced. The procedure served for the investigation of net samples collected during the "Meteor - Equator - Expedition 1979".

The image analysis method has been developed for the "Quantimet 720" system produced by "Cambridge Instruments". A detailed description of the system's structure and its mode of operation is given. For the investigation of the zooplankton samples the system was equipped with a "Tessovar" microscope by Zeiss that enabled measurements by a 2-fold and a 3.2-fold magnification. Using this system a quick, precise and objective measurement of planktonic organisms is possible. Only copepods and their developmental stages were investigated. The geometrical parameters, length and area, were used for the measurements. Assuming that the ideal shape of a copepod equals an ellipsoid, the individual volume was calculated. The processing of the automatically stored raw data was carried out with specially developed computer programs. With these programs a statistical analysis and the presentation of results in the form of size - frequency - distributions are possible.

The potential measurement speed of the image analysis system was reduced to eliminate errors caused by artefacts arising from the adhering or overlapping of single organisms. Furthermore a counting chamber was designed to allow the repositioning of the organisms during measurement. The operator also has the possibility to append additional information in the form of indices to the measured data. The copepods have been differentiated into 4 functional groups: floaters, swimmers, wrigglers and nauplii. A clear visual distinction between these groups is easily made via the monitor and so a quick index assignment is possible.

The described system works more slowly than the coulter - counter - method but exceeds the traditional microscopic analysis in speed. Its information content surpasses that of the coulter - counter - method and is comparable with information gained by traditional microscopic

analysis.

The zooplankton material used for this thesis was sampled between the 2<sup>nd</sup> and the 6<sup>th</sup> of February in the equatorial Atlantic at 15 stations located on a profile, which ran along from 3<sup>o</sup> N to 2<sup>o</sup> S at a longitude of 22<sup>o</sup> W. At all stations five standard depth intervals (300m to 200m, 200m to 100m, 100m to 50m, 50m to 25m and 25m to the surface) were vertically sampled with a multiple opening and closing net of 100 $\mu$ m mesh size.

The fixed sample material was size- fractioned for image analysis and the largest fraction was pre- sorted under a stereomicroscope to disassemble aggregates of organisms.

The vertical distribution of copepods reflects water column stratification caused by a strongly marked thermocline that was located between 50m and 100m. The bulk of copepods is situated in the mixed upper layer with a clear maximum in the region between 25m and the surface. Below the thermocline the numbers of copepods are comparatively low with a slight increase in the region between 200m and 300m.

The mean biomass of 23 10<sup>3</sup> ppm and the structure of the vertical distribution of copepods in the upper 100m are comparable with findings from the oligotrophic regions of the anticyclonic gyres on both sides of the equator. This conformity meets the expectations of a normal seasonal development in the investigation area.

The slight increase in copepods between 200m and 300m is attributed to an active transport by meridional circulation cells as indicated by the distribution of the total amount of copepods and the structure of the size- frequency- distributions. However the influence of seasonal vertical migration cannot be excluded.

The vertical distribution of copepods does not indicate changes that can be explained by diurnal vertical migrations.

Accounting for 17% of the total abundance nauplii occur in negligible number. It is assumed that reproduction is limited by the poor food supply. On the other hand it is possible that the meshsize of 100 $\mu$ m is not sufficiently fine for a quantitative collection of nauplii.

The wrigglers are represented by Microsetella sp.. The composition of the samples indicates that the harpacticoid copepod uses aggregates

often referred to as "marine- snow" as substrate.

The structure of the size- frequency- distributions and the relationship between number and volume indicate the existence of a competition between floaters and swimmers. Despite their relatively small body size, a comparatively large food supply within the mixed layer and a prevailing "ambush encounter" feeding tactic allow the floaters to maintain a nearly constant volume ratio of 9:1 between the two groups throughout all the depth intervals. Below the mixed layer, where food supply is distinctly reduced, the encounter tactic of the swimmers has more success: They are able to reduce their body size and with increasing depth their dominance in number increases but is not sufficient to change the nearly constant volume ratio because their maximal mean size is only about one half that of the floaters.

The regional distribution of copepods shows a correlation with the meridional circulation cells. This leads to the hypothesis that the copepods in the region of the core of undercurrent, where the cells converge, are hydrographically concentrated. From this area of high concentration the copepods drift to the upper part of the mixed layer and to the lower part of the thermocline following the currents of the meridional circulation cells.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben mittels der quantitativen automatischen Bildanalyse vorgestellt. Mit dieser Methode wurden Netzproben der "Meteor-Aquatorexpedition 1979" ausgewertet.

Das Bildanalyseverfahren wurde für das System "Quantimet 720" der Firma Cambridge Instruments entwickelt. Sein Aufbau und die Funktionsweise werden ausführlich geschildert. Für die Auswertung des Probenmaterials wurde das System mit dem Lupenaufnahmegerät "Tessovar" der Firma Zeiss ausgerüstet. So konnte mit 2facher und 3,2facher Vergrößerung gearbeitet werden. Das Verfahren ermöglicht eine schnelle, präzise und objektive Vermessung der Planktonorganismen. Bedingt durch die Zusammensetzung des Probenmaterials wurden Copepoden und deren Entwicklungsstadien ausgewertet. Zur Vermessung wurden die geometrischen Parameter Länge und Fläche herangezogen. Unter der Annahme, daß die ideale Form eines Copepoden einem Ellipsoid gleicht, wurde das individuelle Volumen berechnet. Die Auswertung der automatisch auf Datenträger gespeicherten Rohdaten erfolgte mit speziell dafür entwickelten Rechnerprogrammen. Sie ermöglichen eine statistische Analyse und die Ergebnisdarstellung in Form von Größenhäufigkeitsverteilungen.

Die potentielle Meßgeschwindigkeit des Bildanalyseystems wurde im vorgestellten Verfahren reduziert, um bildanalytisch bedingte Fehlmessungen durch gegenseitige Berührung einzelner Organismen auszuschließen. Dazu wurde eine Probenkammer entwickelt, die eine Lagekorrektur während der Meßprozedur erlaubt. Zudem erhält der Anwender die Möglichkeit, den Meßdaten in Form von Indices Zusatzinformationen anzufügen. Dadurch gewinnen die Ergebnisse an Aussagekraft über die Beschaffenheit der Organismen. Für das Copepodenmaterial wurde eine Differenzierung in die funktionellen Gruppen Schwebler, Schwimmer, Schlängler und Nauplien eingeführt. Die Gruppen lassen sich auf dem Bildschirm leicht unterscheiden und ermöglichen dadurch eine schnelle Indexzuordnung

Die Methode ist bezüglich Geschwindigkeit und Aussagekraft zwischen

der herkömmlichen mikroskopischen Analyse und dem Coulter-Counter Verfahren anzusiedeln. Sie ist langsamer als das Coulter-Counter Verfahren und übertrifft in der Geschwindigkeit die herkömmliche mikroskopische Analyse. Ihre Aussagekraft ist größer als die des Coulter-Counter Verfahrens und vergleichbar mit der der herkömmlichen mikroskopischen Analyse.

Das der Arbeit zugrunde liegende Probenmaterial wurde auf einem Stationsschnitt im äquatorialen Atlantik von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 02.02. bis 06.02.1979 gewonnen. Mit einem Mehrfachschlieβnetz (100 µm Maschenweite) wurden auf 15 Stationen die Standardtiefen 0 - 25 m, 25 - 50 m, 50 - 100 m, 100 - 200 m und 200 - 300 m befishet.

Das fixierte Probenmaterial wurde für die bildanalytische Auswertung fraktioniert und die größte Fraktion unter dem Binokular vorsortiert, um Organismenaggregate zu vereinzeln.

In der Vertikalverteilung der Copepoden spiegelt sich die Gliederung der Wassersäule durch eine stark ausgeprägte Temperatursprungschicht wider. Die Sprungschicht hatte ihre mittlere Lage zwischen 50 m und 100 m Tiefe. In der Deckschicht befindet sich die Hauptmasse der Copepoden, ein deutliches Maximum tritt im Bereich 0 - 25 m auf. Unterhalb der Sprungschicht ist die Copepodenmenge reduziert, ein Anstieg erfolgt im Bereich 200 - 300 m.

Die mittlere Biomasse von  $23 \cdot 10^3$  ppm und die vertikale Verteilungsstruktur der Copepoden in den oberen 100 m sind vergleichbar mit der Situation in oligotrophen Regionen der beiderseits des Äquators liegenden antizyklonischen Wirbel. Diese Übereinstimmung entspricht den Erwartungen für einen normalen saisonalen Verlauf im Untersuchungsgebiet.

Für den Anstieg der Copepodenmengen im Tiefenbereich 200 - 300 m wird ein aktiver Transport durch meridionale Zirkulationszellen verantwortlich gemacht. Indizien dafür sind in der Verteilung der Gesamtmengen der Copepoden und in der Struktur der Größenhäufigkeitsverteilungen zu erkennen. Eine saisonal bedingte Vertikalwanderung wird nicht ausgeschlossen.

In der Vertikalverteilung der Copepoden ist kein Hinweis für Ände-

rungen, die auf tagesrhythmische Vertikalwanderungen schließen lassen, zu erkennen.

Nauplien treten mit 17 % der Gesamtabundanz in verschwindend kleiner Anzahl auf. Es wird angenommen, daß das geringe Nahrungsangebot die Reproduktion einschränkt. Möglich ist allerdings auch, daß die benutzte Maschenweite von 100 µm für eine quantitative Erfassung nicht ausreicht.

Die Gruppe der Schlängler wird durch Microsetella spec. vertreten. Die Zusammensetzung der Proben deutet darauf hin, daß der harpacticoide Copepode in der Literatur als "marine snow" bekannte Aggregate als Substrat benutzt.

Die Struktur der Größenhäufigkeitsverteilungen und die Wechselbeziehung zwischen Anzahl und Volumen deuten auf eine Konkurrenz zwischen Schwebern und Schwimmern. Danach sind die Schweber bei einer vergleichsweise hohen Nahrungspartikeldichte in der Deckschicht mit ihrer vorwiegend lauernden Ernährungsstrategie trotz relativ kleiner Körpergröße erfolgreich genug, um das in allen Tiefenbereichen ein annähernd konstantes Volumenverhältnis von 9 : 1 zwischen den beiden Gruppen aufrecht zu erhalten. Unterhalb der Deckschicht ist bei deutlich gesenktem Nahrungsangebot die Strategie der Schwimmer überlegen: Sie können ihre Körpergröße reduzieren. Dabei erreichen sie mit zunehmender Tiefe eine zahlenmäßige Überlegenheit, die jedoch nicht ausreicht, um das konstante Volumenverhältnis zu ändern, da ihre maximale mittlere Größe noch um die Hälfte kleiner ist als die der Schweber.

Die regionale Verteilung der Copepoden zeigt eine Korrelation zu den meridionalen Zirkulationszellen. Daraus kann die Hypothese abgeleitet werden, daß die Copepoden im Bereich des Unterstromkerns, in dem die Zellen konvergieren, zusammengetrieben werden. Aus dieser Region driften sie in der Strömungsrichtung der meridionalen Zirkulationszellen in den oberen Bereich der Deckschicht und in den unteren Bereich der Thermoclad.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
1.1 Die "Meteor-Äquatorexpedition 1979"	4
1.2 Automatische Partikelmeßverfahren	6
1.2.1 Partikelmeßsysteme nach dem Coulter-Counter-Prinzip	7
1.2.2 Partikelmeßsysteme auf optischer Basis	10
2. Das Untersuchungsgebiet	15
2.1 Meteorologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet	15
2.2 Das äquatoriale Stromsystem	17
2.2.1 Die Oberflächenströmungen	17
2.2.2 Der Äquatoriale Unterstrom	19
2.3 Die vertikale hydrographische Situation	20
3. Material und Methoden	22
3.1 Die Probennahme	22
3.1.1 Ort und Zeit der Probennahme	22
3.1.2 Das Netz	23
3.1.3 Die Fangbereiche	24
3.1.4 Die Probenaufbereitung	25
3.1.5 Kriterien zur Auswahl des Probenmaterials	25
3.2 Ein Verfahren zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben mittels der automatischen quantitativen Bildanalyse	26
3.2.1 Technische, die Auswertung verzögernde Probleme	27
3.2.2 Der Aufbau des Bildanalyseystems "Quantimet 720" am Institut für Meereskunde Kiel	29
3.2.2.1 Die Bilderfassungseinheit	29
3.2.2.2 Die Anzeigeeinheit	30
3.2.2.3 Die Hardware-Einheit	31
3.2.2.4 Die Software-Einheit	34
3.2.3 Der Verlauf eines Meßzyklus	35
3.2.4 Das Meßprogramm	36
3.2.4.1 Programme zur Auswertung der Rohdaten	39

3.2.4.2	Die Ergebnisauswertung	40
3.2.5	Die Aufbereitung der Zooplanktonfeldproben für die automatische Bildanalyse	41
3.2.5.1	Die Probenkammer	43
3.3	Diskussion des Bildanalyseverfahrens, der biologischen Bedeutung der Unterscheidungskriterien und der Datenauswertung	45
3.3.1	Kritische Betrachtung von Meßgeschwindigkeit und -genauigkeit	45
3.3.2	Die Größenstruktur eine pelagischen Nahrungskette	48
3.3.2.1	Faktoren, welche die Größenstruktur der Nahrungskette beeinflussen	50
3.3.2.2	Die Größe der 1. Antennen als Hinweis auf die Ernährungsweise der Copepoden	51
3.3.3	Das Bildanalyseverfahren im Vergleich mit anderen Auswertungsmethoden	53
3.3.4	Die Clusteranalyse	55
4.	Ergebnisse	56
4.1	Die vertikale und regionale Verteilung des Gesamtvolumens und der Gesamtanzahl der Copepoden	56
4.1.1	Die Summe aller Copepoden	57
4.1.2	Die Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien	60
4.2	Regionale und vertikale Änderungen der Größenhäufigkeitsverteilungen der Anzahl und des Volumens der Copepoden	62
4.2.1	Die Summe aller Copepoden	63
4.2.2	Die Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien	68
4.3	Ergebnisse der Clusteranalyse	74
4.3.1	Das Volumen der Summe aller Copepoden	74
4.3.2	Die Schweber	76
4.4	Tagesrhythmische Änderungen in der Vertikalverteilung der Copepoden	78

5.	Ergebnisdiskussion	78
5.1	Die Vertikalverteilung der Summe aller Copepoden	79
5.2	Die Vertikalverteilung der Gruppe Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien	84
5.3	Die regionale Verteilung der Summe aller Copepoden	86
6.	Literaturverzeichnis	88
7.	Anhang	100

## 1. Einleitung

Mit Beginn des 19. Jahrhunderts endete die Epoche der grundlegenden Entdeckung und Kartierung neuer Länder. Im Zusammenhang mit der Suche nach Navigationshilfen wuchs das Interesse, den Ozean zu erforschen. Dabei lagen die Schwerpunkte auf der Untersuchung der Meeresströmungen, der Temperatur, des Salzgehalts, der Bodenbeschaffenheit aber auch der Tiere und Pflanzen, die den Ozean besiedeln. Man beschränkte sich jedoch im Bereich der marinen Biologie bei nahezu allen großen Expeditionen, die zum Beginn des 1. Weltkrieges durchgeführt wurden, auf taxonomische, biogeographische und morphologische Untersuchungen. Durch den drastischen Rückgang der Fischereierträge gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde ein neuer Aspekt in die marinbiologische Forschung eingeführt. Hielt man bis zu diesem Zeitpunkt den Fischreichtum des Ozeans für unerschöpflich, so machte man sich nun Gedanken über die Größe des Fischbestands und dessen Nahrungsquellen. Dazu wurde es notwendig, quantitative Untersuchungen durchzuführen. Die ersten quantitativen Arbeiten ergaben schnell interessante Ergebnisse über die geographische und saisonale Variabilität des Planktons. Von nun an spielten zwar faunistische und biogeographische Forschung noch eine große Rolle, jedoch trat die Bedeutung der Erforschung von quantitativer Verteilung sowie Interaktionen zwischen Organismen und physikalischen und biologischen Faktoren, die die Verteilung mariner Organismen steuern, immer stärker in den Vordergrund (Vinogradov 1970). Um den Kenntnisstand der marinen Biologie zu erweitern, wurden seitdem zahlreiche nationale und internationale Expeditionen in allen Bereichen des Ozeans durchgeführt.

### 1.1 Die "Meteor-Äquatorexpedition 1979"

Die Bundesrepublik Deutschland führte im Jahre 1979 im Rahmen des First GARP (Global Atmospheric Research Programm) Global Experiment (FGGE) mit ihrem Forschungsschiff "Meteor" im Zeitraum vom 2. Februar

bis zum 13. Juni Untersuchungen im zentralen äquatorialen Atlantik durch. Den Anstoß für dieses Forschungsvorhaben gab die zunehmende Erkenntnis über die Bedeutung der tropischen Atmosphäre für das gesamte atmosphärische System. Untersuchungen, die zu diesem Kenntnisstand beitrugen, lassen auf eine rund 500jährige Tradition zurückblicken (Fahrbach 1983). Höhepunkte waren das ICITA (International Cooperative Investigations of the Tropical Atlantic) Programm und das GARP. Während des ICITA-Programms wurden 1963 - 1964 drei multinationale Experimente (Equalant I - III) unter besonderer Berücksichtigung der meeresbiologischen Faktoren durchgeführt. Eingebettet in das GARP erfolgte 1974 das FGGE, aus welchem das Probenmaterial der vorliegenden Arbeit stammt. Die Bezeichnung GARP weist darauf hin, daß im Vordergrund meteorologische Untersuchungen standen. Die starke Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre forderte für das Verständnis des Systems ein umfassendes ozeanographisches Untersuchungsprogramm. Neben dem Einfluß des Ozeans auf die Atmosphäre bleiben die ozeanographischen Verhältnisse nicht ohne Rückwirkung auf das Leben im Meer. So bot es sich an, die biologischen Faktoren unter dem Einfluß der ozeanographischen Verhältnisse zu studieren. Dazu wurde während der "Meteor-Äquatorreise 1979" in Anlehnung an die ozeanographischen Untersuchungen ein biologisches Grundprogramm durchgeführt. An diesem Grundprogramm beteiligten sich die Arbeitsgruppen "Nährsalze und Sauerstoff", "Bakterien", "Phytoplankton", "Zooplankton" und "Ichthyoplankton". Zusätzlich zu dem Grundprogramm wurden während zweier Fahrtabschnitte im Zeitraum vom 27.02. bis zum 21.04. schwerpunktmäßig biologische Arbeiten ausgeführt.

Über die biologischen Untersuchungen liegen bereits Ergebnisse vor. So berichtete Meyerhöfer (1980) über die Primärproduktion und die Verteilung des Chlorophylls während zweier Schnitffahrten, Bauerfeind (1983) über die Primärproduktion und die Ökologie des Phytoplanktons, Rolke (1981) über die Biomasseverteilung des kleineren Zooplanktons, Hülsemann (1984) über die calanoiden Copepoden der Schnitffahrt 3, Lopes (1983) über die Verteilung und die Häufigkeit des Ichthyoplank-

tons während dreier Schnittfahrten und Kinzer und Schulz (1985) über die Vertikalverteilung und die Ernährungsweise der Myctophiden.

Die Verteilung der Biomasse des kleineren Zooplanktons zeigte eine saisonale Beziehung zu den ozeanographischen Prozessen. Die regionale Verteilung schwankte sehr stark, jedoch ließ sich keine deutliche Korrelation zur Hydrographie erkennen. In der Vertikalverteilung spiegelte sich die Gliederung der Wassersäule durch die im Untersuchungsgebiet stark ausgeprägte Temperatursprungschicht wider, jedoch ließen sich keine Tag-Nacht Unterschiede, wie sie Le Borgne (1977) bei einer vergleichbaren Untersuchung auf 4° W im Äquatorbereich fand, erkennen (Rolke 1981).

## 1.2 Automatische Partikelmeßverfahren

Von den für die Untersuchung der Biomasse (Rolke 1981) verwendeten Netzproben lagen noch fixierte Unterproben vor. So bot es sich an, dieses Material einer ausführlichen Auswertung zu unterziehen, um weitere Informationen über die Verteilung des kleineren Zooplanktons im Untersuchungsgebiet zu gewinnen. Die herkömmliche Methode zur Untersuchung von fixierten Planktonproben ist die mikroskopische Analyse. Dabei stehen die taxonomische Zuordnung, die Untersuchung der Ernährungsweise und die Größenvermessung im Vordergrund. Diese Arbeit ist sehr zeitraubend und verlangt gut ausgebildetes und trainiertes Personal. Das vorliegende Material besteht, bedingt durch Fangmethode (Netzfängen mit 100 µm Maschenweite) und Untersuchungsgebiet, zahlenmäßig zu einem hohen Prozentsatz aus Copepoden und deren Entwicklungsstadien. Die Proben zeichnen sich durch eine große Diversität aus. Hülsemann (1984) konnte auf 3 Dauerstationen bei Netzfängen mit größerer Maschenweite (300 µm) über 60 calanoide Copepodenarten identifizieren. Sie beschränkte sich dabei auf adulte Organismen. Versucht man Entwicklungsstadien der tropischen Copepoden, die im vorliegenden Probenmaterial reichlich vertreten sind, taxonomisch einzuordnen, so stößt man auf sehr lückenhafte Bestimmungsliteratur (Timonin und Voronina, 1977). Zudem ist die Biologie der Arten so wenig erforscht,

daß in einer taxonomischen Zuordnung wenig Aussagekraft über die ökologische Bedeutung steckt. Diese Probleme führten dazu, nach einem Weg zu suchen, wie man die Auswertung beschleunigen und Parameter messen kann, die eine Vorstellung über die Rolle der Organismen im System ermöglichen.

Die langwierige Prozedur der Erkennung und Charakterisierung von Partikeln in Planktonproben ließ schon früh den Wunsch nach einer Automatisierung aufkommen. Dazu geben Parsons und Seki (1969) einen kurzen Überblick über bis dahin durchgeführte Versuche der Automatisierung. Fawell (1976) stellt elektronische Meßsysteme vor und unterscheidet drei Kategorien: Meßsysteme, die nach dem Funktionsprinzip des Coulter-Counter (Coulter 1957) arbeiten, Fernsehbildanalyse-systeme und rechnergesteuerte Formerkennungssysteme.

An dieser Stelle sollen einige Meßsysteme vorgestellt werden, um ein Bild über die augenblicklichen Möglichkeiten der elektronischen, automatischen Auswertung von Planktonproben zu entwerfen und einen Vergleich mit dem in der Arbeit entwickelten Verfahren zu ermöglichen. Dazu erfolgt die Einteilung der Geräte grundsätzlich nach der o.a. Gliederung von Fawell (1976), wobei die letzten beiden Kategorien unter dem Titel "Partikelmeßsysteme auf optischer Basis" zusammengefaßt werden.

#### 1.2.1 Partikelmeßsysteme nach dem Coulter-Counter-Prinzip

Partikelzählgeräte, besonders der Coulter-Counter, wurden seit über 20 Jahren im Bereich der marinen Forschung eingesetzt (Pugh 1978). Der Coulter-Counter wurde entwickelt, um Blutzellzählungen zu beschleunigen und größere Objektivität und Genauigkeit zu erreichen, als dies mit gebräuchlichen Zählkammern möglich ist. Das Funktionsprinzip des Gerätes basiert darauf, daß Stoffe verschiedener Zusammensetzung unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Ein Elektrolyt wird durch ein dünnes Röhrchen gepumpt. Der innere Durchmesser des Röhrchens richtet sich nach der Größe der Meßobjekte. Beidseitig des Röhrchens sind Elektroden angebracht. Durch Röhrchen und Elektrolyt

fließt ein elektrischer Strom. Bringt man in das Trägermedium Partikel ein, so erzeugt ein Objekt beim Passieren der Elektroden durch seinen gegenüber den Elektrolyten unterschiedlichen Widerstand eine Spannungsänderung. Der Spannungsimpuls ist dem Volumen des Partikels direkt proportional. Voraussetzung für die Messung ist ein deutlicher Leitfähigkeitsunterschied zwischen Partikel und Elektrolyt. So wird neben einer schnellen Partikelzählung eine genaue Volumenmessung ermöglicht. Die Messung eines Partikels benötigt in Abhängigkeit von der Durchflußgeschwindigkeit eine Zeitspanne von 1/50000 bis 1/100000 Sekunde (Coulter 1957).

El-Sayed und Lee (1963) testeten den Coulter-Counter auf seine Nutzbarkeit für die Zählung von einzelligen Algen. Sie heben hervor, daß das Instrument viele Vorteile gegenüber der herkömmlichen mikroskopischen Analyse bietet, wobei Geschwindigkeit und Meßgenauigkeit herausragen. Fehler treten auf, wenn die Zellkonzentration zu hoch ist, so daß das Volumen zweier eng aneinanderliegender Zellen einem einzigen Partikel zugeordnet wird. Ein ähnliches Problem tritt auf, wenn Kulturen von Zellaggregaten ausgewertet werden. Gute Anwendungsmöglichkeiten sehen die Autoren für die Aufnahme von Größenhäufigkeitsverteilungen.

Cushing und Nicholson (1966) und Cushing et. al. (1968) benutzen den Coulter-Counter zur Bestimmung der Algenproduktionsrate in natürlichen Proben. In diesen Proben tritt eine fließende Partikelgrößenverteilung auf. So ist es nicht möglich, die Meßwerte einzelner Größenklassen eindeutig einer Art zuzuordnen. Möglich wäre das nur bei einer kleinen Diversität und zugleich in der Größe unterschiedlichen Arten.

Ein erweitertes Coulter-Counter-System stellt Fulwyler (1966) vor. Mit dieser Ausstattung wird das Volumen biologischer Zellen gemessen und nach vorgegebenen Größenkategorien in getrennte Gefäße sortiert.

Parsons (1973) faßt die Anwendungsmöglichkeiten des Coulter-Counter im Bereich der Phytoplanktonforschung in einer Gebrauchsanleitung zusammen. Er weist darauf hin, daß Probleme, die durch die Beschaffenheit des Materials, speziell in natürlichen Proben, hervorgerufen werden, nur schwer zu diagnostizieren sind.

In den bisher beschriebenen Verfahren war der Coulter-Counter für Partikelmessungen im Größenbereich von Blutzellen und einzelligen Algen angelegt. Um repräsentative Proben für Phytoplanktonuntersuchungen zu gewinnen, genügen relativ kleine Wassermengen von einigen Litern. Das Zooplankton tritt in weitaus kleineren Konzentrationen auf. Es müssen große Wassermengen filtriert werden, um repräsentative Proben zu erhalten. Durch diese Prozedur bleibt die kleinskalige räumliche Verteilung verdeckt.

Um ein besseres Bild über die Feinverteilung des Zooplanktons zu erhalten, entwickelten Maddux und Kanwisher (1965) ein Meßinstrument nach dem Funktionsprinzip des Coulter-Counter, welches in situ Aufnahmen von Partikelgrößenverteilungen im Größenbereich des kleineren Zooplanktons (Partikelgrößen von  $0,001 \text{ mm}^3$  bis  $2 \text{ mm}^3$ ) ermöglicht. Gleichzeitig wird die filtrierte Wassermenge registriert. Die Meßergebnisse werden über Mehrleiterkabel an Bord übermittelt. Treten im Untersuchungsgebiet nur wenige Arten mit deutlich unterschiedlicher Größe auf, so ist eine taxonomische Zuordnung möglich. Zudem können nach Aussage der Autoren mit dem Detektor als Laborgerät auch fixierte Proben ausgewertet werden. Dazu müssen die Organismen wieder in einen Elektrolyten wie Seewasser oder NaCl-Lösung überführt werden.

Boyd und Johnson (1969) und Boyd (1973) präsentieren eine Weiterentwicklung der Systemkonfiguration von Maddux und Kanwisher. Mit diesem Gerät werden gleichzeitig die Zooplanktonverteilung in situ vermessen und für den Aufenthaltsort der Organismen Temperatur, Tiefe und Durchflußvolumen angegeben. Die Daten werden an Bord übermittelt. Durch Rechnerprogramme können sowohl Größenhäufigkeitsverteilungen der Organismen als auch die übrigen Parameter graphisch dargestellt werden. Das Gerät besitzt einen Meßbereich von  $0,078 \text{ mm}^3$  bis  $8,69 \text{ mm}^3$ . Dies entspricht dem Durchmesser eines kugeläquivalenten Volumens von  $0,531 \text{ mm}$  bis  $2,55 \text{ mm}$ .

Mackas et. al. (1981) entwickelten ein automatisches Zooplanktonmeßgerät, das mit einem Sensor nach Boyd und Johnson (1969) ausgestattet wurde. Es ermöglicht Partikelmessungen in einem Größenbereich von  $0,3 \text{ mm}$  bis  $3 \text{ mm}$ . Die Ergebnisse werden automatisch in 10 Größenklassen sortiert.

Ebenfalls auf der Basis des Coulter-Counter-Prinzips arbeitet das System von Dauphinee (1977), Herman (1977), Herman und Dauphinee (1980) und Herman und Mitchell (1981). Im Gegensatz zu den in situ Systemen von Boyd und Johnson (1969) und Maddux und Kanwisher (1965), die für die Messung der Leitfähigkeitsänderung hochfrequenten Wechselstrom anwenden, benutzen jene Autoren Gleichstrom. Mit ihrer Konfiguration können sie neben Zählungen und Volumenmessungen auch eine Längenmessung durchführen. Es besteht die Möglichkeit, das Gerät zusammen mit weiteren Meßsonden auf einem Trägersystem, dem "Batfish", in situ einzusetzen. Der "Batfish" ist ein ferngesteuertes System, mit dem ausgewählte Tiefenhorizonte oder Vertikalprofile untersucht werden können. Die Daten werden on line an Bord aufgezeichnet, so daß ein schneller Einblick in die biologische und hydrographische Situation möglich wird. Treten im Untersuchungsgebiet dominante Arten auf, die sich in der Größe deutlich unterscheiden, so ist eine taxonomische Zuordnung aufgrund der Größenhäufigkeitsverteilung denkbar. Die Autoren äußern die Möglichkeit, auf dieser Grundlage Entwicklungsstadien zu unterscheiden. Neben dem in situ Einsatz kann das Gerät zur Auswertung von Netzproben benutzt oder an ein Pumpsystem angeschlossen werden. Herman und Mitchell (1981) betonen jedoch, daß dieses automatische System niemals die aufwendige Arbeit der mikroskopischen Analyse völlig ausschließen wird, da eine Überprüfung der automatisch gelieferten Daten notwendig ist. Dazu wird das vermessene Planktonmaterial in einem Netz aufgefangen.

### 1.2.2 Partikelmeßsysteme auf optischer Basis

Im einfachsten Fall nutzen automatische Partikelmeßsysteme auf optischer Basis die Unterbrechung eines Lichtstrahls durch ein passierendes Partikel als Zählsignal. In stärker ausgebauten Systemen dient zur elektronischen Auswertung das Bild von Meßobjekten.

Parrish et. al. (1960) benutzten zur Zählung von Heringseiern ein Gerät, bei dem die Eier durch eine schmale Röhre geschleust werden. Im Durchfluß unterbrechen sie einen senkrecht zur Flußrichtung auf eine

Photozelle gerichteten Lichtstrahl. Die Unterbrechung wird mit Hilfe der Photozelle als Zählsignal registriert. Davis und Paulik (1965) entwickelten ein ähnliches Gerät und benutzten es zur Zählung von Lachseiern. Eine vergleichbare Ausstattung wurde zur Zählung von Artemia salina Nauplien (Mitson 1963) eingesetzt

Kamentsky et. al. (1965) und Kamentsky (1967) stellen ein System zur Zählung und Sortierung von Partikeln aufgrund ihrer optischen Eigenschaften vor. Sie benutzen das Gerät im medizinischen Bereich zur Auswertung von Gewebezellen. In ihrem Beispiel messen sie einerseits die Absorption von Nucleinsäuren bei einer definierten Wellenlänge und andererseits die Zellgröße durch die Streuung des sichtbaren Lichts. Nach dem Verhältnis beider Ergebnisse werden sodann entsprechende Zellen aussortiert und auf Filtern für eine mikroskopische Analyse aufgefangen.

Ein halbautomatisches Verfahren zur Teilchenzählung und -größenanalyse stellt Krey (1961) vor. Dazu werden Photographien von sedimentierten Planktonproben angefertigt. Mit Hilfe des "Teilchengrößenanalysators" der Firma Zeiss werden die Teilchen durch Flächenabgleichung gezählt und vermessen. Zur Messung dient ein Lichtkreis mit veränderbarem Durchmesser, der auf das Teilchen so eingestellt wird, daß sich ihre Flächen decken. Die Kreisdurchmesser werden nach Größenklassen geordnet. So erhält man eine Größenhäufigkeitsverteilung der Partikel. Dies Verfahren setzte Lenz (1968) zur Größenanalyse und Mengenbestimmung von Detrituspartikeln ein.

Cooke et. al. (1970) und Fulton (1972) beschreiben ein automatisches Planktonmeßgerät zur Auswertung von Feldproben. Mit diesem Gerät werden Organismen durch eine transparente Kammer geführt. Durch ein Lichtquelle wird das Bild der durch die Kammer strömenden Partikel auf eine Anordnung von Photozellen projiziert. Die Menge der durch das Bild abgedeckten Photozellen dient als Maß für die Länge der Planktonorganismen. Das System liefert Größenhäufigkeitsverteilungen mit einer Klassenbreite von 0,5 mm im Größenbereich von 0,5 mm bis 15 mm.

Pugh (1968) stellt ein System zur in situ Messung von Partikeln im Größenbereich des Phyto- bis Mikrozooplanktons vor. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Lichtstrahlunterbrechung. In starker Verein-

fachung wird dabei die Attenuation eines sich im parallelen Lichtstrahl befindlichen Partikels gemessen. Die Beziehung zwischen projizierter Fläche und Attenuation dient der Größenbestimmung. Das Gerät wurde in Kombination mit einer Schiffspumpe zur Messung der horizontalen Verteilung und in Kombination mit einer Tauchpumpe zur Aufnahme von Vertikalprofilen eingesetzt.

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Computertechnik wurde es möglich, Partikel auf optischer Basis exakter zu vermessen als mit den bisher vorgestellten Systemen. Man bezeichnet solche rechnergestützten Systeme als Bildanalysesysteme. Grundsätzlich unterscheidet man halbautomatisch und vollautomatisch arbeitende Systeme. Halbautomaten verwenden Digitalisiertablets oder Videobilder. Die Konturen werden mit einem Stift auf dem Digitalisiertablett oder dem Fernsehschirm umfahren oder angetippt. Mit einer entsprechenden Rechnersoftware wird die Messung von geometrischen Parametern der gekennzeichneten Objekte möglich. Vollautomaten benötigen ein Videobild. Die Bilder werden aufgrund von Grauwertunterschieden automatisch vermessen. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe von aufwendigen Rechnerprogrammen (softwareorientiert) oder durch elektronische Bausteine, die einzelne Parameter vermessen. Reine Softwareauswertung ist im Vergleich mit der Verwendung von Meßbausteinen langsamer. Die Auswertung erfolgt in beiden Fällen im Bereich von Sekundenbruchteilen. Voraussetzung für die Anwendung von Vollautomaten ist ein kontrastreiches Bild.

Als Beispiel für die Anwendung eines Halbautomaten wird das System von Lough und Potter (1983) vorgestellt. An Bord wurden Silhouettenaufnahmen von Planktonproben angefertigt. Die Bilder wurden anschließend mit einem Halbautomaten der Firma Zeiss (Carl Zeiss MOP 3) durch Antippen mit einem opto-elektronischen Stift ausgewertet. Während die Zählung und Vermessung automatisch geschieht, muß die Artzuordnung durch den Bearbeiter erfolgen.

Mit vollautomatischen Systemen ist neben der Erstellung von Größenhäufigkeitsverteilungen prinzipiell eine taxonomische Zuordnung

der Daten durch Formerkennung möglich. Zur Formerkennung dient eine Kombination mehrerer Meßparameter, die die geometrische Figur eindeutig von anderen Partikelformen unterscheidet.

Uhlmann et. al. (1978) und Schlimpert et. al. (1980) erreichten durch ihre Klassifikationsstruktur mit ihrem automatischen Bildverarbeitungs- und Mustererkennungssystem für fünf Phytoplanktonarten eine fehlerfreie Gattungszuordnung.

Furuya (1982) überlagert mit Hilfe eines Bildspeichers ein Epifluoreszenz- und ein Phasenkontrastbild, um Kontur und projizierte Fläche der Organismen kontrastreich abzubilden. Mit Hilfe eines Lichtgriffels werden aneinanderliegende Partikel manuell getrennt und offensichtliche Bildfehler korrigiert. Die Vermessung von Länge und Breite der Partikel erfolgt automatisch.

Jeffries et. al. (1980, 1984) entwickelten ein automatisches Bildanalysesystem zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben. Sie erreichten durch eine Kombination von Form-algorithmen, die auf morphologisch geometrischen Parametern der Organismen basieren, die automatische Klassifizierung von taxonomischen Hauptgruppen wie Copepoden, Dekapoden, Zoealarven, Euphausiden, Fischeiern, Fischlarven etc. Probleme bei der Formerkennung entstehen dadurch, daß einige Gruppen kontrastarm abgebildet werden und die Organismen zufällig orientiert in der Probenkammer liegen. Die Autoren erreichten mit Material aus dem Küstenbereich vor Neu-England eine Zuordnungsgenauigkeit von 90 %.

Mit einem kommerziell produzierten automatischen Bildanalysegerät der Firma Cambridge Instruments, dem "Quantimet 720" wurden Versuche zur Auswertung von biologischen Organismen durchgeführt. Das Gerät ermöglicht die Messung von geometrischen Parametern wie Fläche, Umfang, und Durchmesser in verschiedenen Richtungen. Sprules und Holtby (1979) benutzten das System zur Zählung und Vermessung von limnischem Zooplankton. Dietrich (1980) untersuchte mit ihm für fünf typische Copepodenarten der Kieler Bucht Flächen/Trockengewichtsbeziehungen. Hoppe (1981) setzte es zur Auswertung der Autoradiographie ein. Rolke und Lenz (1984) stellten eine erste funktionstüchtige Version einer Methode zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben vor. Mit einem moderneren Modell, dem "Quantimet 23C", führte Dietrich (1984) Routine-

messungen zur Kontrolle des Wachstums und der Produktivität des in Massenkulturen gezüchteten harpacticoiden Copepoden Tisbe holothuriae durch.

Vergleicht man zusammenfassend Systeme, die auf der Basis des Coulter-Counter Prinzips arbeiten, mit Systemen, welche die optischen Eigenschaften von Organismen ausnutzen, so bieten Coulter-Counter Systeme den Vorteil der exakten Volumenmessung und der in situ Messung. Allerdings ist immer eine zusätzliche mikroskopische Analyse notwendig, um die Daten zu verifizieren. Der Vorteil moderner Bildanalyse-systeme liegt in der potentiellen Möglichkeit der automatischen taxonomischen Zuordnung von Meßwerten und der Überprüfungsmöglichkeit auf dem Bildschirm während der Meßprozedur. Durch die schnelle Entwicklung auf dem elektronischen Sektor ist der in situ Einsatz von Bildanalyse-systemen nur eine Frage der Zeit.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Auswertung von Zooplanktonproben mit Hilfe des Bildanalyse-systems "Quantimet 720" vorgestellt. Es dient der Auswertung von Probenmaterial der "Meteor-Äquatorexpedition 1979". Die Ergebnisse werden auf ihre Aussagekraft hin geprüft und Darstellungs- und Interpretationsmöglichkeiten diskutiert. Die vertikale und regionale Verteilung des Zooplanktons wird unter Berücksichtigung von physikalischen und biologischen Parametern untersucht.

## 2. Das Untersuchungsgebiet

Das Probenmaterial der vorliegenden Arbeit stammt aus dem zentralen äquatorialen Atlantik. Es wurde während der "Meteor-Äquatorreise 1979" auf einem Stationsschnitt zwischen 3° N und 2° S auf 22° W gewonnen (Abb. 1). In dieser Region des Ozeans bestimmt ein komplexes Stromsystem die hydrographische Situation. Hydrographie und Biologie stehen

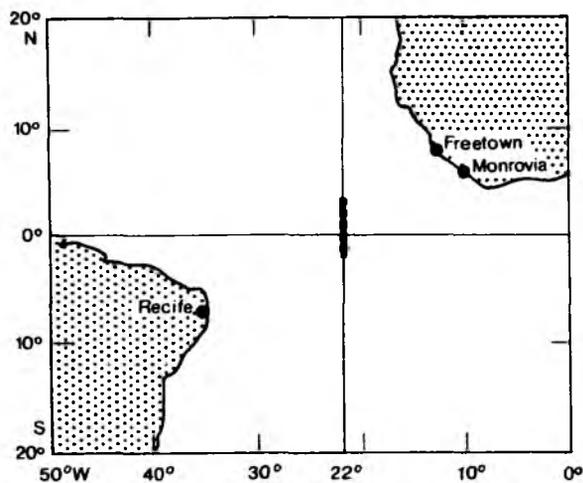


Abb. 1: Die Lage des Untersuchungsgebiets  
(aus Bauerfeind et. al., 1984)

in enger Wechselbeziehung, so daß eine Schilderung des hydrographischen Aufbaus für das Verständnis der biologischen Situation notwendig erscheint. Dazu werden die prinzipielle Struktur und die räumliche und zeitliche Variabilität in den Vordergrund gestellt.

### 2.1 Meteorologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Für das Verständnis des äquatorialen Stromsystems und dessen saisonale Variation müssen die meteorologischen Besonderheiten der Äqua-

torregion berücksichtigt werden. Die unterschiedliche Landmassenverteilung auf der Nord- und Südhemisphäre führt zu einem charakteristischen unsymmetrisch zum Äquator ausgebildeten tropischen Windsystem. Infolge davon liegt die Intertropische Konvergenzzone (ITCZ), der Bereich, in dem Nordostpassat und Südostpassat konvergieren, im Jahresmittel nördlich des Äquators (Panitz 1981). Mit der saisonalen Verlagerung der tropischen Windfelder führt die ITCZ eine Wanderung durch. Dabei liegt sie im März in der Nähe des Äquators und erreicht im August ihre nördlichste Position (Hellermann 1979, Garzoli et. al. 1982, Köhne und Speth 1982). Abbildung 2 zeigt die Wanderung der ITCZ (Doldrums) auf 30° W im Jahresverlauf. Ihre Lage ist einerseits durch die Südgrenze des Nordostpassats und andererseits die Nordgrenze

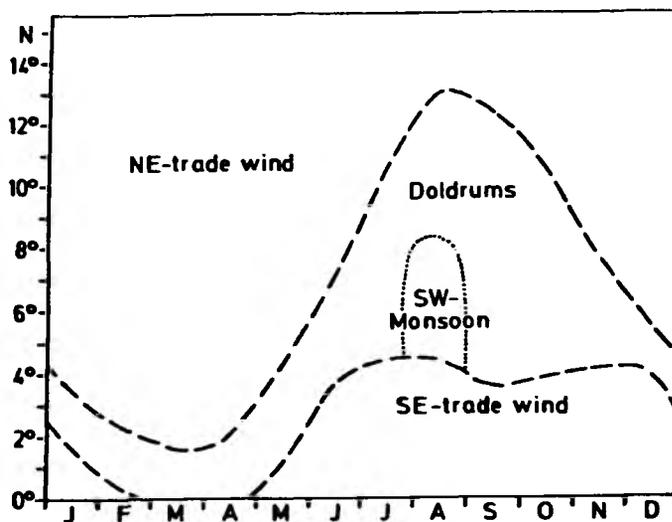


Abb. 2: Die jahreszeitliche Meridionalverlagerung der Passatwindfelder auf 30° W (nach Schemainda et. al. 1976)

des Südostpassats (gestrichelte Linie) gekennzeichnet. Im August treten im Bereich der ITCZ Monsune auf. Als Monsune werden Winde bezeich-

net, die eine regelmäßige saisonale Richtungsumkehr durchführen (Dietrich et. al. 1975).

## 2.2 Das äquatoriale Stromsystem

### 2.2.1 Die Oberflächenströmungen

Die jahreszeitliche Wanderung der Passatwindfelder bewirkt eine Änderung in Windgeschwindigkeit und Richtung. Dadurch wird die obere Schicht des äquatorialen Atlantiks einer saisonal variablen Kraft ausgesetzt (Garzoli et. al. 1982). Die Bedeutung dieser Kräfte für das äquatoriale Stromsystem wird anhand einer schematischen Darstellung der mittleren Verhältnisse erklärt (Abb. 3). Der Südostpassat reicht im Jahresmittel über den Äquator hinaus. Die Windschubspannung und die Umkehrung der Corioliskraft am Äquator führen zu divergierenden Triftströmungen (äquatoriale Divergenz). An der Südseite der ITCZ wird eine Massenkongruenz, die nordäquatoriale Konvergenz, gebildet. Durch ihr Zusammenwirken mit dem durch den Nordostpassat gebildeten Triftstrom (Ekmantransport) entsteht an der Nordseite der ITCZ die nordäquatoriale Divergenz. Das meridionale Oberflächengefälle führt zu geostrophischen Strömungen, welche die Hauptkomponenten der äquatorialen Oberflächenströmungen bilden. Es sind dies der westwärtssetzende Südäquatorialstrom, der ostwärtssetzende Äquatoriale Gegenstrom und der westwärtssetzende Nordäquatorialstrom. Als mittlere meridionale Lage dieser zonalen Stromkomponenten geben Philander und Düing (1979) die Position des Südäquatorialstroms mit südlich  $3^{\circ}$  N, des Nordäquatorialen Gegenstroms zwischen  $3^{\circ}$  N und  $10^{\circ}$  N und des Nordäquatorialstroms mit nördlich  $10^{\circ}$  N an. Die genaue Ausbreitung des Stromsystems läßt sich nicht pauschal beschreiben, weil die Lage und die Stärke des Stromsystems von der Lage des Passatwindfelds, insbesondere der ITCZ, abhängt (Siedler 1975). Als Beispiel für die Änderung des Stromsystems im Jahresverlauf soll der Nordäquatoriale Gegenstrom dienen. Nach Dietrich et. al. (1975) ist der Strom das

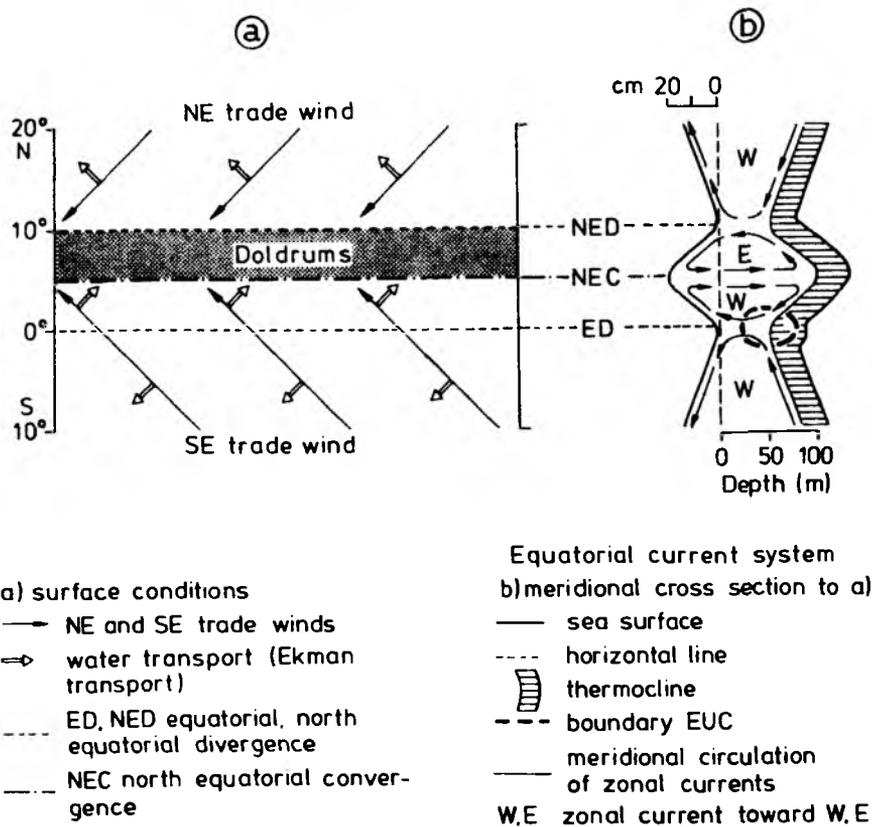


Abb. 3: Schematische Darstellung der winderzeugten Zirkulation im Bereich der äquatorialen Divergenzzone (nach Dietrich et. al. 1975)

ganze Jahr über nördlich des Äquators lokalisiert. Seine stärkste zonale Ausdehnung erfährt er, einhergehend mit der nördlichsten Lage der ITCZ (s. Abb. 2), im Nordsummer. In diesem Zeitraum erstreckt er sich in einem Bereich von 50°W bis in die innere Bucht von Guinea. Im Nordwinter wird der Strom erst östlich 25°W registriert. Seine meridionale Lage deckt sich weitgehend mit der Position der ITCZ.

## 2.2.2 Der Äquatoriale Unterstrom

Neben den Oberflächenströmungen zählt der Äquatoriale Unterstrom als charakteristische Erscheinung zum äquatorialen Stromsystem. Er stellt sich als stark gebündelter, mit hoher Geschwindigkeit nach Osten setzender Strom dar. Philander und Düing (1979) geben eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 75 cm/sec an. Der Kern maximaler Geschwindigkeit wird in einer Tiefe zwischen 50 m und 100 m gefunden (Neumann 1969). Für die Theorie über den Funktionsmechanismus des Unterstroms spielt der Aufbau eines Druckgradienten durch den zonalen Windstreß des Passatwindfelds eine große Rolle. Im Zusammenhang mit dem Druckgradienten steigt die Thermokline von West nach Ost entlang des Äquators (Ostapoff 1982). Als Folge des Druckausgleichs fließt der Unterstrom von Westen nach Osten unterhalb des in der Deckschicht nach Westen setzenden Südäquatorialstroms. Sein Stromkern ist in der Thermokline lokalisiert. Das stark geschichtete Wasser begrenzt den Unterstrom nach unten. Seine scharfe seitliche Begrenzung findet eine Erklärung in dem divergenten Wassertransport der Triftströme (Ekmantransport) am Äquator, wodurch unterhalb des Triftstroms eine Konvergenz entsteht, welche die Bündelung des Unterstroms erzwingt. Die auffallend symmetrische Lage zum Äquator wird durch die hier fehlende Corioliskraft erklärt. Entfernt sich der Unterstrom vom Äquator, so steigt mit zunehmender Entfernung die Wirkung der Corioliskraft und zwingt den Strom in seine Lage unter dem Äquator zurück (Dietrich et. al. 1975). Als klares Erkennungszeichen des Unterstroms dient ein deutlich von den umgebenen Wassermassen abgehobenes Salzgehaltsmaximum, für dessen Quelle der Nordbrasilianische Küstenstrom verantwortlich gemacht wird (Katz et. al. 1979, Philander und Düing 1979). Die Lage des Salzgehaltskerns deckt sich nicht immer mit der des Stromgeschwindigkeitskerns. So lokalisiert Rinkel (1969) den Kern maximaler Geschwindigkeit etwa 9 m über dem Salzgehaltsmaximum, und Philander und Düing (1979) geben seine mittlere Lage mit 20 m unterhalb des Salzgehaltskerns an. Fahrbach (1983) fand eine klare horizontale Trennung der beiden Kerne, wobei der Salzgehaltskern meist südlich des Stromkerns lag. Als Ursache für die Trennung sieht

Fahrbach (1983) Prozesse unterschiedlicher Zeitskalen, die Auslenkungen mit verschiedenem Charakter bewirken. So berichten Düing et. al. (1975) von Unterstrommäandern zwischen  $0^{\circ}50'N$  und  $0^{\circ}50'S$  in einem Zeitbereich von 2 - 3 Wochen. Seit dieser Entdeckung wird nach Fahrbach (1983) im Periodenbereich ab 14 Tagen mit einer unterschiedlichen Lage des Stromkerns gerechnet. Neben den meridionalen wurden vertikale Auslenkungen bis zum Durchbruch an die Oberfläche beobachtet (surfacing). Dies führt zu zeitweiligen ostwärtssetzenden Oberflächenströmungen im Bereich des Südäquatorialstroms. Solch ein Ereignis wird nach Katz et. al. (1977) gewöhnlich bei reduziertem Oberflächenwindstreß beobachtet.

Die Trennung von Strom- und Salzgehaltskern erklärt Fahrbach (1983) durch eine turbulente Diffusion, die bei einer Auslenkung des Stromkerns durch die asymmetrische Verteilung des Salzgehalts hervorgerufen wird. Dabei wird nach Verlagerung des Stroms aus seiner ursprünglichen Lage der Salzgehaltskern in Richtung des kleineren Gradienten verschoben.

### 2.3 Die vertikale hydrographische Situation

Zur Schilderung der vertikalen hydrographischen Struktur soll die Gliederung nach Fahrbach dienen. Das Gebiet ist durch eine gut durchmischte Deckschicht, welche durch die für die Tropen typische, stark ausgeprägte Temperatursprungschicht begrenzt wird, charakterisiert (s. Abb. A1 im Anhang). Als Grenze zwischen Deckschicht und Sprungschicht definiert Fahrbach (1983) die  $25^{\circ}C$  Isotherme. Die Sprungschicht spaltet sich bei Annäherung an den Äquator in einen oberen und unteren Teil. Nach Knoll et. al. (1982) erfolgt dies im tropischen Atlantik zwischen  $4^{\circ}N$  und  $4^{\circ}S$ . Die obere Sprungschicht, ausgezeichnet durch einen stärkeren Gradienten, wird als Bereich zwischen der  $25^{\circ}C$  und der  $16^{\circ}C$  Isotherme definiert. Sie lag während FGGE von Januar bis Juli zwischen  $3^{\circ}N$  und  $2^{\circ}S$  auf  $22^{\circ}W$  in einer mittleren Tiefe von 50 - 150 m.

Zwischen den beiden Sprungschichten liegt eine Zone kleiner ver-

tikalere Gradienten, die Thermocline. Sie wird als Bereich zwischen der 16° C und der 17° C Isotherme definiert und erstreckt sich bis etwa 300 m Tiefe. Die darunterliegende Sprungschicht wird, in Anlehnung an Fahrbach (1983), trotz des kleineren Gradienten zwischen 11° C und 9° C als Hauptsprungschicht bezeichnet. Sie lag im Mittel zwischen 300 m und 400 m Tiefe.

Auf die Beschreibung der sich darunter anschließenden Wassersäule wird verzichtet, da sie für die vorliegende Arbeit ohne Bedeutung ist. Der meridionale Verlauf der beiden Sprungschichten zeichnet sich durch eine Aufwölbung der Hauptsprungschicht und einer Spreizung der oberen Sprungschicht im Bereich des Äquators aus. Im zeitlichen Mittel fällt die stärkste Spreizung der oberen Sprungschicht mit der Lage des Unterstromkerns zusammen. Für die Aufspreizung der Sprungschicht können zwei Prozesse in Betracht gezogen werden: zum einen die starke Stromscherung zwischen dem Äquatorialen Unterstrom und dem Südäquatorialstrom, zum anderen der Einfluß meridionaler Zirkulationszellen. Fahrbach und Bauerfeind (1982) und Fahrbach (1983) zeigen, daß die Bedeutung der vertikalen Vermischung aufgrund der Stromscherung bei unterschiedlich starker Aufspreizung der Sprungschicht gleich bleibt. Aus diesem Grunde muß die Mitwirkung meridionaler Zirkulationszellen angenommen werden.

Nach Fahrbach (1983) handelt es sich um ein System von drei Paar Zirkulationszellen. Das erste Paar liegt in der Deckschicht, konvergiert im Bereich des Stromkerns des Äquatorialen Unterstroms und divergiert aus diesem Bereich zur Oberfläche. Diese Zellen stehen in Verbindung mit dem äquatorialen Auftrieb und bewirken die Aufspreizung der Sprungschicht zur Oberfläche. So ist der Grad der Aufwölbung der Isothermen als Indikator für die Stärke des äquatorialen Auftriebs zu sehen. Das zweite Paar liegt im Unterstrom, konvergiert ebenfalls im Bereich des Stromkerns und divergiert in den oberen Teil der Thermocline. Dieses Zellenpaar bewirkt die Aufspreizung der Sprungschicht in die Tiefe. Ein weiteres Paar Zirkulationszellen konvergiert unterhalb der Hauptsprungschicht und divergiert im unteren Bereich der Thermocline. Dieses Paar ist für die Aufwölbung der Hauptsprungschicht-Isothermen verantwortlich. So sind die beiden Sprungschichten über meri-

dionale Zirkulationszellen aneinander gekoppelt. Mit ihrer Vertikalbewegung führen die Zellen durch ihre Gegenläufigkeit die Ursprungswassermassen zur Bildung des Thermostadwassers zusammen. Ihre horizontalen Bewegungen advektieren das frisch gebildete Thermostadwasser jeweils polwärts und erzeugen die Aufspaltung in Sprungschicht und Hauptsprungschicht bis ca. 4° beiderseits des Äquators.

### 3. Material und Methoden

Im folgenden Kapitel wird die Gewinnung und Präparation des Datenmaterials dargestellt. In der Hauptsache wird das Bildanalyseverfahren zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben beschrieben. Dazu wird das Bildanalyseverfahren mit seinen prinzipiellen Möglichkeiten vorgestellt, außerdem auf Modifikationen eingegangen, welche sich für die Bearbeitung des Materials als notwendig erwiesen.

#### 3.1 Die Probennahme

##### 3.1.1 Ort und Zeit der Probennahme

Das Probenmaterial wurde während der "Meteor-Äquatorexpedition 1979" gewonnen. In einem Grundprogramm wurde ein meridionaler Stationschnitt von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 2. Februar bis 13. Juni 1979 zehnmal durchgeführt (s. Abb. 1). Der Abstand zwischen den Stationen betrug außerhalb des Bereichs 1°30'N bis 1°30'S 15 Seemeilen und innerhalb 10 Seemeilen. Die Stationen wurden in Äquatornähe dichter zusammen gelegt, um den Einfluß des Unterstroms besser erfassen zu können. An dem Grundprogramm beteiligten sich die Arbeitsgruppen "Physikalische Ozeanographie" sowie die biologischen Gruppen "Nährsalze und Sauerstoff", "Bakterien", "Phytoplankton", "Zooplankton" und "Ichthyoplankton". Eine weitgehend synchrone Aufnahme eines Stationschnitts wurde angestrebt. Dazu wurde ein Zeitraum zwischen vier und sechs Tagen benötigt. Die biologischen Arbeitsgrup-

pen konnten in der Regel nur jede zweite Station in Anspruch nehmen, da die Aufbereitung des Probenmaterials viel Zeit verschlang. Der Einfluß der Tageszeit auf die Vertikalverteilung des Zooplanktons konnte keine Berücksichtigung finden. Im weiteren wird lediglich das Proben- und Datenmaterial der Arbeitsgruppen angesprochen, auf deren Ergebnisse für die Interpretation des Zooplanktonmaterials zurückgegriffen wird. Es sind dies die Gruppen "Physikalische Ozeanographie", "Nährsalze und Sauerstoff", "Phytoplankton" und "Zooplankton". Die Daten der Gruppen "Physikalische Ozeanographie", "Nährsalze und Sauerstoff" und "Phytoplankton" wurden jeweils als Datenband, das eine Mal in graphischer Form (Bauerfeind et. al. 1984), das andere Mal in Tabellenform (Bauerfeind et. al. 1983), veröffentlicht. Im letzteren liegen erste Daten der Gruppe "Zooplankton" vor.

### 3.1.2 Das Netz

Die Zooplanktonproben wurden mit einem als "Multinetz" bezeichneten MehrfachschlieBnetz der Firma Hydrobios ausgeführt. Der SchlieBmechanismus entspricht dem des "Multiple Plankton Sampler" (MPS) (Bé 1959, 1962). Der Mechanismus ermöglicht das sukzessive Öffnen und Schließen der Netze. Die Öffnung der Netze erfolgt mit einem Elektromotor, der über ein Kabel von Bord aus in Betrieb gesetzt wird. Der Motor bewegt eine Nockenwelle, die nach jedem Auslösesignal jeweils einen Gummizug frei gibt, wodurch ein Netz geöffnet und ein schon offenes Netz zugleich automatisch geschlossen wird. Das Multinetz ist mit fünf Netzbeuteln ausgestattet. Die Netzöffnung beträgt 50 x 50 cm.

Nach Untersuchungen von Weikert und John (1981) liegt die Variation bei Vergleichsfängen mit dem Multinetz im Rahmen der Variation bei vergleichbaren Netzen. In Abweichung von dem von Weikert und John eingesetzten Multinetz war das während der "Meteor-Äquatorreise 1979" eingesetzte mit fünf Netzbeuteln von 1,50 m Länge und einer Maschenweite von 100 µm ausgestattet. Zudem wurde die Aufhängung des Netzes geändert, um die Scheuchwirkung vor der Netzöffnung zu verringern. Das Netz war mit einer Drucksonde für die Tiefenanzeige, einer Temperatursonde und einem seitlich angebrachten Flowmeter bestückt. Die Daten

der Sondenausstattung wurden über ein Mehrleiterkabel an Bord übertragen. Ein XY-Schreiber zeichnete die Temperaturenabhängigkeit von der Tiefe auf und markierte dabei den Netzwechsel. Die Flowmeterdaten wurden mit einer mechanischen Ausstattung registriert.

Bei der Auswertung fanden lediglich die Werte der Drucksonde Berücksichtigung. Durch Wassereinbruch in das Mehrleiterkabel lieferte die Temperatursonde unzuverlässige Werte, so daß auf die Ergebnisse der Arbeitsgruppe "Physikalische Ozeanographie" zurückgegriffen wird.

Das Flowmeter arbeitete ebenfalls unzuverlässig. Der Grund dafür konnte in Zusammenarbeit mit der Firma Hydrobios gefunden werden. Die Netzfänge wurden an Steuerbordseite über einen Galgen ausgeführt. Holte das Schiff während des Hievens über, so bedeutete dies eine beträchtliche Beschleunigung für das im Wasser befindliche Netz. Das Flowmeter ist in der Lage, diese Durchflußgeschwindigkeiten zuverlässig zu messen, jedoch war die mechanische Registrieranlage überfordert, sodaß sie blockierte. Die Netzfänge wurden ausschließlich während des Hievens mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,5 m/sec durchgeführt. Im weiteren wird für das Netz eine Filtrationseffizienz von 100 % angenommen (Bauerfeind et. al. 1983).

### 3.1.3 Die Fangbereiche

Mit dem Multinetz wird eine Gliederung der Wassersäule in fünf Fangbereiche ermöglicht. Die Aufteilung richtete sich nach der hydrographischen Struktur. Der Bereich der Deckschicht, im Mittel bis 50 m Tiefe, wurde in die zwei Stufen 0 - 25 m und 25 - 50 m geteilt, um das hier erwartete Zooplanktonmaximum stärker räumlich aufzulösen. Eine dritte Stufe zwischen 50 - 100 m deckt den Bereich der Sprungschicht ab. In der Thermostad liegen die Stufen bei 100 - 200 m und 200 - 300 m.

Da das Flowmeter nicht vertrauenswürdig arbeitete, mußte ein anderer Weg für die Bestimmung der durchfischten Wassermenge gewählt werden. Dazu dienten die Tiefenangaben von Drucksonde und Drahtlänge, die in der Regel jedoch Differenzen aufwiesen. Als Ursache für die

Abweichungen sind die hohen Stromgeschwindigkeiten im Arbeitsgebiet anzusehen. Um die Differenz so klein wie möglich zu halten, wurde ein Gewicht am Netz befestigt. Zusätzlich wurde das Schiff so lange nachgesteuert, bis die Drahtlänge weitgehend mit der Tiefenangabe der Drucksonde übereinstimmte. Die durchfischte Wassermenge wurde nach den Werten der Drucksonde, die mit Hilfe der Differenz zwischen Drahtlänge und Druckwert korrigiert wurden, berechnet. Die Drucksonde lieferte sehr verlässliche Tiefenanzeigen. Bei einer Abweichung zwischen Druckanzeige und Drahtlänge zeigte der Draht eine größere Tiefe an. Der Draht hing nicht senkrecht in der Wassersäule, sondern wurde in der Tiefe ausgelenkt. Die Differenz zwischen aktueller Tiefe und Drahtlänge wurde den Tiefenstufen anteilmäßig zugerechnet. Der Fehler läßt sich schwer abschätzen, da nicht nachvollziehbar ist, in welcher Tiefe der Draht ausgelenkt wurde.

#### 3.1.4 Die Probenaufbereitung

Unmittelbar nachdem die Proben an Bord waren, wurden sie mit einem "Folsomsplitter" in zwei Teile geteilt. Statistische Untersuchungen ergaben, daß bei Einsatz des Folsomsplitters nur Zufallsfehler auftreten (McEwen et. al., 1954). Die eine Hälfte wurde in zweiprozentigem mit Borax gepufferten Formalin konserviert. Die andere Hälfte wurde bereits ausgewertet (Rolke 1981).

#### 3.1.5 Kriterien zur Auswahl des Probenmaterials

Die Entwicklung des Meßverfahrens zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben mit Hilfe der quantitativen automatischen Bildanalyse nahm wegen vorher nicht kalkulierbarer technischer Probleme (Näheres dazu in Kapitel 3.2.1) so viel Zeit in Anspruch, daß nur ein Teil des zur Verfügung stehenden Probenmaterials ausgewertet werden konnte. Daher mußte eine Auswahl getroffen werden. Im Vordergrund stand dabei die Untersuchung der Sensibilität und Aussagekraft bildanalytisch gewon-

nener Meßergebnisse. Hierzu sollte eine Situation dienen, in der bei den bisherigen Untersuchungen zwischen der Zooplanktonverteilung und anderen gleichzeitig aufgenommenen Parametern keine deutlichen Beziehungen ersichtlich geworden waren. Unter diesem Gesichtspunkt bot sich die Untersuchung der regionalen Verteilung des Zooplanktons an. Während die saisonale Verteilung der Zooplanktonbiomasse einen deutlichen Bezug zur Hydrographie zeigte, konnte ein solcher zwischen der regionalen Verteilung der Biomassenschwankungen von Station zu Station und den parallel gemessenen Parametern nicht erkannt werden (Rolke 1981). Als Beispiel für die regionale Verteilung wurde der erste im Zeitraum vom 02. bis 06.02.1979 durchgeführte Stationsschnitt ausgewählt. Dieser Schnitt lag in der Übergangsphase eines Zeitraums mit häufigen Auftriebsereignissen und der auftriebsarmen Zeit. Die ITCZ befindet sich in dieser Phase auf der Wanderung in Richtung Äquator, ohne ihre südlichste Position jedoch schon erreicht zu haben. Es herrschen noch relativ kühle Oberflächentemperaturen vor, die erst im März von einer wärmeren Periode abgelöst werden (Fahrbach 1983). Hinsichtlich des Phytoplanktons kann das Untersuchungsgebiet als einheitlicher Bereich betrachtet werden, der nur durch eine kleine Zone in der Nähe des Äquators unterbrochen wird (Bauerfeind, 1983). Die genauen Positionen mit Zeitangabe sind in Tabelle A1 im Anhang aufgelistet. Insgesamt wurden Zooplanktonfänge von 15 Stationen mit jeweils 5 Fangbereichen ausgewertet.

### 3.2 Ein Verfahren zur Auswertung von Zooplanktonfeldproben mittels der automatischen quantitativen Bildanalyse

Das umfangreiche Zooplankton-Probenmaterial der "Meteor-Äquator-expedition 1979" ließ schnell den Wunsch nach einem Verfahren zur Beschleunigung der Auswertung aufkommen. Dazu bot sich das zu diesem Zeitpunkt schon seit einigen Jahren am Institut für Meereskunde vorhandene automatische quantitative Bildanalyzesystem "Quantimet 720" der Firma Cambridge Instruments an. Das Gerät wurde für die Anwendung im Bereich der Metallforschung entwickelt. Inzwischen konnte es auf

einem weiten Feld unterschiedlicher Disziplinen der Forschung und Industrie eingesetzt werden. Es dient zur Zählung und zur Messung von Grauwertbildern und zeichnet sich durch hohe Geschwindigkeit und Präzision aus. Zudem ist es prinzipiell möglich, Partikel automatisch aufgrund von Formparametern zu unterscheiden. Das System ist nach dem Bausteinprinzip aufgebaut. Neben einer Grundausstattung sind verschiedene Module erhältlich, deren Kombination sich nach der jeweils vorliegenden Problemstellung richtet. Auf die Ausstattung des "Quantimet 720" am Institut für Meereskunde wird in den nächsten Kapiteln ausführlich eingegangen. Kurz vor Beginn der Arbeit wurde das System so weit ausgebaut, daß die Steuerung einzelner Meßfunktionen automatisch über einen Tischrechner durchgeführt werden konnte. Der Vorteil dieser Erweiterung besteht in der Beschleunigung von Messung und Auswertung. Zwei weitere Bausteine, die jedoch aus Kostengründen nicht angeschafft werden konnten, würden eine zusätzliche Erleichterung der Meßprozedur ermöglichen. Es sind dies der sogenannte "Amen-der", mit dem sich automatisch einander berührende und vom System als ein Objekt erkannte Partikel für die Vermessung trennen lassen und der "Image-Editor", der eine manuelle Auswahl, Trennung oder Korrektur von Bildelementen ermöglicht. Das Bildanalyse-System "Quantimet 720" ist nach heutigem technischen Stand veraltet. Inzwischen sind mehrere Generationen neuer Bildanalyse-Systeme auf dem Markt. Allein die beiden angesprochenen Bausteine wären so teuer, daß damit etwa 2/3 der Kosten eines modernen Systems höherer Ausbaustufe abgedeckt werden könnten.

### 3.2.1 Technische, die Auswertung verzögernde Probleme

Ein Vorteil des Bildanalyse-Systems "Quantimet 720" besteht in seiner Überschaubarkeit. Einzelne Meßfunktionen können mit geringem Programmieraufwand gezielt angesprochen oder von Hand geschaltet werden. Dies ermöglicht zum einen den Einblick in die Arbeitsweise des Systems, zum anderen läßt sich einfach überprüfen, ob alle Funktionen fehlerfrei ausgeführt werden. Zur Funktionskontrolle dienen Eichobjekte bekannter Größe. Während der Messung wird auf dem Bildschirm angezeigt,

welcher Parameter des jeweiligen Objekts gerade vermessen wird. Die Meßergebnisse erscheinen auf dem Bildschirm und können durch den Rechner ausgedruckt werden. Durch solche Funktionsüberprüfungen konnten bei dem "Quantimet 720", welches sich von Beginn der Arbeit an durch seine große Störanfälligkeit auszeichnete, immer wieder Fehler aufgedeckt werden. Die Behebung der Störungen war in der Regel mit kostenaufwendigen Reparaturleistungen der Herstellerfirma verbunden. Unterbrechungen der Entwicklung des Meßverfahrens sowie der Auswertung des Probenmaterials waren die Folge. Dadurch konnten nicht alle Zooplanktonproben der "Meteor-Äquatorexpedition 1979" ausgewertet werden. Es mußte eine Auswahl des Probenmaterials getroffen werden, die sich nach den in Kapitel 3.1.5 angesprochenen Kriterien richtete. Nur mit viel Geduld und Ausdauer konnte der Datensatz dieser Arbeit erstellt werden.

Schematic Diagram of the Image Analysis System Quantimet 720  
at the Institut für Meereskunde Kiel

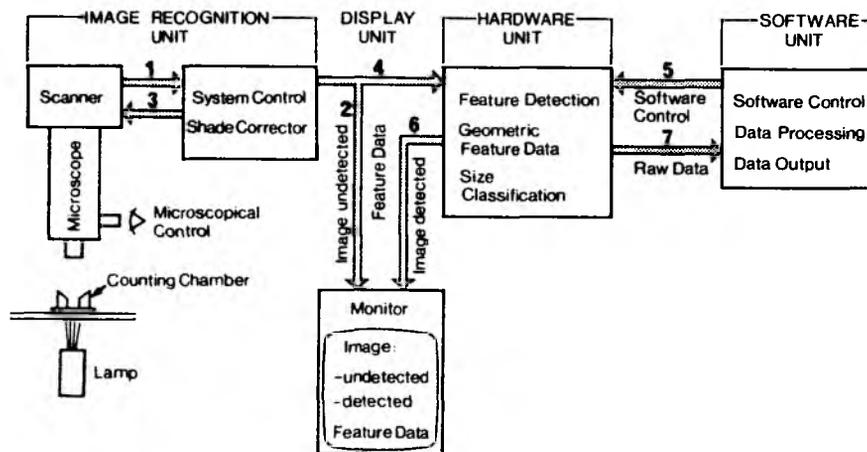


Abb. 4: Schematischer Aufbau des Bildanalyse systems "Quantimet 720"  
am Institut für Meereskunde Kiel (aus Rolke und Lenz, 1984)

### 3.2.2 Der Aufbau des Bildanalyse-Systems "Quantimet 720" am Institut für Meereskunde Kiel

Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, ist das Bildanalyse-System "Quantimet 720" nach dem Bausteinprinzip aufgebaut. Es lassen sich vier Funktionseinheiten unterscheiden (s. Abb.4): Die Bilderfassungseinheit (Image recognition unit), die Anzeigeeinheit (Display unit), die Hardwareeinheit (Hardware unit) und die Softwareeinheit (Software unit). Im folgenden werden Aufbau und Funktionsweise der einzelnen Einheiten ausführlich behandelt.

#### 3.2.2.1 Die Bilderfassungseinheit

Bestandteil der Bilderfassungseinheit ist eine optische Ausstattung. Ein Plumbicon Scanner setzt das durch die Optik erzeugte Bild in Ausgangssignale um, die in der Hardwareeinheit ausgewertet werden. Der Scanner wird über "System control" gesteuert. Ein "Shade corrector" ermöglicht Korrekturen von Ausleuchtungsunregelmäßigkeiten. Hauptsächlich werden mit dem "Quantimet 720" lichtmikroskopische Bilder ausgewertet. Hierzu können nahezu alle gängigen Lichtmikroskope an das System angeschlossen werden. Die Auswertung der Zooplanktonproben erfolgte mit dem Lupenaufnahmegerät "Tessovar" der Firma Zeiss. Bei dem "Tessovar" wird der Abbildungsmaßstab über eine stufenlose Änderung der Brennweite des Objektivs gewählt. Dazu steht ein Bereich von 0,4facher bis 12,8facher Vergrößerung zur Auswahl.

Der Scanner führt eine rasterförmige Abtastung des Objektbilds durch. Seine Plumbicon-Röhre zeichnet sich durch eine geringe Abklingzeit für das geschriebene Bild und eine hohe Empfindlichkeit im grünen Spektralbereich aus. Die einzelnen Zeilen werden digital kontrolliert und der Reihe nach ohne Zeilensprungverfahren geschrieben. Ein Meßfeld besteht aus einer Punktmatrix von 650 Zeilen mit jeweils 800 Bildpunkten. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu erhöhen, werden die Zeilen mit einer Abtastrate von 10,8 Bildern/sec signifikant langsamer als beim Standard TV geschrieben.

Die Auswertung der Bildinformation erfolgt aufgrund von Grauwertunterschieden. Voraussetzung für eine fehlerfreie Messung ist ein grauwertfreier Hintergrund, von dem sich die Meßobjekte im Grauwert klar abheben. Die Arbeit im Durchlicht, die bei der Auswertung der Zooplanktonproben angewandt wurde, verlangt dazu eine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildfelds. Während gängige Mikroskopierleuchten auch im kleinen Vergrößerungsbereich den Ansprüchen des menschlichen Auges genüge tun, erfüllen sie nicht die Anforderungen des "Quantimet 720". Um diese Fehlerquelle weitgehend auszuschalten, ist das System mit einem "Shade corrector" ausgestattet. Diese Einrichtung registriert Ausleuchtungsunregelmäßigkeiten und berücksichtigt sie bei der Meßung von Objekten. Damit bei Fokussierungsänderungen die Ausleuchtung des Bildfelds konstant bleibt, wurde die Beleuchtungseinrichtung in einem festen Abstand mit dem Objektisch verbunden.

#### 3.2.2.2 Die Anzeigeeinheit

Die Anzeigeeinheit hat keinen Einfluß auf den Meßvorgang. Sie steht in Verbindung mit der Bilderfassungseinheit und der Hardware-Einheit und dient dazu, deren Informationen auf einem Monitor darzustellen. Ausgangssignale der Bilderfassungseinheit werden auf dem Monitor abgebildet und gleichzeitig der Hardware-Einheit für die Bildauswertung zur Verfügung gestellt (Abb. 4 - Pfeil 2 und 4). Überschreitet die Abbildung eines Objekts einen vorgewählten Grauwert-Schwellenwert, so zeigt durch eine Marke auf dem A.C.P. (Anti-Coincidence Point) des Objekts die Hardware-Einheit auf dem Bildschirm an, daß das Objekt erkannt wurde und der Vermessung zur Verfügung steht. Der A.C.P. liegt im Schnittpunkt der ersten Zeile unterhalb des Teilchens mit einer an seiner rechten Seite gelegenen Tangente definierter Steigung. Neben der Markierung des A.C.P., der als Grundlage für die Zählung der Objekte zu sehen ist, wird die Vermessung einzelner geometrischer Parameter auf dem Monitor markiert. Ergebnisse jeder Messung erscheinen auf dem Monitor. So bietet die Anzeigeeinheit eine Möglichkeit, die Funktionen des Systems auf dem Monitor zu überwachen.

### 3.2.2.3 Die Hardware-Einheit

Die Hardware-Einheit bezieht die Ausgangssignale für die Bildanalyse aus der Bilderfassungseinheit. Sie besteht aus mehreren Modulen. Voraussetzung für die Vermessung der Objekte ist der Detektorbaustein. Mit ihm erfolgt die Erkennung des Objekts auf Grund von Grauwertunterschieden. Es lassen sich 64 Grauwertschwellen vorwählen. In der Praxis erfolgt die Wahl der korrekten Grauwertschwelle durch Überprüfung auf dem Monitor. Im Durchlicht wird das Objekt dunkel auf hellem Untergrund dargestellt. Die Grauwertschwelle wird so weit eingeregelt, bis das Objektbild vollständig erkannt wird. Die Anzeige auf dem Monitor erfolgt durch Überlagerung des detektierten Objektbereichs mit einer deutlich helleren Markierung. Erschwert wird die manuelle Einstellung der Grauwertschwelle durch den sogenannten "Lichthof-Fehler". Er stellt sich als heller Bereich oder "Lichthof" am Rande eines dunklen Partikels auf hellem Untergrund dar. Seine Entstehung erklärt sich durch die Abtastung des Bildes durch den Elektronenstrahl der "Scanner-Röhre". Im Übergang von hellem Untergrund zu dunklem Objektbild erfaßt er, bedingt durch seine endliche Größe, zu Beginn nur einen Teil des dunklen Objektbereichs. Während sich der Elektronenstrahl in der Zeile weiterbewegt, vergrößert sich der erfaßte dunkle Bereich, bis der Strahl völlig im Objektbereich liegt. So stellt sich dem System die Grenze zwischen Hintergrund und Objektbild nicht als scharfe Kontur, sondern als fließender Übergang dar. Um diesen Fehler weitgehend auszuschalten, wurde das System des Instituts für Meereskunde Kiel mit einem "2D Auto-Detektor" ausgestattet. Dieser Detektor analysiert den Übergang von Hintergrund zu Objektbild und korrigiert automatisch den "Lichthof-Fehler".

Nach Erfassung der Meßobjekte durch den Detektor stehen weitere Module für die Vermessung zur Verfügung. Es lassen sich dabei grundsätzlich zwei Verfahrensweisen, die bildspezifische - und die objekt-spezifische Messung, unterscheiden. Bildspezifische Messungen werden mit dem "Standard Computer" durchgeführt. Sie liefern Resultate der Messungen geometrischer Parameter für die Summe aller im Bildfeld erkannten Objekte. Diese Art der Auswertung wird nicht näher beschrie-

ben, da nur die objektspezifische Messung zur Anwendung kam. Objektspezifische Messungen liefern für jedes einzelne im Bildfeld erkannte Objekt Ergebnisse. Ermöglicht wird diese Verfahrensweise durch die Kombination des "Standard Computer" mit einem "Function Computer". Ein weiterer Baustein, der "Calculator Field/Feature Interface", erweitert die Möglichkeiten objektspezifischer Messungen.

Meßergebnisse werden in der Einheit "Bildpunkte" angegeben. Das jeweils vermessene Partikel wird auf dem Monitor durch ein helles Rechteck gekennzeichnet. So kann man auf dem Monitor überwachen, welches Partikel gerade vermessen wird. Von den geometrischen Parametern sollen nur diejenigen angesprochen werden, welche in dem entwickelten Verfahren angewandt werden. Es sind dies die Fläche und die Länge. Die Bestimmung der Fläche erfolgt durch die Anzahl der Bildpunkte, die das erkannte Objekt abdecken. Zur Längenmessung dient der Durchmesser nach Feret. Er beschreibt den Abstand zwischen zwei parallelen Tangenten eines Objekts.

Leider ist das "Quantimet 720" in der am Institut für Meereskunde Kiel vorhandenen Modulkombination nicht in der Lage, orientierungsunabhängige Längenmessungen durchzuführen. Es lassen sich lediglich Feret-Durchmesser-Messungen in vier Richtungen durchführen: vertikal, horizontal, unter 45° und unter 135°. Um eine orientierungsunabhängige Längenmessung annähernd zu erreichen, werden alle vier Durchmesser nach Feret gemessen und der größte als Länge des Objekts angenommen. Abbildung 5 veranschaulicht die Längenmessung. Es handelt sich um Monitordarstellungen von Copepoden, deren Länge nacheinander in den vier möglichen Richtungen vermessen wird (Abb. 5, Bild 1 - 4) Die hell den Organismenabbildungen überlagerten Muster entsprechen der Monitoranzeige des jeweiligen Meßparameters. Direkt unter dem Bild des harpacticoiden Copepoden ist ein helles Rechteck zu erkennen. Es handelt sich dabei um die Marke, welche das gerade vermessene Objekt kennzeichnet (s. auch Abb. 6).

Ein weiteres Modul der Hardware-Einheit, der "Classifier-Collector" ermöglicht die Vermessung von Partikeln, welche außerhalb oder

zwischen zwei willkürlich gesetzten Größengrenzen liegen. Partikel, die deutlich größer oder kleiner als die Meßobjekte sind, können zurückgewiesen werden. Detrituspartikel, wie sie in Abbildung 5 und 6

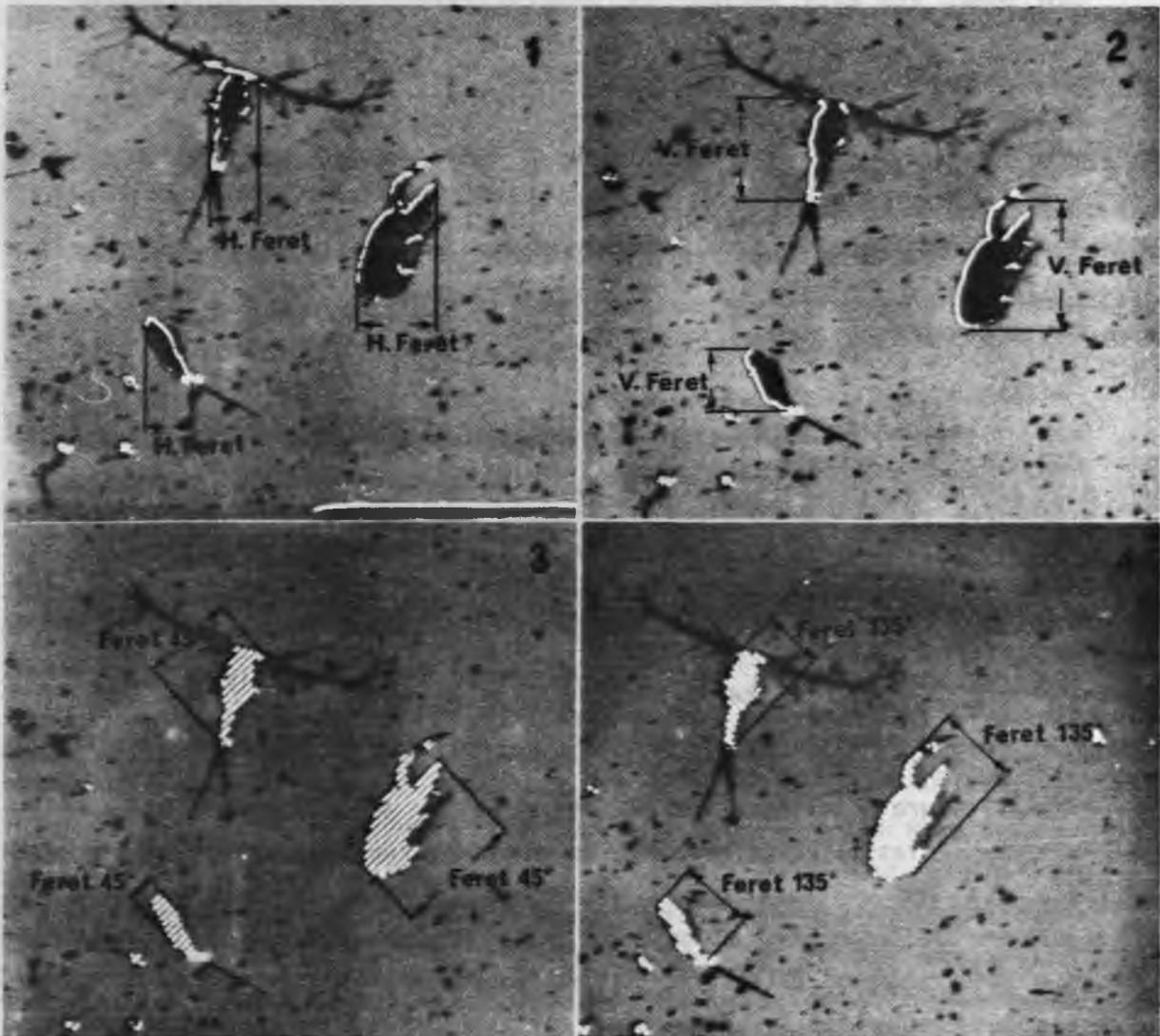


Abb. 5: Monitordarstellung von Copepoden mit meßparameterspezifischer Markierung der vier Feretdurchmesser: Horizontal (1), vertikal (2), 45° (3), 135° (4) (aus Rolke und Lenz, 1984)

auf dem Monitor zu erkennen sind, werden dadurch aus der Meßprozedur ausgeschlossen. Das verkürzt die Meßzeit und spart Speicherplatz in der Software-Einheit.

Die Angabe der Meßergebnisse in Bildpunkten verlangt für die Auswertung eine Eichung in absoluten Einheiten. Dazu ist es notwendig, die lineare Beziehung zwischen dem Bildpunkt und dem verwendeten optischen System zu ermitteln. Zur Eichung wird ein Objekt-Mikrometer in den Strahlengang gebracht und fokussiert. Die Abbildung der Skala erscheint auf dem Monitor. Durch einen Baustein der Hardware-Einheit, dem "Variable Frame and Scale" wird auf dem Monitor eine Bildpunkt-skala eingeblendet. Nun wird die relative Lage beider Skalen so eingestellt, daß sie sich decken. Dadurch läßt sich der Umrechnungsfaktor von Bildpunkten in absolute Einheiten leicht und sehr präzise bestimmen.

#### 3.2.2.4 Die Software-Einheit

Die Software-Einheit wird durch einen Tischrechner der Firma 'Hewlett Packard' dargestellt. Durch den Rechner lassen sich über den "Mini-Control-Interface" Baustein des Systems automatisch vier Module steuern und Meßergebnisse abrufen. Rechnergesteuerte Module sind der "Standard Computer" und der "Function Computer" für die Messung von Fläche sowie horizontalem und vertikalem Feret, der "Calculator Field/Feature Interface" zur Messung von Feret 45° und Feret 135° sowie der "Classifier-Collector" für die Zurückweisung von Partikeln, die aus dem willkürlich gesetzten Größenbereich herausfallen. Die übrigen Bausteine werden vor jedem Meßzyklus manuell eingestellt. Für die Steuerung und Datenerfassung wurden eigene Programme entwickelt. Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Rechner des Rechenzentrums am Institut für Meereskunde. Dazu wurde eine direkte Verbindung zum Rechner installiert. Einrichtungen des Rechenzentrums am Institut für Meereskunde ermöglichen die Übertragung von Daten an das Rechenzentrum der Universität Kiel. Mit dem Rechner des Instituts für Meereskunde erfolgte die Berechnung der Rohdaten, mit dem Rechner des Rechenzentrums der Universität Kiel dagegen die statistische Auswertung.

### 3.2.3 Der Verlauf eines Meßzyklus

Der typische Verlauf eines Meßzyklus soll anhand von Abbildung 4 erklärt werden. Zu Beginn erfolgt eine Grundeinstellung der Bildfassungseinheit, die während der gesamten Messungen nicht mehr geändert wird. Nach Inbetriebnahme des Systems wird die Lampe mit geringster Intensität eingeschaltet. Eine überhöhte Lichtintensität fördert den Verschleiß der empfindlichen Scannerröhre. Über Weg 1 und 2 hellt sich der Monitor auf. Mittels "System Control" wird die für das System optimale Lichtstärke eingestellt (Weg 3). Die Einstellung richtet sich nach Angaben des Herstellers und wird über eine Anzeige der "System Control" kontrolliert. Diese Justierung erfolgt ohne Meßobjekte im freien Strahlengang. Auf dem Monitor wird erkenntlich, ob das Bildfeld gleichmäßig ausgeleuchtet ist (Weg 2). Geringe Ausleuchtungsunregelmäßigkeiten werden durch den "Shade Corrector" automatisch ausgeglichen (Weg 3). Nun wird die Probenkammer in den Strahlengang gebracht. Die Probe wird mit Hilfe der Abbildungen auf dem Monitor (Weg 1 und 2) sowie des Einblicks durch das Mikroskop (Microscopical Control) fokussiert. Die Ausgangssignale des undetektierten Bildes gelangen gleichzeitig in die Hardware-Einheit (Weg 4). Durch Überprüfung auf dem Monitor wird die Grauwertschwelle so geregelt, daß sich detektiertes und undetektiertes Bild decken. Über den Rechner werden nun willkürlich Größenschwellwerte gesetzt, um Partikel, die sich in der Größe von den Meßobjekten unterscheiden, aus der Messung auszuschließen. Die Wahl der Größengrenzen wird auf dem Monitor überprüft (Weg 5 und 6). Nun beginnt der eigentliche Meßvorgang, welcher durch den Rechner der Software-Einheit gesteuert wird. Auf dem ersten detektierten Objekt, das in den vorgewählten Größengrenzen liegt, erscheint das Rechteck. Die geometrischen Parameter des Objekts werden vermessen. Für jede Messung erscheinen charakteristische Muster auf dem detektierten Objekt. Meßdaten der einzelnen Messungen erscheinen auf dem Monitor (Weg 6). Die Rohdaten werden der Software-Einheit übergeben und hier in Datenpaketen auf Magnetbandkassette gespeichert (Weg 7). Nachdem das erste Objekt vermessen wurde, springt die Marke zum nächsten Objekt und wiederholt die

Meßprozedur. So wird für jedes Bild sukzessive ein Objekt nach dem anderen vermessen.

#### 3.2.4 Das Meßprogramm

Die automatischen Funktionen des "Quantimet 720" am Institut für Meereskunde werden über einen Tischrechner des Typs 9825 A der Firma Hewlett Packard gesteuert. Für die Auswertung der Zooplanktonproben wurde ein spezielles Meß- und Steuerprogramm entwickelt. Die Programmierung erfolgte in der Hewlett-Packard-Sprache, einer dem BASIC verwandten Programmiersprache. Grundlagen für die Programmierung wurden dem Bedienungs- und Programmierungshandbuch (1976) des Herstellers sowie einer Einführung in das Programmieren in Tischcomputer-BASIC (Schärf 1979) entnommen.

Rechnerprogramme sowie Datenpakete lassen sich in Files auf Magnetbandkassette speichern. Die einzelnen Files werden auf dem Magnetband fortlaufend durchnummeriert. Der Umfang eines Files muß genau definiert werden.

Vor Beginn einer Messung wird das Programm von der Kassette in den Rechner eingelesen. Nach dem Start des Programms folgt ein Dialog mit dem Benutzer. Der Rechner fragt nach der Nummer, unter welcher der anschließend erstellte Datenfile auf Magnetbandkassette gespeichert werden soll. Die Nummer des Datenfiles und eine eindeutige Bezeichnung der Planktonprobe müssen in einem Protokoll registriert werden. Um spätere Verwechslungen zu vermeiden, wird für jeden Datenfile ein sogenannter Filekopf angelegt. Im Dialog mit dem Rechner können Stationsnummern, geographische Breite und Länge, Datum, Tageszeit, Fangbereich, filtrierte Wassermenge und der Eichfaktor eingegeben werden. Von diesen Informationen haben die Angaben über die filtrierte Wassermenge und den Eichfaktor Bedeutung für die Auswertung der Rohdaten. Sie werden durch ein Programm automatisch aus dem Filekopf gelesen und für Berechnungen benutzt. Nachdem der Filekopf geschrieben ist, fragt der Rechner nach Größenschwellenwerten zum Ausschluß von Partikeln, die sich in der Größe deutlich von den Meßobjekten unterscheiden. Die

Grenzen werden willkürlich gesetzt. Nun fragt der Rechner den Benutzer, ob er mit den Schwellenwerten einverstanden ist. Durch einen Blick auf den Bildschirm wird überprüft, ob alle Meßobjekte erfaßt und unerwünschte Partikel weitgehend vernachlässigt werden. Eine Korrektur der Schwellenwerte ist möglich, ohne das laufende Programm zu unterbrechen. Sobald die Grenzen zufriedenstellend sind, beginnt die Meßprozedur. Das Rechteck springt auf dem Bildschirm zum ersten Meßobjekt. Fläche und Feret-Durchmesser in den vier möglichen Richtungen werden vermessen. Der Rechner sucht automatisch den größten Feret-Durchmesser und registriert diesen als Länge des Objekts. Im weiteren Dialog fragt der Rechner, ob die Daten dieses Objekts gespeichert oder verworfen werden sollen. Dazu werden die Meßergebnisse auf der Anzeige des Rechners betrachtet. Sind die Meßergebnisse offensichtlich falsch, so werden sie nicht registriert. Dieser Fall tritt ein, wenn sich zwei Partikeln berühren, ein Detrituspartikel innerhalb der vorgewählten Größengrenzen gemessen wurde oder das System durch Störungen falsche Ergebnisse liefert. Berühren sich zwei Objekte, so werden sie unter Einblick durch das Tessoar vorsichtig vereinzelt. Die Abfrage des Rechners eröffnet nach der Messung drei Möglichkeiten: Das gleiche Objekt kann nochmals vermessen und die Meßergebnisse können gespeichert oder verworfen werden. Mit dieser Version des Programms wurden die Netzproben der Stationen 10, 11, 13, 15, 17 sowie von Station 18 die Fangstufen unterhalb 25 m Tiefe ausgewertet. (Vgl. Abb. 11 - 25).

Mit Beginn der Auswertung des Netzfangs von Station 18 aus dem Tiefenbereich 0 - 25 m wurden in das Programm weitere Entscheidungskriterien eingebaut. Es wurde die Möglichkeit eröffnet, den geometrischen Daten eines jeden Organismus einen Merkmalindex anzufügen. Als Index dient ein einfacher Zahlencode. Der Code wird vom Rechner abgefragt. Gelingt die Bestimmung eines Organismus, so ist mit dieser Verfahrensweise eine taxonomische Zuordnung möglich. Die Netzproben der "Meteor-Aquatorexpedition" zeichnen sich durch große Diversität und, bedingt durch die kleine Maschenweite von 100 µm, durch einen hohen Anteil von Entwicklungsstadien aus. Eine taxonomische Auswertung der Copepoden-Entwicklungsstadien gestaltet sich

denkbar schwierig. (Timonin und Voronina, 1977). So wurde nach alternativen, leicht auf dem Bildschirm sichtbaren Unterscheidungskriterien gesucht. Das Resultat war eine Gliederung in vier Gruppen. In einer Gruppe werden Nauplien zusammengefasst. Die restlichen Gruppen werden in Anlehnung an die Gliederung von Spandl (1925) unterschieden. Spandl unterteilt Copepoden auf Grund ihrer Fortbewegungsweise in Gruppen vom Typ Schwebler, Schwimmer und Schlängler. Diese Einteilung entspricht im wesentlichen der Gliederung von Sars (1903) in Calanoida, Cyclopoida und Harpacticoida. Als leicht auf dem Bildschirm erkennbares Unterscheidungsmerkmal wurde die Länge der 1. Antenne gewählt. Die 1. Antenne erreicht nach Kaestner (1967) bei den Schweblern oder Calanoida mindestens die halbe Körperlänge, bei den Schwimmern oder Cyclopoida ist sie fast immer kürzer als die halbe Körperlänge. Mit einem kurzen Blick auf den Bildschirm läßt sich so, durch Abschätzung der Antennenlänge, eine Unterteilung in Schwebler und Schwimmer durchführen. Die Schlängler oder Harpacticoida sind nur mit wenigen Gruppen im marinen Pelagial vertreten. In den Proben wurde nur ein Vertreter registriert. Er hebt sich durch seine Körperform deutlich von den anderen Gruppen ab (vgl. Abb. 5 und 6).

Die Gliederung der Copepoden in die vier Gruppen wurde im Meßprogramm folgendermaßen berücksichtigt: Nach der Messung der geometrischen Parameter erfolgt, falls die Meßergebnisse akzeptiert werden, eine Abfrage nach dem Typ des Copepoden. Durch einfachen Tastendruck wird nun den Meßergebnissen ein Zahlencode zugeordnet. In dieser Form werden nacheinander alle Copepoden vermessen und klassifiziert. Ist die Auswertung eines Bildfeldes abgeschlossen, so wird die Zählkammer auf dem Objektisch weiterbewegt und die Vermessung des nächsten Bildfeldes kann beginnen. Sobald die Speicherkapazität eines Datenfiles überschritten wird, erfolgt automatisch die Speicherung auf Magnetbandkassette. Als Ergebnis erhält man eine Anzahl von Datenpaketen mit Klassifizierungs-codes und Informationen für die Berechnung der Rohdaten.

#### 3.2.4.1 Programme zur Auswertung der Rohdaten

Die rechnerische Auswertung der Rohdaten erfolgt mit dem Computer des Rechenzentrums am Institut für Meereskunde. Dazu müssen die Daten der Magnetbandkassetten in den Computer eingelesen werden. Der Datentransfer wird über eine Direktleitung vom Tischrechner zum Hausrechner durchgeführt. Der Aufbau der beiden Rechner erlaubt jedoch keinen Dialog, sondern nur eine einseitig gesteuerte Übertragung. Durch ein kleines Programm des Tischrechners wird der Benutzer nach der Filenummer des jeweiligen Datenfiles der Magnetbandkassette gefragt. Der Datenfile wird in den Rechner eingelesen. Nun nimmt der Tischrechner Verbindung mit dem Hausrechner auf. Systembedingt bekommen die Datenfiles für den Hausrechner eine neue Filebezeichnung. Die Filebezeichnung wurde so strukturiert, daß nachfolgende Berechnungsprogramme alle Datenfiles einer Netzprobe automatisch greifen können. Nach der Umbenennung erfolgt die Übertragung. Auf einem parallel angeschlossenen Bildschirmterminal des Hausrechners wird der Inhalt der Datenfiles sichtbar. Nach der Datenübertragung ist die Arbeit mit dem Tischrechner abgeschlossen.

Die Programme zur Auswertung der Rohdaten wurden in der Programmiersprache FORTRAN 77 (Wehnes, 1984) geschrieben. Im Dialog mit dem Benutzer werden zu Beginn alle Datenfiles einer Planktonprobe zu einem Gesamtfile zusammengefaßt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Rohdaten. Mit dem Eichfaktor aus dem Filekopf werden die Bildpunkteinheiten in absolute Einheiten umgerechnet, aus Länge und Fläche ein angenähertes Volumen berechnet. Voraussetzung ist die Annahme, daß die Idealform eines Copepoden einem Ellipsoid entspricht. Die Körperanhänge werden vernachlässigt, da ihr Anteil am Gesamtvolumen gewöhnlich insignifikant ist (Herman und Dauphinee, 1980).

Abbildung 6 zeigt die Monitordarstellung von drei Copepoden. Helle, den Organismenabbildungen überlagerte Flächen bezeichnen Bereiche, die bei der Messung berücksichtigt wurden. Die Grauwertschwelle wurde so gesetzt, daß Körperanhänge wie Antennen und Furca weitgehend unberücksichtigt blieben. Die eingezeichneten Ellipsen wurden aus den Meßergebnissen konstruiert. Sie verdeutlichen, inwieweit sich die



Abb. 6: Monitordarstellung von Copepoden. Die durch die gepunktete Linie eingeschlossene Ellipse wurde aus den Meßdaten für Länge und Fläche konstruiert und dient als Grundlage für die Berechnung des Volumens. Das weiße Rechteck (R) markiert den gerade vermessenen Copepoden. Seine Körperfläche, ausgedrückt in Bildpunkten, wird in der oberen rechten Ecke angezeigt. Die Zahl in der linken oberen Ecke bezeichnet die Anzahl der erkannten Meßobjekte. Partikel, deren Größe außerhalb der vorgewählten Grenzen liegt, werden detektiert aber nicht vermessen (S). Die Grenzen des Meßfeldes (vgl. Abb. 8) werden auf dem Monitor angezeigt (F) (aus Rolke und Lenz, 1984)

Flächen der wahren und der berechneten Form entsprechen. Zur Berechnung werden Höhe und Breite des Ellipsenrotationskörpers gleichgesetzt. Daraus wird nach der Formel  $V=3/4 \cdot \pi \cdot a \cdot b^2$  das Volumen jedes Copepoden näherungsweise berechnet.

Mit diesem Programm gewonnene Ergebnisse werden in einem Datenfile gespeichert. Zur weiteren Bearbeitung stehen zwei Programme zur Auswahl. Sie unterscheiden sich nur durch die Struktur ihrer Ergebnisfiles, die entsprechend den Anforderungen von Folgeprogrammen aufgebaut sind. Die Datenverarbeitung beider Programme ist identisch: Zu Beginn muß die Entscheidung getroffen werden, ob die Daten sämtlicher Copepoden, der Schweber, der Schwimmer, der Schlängler, der Nauplien, oder einer Kombination der vier Gruppen ausgewertet werden sollen. Sodann werden die Wertepaare nach der Länge in Größenklassen sortiert. Die Klassenbreite wächst nach der von Sheldon und Parsons (1967a) und Sheldon (1969) empfohlenen Stufenskala um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ . Für jede Größenklasse werden Anzahl und Gesamtvolumen der Copepoden registriert. Im nächsten Schritt wird die Information über die filtrierte Wassermenge aus dem Filekopf gelesen. Damit wird ein Bezug von Anzahl und Gesamtvolumen der Copepoden einer Größenklasse zum filtrierten Wasservolumen hergestellt. Die Ergebnisse werden in Datenfiles gespeichert.

Ein Programm liefert als Ergebnisfile Größenhäufigkeitsverteilungen für Anzahl und Volumen in Form einer Tabelle sowie eines Plotfiles. Die Datenanordnung im Plotfile entspricht den Anforderungen eines Plotprogramms der Softwareausstattung des Hausrechners. Mit diesem Plotprogramm lassen sich die Größenhäufigkeitsverteilungen graphisch darstellen (vgl. Abb. 11 - 25).

Die Ergebnisfiles des zweiten Programms werden von den Programmen des Programmblocks zur Strukturanalyse von Ökosystemen (Bölter et. al., 1980, Meyer und Bölter, 1981) akzeptiert.

#### 3.2.4.2 Die Ergebnisauswertung

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im wesentlichen durch eine analytische Beschreibung der Größenhäufigkeitsverteilungen. Um eine

weitgehende Objektivität zu erreichen, werden Mittelwerte der Verteilungen verglichen. Der Medianwert (Spiegel, 1976) wurde dem arithmetischen Mittel vorgezogen, da Extremwerte weniger ins Gewicht fallen. Eine statistische Analyse wurde mit Hilfe des im Sonderforschungsbereich 95 der Universität Kiel entwickelten Programmblocks zur Strukturanalyse von Ökosystemen (Bölter et. al., 1980, Meyer und Bölter, 1981) durchgeführt. Mit den Programmen SPEARM.ALG und PROB.ALG wurden die Datensätze einer Spearman-Rang-Korrelation unterzogen. Der Spearman-Rang-Korrelation bedient man sich, wenn es darum geht, Zusammenhänge zwischen nicht normal verteilten Meßreihen zu ermitteln (Lienert, 1962). Im vorliegenden Fall werden die Größenhäufigkeitsverteilungen der Copepoden auf ihre Ähnlichkeit hin untersucht. Die Korrelationsmatrix der Spearman-Rang-Korrelation dient als Grundlage für die anschließende Clusteranalyse mit dem Programm CLUST.ALG. Für die Clusteranalyse wurde das Complete-Linkage Verfahren angewandt. Nach Meyer (1983) ist dies eine Klassifikationsmethode, die scharf voneinander abgegrenzte Gruppen bildet.

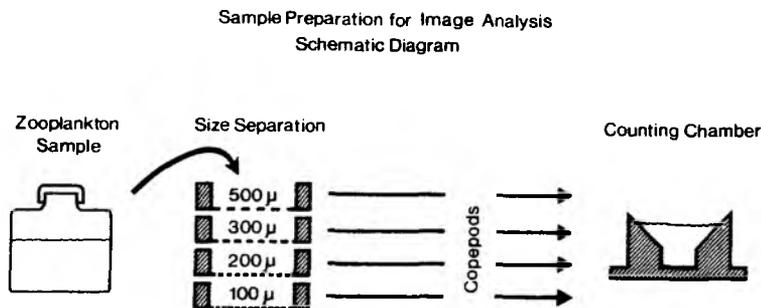
### 3.2.5 Die Aufbereitung der Zooplanktonfeldproben für die automatische Bildanalyse

Der Aufbau des Bildanalyzesystems erlaubt die Bearbeitung von Zooplanktonproben entsprechend der gebräuchlichen mikroskopischen Analyse. Dazu werden die Proben in Zählkammern überführt und unter das Mikroskop gebracht. Im Unterschied zum herkömmlichen Verfahren dürfen sich die Organismen nicht berühren. Während der Mensch in der Lage ist, sich berührende Objekte zu unterscheiden, gelingt dies dem "Quantimet 720" in der am Institut für Meereskunde vorhandenen Modulkombination nicht. Hier werden sich berührende Partikel als ein Objekt aufgefasst.

Nach der Überführung der Planktonproben in Zählkammern kommt es bei der Sedimentation der Organismen zu Berührungen und Oberlagerungen. Dadurch, daß die Copepodenextremitäten mit vielen Haken und Dornen versehen sind, bilden sich Organismenknäuel. Hinzu kommt, daß in den

Proben der "Meteor-Aquatorexpedition" häufig schleimige, mit fädigem Material und Detritus durchsetzte Aggregate auftraten. In diesen flockigen Aggregaten saßen Copepoden und andere Organismen. Durch die schleimige Substanz klebten sie förmlich in und an den Aggregaten. Der erste Eindruck legte die Vermutung nahe, daß die Bildung der Aggregate auf Auswirkungen des Konservierungsmittels zurückzuführen seien.

Hirche (pers. Mitt.) fand diese Aggregate auch bei der Untersuchung von frischen Netzproben. Von ähnlichen Aggregaten berichten Nishizawa et. al. (1954), Riley (1963) und Hamner et. al. (1975). Nishizawa et. al. beobachteten die Aggregate bei Tauchgängen mit einer Tauchkammer. Riley erklärt die Entstehung dieser Aggregate durch Adsorption von gelösten oder kolloidalen organischen Substanzen an kleine Luftblasen. Seiner Meinung nach vergrößern sie sich, indem sich organische und anorganische Detrituspartikel anlagern. Hamner et. al. fanden bei Tauchgängen in mehreren Regionen des tropischen Ozeans Aggregate in beträchtlichen Mengen und einer Größe bis zu 30 cm Durchmesser. Sie führen die Entstehung auf schleimige Abscheidungen gallertiger Planktonorganismen zurück. Eingebettet in die schleimige Grundsubstanz beobachteten sie Algen, Foraminiferen und Detrituspartikel.



**Abb. 7:** Die Probenaufbereitung für die Bildanalyse  
(aus Rolke und Lenz, 1984)

Oberlagerungen und Berührungen von Organismen, mögen sie nun bei der Sedimentation in der Probenkammer oder durch die in der Literatur auch als "marine snow" bekannten Aggregate hervorgerufen worden sein, erschweren eine bildanalytische Auswertung. Um dieses Problem zu reduzieren, wurden die Netzproben in Größen fraktioniert. Zudem wurde für die Auswertung eine Probenkammer entwickelt, die während der Meßprozedur eine Trennung sich berührender Organismen erlaubt.

Die Proben wurden durch Gaze mit einer Maschenweite von 500  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  filtriert (s. Abb. 7). In der Fraktion 500  $\mu\text{m}$  wurden miteinander verhakte und verklebte sowie große Organismen zurückgehalten. Für die weitere Auswertung wurden nur Copepoden und deren Entwicklungsstadien berücksichtigt. Der Anteil der Copepoden an der Planktonfauna beträgt etwa 70 % (Raymont, 1983). Auch in den Netzproben aus dem äquatorialen Atlantik traten die übrigen taxonomischen Gruppen nur in verschwindend kleiner Zahl auf.

Die Copepoden wurden unter dem Binokular aus den Aggregaten befreit und aussortiert. In den übrigen Fraktionen lagen die Organismen weitgehend vereinzelt vor.

#### 3.2.5.1 Die Probenkammer

Die Proben wurden in speziell für das Bildanalyzesystem angefertigten Probenkammern ausgewertet. Die Breite zwischen ihren Seitenwänden entspricht der Breite eines Bildfelds (s. Abb. 8). In den Boden sind in einem der Höhe eines Bildfelds entsprechenden Abstand Markierungen eingeritzt. Die Probenkammer ist oben geöffnet, so daß die Möglichkeit besteht, sich berührende Organismen zu vereinzeln. Problematisch ist dabei, daß durch die Oberflächenspannung des Wassers eine Wölbung mit Linsenwirkung entsteht, die die Messungen verfälscht. Um diese Erscheinung zu verhindern, wurden die Seitenwände der Kammern abgeschragt. Dadurch wird die Grenzfläche zwischen Wasseroberfläche und Kammerwand so weit aus dem Bild herausgezogen, daß die Wölbung der Wasseroberfläche über dem Meßfeld sehr gering ist. Die Zugabe von Detergenzien vermindert die Wölbung der Wasseroberfläche so weit, daß

Messungen von Partikeln bekannter Größe keine Abweichungen ergaben. Die Maße der Zählkammern richteten sich nach der Vergrößerung. Nach ausführlichem Vorstudium empfahl sich für die Fraktion 100 - 200  $\mu\text{m}$  eine 3,2fache Vergrößerung. Bei dieser Vergrößerung erfaßt das Tessovar ein Bildfeld von 4,5 x 3,2 mm. Unter Verwendung der größten Blende wird eine Abbildungstiefe von 2,56 mm erreicht (Angaben des Herstellers). Die übrigen Fraktionen wurden bei 2facher Vergrößerung ausgewertet. Das Bildfeld deckt hier eine Fläche von 7 x 5 mm ab. Die

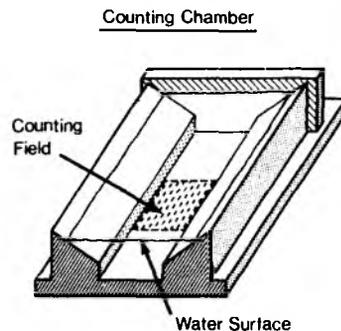


Abb. 8: Die Probenkammer  
(aus Rolke und Lenz, 1984)

größtmögliche Abbildungstiefe beträgt dabei 4 mm (Angaben des Herstellers). In diesen Größenbereichen werden die Abbildungen der Organismen noch in genügend viele Bildpunkte aufgelöst, um exakte Messungen durchführen zu können. Dabei passen genügend Organismen in ein Meßfeld, um eine zügige Auswertung zu gewährleisten. Die großen Abbildungstiefen ermöglichen die scharfe Abbildung von Partikeln, deren Stärke in den angegebenen Größenbereichen variiert, ohne daß man nachfokussieren muß. Der Abstand zwischen Objektiv und Fokussierungsebene beträgt etwa 15 cm. Dieser Abstand erwies sich als hilfreich, um

die Lage der Organismen in der Probenkammer noch bequem korrigieren zu können.

Ein weiteres Problem ist die Wärmestrahlung der Lichtquelle. Sie ruft im Verlauf der Messung eine Zirkulation hervor, die während des Meßvorgangs zu einer Bewegung der kleinen und leichten Organismen führt. Genaue Messungen können aber nur durchgeführt werden, wenn sich das Meßobjekt nicht bewegt. Zur Lösung des Problems wurde eine ständig von Wasser durchflossene, transparente Kammer in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Probenkammer gesetzt. Sie absorbiert die Wärme der Lichtquelle und verhindert damit eine thermische Zirkulation in der Probenkammer.

### 3.3 Diskussion des Bildanalyseverfahrens, der biologischen Bedeutung der Unterscheidungskriterien und der Datenauswertung

#### 3.3.1 Kritische Betrachtung von Meßgeschwindigkeit und -genauigkeit

Das Bildanalyzesystem "Quantimet 720" ist als Werkzeug für exakte und schnelle Messungen von geometrischen Parametern zu betrachten. Grundsätzlich ist es möglich, Partikel automatisch nach ihrer Form zu klassifizieren. Die Formerkennung führt zum vollautomatischen Einsatz von Bildanalysegeräten. Bei vollautomatischem Einsatz sind Bildanalysegeräte bezüglich Geschwindigkeit und Genauigkeit vergleichbar mit Meßgeräten des Coulter-Counter-Typs. Ihre Überlegenheit zeichnet sich durch eine Klassifizierung nach dem Unterscheidungsmerkmal "Partikelform" aus. Dazu wurden im marinbiologischen Bereich erste Erfolge erzielt (vgl. Kapt. 1.2.2). Die vorliegenden Proben aus der tropischen Region enthalten Arten, die sich in Gestalt und Größe deutlich unterscheiden. Im detektierten Bild ist der Unterschied der Copepoden nicht so deutlich, daß aus den möglichen Meßparametern über Formfaktoren eine automatische Sortierung in taxonomische Gruppen denkbar wäre. Auch die Unterscheidung zwischen Copepoden und anderen Partikeln ist nicht immer durchführbar, da sich die detektierten Bilder manchmal zum Verwechseln ähneln.

Die Meßgeschwindigkeit wird im wesentlichen durch die Abtastrate des Scanners bestimmt. Mit jeder Bildraasterung wird ein geometrischer Parameter vermessen. Dies dauert jeweils ca. 1/10 Sekunde. Im Meßprogramm werden für jedes Objekt fünf Parameter abgefragt. Da das System im vorgestellten Verfahren nicht vollautomatisch, sondern im Dialog mit dem Benutzer eingesetzt wird, ist der reinen Meßzeit eine Zeitspanne für Entscheidungen hinzuzurechnen. Im Mittel erscheint ein Zeitaufwand von ca. 2 Sekunden für die Vermessung, die Merkmalszuordnung und die Datenspeicherung eines Objekts als realistisch. Eine Verzögerung tritt ein, wenn sich zwei Organismen in der Probenkammer berühren. Sie müssen, im Vergleich zur Messung, mit hohem Zeitaufwand und starker Konzentration vorsichtig, unter Einblick durch das Tessovar, in der Probenkammer vereinzelt werden.

Die Meßgenauigkeit richtet sich nach der Vergrößerung und damit der Auflösung des Objektbildes in Bildpunkte. Größte Präzision wird erreicht, wenn ein Objekt bildfüllend abgebildet wird. Dadurch wird jedoch die Auswertung gebremst. Die Wahl der Vergrößerungsstufen richtete ich nach dem Bestreben, bei einer Auflösung mit noch vertretbarer Meßgenauigkeit möglichst viele Organismen in einem Bildfeld zu vermessen. In den gewählten Vergrößerungsbereichen lassen sich bis zu 30 Organismen ohne gegenseitigen Kontakt in einem Bildfeld plazieren. Dabei liegen die Schwankungen des systembedingten Meßfehlers unter 1 %. Diese Schwankungen entsprechen bei Längenmessungen einer Variation um einen Bildpunkt. In den gewählten Vergrößerungsbereichen von 2facher und 3,2facher Vergrößerung beträgt der Durchmesser eines Bildpunktes  $9,91 \mu\text{m}$  bzw.  $5,99 \mu\text{m}$ . Die kleinsten Organismen hatten, bedingt durch die Maschenweite des Netzes, eine Länge von etwa  $100 \mu\text{m}$ . Kalkuliert man die zufällige Schwankung um einen Bildpunkt, so entspricht dies, bei der Arbeit mit 3,2facher Vergrößerung, einem Meßfehler von ca. 6 %. Die Fraktionen größer  $200 \mu\text{m}$  (vgl. Abb. 7) wurden bei 2facher Vergrößerung vermessen, hier reduziert sich der maximale Fehler auf ca. 2 %.

Eine weitere Fehlerquelle entsteht bei der Abbildung der Objekte. Fixiertes Copepodenmaterial wird zwar im Durchlicht genügend kontrastreich abgebildet, jedoch variiert das Bild entsprechender

Organismen durch ihre unterschiedliche Lage in Form und Größe. Einige liegen auf der Seite, andere auf dem Bauch oder Rücken, einige haben ihre Extremitäten angelegt, andere ausgestreckt. Das Resultat sind Unterschiede in den Längen- und Flächenmessungen. Die Größe dieser Fehlerquelle läßt sich schwer abschätzen. Da es sich dabei, wie bei den oben erwähnten Fehlern, um Zufallsfehler handelt, wird angenommen, daß sie sich in den umfangreichen Datensätzen herausmitteln.

Neben den zufälligen Fehlern tritt ein systematischer Fehler auf, dessen Ursache darin besteht, daß Längenmessungen nicht orientierungsunabhängig durchgeführt werden können. Als Folge davon werden die Längen der Organismen im Mittel um 5 % unterschätzt.

Die Berechnung des Organismenvolumens aus Länge und Fläche beinhaltet eine weitere Fehlerquelle. Die Ellipsenkonstruktionen aus Meßergebnissen (s. Abb. 6) zeigen nämlich, daß die angenommene Form der wahren stark angenähert ist. Exakte Volumenmessungen zum Vergleich mit Ergebnissen der Bildanalyse sind nahezu undurchführbar. Mit einer Geräteausstattung nach Boyd und Johnson (1969) wurde der Versuch unternommen, Messungen nach dem Coulter-Counter-Prinzip zum Vergleich heranzuziehen. Maddux und Kanwisher (1965) erwähnen, daß mit einem entsprechenden System Formalin fixierte Copepoden vermessen werden können. Eigene Versuche zeigten jedoch nach mehrfacher Messung desselben Copepoden unrealistisch schwankende Ergebnisse. Entsprechende Beobachtungen machten Herman und Dauphinee (1980). Sie vermuten, daß bei längerer Konservierung ein Austausch zwischen Salzwasser und Körperflüssigkeit stattfindet, so daß sich die Leitfähigkeit der Organismen von der des umgebenden Mediums nicht mehr charakteristisch unterscheidet.

In einem weiteren Versuch sollte das "packed cell volume" (Sorokin, 1973) als Maß für das Volumen der Copepoden mit bildanalytischen Ergebnissen verglichen werden. Für die Bestimmung des "packed cell volume" wurden zwischen 30 und 60 Copepoden unterschiedlicher Art und Größe mit einem speziellen Kapillarröhrchen zentrifugiert. Die Eichskala ermöglicht Volumenbestimmungen mit einer Genauigkeit von 1  $\mu$ l. Probleme entstanden nach der ersten Zentrifugierung. In der Kapillare bildeten sich in unregelmäßigen Abständen Organismenpro-

pfen. Mit einem feinen Draht wurden die Pfropfen vorsichtig in der Kapillare zusammengeschoben und anschließend nochmals zentrifugiert. Das Zusammenschieben ist ein sehr subjektiver Eingriff, so daß die Meßergebnisse nur als grobe Abschätzung dienen können. In fünf Durchgängen wurden Copepoden bildanalytisch vermessen und anschließend das "packed cell volume" bestimmt. Die mittlere Abweichung betrug 11 %. Das Verfahren läßt keine klare Fehlerschätzung zu, zeigt jedoch, daß die Berechnung des Copepodenvolumens nicht um Größenordnungen von der Realität abweicht.

### 3.3.2 Die Größenstruktur einer pelagischen Nahrungskette

In einem pelagischen Ökosystem wird Sonnenenergie von autotrophen Einzellern durch den Aufbau von organischer Substanz gebunden. Anschließend wird die umgewandelte Energie durch die Nahrungskette geschleust. Der Weg führt durch ein komplexes System von Räuber-Beute-Beziehungen. Betrachtet man die Nahrungskette unter dem Gesichtspunkt der Größenstruktur, so läßt sie sich in drei Kategorien gliedern (Sheldon et. al., 1973, 1977). Die erste Kategorie umfaßt die Primärproduzenten, die im Pelagial im wesentlichen aus kleinen einzelligen Pflanzen bestehen. Die trophische Verbindung zur nächsten Kategorie wird durch kleine herbivore Organismen, welche in der Regel größer sind als die Pflanzen, hergestellt. In der dritten Kategorie werden die Verknüpfungen mit höheren trophischen Stufen zusammengefaßt. Hier herrscht die Tendenz vor, daß Organismen einer höheren trophischen Stufe (Räuber) größer sind als die der darunter liegenden (Beute) (z. B. Mullin, 1965, Sheldon et. al., 1973, Conover, 1978). Diese biologische Gesetzmäßigkeit erklären Sheldon et. al. (1973, 1977) durch die Anforderung des Lebensraumes. Aquatische Organismen bewohnen ein Medium, welches gegenüber Luft eine etwa 800fach höhere Dichte aufweist. Eine effektive Fortbewegung ist hier nur bei annähernd stromlinienförmiger Körperform möglich. Aufwendige Extremitäten zum Ergreifen und Mitführen der Beute sind unvorteilhaft, da sie die Fortbewegung beeinträchtigen, und werden gewöhnlich nicht aus-

gebildet. Aus diesem Grunde muß ein pelagischer Räuber seine Beute als Ganzes verschlingen und deshalb größer sein als seine Beute.

In der Nahrungskette wird die Sonnenenergie von kleinen autotrophen Organismen an immer größere werdende Räuber weitergegeben. Da kleine Organismen eine höhere Reproduktionsrate haben, nimmt die Anzahl der Organismen mit wachsender Individuengröße ab. Unter diesem Gesichtspunkt stehen Größe und Häufigkeit in reziproker Beziehung. Betrachtet man die Größenhäufigkeitsverteilung unter einem anderen Aspekt, so wird ein weiterer Zusammenhang deutlich. Dazu wird das Gesamtvolumen aller Organismen definierter Größenbereiche dargestellt. Für die Wahl der Größenklasse wird vorausgesetzt, daß bei der Vielfalt mariner Organismen Vertreter in allen Größenbereichen anzutreffen sind. Da die Räuber in der Regel größer sind als ihre Beute, wird angenommen, daß sich das mittlere Organismenvolumen von Stufe zu Stufe verdoppelt. Als Variable der Klassenbreite dient der Organismendurchmesser. Aus dem mathematischen Zusammenhang zwischen Durchmesser und Volumen resultiert ein Klassengrößenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$  (Sheldon und Parsons, 1967B, Sheldon, 1969).

Diese Darstellung der Biomasse wurde auf einem weiten Feld von Untersuchungen der marinen Organismenverteilungen angewandt (z. B. Sheldon und Parsons, 1967B, Parsons, 1969, Parsons und Le Brasseur, 1970, Sheldon et. al., 1972, 1973, 1977, Conover, 1978). Sie ist Grundlage der empirisch begründeten Hypothese von Sheldon et. al. (1972), die besagt, daß im Ozean in grober Näherung im Größenbereich von den Bakterien bis zu den Walen etwa gleiche Partikelvolumenkonzentrationen anzutreffen sind. Die Autoren räumen ein, daß dies eine vereinfachte Beschreibung der natürlichen Situation ist. Um das Bild der Realität anzunähern, kalkulieren sie eine Abnahme des "standing stock" mit zunehmender Organismengröße. Sie nehmen an, daß er sich von den Bakterien bis zu den Walen um den Faktor 2 - 4, jedoch mit Sicherheit nicht um mehr als eine Größenordnung ändert.

Die Hypothese von Sheldon et. al. (1972) kann Kerr (1974) mit einem theoretischen Ansatz bestätigen. Das Bestechende dieser Hypothese liegt darin, daß sich das Ergebnis der komplizierten Interaktionen in einer Nahrungskette zusammenfassend durch eine einfache Größenvertei-

lung beschreiben läßt. Dies führte zu verschiedenen Anwendungen. Sheldon et. al. (1977) schätzten für den Golf von Maine und die Nordsee die Phytoplanktonproduktion nach bekannten Fischereierträgen und für das Auftriebsgebiet vor Peru die Fischproduktion auf Grund von bekannter Planktonproduktion. Andere Autoren (z. B. Steele und Frost, 1977, Platt und Denman, 1977, 1978, Silvert und Platt, 1980) benutzten die Größenverteilung als Grundlage für theoretische Analysen der Ökosystemstruktur.

### 3.3.2.1 Faktoren, welche die Größenstruktur der Nahrungskette beeinflussen

Die Hypothese von Sheldon et. al. (1972) führt zu einer grob genäher-ten Darstellung der natürlichen Situation. Unterzieht man Partikelgrößenverteilungen im Pelagial einer empfindlicheren Analyse, so lassen sich regionale und vertikale Unterschiede erkennen (Sheldon et. al., 1972). Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß viele wichtige Prozesse im Leben der Organismen größenabhängig sind. Die Körpergröße spielt eine bedeutende Rolle für den Metabolismus und das Wachstum der Organismen (Fenchel, 1974, Banse, 1976). Physikalische Umweltbedingungen nehmen ebenfalls Einfluß auf die Körpergröße der Organismen und damit auch auf die trophische Struktur der Nahrungskette, im besonderen auf das Phytoplankton (z. B. Semina, 1972, Parsons und Takahashi, 1973, Sournia, 1982).

Dazu unterscheidet Landry (1977) zwei charakteristische Situationen. Auf der einen Seite ein System, welches sich durch starke Turbulenz und hohe Nährstoffkonzentration auszeichnet. Hier wird das Wachstum großer, kettenbildender Diatomeen favorisiert. Bedingt durch ihre Größe werden sie von großen Herbivoren effektiver aufgenommen als von kleinen. Das Auftreten großer Beute fördert das Wachstum von Fischen und großen invertebraten Räubern. Die andere Situation wird durch große Stabilität und niedrige Nährstoffkonzentration geprägt. Die dominierenden Primärproduzenten bestehen hier aus Mikroflagellaten und Cyanobakterien (Blaualgen). Diese werden von kleinen Herbivoren

und Mikrozooplanktern effektiv genutzt. Es schließen sich kleine omnivore oder carnivore Invertebraten an. Hier werden in der Regel mehrere Stufen durchlaufen, bis eine Organismengröße erreicht ist, die von Fischbeständen nutzbar ist.

Die Länge der Nahrungskette und damit die Form der Größenverteilung wird danach im wesentlichen von zwei Faktorenkomplexen gesteuert. Zum einen vom unteren Ende her durch physikalische Bedingungen, welche die Größe der Primärproduzenten bestimmen, zum anderen von oben her durch Räuber-Beute Beziehungen. Die Auswirkung von selektivem Räuberdruck und Nahrungskonkurrenz auf die Größenstruktur der pelagischen Nahrungskette konnten Brooks und Dodson (1965) in einer Pionierstudie zeigen. Weitere Untersuchungen (z. B. Dodson, 1970, Boyd, 1976, Frost, 1980, Ryther und Sanders, 1980) bestätigen die Bedeutung dieser Faktoren.

Aus diesen Zusammenhängen wird deutlich, daß die Darstellung der Nahrungskette als bloße Verteilung der Biomasse in logarithmisch wachsenden Größenklassen nur eine begrenzte Aussagekraft hat. Unterschiedliche Verteilungsmuster lassen sich lediglich zu der physikalischen Situation in Beziehung setzen. Die Information über die Funktionsmerkmale der Organismen einzelner Größenklassen führt zu einem Einblick in den biologischen Mechanismus, der durch manigfaltige Verknüpfungen trophischer Stufen die Größenstruktur der Nahrungskette formt.

### 3.3.2.2 Die Größe der 1. Antennen als Hinweis auf die Ernährungsweise der Copepoden

In der pelagischen Nahrungskette wird von autotrophen Organismen gebundene Energie durch heterotrophe (im weiteren als Räuber bezeichnet) von einer trophischen Stufe zur nächsten weitergereicht. Die Art und Weise der Übertragung hängt nicht nur von der morphologischen Ausstattung, sondern auch von der Verhaltensweise der Räuber ab (Hamner, 1985).

Unter den pelagischen Räufern lassen sich zwei Gruppen unterschei-

den. Eine besteht aus Organismen, die man als "Jäger" bezeichnen kann. Sie jagen ihre Beute und verzehren sie erst dann, wenn sie als adäquate Beute erkannt wurde. Es handelt sich im wesentlichen um Vertebraten. Vertreter der zweiten Gruppe, hauptsächlich invertebrate Planktonorganismen, lassen sich mit "Sammlern" vergleichen. Ohne vorherige Qualifikation ergreifen sie alles Erreichbare. Soweit es ihre Sinnesausstattung erlaubt, testen sie anschließend ihre Beute und entscheiden danach, ob sie verzehrt oder zurückgewiesen werden soll (Conover, 1978). Dazu lassen sich zwei Strategien unterscheiden. Zum einen wird die Beute durch aktives Schwimmen gesucht, zum anderen wird in lauerner Position auf Beute gewartet (Greene, 1983, 1985). Bei den Copepoden läßt sich eine Beziehung zwischen den Sammelstrategien und der Länge der 1. Antennen erkennen. Schwebler zeichnen sich durch große 1. Antennen aus. Sie haben vermutlich keine Funktion für die aktive Fortbewegung. Führt der Copepode vermittels eines Schlages, der vom Abdomen und dem Schwimfüßen gleichzeitig ausgeführt wird (Spandl, 1925), seine typische sprunghafte Bewegung aus, so biegen sich die 1. Antennen durch. Das Zurückbiegen der Antennen ist wahrscheinlich eine passive Bewegung und wird durch den Reibungswiderstand hervorgerufen (Gauld, 1966). Kaestner (1967) beschreibt die Schwebler wie folgt: "Ihre 1. Antennen erreichen mindestens halbe Körperlänge. Sie werden steif waagrecht zur Seite ausgestreckt und dann hängt der Körper, die Bauchseite schräg aufwärts gekehrt, wie an einem Fallschirm daran. Der Reibungswiderstand, der durch viele abstehende Borsten erhöht wird, ist so groß, daß der Copepode nur langsam absinkt. In gewissen Zeitabständen aber muß er sich mit Hilfe der Beine wieder hochschnellen." Diese Verhaltensweise der Schwebler entspricht den Voraussetzungen für eine lauerner Beutesuche.

Die ersten Antennen der Schwimmer sind in der Regel kürzer als die halbe Körperlänge (Kaestner, 1967). Dementsprechend ist bei ihnen die "Fallschirmwirkung" stark reduziert. Sie müssen stärker aktiv werden, um ihre Position in der Wassersäule zu halten. Aus diesem Grunde fällt ihnen die lauerner Beutesuche schwer. Für eine aktive Beutesuche hingegen sind kurze Antennen von Vorteil, da sie weniger Widerstand bieten. Zudem scheinen die Schwimmer ihre 1. Antennen aktiv für die

Fortbewegung einzusetzen (Gauld, 1966). So sind sie besser für eine aktive Beutesuche ausgestattet.

Die Sammelstrategie hat vermutlich auch Bedeutung für die Ortung der Beute. Dazu sind Copepoden mit Mechano- und Chemorezeptoren ausgestattet ( z. B. Landry, 1980, Buskey, 1984, Greene, 1985). Ein Einfluß der Beutesuchverhalten auf die Chemorezeption ist kaum denkbar. Auf die mechanische Rezeption wirkt sich die Eigenbewegung jedoch störend aus. Bewegungssignale der Beute können durch selbstverursachte Signale überdeckt werden. Lauernde Räuber, damit sind die Greifer gemeint, sind unter diesem Aspekt den Schwimmern überlegen. Sie zeigen eine Präferenz für große Beute, da diese stärkere Bewegungssignale verursacht. Nach Greene (1985) steigt der Fangerfolg mit zunehmender Beutegröße bei den lauernden Copepoden schneller als bei den Schwimmern.

### 3.3.3 Das Bildanalyseverfahren im Vergleich mit anderen Auswertungsmethoden

Die Wahl der Untersuchungsmethode eröffnet verschiedene Möglichkeiten, Planktonorganismen nach ihren Funktionsmerkmalen zu unterscheiden. Dabei stehen Geschwindigkeit und Informationsgehalt im umgekehrten Verhältnis.

Einen hohen Informationsgehalt erzielt man nach wie vor durch die herkömmliche Untersuchung unter dem Mikroskop. Durch taxonomische Identifikation erhält man eine klare Aufschlüsselung aller Vertreter der Nahrungskette. Allerdings wird die Aussagekraft durch lückenhafte Information über die Biologie der Organismen eingeschränkt. Die reine taxonomische Untersuchung hat dadurch lediglich Bedeutung für biogeographische Studien. Erst zusätzliche Untersuchungen zur Ernährungsweise geben Aufschluß über die Rolle der Organismen für den Energietransfer in der Nahrungskette. Es lassen sich drei Gruppen unterscheiden: Filtrierende Copepoden, greifende Copepoden und Copepoden, die ihre Beute sowohl durch Ergreifen als auch durch Filtration fangen können. Die erste Gruppe ernährt sich im Schwerpunkt durch autotrophe

Organismen und wird als Herbivore bezeichnet. Die Nahrung der zweiten Gruppe, der Carnivoren setzt sich im wesentlichen aus heterotrophen Organismen zusammen. Übrig bleiben Copepoden mit wechselnder Ernährungsweise, die Omnivoren. Anraku und Omori (1963) fanden eine deutliche Beziehung zwischen Ernährungsmodus und der Struktur der Mundwerkzeuge. Die Untersuchung der Mundwerkzeuge sagt jedoch nichts über die tatsächlich aufgenommene Nahrung aus, sie deutet lediglich an, an welchen Nahrungstyp der Organismus morphologisch am besten angepaßt ist (Mullin, 1966). Zur Auswahl ihrer Nahrung stehen den Copepoden Unterscheidungsmöglichkeiten zur Verfügung. Es konnten größenabhängige (z. B. Mullin, 1966, Wilson, 1973, Frost, 1977, und Paffenhöfer, 1984) und qualitative (z. B. Landry, 1980, Huntley et. al., 1983) Nahrungsdifferenzierungen beobachtet werden. Erst Magenuntersuchungen geben einen genauen Aufschluß über die Zusammensetzung der Nahrung.

Ein Nachteil der mikroskopischen Analyse besteht darin, daß keine gleichzeitige Biomassebestimmung möglich ist. Zusätzliche Methoden, wie z. B. die Bestimmung des Verdrängungsvolumens, des Trockengewichts oder des Kohlenstoffgehalts, müssen zur Hilfe genommen werden.

Die höchste Geschwindigkeit wird durch Meßinstrumente des Coulter-Counter Prinzips erreicht. Exakte Volumenmessungen und, bei in situ Einsatz, eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung der Organismenverteilung zeichnen diese Methode aus. Als Nachteil ist ein begrenzter Meßbereich und die geringe Information über die individuellen Eigenschaften der Organismen zu betrachten. Eine Einteilung auf Grund des Zusammenhangs zwischen Größenfraktionen und taxonomisch trophischen Stufen (Sieburth et. al., 1978), wie sie von Parsons (1969) angewandt wurde, läßt nur einen begrenzten Einblick in die Struktur der Nahrungskette zu. Erst durch zeitaufwendige mikroskopische Zusatzuntersuchungen gewinnt die Methode an Informationsgehalt.

Die bildanalytische Auswertung vereint die Vorteile der beiden erwähnten Methoden, nämlich eine schnelle Biomassegewinnung und den Informationsgewinn durch die Mikroskopie. Bisher ist ein in situ Einsatz noch nicht möglich. Das Volumen, als Maß für die Biomasse, wird nicht direkt gemessen, jedoch ermöglicht die Flächenmessung eine

Näherung an die dritte Dimension. Automatische Bildanalysegeräte sind in der Meßgeschwindigkeit mit Geräten des Coulter-Counter Typs vergleichbar. Im vorgestellten Verfahren wurde zu Lasten der Zeit der Informationsgehalt der Meßergebnisse in den Vordergrund gestellt. Dadurch erreicht das Bildanalyseverfahren potentiell die gleiche Aussagekraft wie die gebräuchliche mikroskopische Analyse.

#### 3.3.4 Die Clusteranalyse

Die bildanalytische Auswertung lieferte eine schwer überschaubare Menge an Detailinformationen über die Zusammensetzung der Zooplanktonfeldproben. Eine erste Datenreduktion wurde durch Klassenbildung und den daraus sich ergebenden Größenhäufigkeitsverteilungen erreicht. Trotz dieser Reduktion bestehen die Ergebnisse aus 248 Einzeldarstellungen (s. Abb. 11 - 25 ). Grundlage für ihre Auswertung ist die Annahme, daß sich die in Kapitel 3.2.2 diskutierten Faktoren sowie die in Kapitel 2 vorgestellten physikalischen Umweltparameter charakteristisch auf die Struktur der Größenhäufigkeitsverteilung auswirken, so daß sich regionale und vertikale Unterschiede als Gruppen ähnlicher Verteilungen zu erkennen geben.

Eine Methode, ungeordnete Objekte oder Datensätze aufgrund ihrer Ähnlichkeit in kleine, praktisch nützliche Gruppen zu zerlegen, um eine Übersichtlichkeit herzustellen, ist die Clusteranalyse. Mit diesem Verfahren versucht man, unbekannte Gruppen dadurch zu rekonstruieren, daß man ähnliche Objekte in homogene Klassen zusammenfaßt und erwartet, daß jede gefundene Klasse eine natürliche Gruppe repräsentiert. Dazu wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, die zur Konstruktion einer optimalen, fast optimalen oder zweckmäßigen Klassifikation dienen und hierbei fast ausschließlich mathematische Hilfsmittel verwenden (Bock, 1974). Für die Durchführung von Clusteranalysen steht an der Universität Kiel der Programmblock zur Strukturanalyse von Ökosystemen (Bölter et. al., 1980, Meyer und Bölter, 1981) zur Verfügung. Die Anwendung dieser Programme muß jedoch nicht zwingend zur Aufdeckung von natürlichen Gruppierungen führen. Der

Benutzer wird nicht der Aufgabe enthoben, zu überprüfen, ob die Gruppierungen der Clusteranalyse sinnvolle Zusammenhänge aufdecken. So ist die Clusteranalyse ein Verfahren, welches objektiv Gruppierungen ermittelt, deren Realitätsbezug jedoch subjektiv beurteilt werden muß. In dieser Arbeit werden nur die Clusteranalyse-Ergebnisse vorgestellt, die sinnvolle Gruppierungen andeuten.

#### 4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die mittels des vorgestellten Bildanalyseverfahrens gewonnenen Ergebnisse der Zooplanktonproben der "Meteor-Äquatorexpedition 1979" vorgestellt. Um den umfangreichen Datensatz überschaubar zu gestalten, wurde eine graphische Präsentation gewählt. Zur Darstellung der Größenhäufigkeitsverteilung war die Verwendung einer logarithmischen Skala erforderlich, da die Ergebnisse im Bereich von mehreren Größenordnungen schwanken. So können kleine Werte im unteren Bereich der Skala noch deutlich dargestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, daß dadurch relativ geringe Unterschiede im kleinen Bereich vergrößert und vergleichsweise deutliche Änderungen im oberen Bereich der Skala gestaucht werden.

In der analytischen Ergebnisbeschreibung werden Beobachtungen betont, die auf systematische Zusammenhänge zwischen biologischen und physikalischen Parametern hinweisen.

##### 4.1 Die vertikale und regionale Verteilung des Gesamtvolumens und der Gesamtanzahl der Copepoden

Die vertikale und regionale Verteilung des Gesamtvolumens und der Gesamtanzahl der Copepoden wird durch Abbildung 9 und 10 dargestellt. Die Bezeichnung "Gesamtvolumen" und "Gesamtanzahl" bedeutet, daß die Größenhäufigkeitsverteilungen noch keine Berücksichtigung finden. In den Abbildungen rahmt eine stärker ausgezogene Kurve die Summe aller Copepoden ein. Die Unterteilung in die funktionellen Gruppen Schweber,

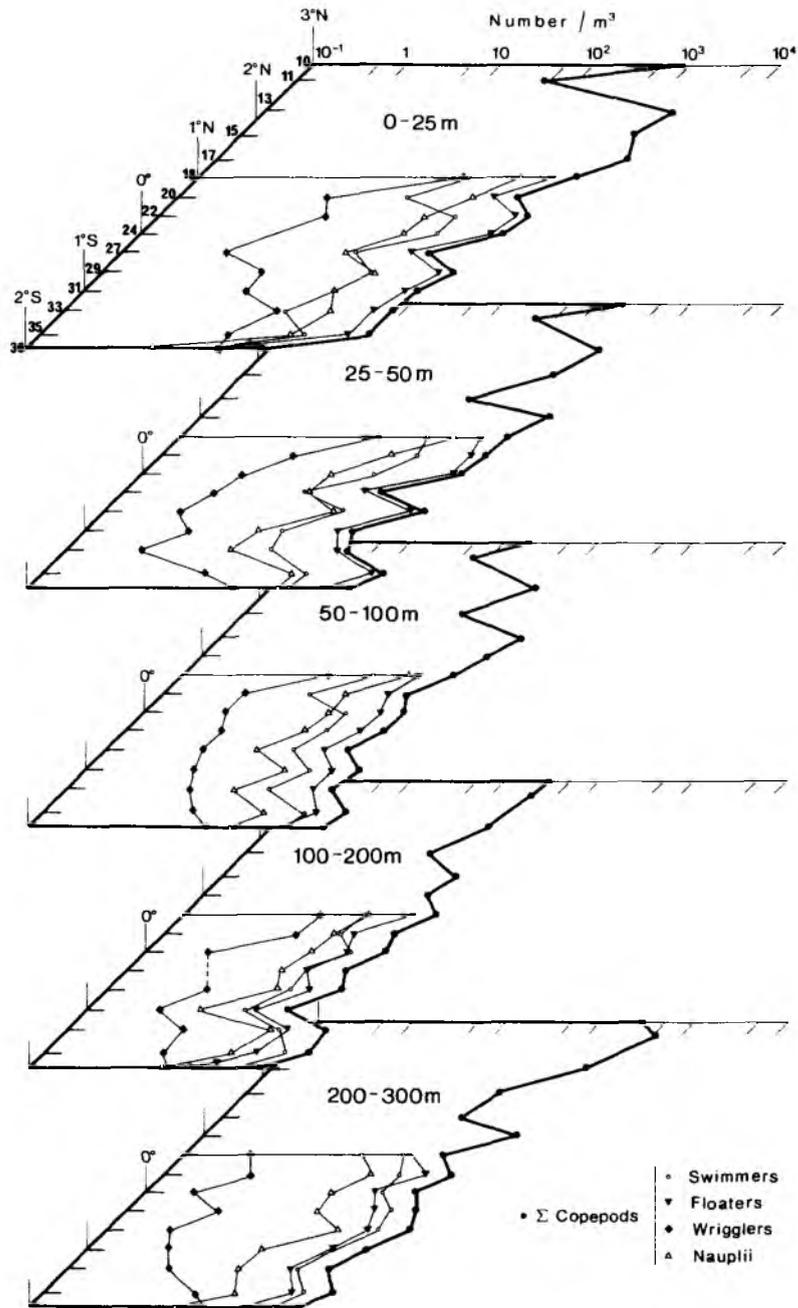
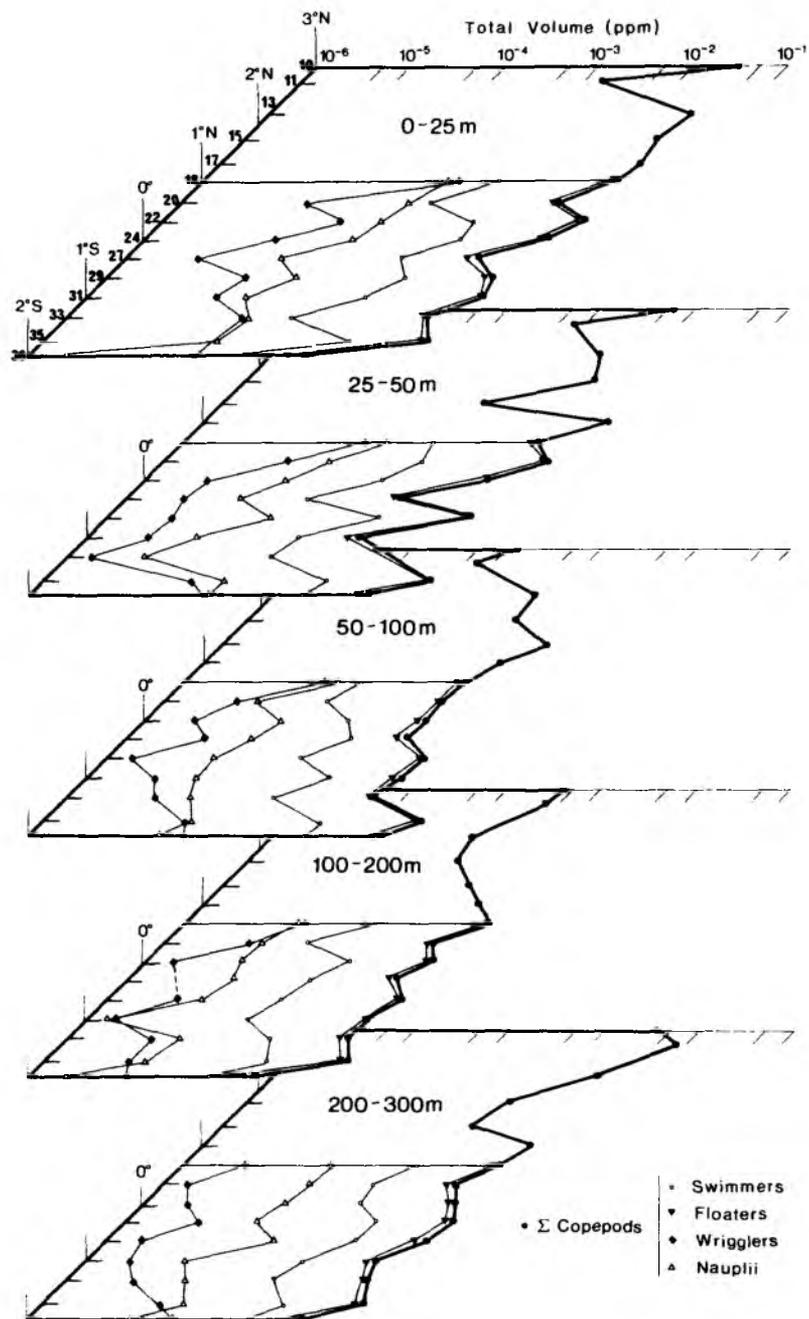


Abb. 9: Die regionale und vertikale Verteilung der Anzahl/m<sup>3</sup> der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe im zentralen äquatorialen Atlantik (Stationsschnitt von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 02.02. bis 06.02.1979)



**Abb. 10:** Die regionale und vertikale Verteilung des Volumens (ppm) der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe im zentralen äquatorialen Atlantik (Stationsschnitt von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 02.02. bis 06.02.1979)

Schwimmer, Schlängler und Nauplien konnte aus den in Kapitel 3.2.4 erwähnten Gründen erst mit Beginn der Auswertung des Netzfangs der Tiefenstufe 0 - 25 m auf Station 18 durchgeführt werden.

#### 4.1.1 Die Summe aller Copepoden

Betrachtet man die Verteilung der Werte für Anzahl und Volumen der Summe aller Copepoden (Abb. 9 und 10), so läßt sich in beiden Fällen von Station zu Station in allen Tiefenhorizonten ein gleichförmiger, tendenzieller Anstieg oder Abfall der Ergebnisse registrieren. Diese Beobachtung weist auf eine relativ ausgeglichene Größenverteilung hin. Jedesmal wenn eine kleine Gesamtzahl gemessen wurde, war auch das entsprechende Volumen gering. Es treten keine deutlich dominanten Gruppen, mit hoher Anzahl und kleinem Individuenvolumen oder umgekehrt, auf. Ein solcher Fall würde sich durch einen tendenziell gegenläufigen Kurvenverlauf darstellen.

Durch einen Vergleich der Volumendarstellung (Abb. 10) mit der Verteilung der organischen Substanz (Abb. A2 im Anh.), erkennt man ebenfalls einen tendenziell gleichen Kurvenverlauf. Lediglich die Station 35 auf 1°45'S fällt deutlich aus dem Rahmen. Der Grund ist darin zu sehen, daß für die Messung der organischen Substanz (Rolke 1981) alle Partikel eines Netzfangs berücksichtigt wurden, für die bildanalytische Auswertung dagegen lediglich die Copepoden.

Während der Vorsortierung der Fraktion 500 µm und der bildanalytischen Auswertung fielen die Proben der Station 35 aus den Bereichen bis 100 m Tiefe durch einen ungewöhnlich starken Detritusanteil auf. Er wird für die im Vergleich zur Volumendarstellung extrem hohen Werte der organischen Substanz verantwortlich gemacht.

Die ähnliche Kurvenstruktur (vgl. Abb. 10 und A2) bestätigt die Annahme, daß die Biomasse in dem Größenbereich, den das Multinetz erfaßt, im wesentlichen durch Copepoden repräsentiert wird.

Unter dem Gesichtspunkt der vertikalen Verteilung erkennt man in Abbildung 10 von der Oberfläche bis in die Tiefe von 200 m eine kontinuierliche Abnahme der Werte. In dem darunterliegenden Tiefenbereich

ist ein Anstieg der Werte zu verzeichnen. Um diese Struktur näher zu beleuchten, wurden Medianwerte der Tiefenhorizonte für den gesamten Stationsschnitt gebildet. Aus den Medianwerten (Tab. 1) wird ersichtlich, daß sich das Volumen der Copepoden bis in den Bereich 50 - 100 m überschlagsmäßig etwa um den Faktor 4 pro Tiefenstufe

Tab.1: Medianwerte für das Gesamtvolumen und die Gesamtanzahl der Copepoden in den Tiefenhorizonten für den gesamten Stationsschnitt

Tiefe	Volumen (ppm)	Anzahl/m <sup>3</sup>
0 - 25	17419	535
25 - 50	4292	252
50 - 100	984	65
100 - 200	696	27
200 - 300	2301	113

verringert. Im Bereich 100 - 200 m ist das Volumen etwas kleiner, aber in der Größenordnung vergleichbar mit dem der darüber liegenden Stufe. Im tiefsten Bereich steigt das Volumen wieder etwa um das 3fache und ist damit nur um die Hälfte kleiner als der Wert in der 25 - 50 m Tiefe. Auch für die Anzahl sinken die Werte bis 200 m Tiefe und steigen darunter wieder an. Allerdings sind hier andere Verhältnisse zu beobachten. Von der Oberfläche in die Tiefe verringert sich die Anzahl erst um den Faktor 2, dann um 4, danach wieder um 2 und steigt im Bereich 200 - 300 m um das 4fache.

Setzt man die Änderungen der vertikalen Verteilung von Anzahl und Volumen in Beziehung, so erhält man folgendes Bild: Bis 50 m Tiefe sinkt das Volumen in Relation zur Anzahl um das Doppelte. Damit ist eine Schrumpfung der individuellen Organismengröße verbunden. Die Abnahme der Werte zu der darunter liegenden Stufe erfolgt für Anzahl

und Volumen im gleichen Verhältnis, folglich bleibt die mittlere Organismengröße konstant. In der nächsten Tiefenstufe bleibt das Volumen etwa gleich, die Anzahl verringert sich um die Hälfte. Dies bedeutet, daß die durchschnittliche Organismengröße ansteigt. In der tiefsten Fangstufe sinkt die Anzahl stärker als das Volumen, hier tragen wieder relativ viele kleine Organismen zur Gesamtbiomasse bei.

Die regionale Verteilung der Copepoden wird mit Hilfe ihres Gesamtvolumens (Abb. 10) beschrieben. Auf den ersten Blick sind keine offensichtlichen Gruppierungen erkennbar. Um eine objektive Beurteilung zu ermöglichen wird der Medianwert der Tiefenhorizonte (Tab. 1) mit den Ergebnissen der einzelnen Stationen (Abb. 10) verglichen. In der Stufe 0 - 25 m entspricht der Medianwert des Volumens dem der Station 31 (1°S). Der Vergleich macht deutlich, daß nördlich des Äquators mit Ausnahme von Station 11 (2°45'N) und Station 20 (0°40'N) alle Stationen deutlich höhere Ergebnisse aufweisen.

In der darauffolgenden Tiefenstufe entspricht der Medianwert dem Wert der Station 24 (0°). Im Vergleich fällt ein Bereich zwischen Station 18 (1°N) und Station 35 (1°45'S) mit häufig höheren Werten als in den angrenzenden Gebieten auf.

Im Tiefenhorizont 50 - 100 m entspricht der Medianwert dem der Station 27 (0°20'S). Hier sind im Vergleich mit dem Medianwert deutlich höhere Werte zwischen Station 29 (0°40'S) und Station 36 (2°S) konzentriert. Nördlich davon hebt sich lediglich das Ergebnis der Station 17 (1 20'N) hervor.

Zwischen 100 und 200 m Tiefe ähnelt der Medianwert dem Wert der Station 27 (0°20'S). Hier erkennt man, wie im Tiefenbereich 25 - 50 m gehäuft höhere Werte zwischen Station 18 (1°N) und Station 35 (1°45'S)

In der Tiefenstufe 200 - 300 m entspricht der Medianwert dem Ergebnis von Station 20 (0°40'N). Höhere Werte sind unregelmäßig über den ganzen Stationsschnitt verteilt, jedoch fallen relativ hohe Werte auf, welche sich von Station 13 (2°40'N) bis Station 10 (3°N) erstrecken.

Faßt man die Beobachtungen für die regionale Verteilung des Gesamtvolumens der Copepoden zusammen, so erhält man folgendes Bild: In den

Tiefenbereichen 0 - 25 m und 200 - 300 m treten nördlich des Äquators, in den Tiefenstufen 25 - 50 m und 100 - 200 m zwischen 1°N und 1°45'S häufig und im Bereich von 50 - 100 m eng begrenzt zwischen 0°40'S und 2°S höhere Werte auf.

#### 4.1.2 Die Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien

Im folgenden wird die Bedeutung der Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien für die Gesamtzusammensetzung der Copepoden untersucht. Abbildung 10 zeigt, daß auf allen Stationen in allen Tiefenhorizonten die Schweber nahezu das Gesamtvolumen stellen. Die Ergebnisse Schwankungen in der Summe aller Copepoden von Station zu Station werden also im wesentlichen durch die Schweber hervorgerufen. Die Werte der Gruppen Schwimmer und Nauplien vollziehen, allerdings mit weitaus kleineren Ergebnissen, tendenziell die gleichen Änderungen. Die Schlängler lassen in der Verteilung keinen Zusammenhang zu den übrigen Gruppen erkennen. Sie treten spärlich auf, sind jedoch bis auf Station 27 (0°40'N) in 200 - 300 m Tiefe immer vorhanden. Auffallend ist auf allen Stationen und in allen Tiefen der relativ konstante Abstand zwischen den Volumenwerten der Schweber, Schwimmer und Nauplien.

Die Verteilung der Anzahl (Abb. 9) zeigt, daß die Schweber nur in den oberen beiden Tiefenstufen nahezu die Gesamtanzahl aller Copepoden stellen. In den darunter liegenden Tiefenhorizonten wächst die Bedeutung der Schwimmer. Im Bereich 100 - 200 m erreichen sie im Mittel etwa die gleiche Anzahl wie die Schweber. In der tiefsten Fangstufe sind sie den Schwebern mit Ausnahme von zwei Stationen nördlich des Äquators zahlenmäßig überlegen. Um diese Beobachtungen näher zu untersuchen, werden wieder Medianwerte verglichen.

Für den Vergleich der Medianwerte (Tab. 2) werden alle Netzfänge berücksichtigt, bei deren Auswertung eine Gliederung in funktionelle Gruppen durchgeführt wurde (vgl. Abb. 9 und 10). Betrachtet man die Medianwerte der Volumina, unter Berücksichtigung der in Abbildung 10 aufgefallenen relativ konstanten Kurvenabstände zwischen Schwebern,

Schwimmern und Nauplien, so fällt eine erstaunliche Gesetzmäßigkeit auf. In der genannten Reihenfolge besteht ein medianes Verhältnis von 9 : 1 zwischen den Gruppen. Es variiert zwischen Schwimmern und Nauplien innerhalb einer Spannweite von 13 : 1 in der Stufe 0 - 25 m bis 7 : 1 in der Stufe 200 - 300 m. Die größten Abweichungen treten also in dem Verhältnis zwischen Schwimmern und Nauplien auf. Das Verhältnis zwischen Schweben und Schwimmern ist mit einer Variation zwischen 8 : 1 und 10 : 1 konstanter.

Tab. 2: Medianwerte für das Gesamtvolumen und die Gesamtanzahl der Gruppen Schweben, Schwimmer, Schlängler und Nauplien in den Tiefenhorizonten für die Stationen 18 bzw. 20 - 36

<u>Tiefe (m)</u>	<u>Schweben</u>	<u>Schwimmer</u>	<u>Schlängler</u>	<u>Nauplien</u>
		<u>Anzahl/m<sup>3</sup></u>		
0 - 25	251	58	6	67
25 - 50	163	36	1	28
50 - 100	34	14	1	10
100 - 200	14	9	2	7
200 - 300	40	39	1	10
		<u>Volumen (ppm)</u>		
0 - 25	11428	1284	46	97
25 - 50	3899	487	5	58
50 - 100	1586	159	7	21
100 - 200	896	90	6	11
200 - 300	1687	219	4	33

Die Medianwerte der Anzahl bestätigen den aus Abbildung 9 gewonnenen Eindruck. In den beiden Stufen bis 50 m Tiefe stehen die Anzahl der Schweben und Schwimmer etwa im Verhältnis 4 : 1, im Tiefbereich

von 50 - 100 m etwa im Verhältnis 2 : 1, darunter sind die beiden Gruppen zahlenmäßig etwa gleichbedeutend. Zwischen Schwimmern und Nauplien ist der Unterschied in der Anzahl bis 200 m Tiefe relativ gering, nur im Bereich 200 - 300 m überwiegen die Schwimmer deutlich. Die Schlangler sind in allen Tiefen im Vergleich mit den anderen Gruppen in verschwindend kleiner Zahl vertreten.

Das relativ konstante Volumenverhältnis zwischen Schwebern und Schwimmern bei schwindender zahlenmäßiger Oberlegenheit der Schweben mit zunehmender Tiefe, weist darauf hin, daß die mittlere individuelle Körpergröße mit zunehmender Tiefe wächst.

Die Nauplien stehen zu den Schweben in einem medianen Volumenverhältnis von etwa 80 : 1. Da die Schweben nahezu das Gesamtvolumen aller Copepoden stellen, folgt daraus, daß, in dem Größenbereich der vom Multinetz erfaßt wird, etwa der achtzigste Teil des Volumens oder der Biomasse aller Copepoden in Form von Nauplien vorliegt.

#### 4.2 Regionale und vertikale Änderungen der Größenhäufigkeitsverteilungen der Anzahl und des Volumens der Copepoden

Die Ergebnisse der Netzfänge sind in Form von Größenhäufigkeitsverteilungen in Abbildung 11 - 25 dargestellt. Die Klassenbreite der Verteilungen wächst um den in Kapitel 3.3.2 diskutierten Faktor von  $\sqrt[3]{2}$ . Die Mengenangaben werden, aus den in Kapitel 4 bereits angesprochenen Gründen, auf einer logarithmischen Skala dargestellt.

Die Darstellungen lassen auf den ersten Blick keine offensichtlichen regionalen oder vertikalen Änderungen in der Größenstruktur erkennen. Der Kurvenverlauf hat in den Tiefenstufen aller Stationen im groben Vergleich annähernd die gleiche Struktur: Die Anzahl der Organismen steigt im unteren Größenbereich schnell an, erreicht ein Maximum und fällt dann mit wachsender Organismengröße langsam ab. Die entsprechenden Volumina steigen mit wachsender Größenklasse langsam an und erreichen ihr Maximum erst gegen Ende der Kurve. In den oberen Größenklassen ist häufig wieder ein leichter Abfall der Werte zu

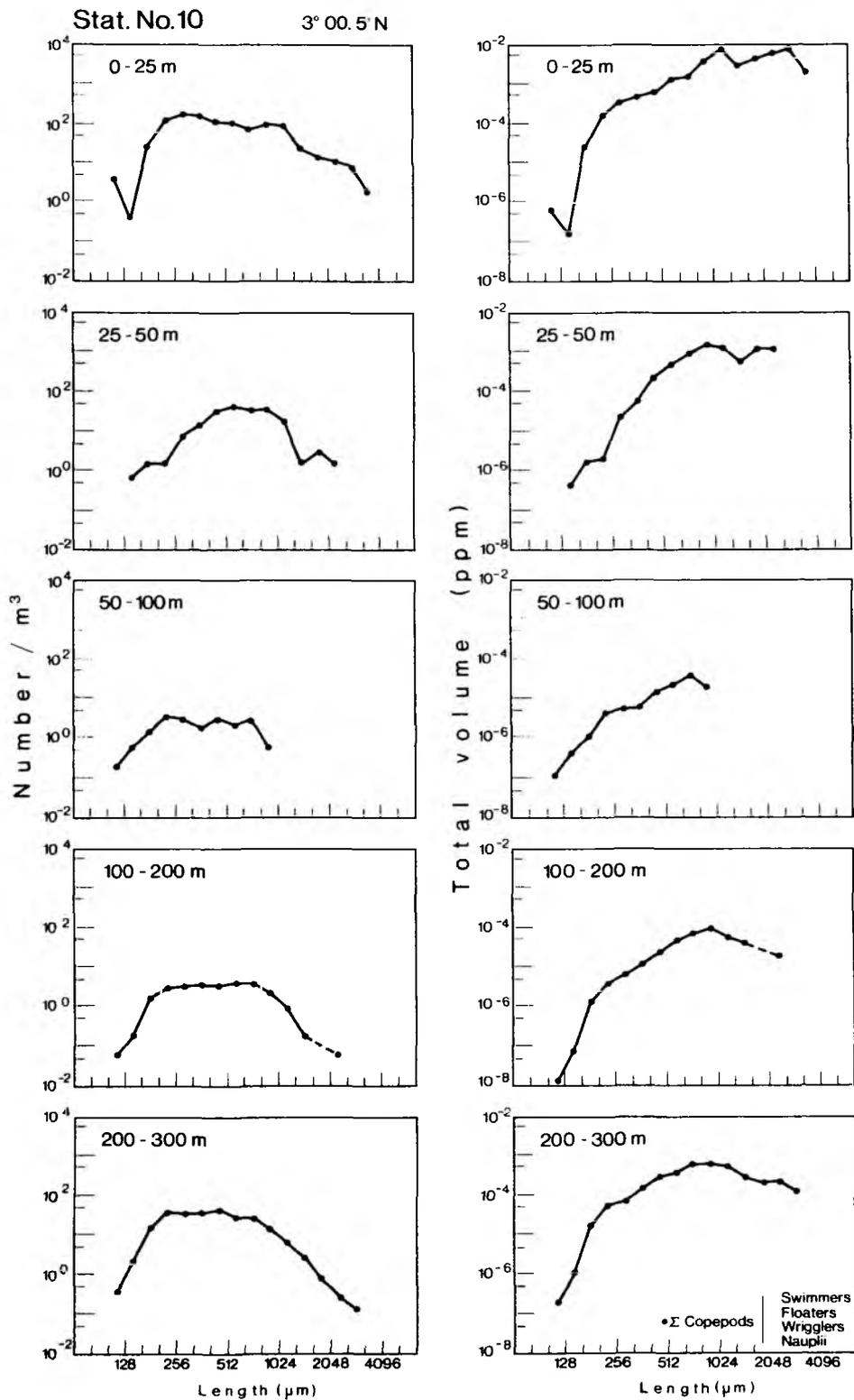


Abb. 11: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 10. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

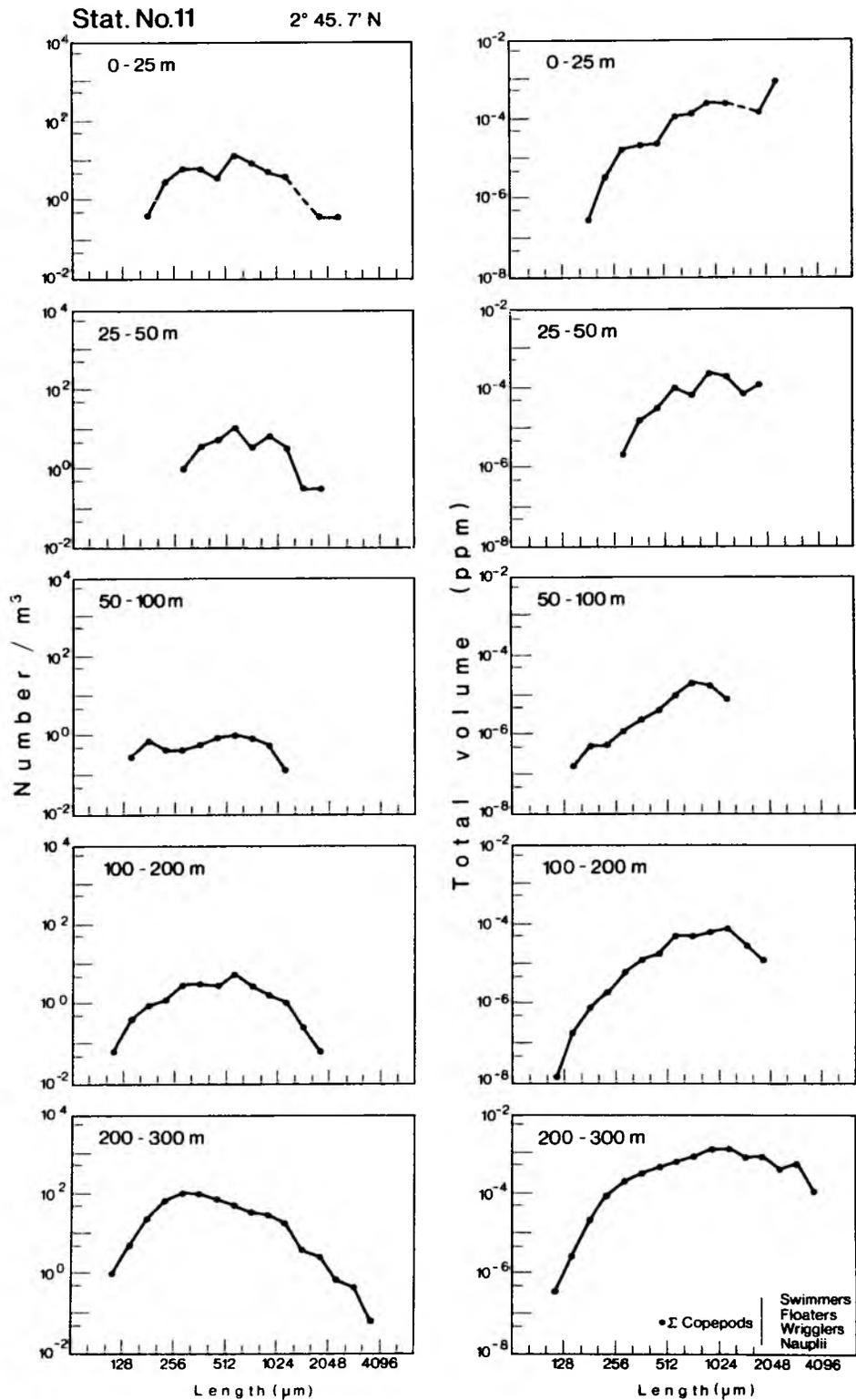


Abb. 12: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 11. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

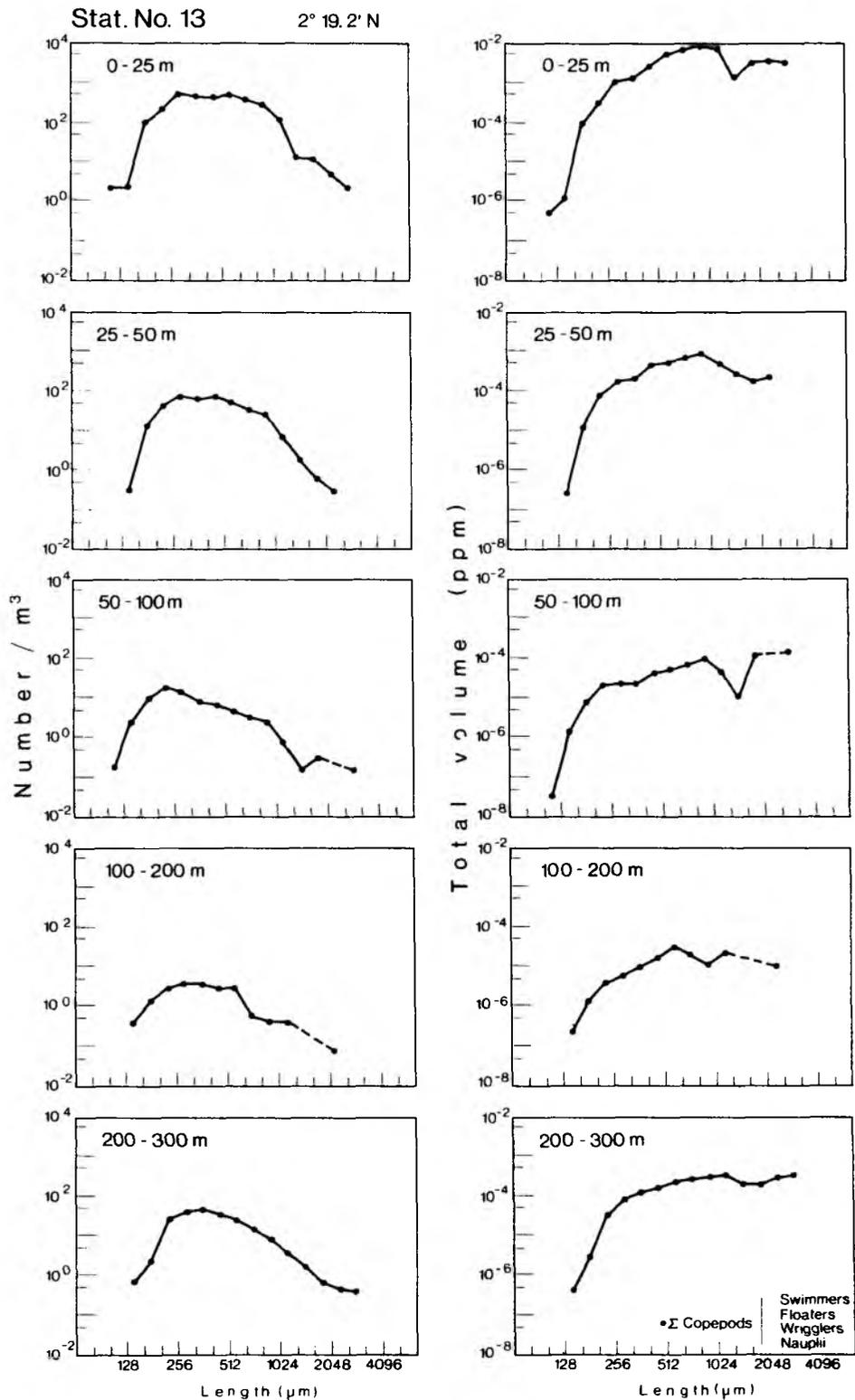


Abb. 13: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 13. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

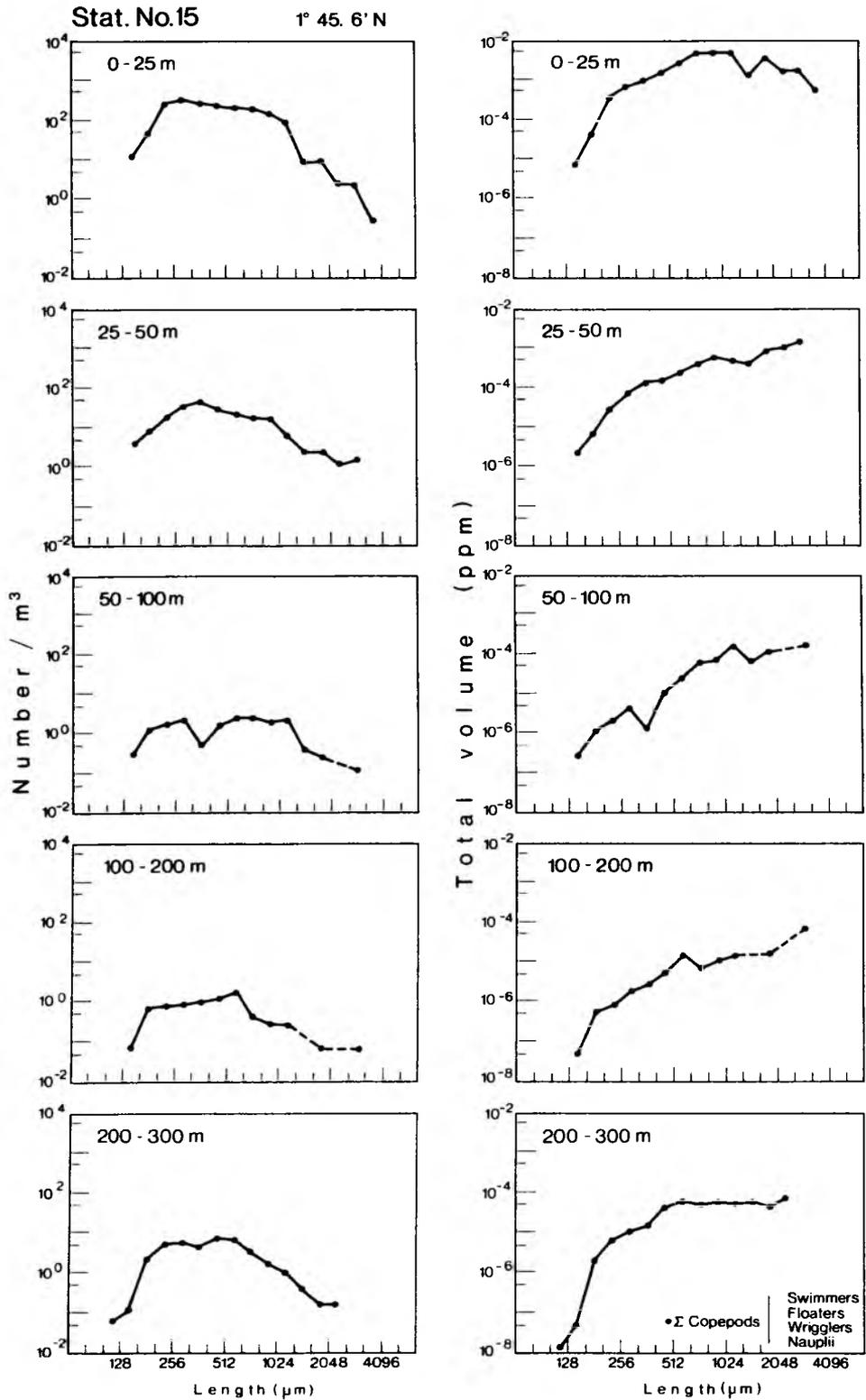


Abb. 14: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 15. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

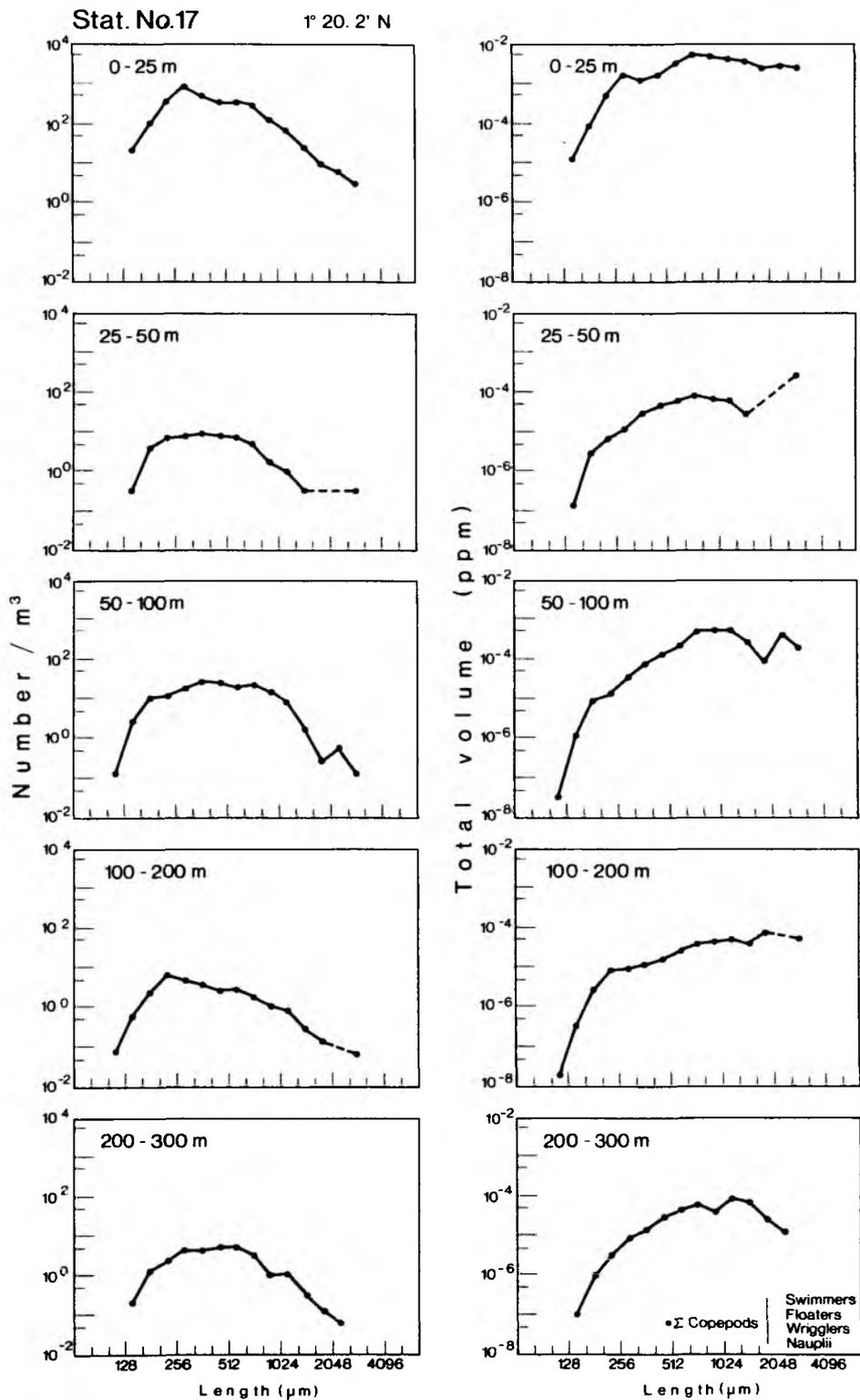


Abb. 15: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 17. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

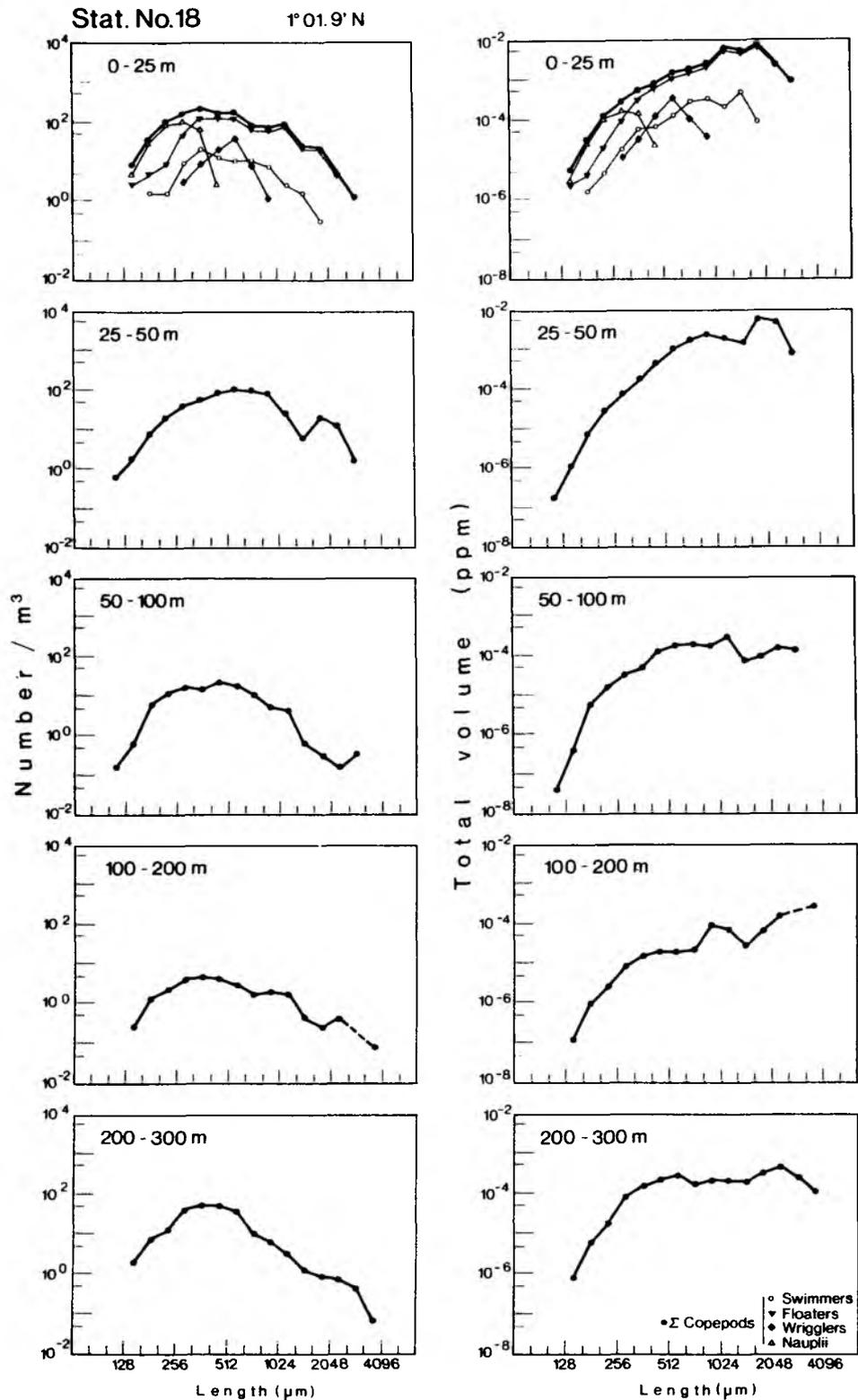


Abb. 16: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 18. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

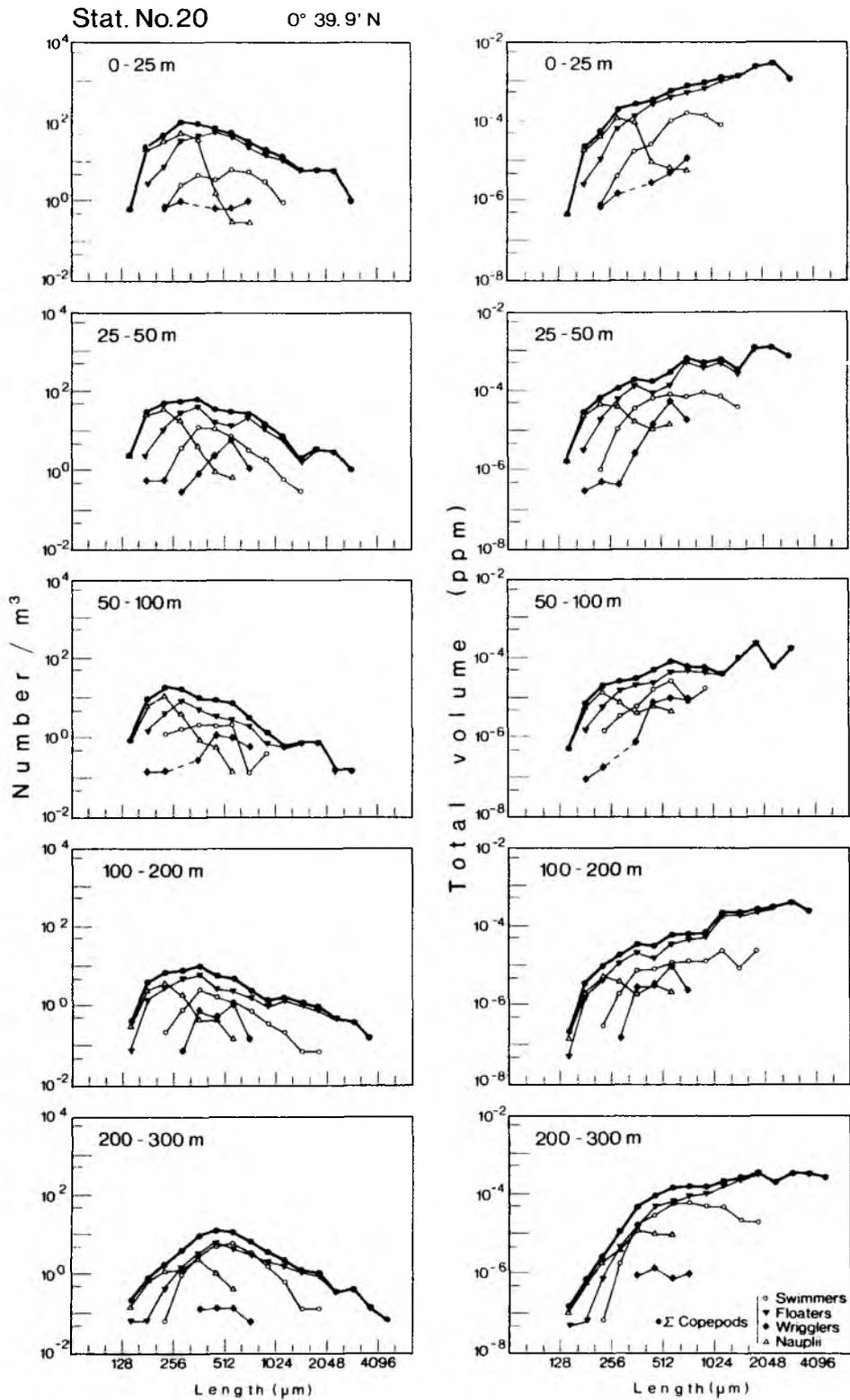


Abb. 17: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 20. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

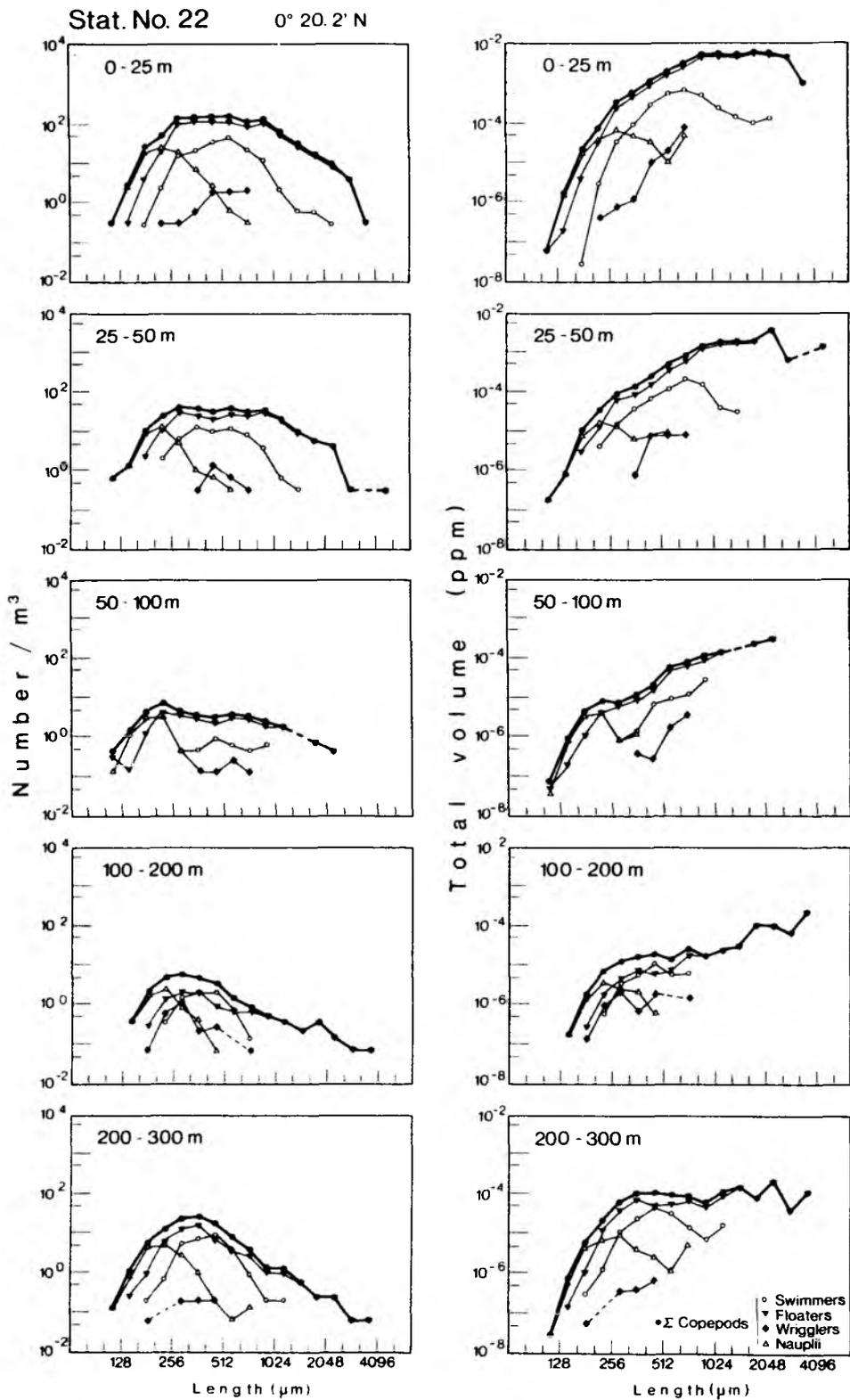


Abb. 18: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 22. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

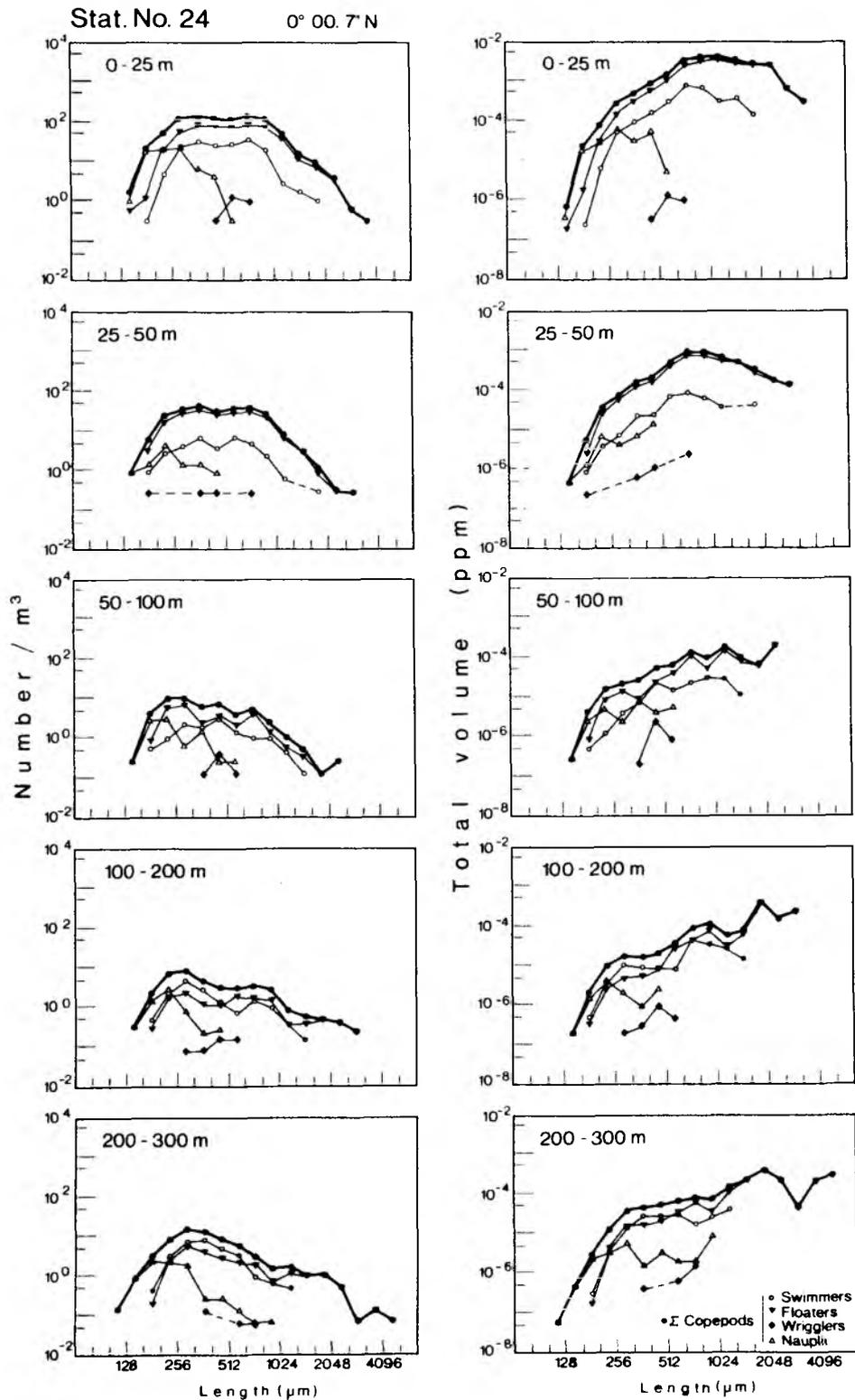


Abb. 19: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 24. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

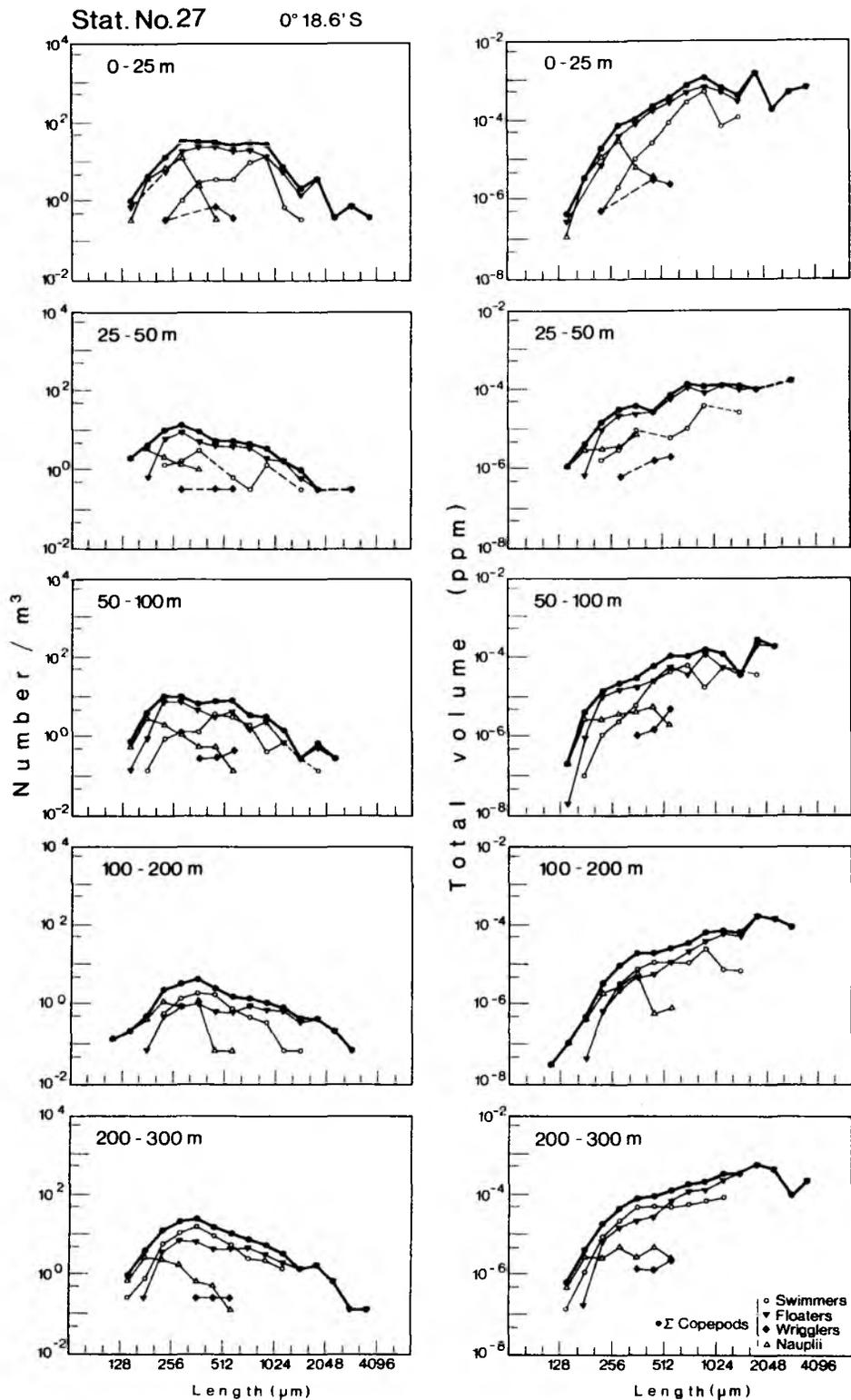


Abb. 20: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 27. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

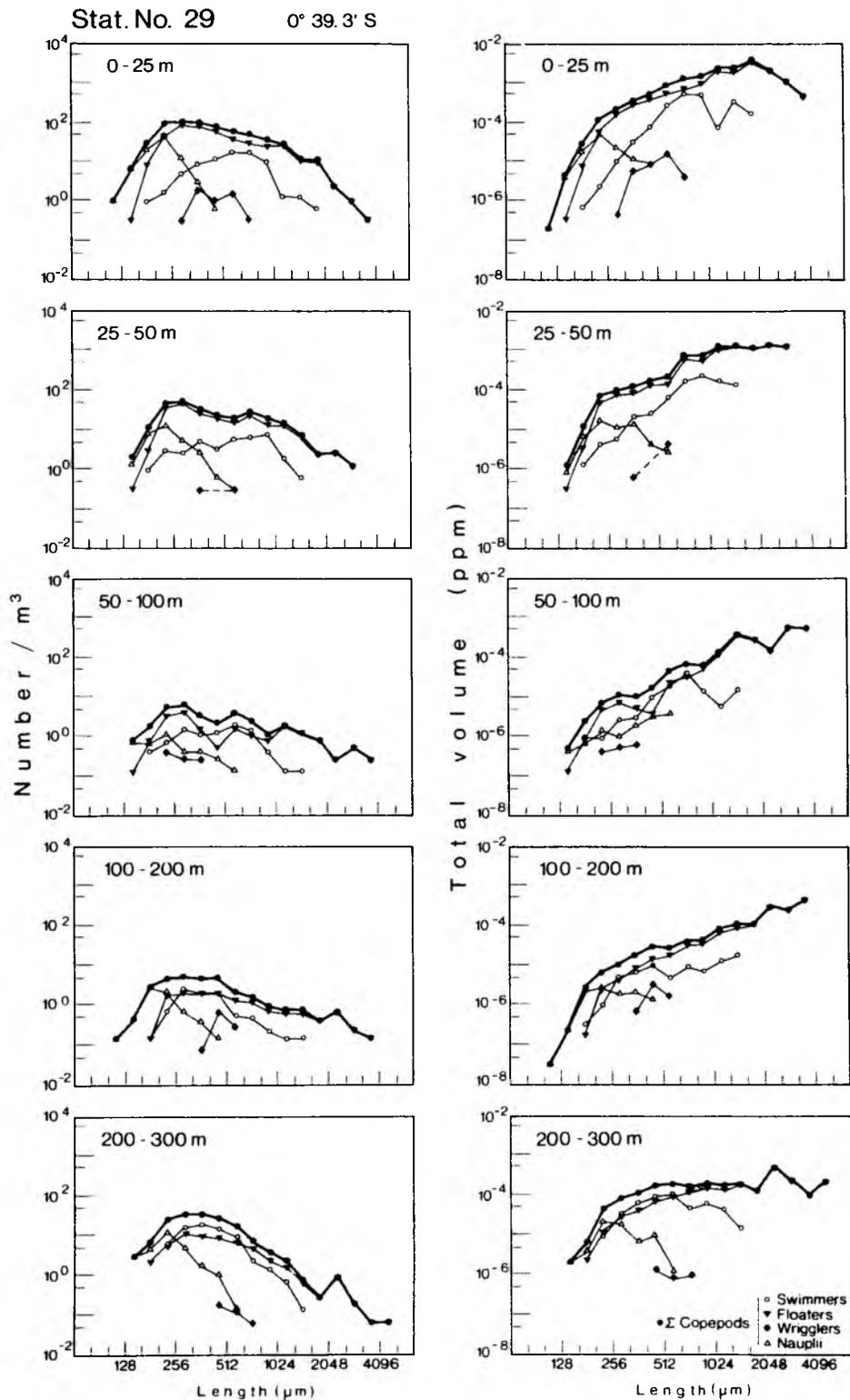


Abb. 21: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 29. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

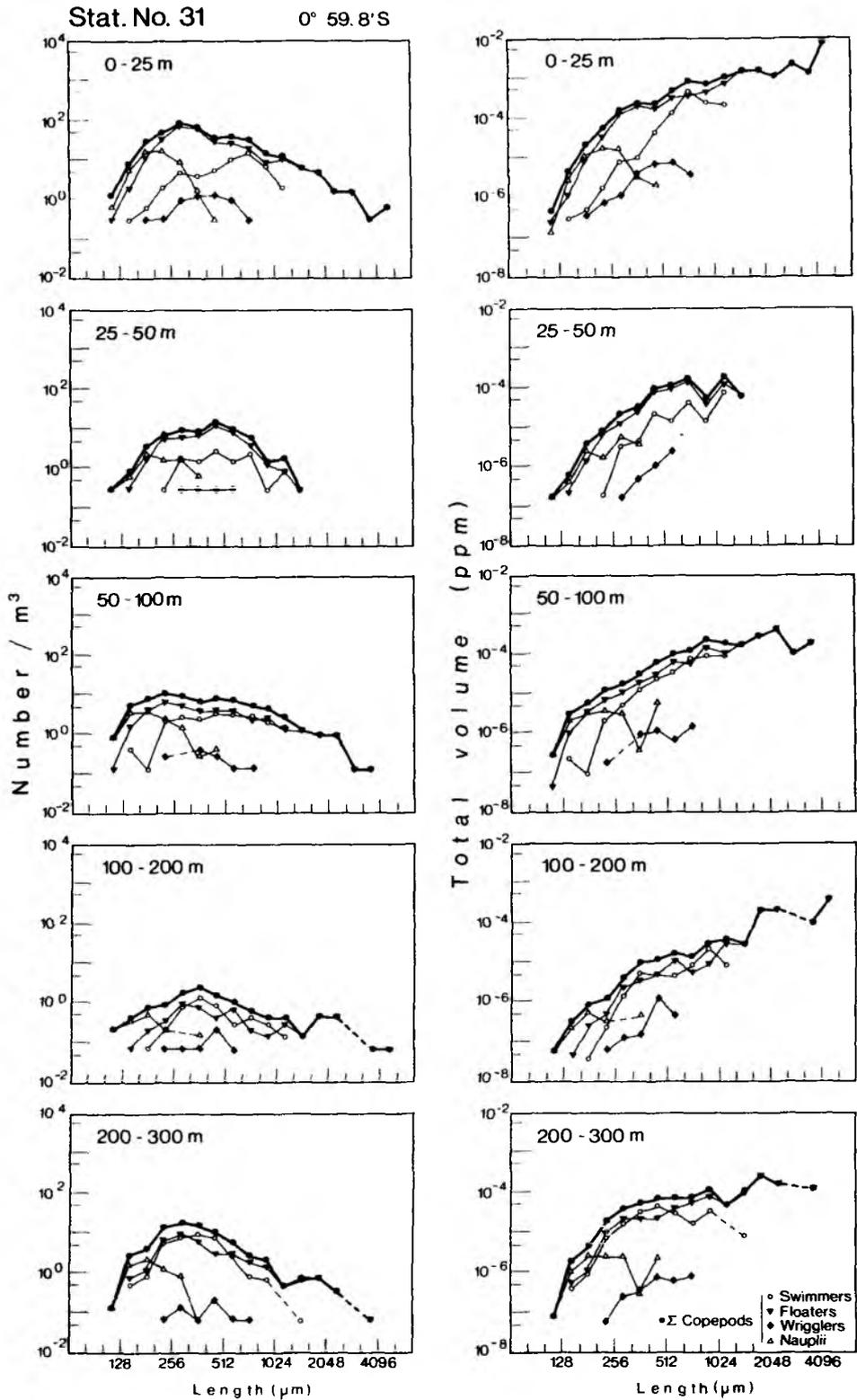


Abb. 22: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 31. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

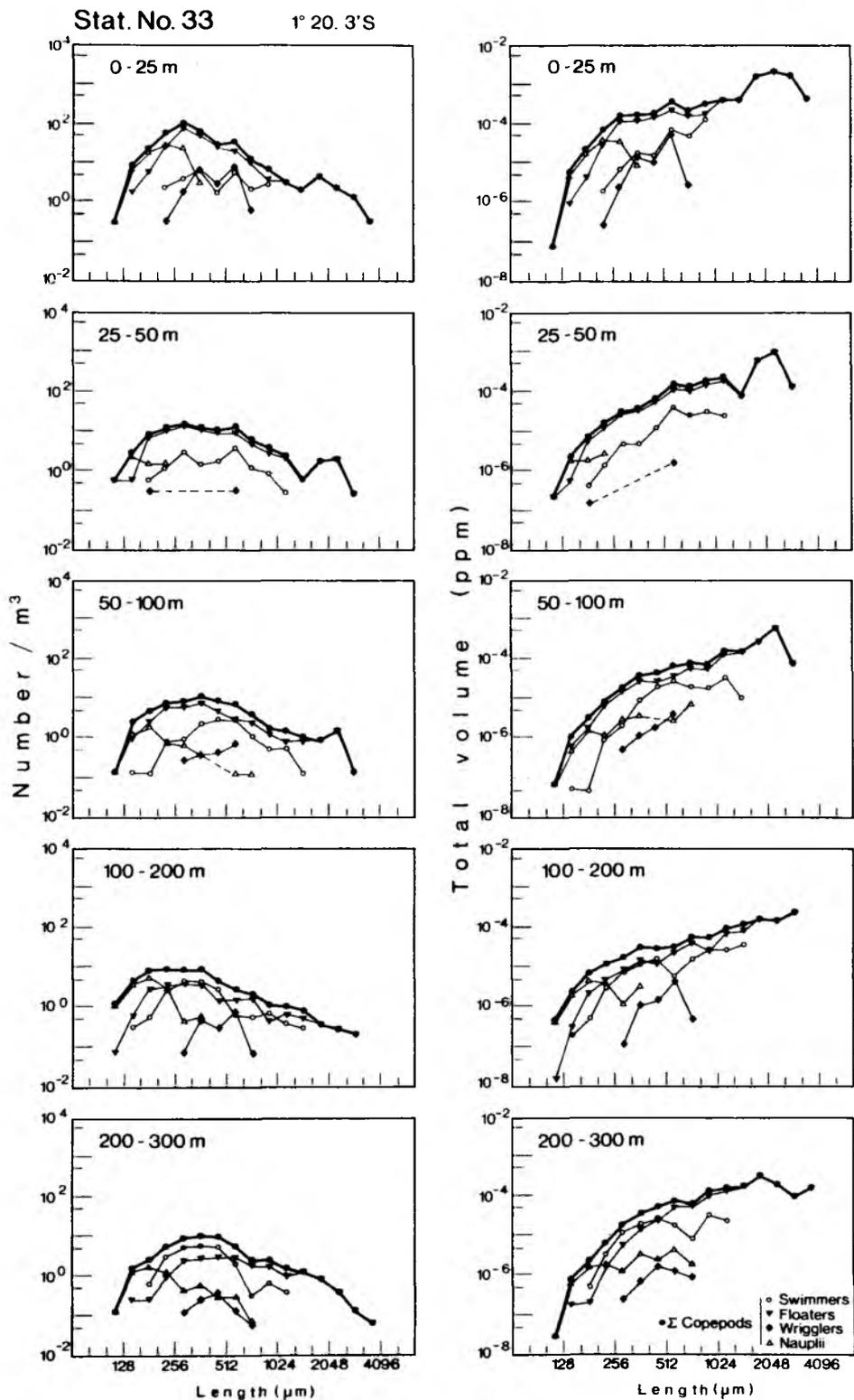


Abb. 23: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 33. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

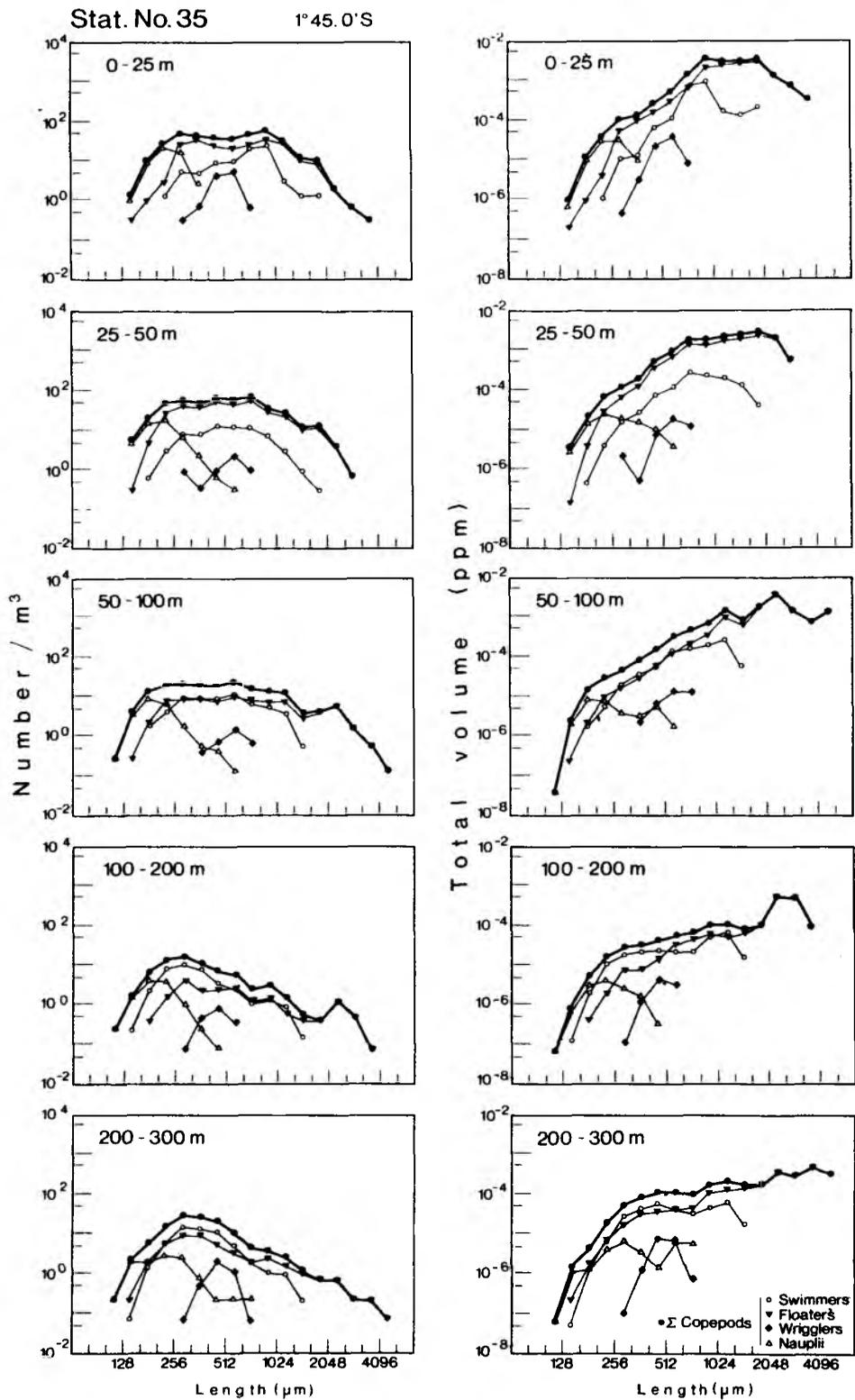


Abb. 24: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 35. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $3\sqrt{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

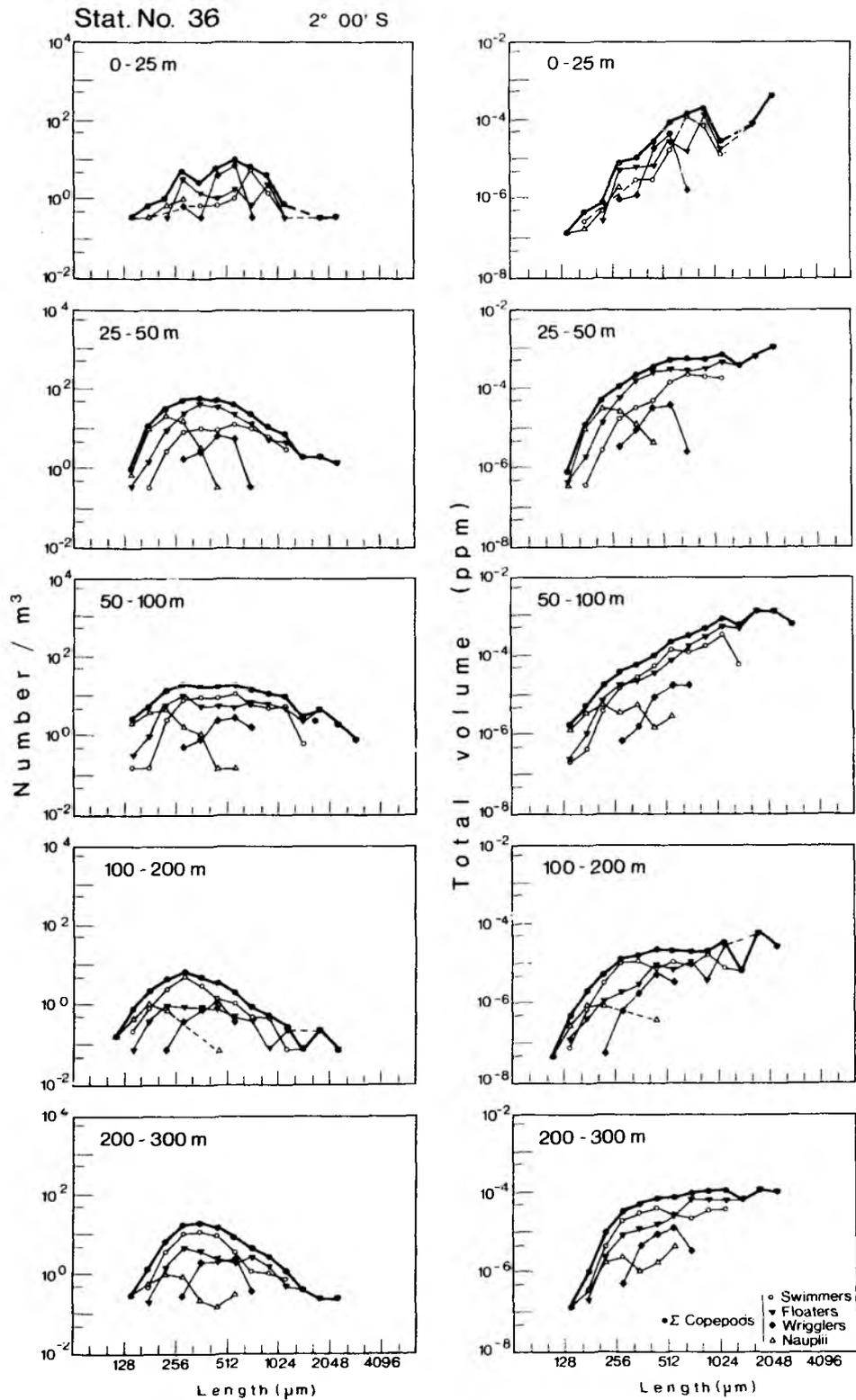


Abb. 25: Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden sowie ihrer funktionellen Gruppen in fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe auf Stat. 36. Anzahl/m<sup>3</sup> (links) und Volumen (ppm) rechts (auf einer logarithmischen Skala) in Abhängigkeit von der Körperlänge (Größenklassenwachstum um den Faktor  $\sqrt[3]{2}$ ). Gestrichelte Linien kennzeichnen das Fehlen eines Wertes in der betreffenden Größenklasse

erkennen. Die Maximalwerte heben sich auf der logarithmischen Skala nicht immer klar von den umgebenden Werten ab. Im Bereich des Maximums treten im Kurvenverlauf

Plateaus auf (z. B. Station 22 und 24 in der Tiefenstufe 0 - 25 m ), das bedeutet, daß der Maximalwert in den angrenzenden Größenklassen von annähernd gleichen Werten eingerahmt wird.

Um trotz der ähnlichen Kurvenstruktur Kriterien für ihre objektive Beurteilung zu erhalten, wird die Lage der Maximalwerte mit dem Umfang des gesamten Größenbereichs der Häufigkeitsverteilungen verglichen. Für die funktionellen Gruppen Schwimmer, Schlängler und Nauplien wird zudem der Größenbereich angesprochen, in welchem eine Gruppe gegenüber den Schwebern, die in der Regel vorherrschen, dominiert. Änderungen in der regionalen Verteilung werden für die Summe aller Copepoden untersucht. Die Beurteilung der vertikalen Variationen wird mit Hilfe von Medianwerten der Tiefenstufen des Stationschnitts durchgeführt. Da es sich um gruppierte Daten handelt, wird die Lage des Medianwerts in der Klasse, die den Median enthält, durch Interpolation ermittelt (Spiegel, 1976). Die Position innerhalb der Klasse gibt Auskunft darüber, ob häufiger Werte in Klassen oberhalb oder unterhalb der Klasse des Medianwerts liegen.

Durch eine statistische Analyse (s. Kap. 3.2.4.3) wird die Gesamtstruktur der Häufigkeitsverteilungen einer Betrachtung unterzogen. Ähnliche Verteilungen werden in Gruppen zusammengefaßt. Es werden nur Ergebnisse für das Volumen der Summe aller Copepoden und der Schweben vorgestellt, da die Ergebnisse der restlichen funktionellen Gruppen keine Zusammenhänge in der regionalen oder vertikalen Verteilung erkennen lassen.

#### 4.2.1 Die Summe aller Copepoden

Die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden (Abb. 11 - 25 ) decken in allen Tiefenhorizonten einen Größenbereich von 102  $\mu\text{m}$  bis maximal 5161  $\mu\text{m}$  ab. Im Bereich 0 - 25 m schwankt die untere Grenze des Größenbereichs zwischen 102 und 128  $\mu\text{m}$ . Nur auf Station 11 be-

ginnt die Kurve erst bei 161  $\mu\text{m}$ . Die obere Grenze variiert in der Regel zwischen 3251  $\mu\text{m}$  und 4096  $\mu\text{m}$ . Auf Station 31 erreicht sie 5161  $\mu\text{m}$  und auf den Stationen 11 und 36 liegt sie bei 2580  $\mu\text{m}$ .

Die Maxima der Anzahl befinden sich für neun Stationen in der Klasse 256 - 323  $\mu\text{m}$ . Auf den übrigen Stationen liegen sie unregelmäßig im höheren Größenbereich und erstrecken sich bis in die Klasse 813 - 1024  $\mu\text{m}$ .

Die maximalen Volumenwerte liegen auf neun Stationen in den beiden Größenklassen zwischen 1625 - 2580  $\mu\text{m}$ . Auf den übrigen Stationen streuen sie sowohl nach oben, und zwar auf Station 31 mit einem Wert in der Klasse 4096 - 5161  $\mu\text{m}$ , als auch nach unten, und zwar nördlich des Äquators auf Station 13, 15 und 17 mit der Ballung von drei Werten in den beiden Klassen zwischen 645  $\mu\text{m}$  und 1024  $\mu\text{m}$ .

Im Bereich 25 - 50 m liegt die untere Grenze des Größenbereichs ebenfalls zwischen 102  $\mu\text{m}$  und 128  $\mu\text{m}$ . Wieder weicht Station 11 mit der Grenze bei 203  $\mu\text{m}$  von der Regel ab. Die obere Grenze liegt in neun Fällen zwischen 2048  $\mu\text{m}$  und 3251  $\mu\text{m}$  und ist damit gegenüber Stufe 0 - 25 m um eine Klasse in den kleineren Bereich verschoben. Auf Station 22 erreicht sie 5161  $\mu\text{m}$ , nach unten weicht sie auf Station 31 bis 1625  $\mu\text{m}$  ab.

Die Maximalwerte der Anzahl streuen stärker als in der Tiefe 0 - 25 m. Sie konzentrieren sich auf zehn Stationen zwischen 256  $\mu\text{m}$  und 406  $\mu\text{m}$ , auf Station 35 erreicht ein Wert die Klasse 645 - 813  $\mu\text{m}$ .

Maximale Volumenwerte liegen in neun Fällen in den beiden Klassen zwischen 2048 - 3251  $\mu\text{m}$ . Auf den übrigen Stationen variiert die Lage der Maximalwerte in dem darunterliegenden Größenbereich. Dabei tritt wieder eine auffällige Konzentration nördlich des Äquators auf: diesmal in der Klasse 813 - 1024  $\mu\text{m}$  auf den Stationen 10, 11 und 13.

Im Tiefenbereich 50 - 100 m liegt auf allen Stationen die untere Grenze der Häufigkeitsverteilungen zwischen 102  $\mu\text{m}$  und 128  $\mu\text{m}$ . Die obere Grenze schwankt in einem größeren Bereich als in den darüberliegenden Tiefenhorizonten. Auf acht Stationen zwischen Station 13 und Station 27 liegt sie zwischen 2580  $\mu\text{m}$  und 3251  $\mu\text{m}$ . Südlich Sta-

tion 27 liegt die Grenze höher und erreicht auf Station 35 mit 5161  $\mu\text{m}$  die höchste Stufe. Nördlich Station 13 liegt sie auf den beiden Stationen 10 und 11 zwischen 1024  $\mu\text{m}$  und 1625  $\mu\text{m}$ .

Die Maximalwerte der Anzahl liegen auf zehn Stationen zwischen 203  $\mu\text{m}$  und 323  $\mu\text{m}$ . Zwischen Station 20 und Station 31 treten dabei keine Abweichungen auf. Nördlich davon liegen die Werte von Station 17 und 18 im höheren Größenbereich. Ihre oberste Grenze erreichen sie auf Station 11 und 15 in der Klasse 512 - 645  $\mu\text{m}$ .

Die maximalen Volumenwerte liegen zwischen Station 20 und Station 36 in den beiden Klassen zwischen 1625  $\mu\text{m}$  und 2580  $\mu\text{m}$ , nur auf Station 27 liegt der Wert in der Klasse 2580 - 3251  $\mu\text{m}$ . Nördlich der Station 20 liegen die Maximalwerte, abgesehen von Station 13 mit einem Wert in der Klasse 2580 - 3251  $\mu\text{m}$ , im kleineren Bereich. Auf den drei Stationen 15, 17 und 18 liegen sie in der Klasse 1024 - 1290  $\mu\text{m}$  und auf den beiden Stationen 10 und 11 in der Klasse 645 - 813  $\mu\text{m}$ .

Auch in der Tiefenstufe 100 - 200 m liegt die untere Grenze der Häufigkeitsverteilung zwischen 102  $\mu\text{m}$  und 128  $\mu\text{m}$ . Die obere Grenze zeigt nicht die großen Schwankungen der vorhergehenden Tiefenstufen. Auf neun Stationen liegt sie zwischen 3251  $\mu\text{m}$  und 4096  $\mu\text{m}$ . Im Süden liegt jedoch auf Station 36 mit 2580  $\mu\text{m}$  die Grenze unterhalb dieses Bereichs und auf Station 31 mit 5161  $\mu\text{m}$  oberhalb. Im Norden liegt die Grenze für die drei Stationen 10, 11 und 13 zwischen 2048  $\mu\text{m}$  und 2580  $\mu\text{m}$ .

Die maximale Anzahl liegt auf zehn Stationen zwischen den Größenklassen 256  $\mu\text{m}$  und 406  $\mu\text{m}$ . Auf Station 17 und 33 befindet sie sich zwischen 203  $\mu\text{m}$  und 356  $\mu\text{m}$ . Im Norden liegen auf den Stationen 10, 11 und 15 die Werte in der Klasse 512 - 645  $\mu\text{m}$ .

Maximale Volumenwerte liegen auf sechs Stationen in der Klasse 3251 - 4096  $\mu\text{m}$ . Auf Station 31 tritt ein Wert in der Klasse 4096 - 5161  $\mu\text{m}$  auf. Südlich Station 17 liegen die Werte nie tiefer als 1625  $\mu\text{m}$ . Nur im Norden treten auf Station 10, 11 und 13 Werte im kleineren Bereich bis Klasse 512 - 645  $\mu\text{m}$  auf.

In der Tiefenstufe 200 - 300 m liegt die untere Grenze der Häufigkeitsverteilungen ebenfalls gleichmäßig zwischen 102  $\mu\text{m}$  und 128  $\mu\text{m}$ .

Auch die obere Grenze hat über den gesamten Schnitt hin einen relativ gleichförmigen Verlauf. Zwischen Station 18 und 35 liegt sie zwischen 4096  $\mu\text{m}$  und 5161  $\mu\text{m}$ . Hier treten auf vier Stationen Werte in der höchsten Größenklasse auf. Im Süden, auf Station 36, liegt die Grenze bei 2580  $\mu\text{m}$ . Nördlich Station 18 variiert sie zwischen 2580  $\mu\text{m}$  und 4096  $\mu\text{m}$ .

Die maximale Anzahl verteilt sich auf 11 Stationen auf die Größenklassen zwischen 256  $\mu\text{m}$  und 406  $\mu\text{m}$ . Im Norden liegt sie auf Station 10, 15 und 20 in der Klasse 406 - 512  $\mu\text{m}$  und auf Station 17 in der Klasse 512 - 645  $\mu\text{m}$ .

Maximale Volumenwerte treten auf zehn Stationen in den beiden Größenklassen zwischen 1625  $\mu\text{m}$  und 2580  $\mu\text{m}$  auf. Im Süden liegt auf Station 35 ein Wert in der höheren Klasse 3251 - 4096  $\mu\text{m}$ . Im Norden liegt nur ein Wert in der höheren Klasse 2580 - 3251  $\mu\text{m}$ . Die Werte der restlichen drei Stationen liegen in niedrigeren Klassen. Auf Station 11 und 17 in der Klasse 1024 - 1290  $\mu\text{m}$  und auf Station 10 in der Klasse 645 - 813  $\mu\text{m}$ .

Zusammenfassend lassen sich nur schwache Hinweise für regionale Unterschiede in den Größenhäufigkeitsverteilungen finden. In den beiden Tiefenstufen 25 - 50 m und 100 - 200 m treten nördlich der Station 15 (1°45'N) häufiger maximale Anzahlen in höheren Größenklassen und Volumenmaxima in kleineren Größenklassen auf als in der südlich davon liegenden Region. In der Tiefenstufe 50 - 100 m beginnen im Norden entsprechende Abweichungen schon mit Station 18 (1°N).

Die vertikalen Änderungen der Häufigkeitsverteilungen werden anhand von Medianwerten der Tiefenstufen beurteilt. Tab. 3 stellt die Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und den Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Summen aller Copepoden in den fünf Tiefenstufen des Stationsschnitts dar.

Die mediane untere Grenze des Größenbereichs liegt in den drei Tiefenstufen unterhalb 50 m in der untersten Klasse 102 - 128  $\mu\text{m}$ . In ihnen zeigt die Verlagerung des Medianwerts innerhalb der Klassen, daß

im Tiefenhorizont 100 - 200 m die untere Größenbereichsgrenze häufiger in einer kleineren Klasse liegt als in den beiden anderen Tiefenstufen. In den Tiefenhorizonten bis 50 m liegen die Medianwerte in der nächst höheren Klasse von 128 - 161  $\mu\text{m}$ . Hier zeigt die Position innerhalb der Klassen, daß in der Tiefenstufe 0 - 25 m die Grenze häufiger

Tab. 3: Die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und der Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden in den fünf Tiefenstufen für den gesamten Stationsschnitt

Tiefe (m)	Mediane Lage der Maximalwerte ( $\mu\text{m}$ )		Medianer Größenbereich ( $\mu\text{m}$ )
	Anzahl	Volumen	
0 - 25	310	1910	134 - 3395
25 - 50	363	2095	139 - 2751
50 - 100	287	1970	127 - 2802
100 - 200	346	2299	124 - 3176
200 - 300	356	1933	127 - 3580

im kleinen Bereich liegt als in der Stufe 25 - 50 m. Die obere Grenze liegt in der Tiefenstufe 0 - 25 m in der Medianklasse 3251 - 4096  $\mu\text{m}$ , von 25 - 200 m Tiefe jedoch in der Medianklasse 2580 - 3251  $\mu\text{m}$ , wobei sie innerhalb der Klasse mit zunehmender Tiefe kontinuierlich in einen höheren Bereich wandert, um in der Tiefe 200 - 300 m sodann wieder die Klasse 3251 - 4096  $\mu\text{m}$  zu erreichen. Der Größenbereich ist in der Tiefenstufe 25 - 50 m am kleinsten. Er erreicht seine maximale Ausdehnung in der Stufe 200 - 300 m. In der Stufe 0 - 25 m ist die Ausdehnung des Größenbereichs mit der der Stufe 200 - 300 m zu vergleichen.

Die mediane Lage der Maximalwerte der Anzahl verlagert sich unterhalb 50 m mit zunehmender Tiefe in höhere Bereiche der Häufigkeitsverteilung. Ihre höchste Position erreichen sie dabei im Tiefen-

bereich 25 - 50 m. Insgesamt variiert die mediane Lage der Maximalwerte in einem begrenzten Größenbereich zwischen 287  $\mu\text{m}$  und 363  $\mu\text{m}$ .

Die mediane Lage der maximalen Volumenwerte ist in einem kleinen Größenbereich zwischen 1910 - 2299  $\mu\text{m}$  konzentriert. In der vertikalen Verteilung fallen Werte im kleinen Bereich in der Stufe 0 - 25 m bei 1910  $\mu\text{m}$  und in der Stufe 200 - 300 m bei 1933  $\mu\text{m}$  auf. In den dazwischen befindlichen Tiefenstufen liegen die Ergebnisse im höheren Größenbereich.

#### 4.2.2 Die Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien

Für die Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien wird die vertikale Änderung in der Struktur der Größenhäufigkeitsverteilung mit Hilfe von Medianwerten untersucht (Tab. 4 - 7).

Tab. 4: Die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und der Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Schweber in den Tiefenstufen für die Stationen 18 bzw. 20 - 36.

Tiefe (m)	Mediane Lage der Maximalwerte ( $\mu\text{m}$ )		Medianer Größenbereich ( $\mu\text{m}$ )
	Anzahl	Volumen	
0 - 25	406	1955	138 - 3511
25 - 50	336	2194	157 - 2841
50 - 100	279	2195	144 - 2896
100 - 200	292	2681	157 - 3158
200 - 300	304	2000	152 - 3979

Bei den Schwebern liegt die mediane untere Grenze des Größenbereichs in allen Tiefen in der Klasse 128 - 161  $\mu\text{m}$  (s. Tab. 4). Im

Vergleich mit der Summe aller Copepoden liegt die untere Grenze im höheren Größenbereich. Innerhalb der Klassen verschieben sich die Medianwerte mit zunehmender Tiefe in den größeren Bereich. Die obere Grenze hat höherliegende Medianwerte als bei der Summe aller Copepoden. Eine kontinuierliche Verlagerung der oberen Grenze in den größeren Bereich beginnt mit der Tiefenstufe 25 - 50 m. In der Tiefe 0 - 25 m liegt sie bei 3511  $\mu\text{m}$  sehr hoch und reicht nahezu an die Grenze bei 3979  $\mu\text{m}$  in 200 - 300 m Tiefe.

Die mediane Lage der Maximalwerte der Anzahl verlagert sich wie bei der Summe aller Copepoden von der Tiefenstufe 50 - 100 m mit zunehmender Tiefe in den größeren Bereich. Ihre höchste Position bei 406  $\mu\text{m}$  wird in der Stufe 0 - 25 m erreicht. In der Stufe 25 - 50 m liegt sie bei 336  $\mu\text{m}$  noch höher als in den darunter befindlichen Tiefenhorizonten.

Die mediane Lage der maximalen Volumenwerte zeigt ebenfalls eine mit der Summe aller Copepoden vergleichbare Struktur, jedoch ist sie in den größeren Bereich verschoben. Ihre Position verlagert sich bis in die Tiefe von 200 m in den größeren Bereich. In der Tiefe 200 - 300 m sinkt sie wieder in den kleineren Bereich. Ihre Lage ist hier vergleichbar mit der in der Tiefenstufe 0 - 25 m.

Während die Schweber nahezu den gesamten Größenbereich der Häufigkeitsverteilungen abdecken, ist seine Ausdehnung für die Schwimmer begrenzt (s. Tab. 5). Die mediane untere Grenze des Größenbereichs liegt in der Klasse 161 - 203  $\mu\text{m}$ . Seine obere Grenze ist abgesehen von Tiefenstufe 200 - 300 m mit Lage in der Klasse 1024 - 1290  $\mu\text{m}$  in allen Tiefen in der Klasse 1290 - 1625  $\mu\text{m}$  lokalisiert. Beide Grenzen führen im Gegensatz zu den Schwebern mit zunehmender Tiefe eine tendenzielle Verlagerung in den kleineren Größenbereich durch. Auch die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte wandert mit zunehmender Tiefe in den kleineren Größenbereich. Im Vergleich mit den Schwebern liegen die Anzahlwerte im höheren, die Volumenwerte im kleineren Größenbereich.

Die Schwimmer dominieren nur in begrenzten Größenbereichen sowohl im Volumen als auch in der Anzahl über die Schweber, in den beiden Tiefenstufen unterhalb 100 m nahezu auf allen Stationen, im Bereich

50 - 100 m nur südlich des Äquators, darüber nur noch südlich 1°S im Bereich 0 - 25 m. Die medianen Grenzen des Bereichs, in dem die Schwimmer dominieren, verlagern sich mit zunehmender Tiefe in den kleineren Größenbereich der Häufigkeitsverteilung.

Tab. 5: Die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und der Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Schwimmer sowie der Größenbereich, in dem Schwimmer über Schwebler dominieren, in den Tiefenstufen für die Stationen 18 bzw. 20 - 36

Tiefe (m)	Mediane Lage der Maximalwerte ( $\mu\text{m}$ )		Medianer Größenbereich ( $\mu\text{m}$ )
	Anzahl	Volumen	
0 - 25	683	813	194 - 1625
25 - 50	456	790	198 - 1406
50 - 100	477	967	176 - 1383
100 - 200	315	986	181 - 1420
200 - 300	380	575	176 - 1261

Medianer Größenbereich, in dem Schwimmer über Schwebler dominieren ( $\mu\text{m}$ ) (mit Stationsangaben)

	Anzahl		Volumen	
0 - 25	724	1 Stat. 1°45S	683	3 Stat. süd 1.1°S
25 - 50				
50 - 100	342 - 683	5 Stat. süd 1.0°	362 - 683	5 Stat. süd 1.0°
100 - 200	287 - 574	8 Stat.	456 - 474	8 Stat.
200 - 300	250 - 564	9 Stat.	287 - 456	8 Stat.

Die Schlängler sind in allen Tiefenstufen nur in geringer Anzahl (vgl. Tab. 2) vertreten, so daß es fraglich ist, ob die vertikale

Variation der Medianwerte der Größenhäufigkeitsverteilungen (Tab. 6) als repräsentativ für diese Gruppe angesehen werden kann.

Die Schlängler decken in der Tiefenstufe 0 - 25 m einen maximalen medianen Größenbereich zwischen 256 und 724  $\mu\text{m}$  ab. Die mediane Lage der maximalen Anzahl variiert zwischen 395 und 524  $\mu\text{m}$  und die der maximalen Volumenwerte zwischen 466 und 592  $\mu\text{m}$ . Die Schlängler treten

Tab. 6: Die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und der Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilung für Schlängler sowie der Größenbereich, in dem Schlängler über Schweber dominieren, in den Tiefenstufen für die Stationen 18 bzw. 20 bis 36

Tiefe (m)	Mediane Lage der Maximalwerte ( $\mu\text{m}$ )		Medianer Größenbereich ( $\mu\text{m}$ )
	Anzahl	Volumen	
0 - 25	512	584	256 - 724
25 - 50	395	564	279 - 660
50 - 100	524	592	271 - 660
100 - 200	512	466	271 - 616
200 - 300	456	483	287 - 701

Medianer Größenbereich, in dem Schlängler über Schweber dominieren (mit Stationsangaben)

	Anzahl		Volumen	
0 - 25	512	1 Stat.2°S	575	1 Stat.2°S

also nur in einem engen Bereich der Größenhäufigkeitsverteilungen in Erscheinung.

Auf Station 36 (2°S) dominieren die Schlängler in der Stufe 0 - 25 m in der Anzahl und im Volumen. Der Grund für diese Dominanz

ist darin zu sehen, daß die übrigen Gruppen in diesem Netzfang (vgl. Abb. 25) unverhältnismäßig schwach vertreten sind.

Tab. 7: Die mediane Lage der maximalen Anzahl- und Volumenwerte und der Größenbereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Nauplien sowie der Größenbereich, in dem Nauplien über Schwebern dominieren, in den Tiefenstufen für die Stationen 18 bzw. 20 bis 36

Tiefe (m)	Mediane Lage der Maximalwerte ( $\mu\text{m}$ )		Medianer Größenbereich ( $\mu\text{m}$ )
	Anzahl	Volumen	
0 - 25	256	274	137 - 456
25 - 50	218	241	139 - 483
50 - 100	152	250	165 - 564
100 - 200	198	224	121 - 456
200 - 300	209	310	126 - 621

Medianer Größenbereich, in dem Nauplien über Schwebern dominieren (mit Stationsangaben)

	Anzahl		Volumen	
0 - 25	138 - 215	alle Stat.	138 - 228	alle Stat.
25 - 50	139 - 186	" "	139 - 186	" "
50 - 100	165 - 173	" "	136 - 177	" "
100 - 200	121 - 165	" "	121 - 165	" "
200 - 300	126 - 181	" "	126 - 184	" "

Die Gruppe der Nauplien ist naturgemäß nur im unteren Bereich der Größenhäufigkeitsverteilungen der Copepoden vertreten (Tab. 7). Die mediane Position der unteren Grenze zeigt mit zunehmender Tiefe eine leichte Verschiebung in den kleineren Bereich, die der oberen Grenze in den größeren Bereich. Die medianen Grenzen variieren dabei zwischen

121 - 165  $\mu\text{m}$  und 456 - 621  $\mu\text{m}$ .

Maximale Werte der Anzahl liegen zwischen 152  $\mu\text{m}$  und 256  $\mu\text{m}$ . Bis 200 m Tiefe ist eine tendenzielle Verlagerung der Werte in den kleineren Bereich zu beobachten, darunter steigen sie leicht in den höheren Bereich.

Die maximalen Volumenwerte schwanken zwischen 224  $\mu\text{m}$  und 310  $\mu\text{m}$ . Es herrscht ebenfalls eine tendenzielle Verlagerung in den kleineren Bereich der Größenhäufigkeitsverteilung vor, nur der Wert in der Tiefenstufe 200 - 300 m fällt mit 310  $\mu\text{m}$  aus dem Rahmen.

Die Nauplien dominieren in der Anzahl im medianen Größenbereich 121 - 186  $\mu\text{m}$ . Mit zunehmender Tiefe findet eine Verschiebung der Grenzen in den kleineren Größenbereich statt.

Im Volumen dominieren Nauplien im medianen Größenbereich 121 - 215  $\mu\text{m}$ . Auch für das Volumen wandern die Grenzen mit zunehmender Tiefe in den kleineren Tiefenbereich. Sowohl für die Anzahl als auch für das Volumen weicht die Tiefenstufe 200 - 300 m mit leicht in den höheren Größenbereich verschobenen Grenzen von der Regel ab.

Faßt man die analysierende Beschreibung der Medianwerte der Größenhäufigkeitsverteilungen der funktionellen Gruppen der Copepoden zusammen, so erhält man folgendes Bild: Die Struktur der Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden wird im wesentlichen durch die Schwebler geprägt. Extremwerte der medianen Grenzen des Größenspektrums der Schwebler liegen bei 138  $\mu\text{m}$  und 3979  $\mu\text{m}$ . Das Größenspektrum verlagert seine Grenzen mit zunehmender Tiefe in den größeren Bereich. Die mediane Lage der Maximalwerte wandert ebenfalls in den größeren Bereich. Ausnahmen treten für die Anzahl bis in 50 m Tiefe und für das Volumen in der Tiefe 200 - 300 m auf.

Im unteren Größenbereich mit medianen Grenzwerten bei 121  $\mu\text{m}$  und 621  $\mu\text{m}$  beeinflussen Nauplien den Verlauf der Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden. Die größte Ausdehnung ihres Größenspektrums wird in der Tiefe erreicht. Sie dominieren in Anzahl und Volumen zwischen den medianen Grenzen 121  $\mu\text{m}$  und 228  $\mu\text{m}$ .

Neben den Schweblern haben die Schwimmer eine große Bedeutung für

den Verlauf der Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden. Ihr Größenspektrum überschneidet sich mit dem der Nauplien. Seine medianen Grenzen liegen bei 176  $\mu\text{m}$  und 1625  $\mu\text{m}$ . Die größten Vertreter der Schwimmer sind also im Mittel noch um die Hälfte kleiner als die der Schweber. Während sich das Größenspektrum der Schweber mit zunehmender Tiefe in den größeren Bereich verlagert, ist bei den Schwimmern eine entgegengesetzte Tendenz zu beobachten. Auch die vertikale tendenzielle Verlagerung der Maximalwerte der Größenhäufigkeitsverteilungen von Schwimmern und Schwebern ist gegenläufig. Die Schwimmer dominieren in Anzahl und Volumen unterhalb 100 m nahezu über den gesamten Stationsschnitt im medianen Größenbereich zwischen 250  $\mu\text{m}$  und 574  $\mu\text{m}$ . Zur Oberfläche hin schwindet die Dominanz der Schwimmer im begrenzten Größenbereich. Nur noch südlich des Äquators dominieren die Schwimmer vereinzelt.

Die Bedeutung der Schlängler für die Größenhäufigkeitsverteilungen der Summe aller Copepoden ist vergleichsweise gering. Ihr Größenspektrum überschneidet sich mit seinen medianen Grenzen bei 256  $\mu\text{m}$  und 724  $\mu\text{m}$  mit dem der Nauplien und dem der Schwimmer.

### 4.3 Ergebnisse der Clusteranalyse

Mittels der Clusteranalyse (vgl. Kap. 3.2.4.5 und 3.3.4) wurden die Größenhäufigkeitsverteilungen der Copepoden aufgrund ihrer Ähnlichkeit in Gruppen zusammengefaßt. Es werden Ergebnisse für das Volumen der Summe aller Copepoden und der Schweber vorgestellt. Die Clusteranalyse der restlichen Copepodengruppen führte zu einer verwirrenden, unregelmäßig regional und vertikal verstreuten Anzahl kleiner Gruppierungen, die keine Zusammenhänge erkennen lassen.

#### 4.3.1 Das Volumen der Summe aller Copepoden

Mit Abb. 26 werden die Clusteranalyseergebnisse der Summe aller Copepoden dargestellt. Bei einer sehr feinen Aufgliederung, bei der sich

die Struktur der Gruppen untereinander nur um weniger als 1 % voneinander unterscheidet, ergeben sich sieben Gruppen von Größenhäufigkeitsverteilungen. In 36 der 75 Netzfänge wird der Gruppe 1 registriert. Im Bereich von Station 20 ( $0^{\circ}40'N$ ) bis Station 35 ( $1^{\circ}45'S$ ) tritt sie in 29 von 40 Netzfängen auf. Die relativ homogene Verteilung der Gruppe 1 in dieser Region wird zwischen Station 24 ( $0^{\circ}$ ) und Station 33 ( $1^{\circ}20'S$ ) in den Stufen bis 100 m Tiefe in 9 Fällen und in der

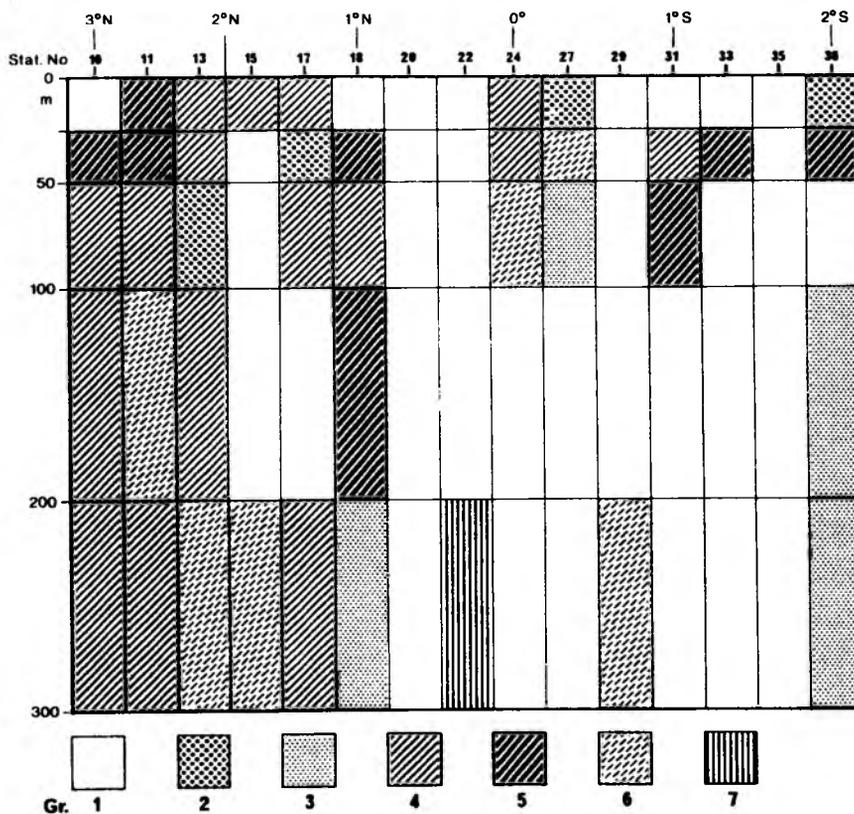


Abb. 26: Clusteranalyseergebnisse für das Volumen der Summe aller Copepoden. Die einzelnen Gruppen umfassen Größenhäufigkeitsverteilungen, deren Strukturen sich weniger als 1 % voneinander unterscheiden

Tiefenstufe 200 - 300 m auf Station 22 ( $0^{\circ}20'N$ ) und Station 29 ( $0^{\circ}40'S$ ) gestört. Daran sind alle übrigen Gruppen beteiligt. Nördlich

Station 18 (1°N) treten die restlichen Gruppen in den Vordergrund. Die Gruppe 4 dominiert durch ihr Vorkommen in 13 Netzfängen. Wie die Gruppe 1 ist sie in allen Tiefenbereichen vertreten. Die übrigen 5 Gruppen weisen eine begrenzte Vertikalverteilung auf. Gruppe 2 wird bis maximal 100 m beobachtet. Die Gruppe 3 erscheint nur in den Tiefenbereichen unterhalb 50 m, ihr nördlichstes Vorkommen liegt auf Station 18 (1°N). Die Gruppe 5 ist in der Tiefe 0 - 50 m konzentriert. Auf Station 31 (1°S) erscheint sie in 50 - 100 m und auf Station 18 (1°N) in 100 - 200 m Tiefe. Die Gruppe 6 tritt nie in der Tiefenstufe 0 - 25 m auf. Ihr südlichstes Vorkommen liegt auf Station 31 (1°S). Die Gruppe 7 wird durch einen einzelnen Netzfang auf Station 22 (0°20'N) aus 200 - 300 m Tiefe repräsentiert.

Bei einer gröberen Differenzierung mit einem Unterschied bis zu 5 % zwischen den Strukturen der Größenhäufigkeitsverteilungen werden jeweils die Gruppen 1, 2, und 3 und die Gruppen 5 und 6 zusammengefaßt. Dadurch ändert sich das Bild nicht wesentlich. Die vertikale Begrenzung der Gruppen 3, 5 und 6 wird aufgehoben, und der weitgehend homogene Bereich der Gruppe 1 weitet sich aus.

Zusammenfassend läßt die Clusteranalyse bezüglich der Ähnlichkeit in der Größenstruktur der Summe aller Copepoden einen relativ homogenen Bereich von Station 20 (0°40'N) bis Station 35 (1°45'S) erkennen. Die Homogenität wird in dieser Region im Bereich von Station 24 (0°) bis Station 33 (1°20'S) bis in die Tiefe von 100 m durchbrochen. Nördlich der Station 20 (0°40'N) und südlich der Station 35 (1°45'S) treten anders geartete Größenhäufigkeitsverteilungen in den Vordergrund. Dabei läßt sich auf dem 99 % Signifikanzniveau eine schwach ausgeprägte vertikale Schichtung einzelner Gruppen erkennen.

#### 4.3.2 Die Schweber

Mit Abb. 27 werden die Clusteranalyseergebnisse der Schweber dargestellt. Es lassen sich fünf Gruppen von Netzfängen, deren Größenhäufigkeitsverteilungen weniger als 1 % Unterschied aufweisen, erkennen. Die Gruppe 1 erscheint in 23 der 46 Netzfänge. Ihr Vorkommen zeigt

keine vertikale Begrenzung. In der Tiefenstufe 100 - 200 m ist sie durchgehend vertreten und damit, abgesehen von Station 36 (2°S), vergleichbar mit der Verteilung der Gruppe 1 der Summe aller Copepoden.

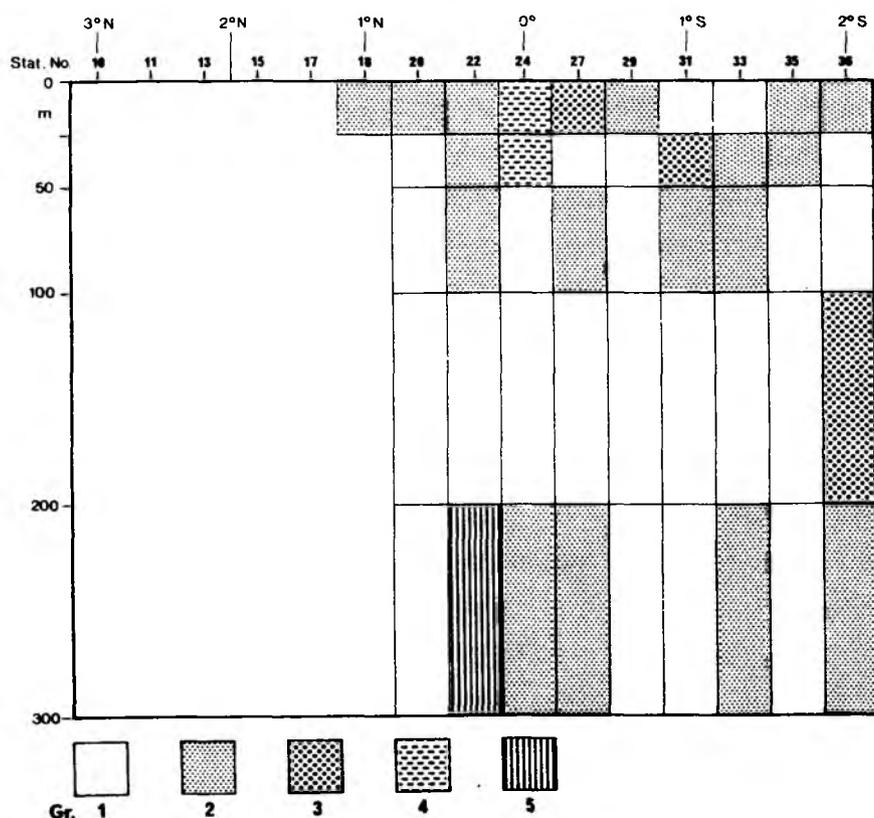


Abb. 27: Clusteranalyseergebnisse für das Volumen der Schwebler. Die Gruppen umfassen Größenhäufigkeitsverteilungen, deren Strukturen sich weniger als 1 % voneinander unterscheiden

Es ist keine regional strukturierte Verteilung zu erkennen. Die Gruppe 2 erscheint in 17 der 46 Netzfänge. Sie ist bis auf Tiefenstufe 100 - 200 m in allen Tiefenbereichen vertreten. Auch für sie treten keine Regelmäßigkeiten in der regionalen Verteilung in Erscheinung. Die Gruppe 3 taucht auf Station 27 (0°20'S) im Bereich 0 - 25 m, auf Station 31 (1°S) in 25 - 50 m und auf Station 36 (2°S) in der

Tiefenstufe 100 - 200 m auf. Die Gruppe 4 erscheint auf Station 24 (0°) in den beiden Tiefenhorizonten bis 50 m Tiefe. Die Gruppe 5 wird durch einen einzelnen Netzfang auf Station 22 (0°20'N) in 200 - 300 m Tiefe repräsentiert und erinnert an die Gruppe 7 aller Copepoden.

Faßt man die Ergebnisse der Clusteranalyse in Gruppen zusammen, deren Größenhäufigkeitsverteilungen sich in der Struktur weniger als 5% unterscheiden, so fallen jeweils die beiden Gruppen 1 und 2 und 3 und 4 zusammen. Auf diesem Niveau ähneln sich 40 der 46 Netzfänge in der Größenstruktur der Schwebler. Diese Gleichförmigkeit wird nur in den Tiefenstufen bis 50 m im Bereich von Station 24 (0°) bis Station 31 (1°S) in vier Fällen, einmal auf Station 36 (2°S) in 100 - 200 m Tiefe und einmal auf Station 22 (0°20'N) in 200 - 300 m Tiefe durchbrochen.

#### 4.4 Tagesrhythmische Änderungen in der Vertikalverteilung der Copepoden

Versucht man in der Darstellung der Gesamtanzahl und des Gesamtvolumens (Kap. 4.1), der Größenhäufigkeitsverteilungen (Kap. 4.2) oder der Clusteranalyseergebnisse (Kap. 4.3) der Copepoden eine tageszeitabhängige Rhythmik (Angaben über den Zeitpunkt der Probenahmen sind in Tab. A1 im Anhang festgehalten), die auf Vertikalwanderungen deutet, zu erkennen, so führt dies zu keinem Erfolg.

#### 5. Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Copepodenverteilungen während des Stationschnitts im äquatorialen Atlantik weisen regionale und vertikale Unterschiede auf, die, soweit möglich, im Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren, diskutiert werden sollen. Dabei stehen die physikalischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet (vgl. Kap. 2), die generell die Verteilung des Planktons steuern (Zeitzechel, 1978), im Vordergrund.

Zur Beurteilung der vertikalen Verteilung werden zudem biologische Faktoren, die unter gewissen Umständen Bedeutung für die Verteilung des Planktons erlangen können (Zeitzschel, 1978), angesprochen.

Eingangs erscheint es notwendig abzuschätzen, inwieweit das Copepodengrößenspektrum repräsentativ erfaßt wurde. Bedingt durch die Maschenweite von 100  $\mu\text{m}$  ist ein Verlust von Nauplien und kleinen Entwicklungsstadien einzukalkulieren. Es wird angenommen, daß im Bereich unterhalb von 100  $\mu\text{m}$  die Anzahl der Copepodenentwicklungsstadien so gering ist, daß dadurch keine ausschlaggebende Änderung der tatsächlichen Größenhäufigkeitsverteilungen hervorgerufen wird. Im oberen Bereich der Größenhäufigkeitsverteilungen ist ein Abfall der Werte zu verzeichnen. In diesem Größenbereich ist eine, durch die Scheuchwirkung des Netzes hervorgerufene, erfolgreiche Flucht der Copepoden nicht auszuschließen. Es wird jedoch angenommen, daß im Untersuchungszeitraum keine Copepoden größer als 5161  $\mu\text{m}$  auftraten, da sie sonst wenigstens vereinzelt in den Netzfängen zu erwarten gewesen wären.

### 5.1 Die Vertikalverteilung der Summe aller Copepoden

In der Vertikalverteilung der Gesamtanzahl und des Gesamtvolumens aller Copepoden spiegelt sich die vertikale hydrographische Struktur des Untersuchungsgebiets wider (Abb. A2 im Anhang). Die Wassersäule wird durch die für die tropischen Regionen der Ozeane charakteristische, permanent stark ausgebildete Temperatursprungschicht in zwei biologisch differenzierbare Bereiche gegliedert. In der Deckschicht, die sich während des Untersuchungszeitraums bis etwa 50 m Tiefe erstreckte, wird die Primärproduktion des Phytoplanktons, die Nahrungsgrundlage für die folgenden Glieder der Nahrungskette, durch Nährstofflimitation begrenzt. In diesem Bereich liegen die beiden Multi-netz-Fangstufen, welche die höchsten Anzahl- und Volumenwerte der Copepoden aufweisen. In der Fangstufe 50 - 100 m ist die Sprungschicht lokalisiert. In diesem Tiefenbereich lag die Begrenzung der euphotischen Zone. Damit verbunden ist eine deutliche Abnahme der Copepoden nach Anzahl und Volumen. Unterhalb der Temperatursprungschicht in den

beiden Fangstufen bis 300 m Tiefe, ist das Wasser nährstoffreicher. Hier begrenzt Lichtlimitation das Phytoplanktonwachstum. In diesem Zusammenhang ist eine weitere Abnahme der Copepoden im Tiefenbereich 100 - 200 m zu beobachten. Nach diesem Schema ist in der Tiefe 200 - 300 m eine weitere Verringerung oder zumindest eine gleichbleibende Menge von Copepoden zu vermuten. Die Werte steigen hier jedoch wider Erwarten deutlich an und liegen zwischen den Ergebnissen der Fangstufen aus dem unteren Bereich der Deckschicht und der Sprungschicht.

Eine vertikale Biomasseverteilung des Zooplanktons mit einem Maximum in der Deckschicht und deutlich kleineren Mengen im darunterliegenden Tiefenbereich wurde in verschiedenen Regionen der äquatorialen Ozeane gefunden (z. B. Greeze et. al., 1966, Vinogradov, 1970, 1981, Le Borgne, 1977, Flint, 1977). Ein vergleichbares Beispiel für einen Anstieg der Biomasse im Tiefenbereich 200 - 300 m konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Als Erklärung für dieses Phänomen werden zwei Möglichkeiten in Erwägung gezogen: zum einen eine saisonale Vertikalwanderung von Copepoden, zum anderen ein aktiver Transport durch vertikale Zirkulation in diesem Tiefenbereich.

Saisonal bedingte Vertikalwanderungen von Copepoden sind für einige Arten aus verschiedenen Regionen des Ozeans bekannt. Einen Überblick geben Longhurst (1976) und Raymont (1983). Danach wird angenommen, daß einige Copepodenarten eine produktionsarme Zeit durch die Verlagerung ihres Aufenthalts in den Bereich unterhalb der euphotischen Zone überbrücken. Saisonale Schwankungen der Primärproduktion sind im tropischen Ozean im allgemeinen nicht üblich, die äquatoriale Divergenzzone macht jedoch eine Ausnahme. Wie in Kap. 2 bereits ausführlich geschildert, bewirkt die saisonale Wanderung der Passatwindfelder eine Änderung des zonalen äquatorialen Stromsystems und der meridional divergierenden Triftströmungen. Die divergierenden Triftströmungen bewirken einen Vertikaltransport von nährstoffreichem Wasser in die Deckschicht und ermöglichen eine verstärkte autotrophe Produktion (z. B. Raymont, 1980, Lenz, 1981, Parsons et. al., 1984). Ihre größte Intensität entwickeln die Triftströme im August, wenn die ITCZ ihre nördlichste Lage erreicht. Mit ihrer Rückwanderung in Richtung Äquator

verlieren die divergierenden Strömungen an Intensität und erreichen ein Minimum, wenn die ITCZ im März ihre südlichste Position einnimmt. Der untersuchte Stationschnitt wurde Anfang Februar durchgeführt und lag damit gegen Ende der Auftriebssaison 1978/79. Den Erwartungen entsprechend wurde für diesen Zeitraum eine relativ geringe Phytoplanktonproduktion und -biomasse sowie Zooplanktonbiomasse beobachtet (Rolke, 1981, Bauerfeind, 1983, 1986).

Im Vergleich mit Ergebnissen aus dem äquatorialen Indischen Ozean und dem äquatorialen Pazifik ermöglichen die Volumenmessungen eine ergänzende Einschätzung der Situation. Dort erreichen nämlich die Biomassewerte des Zooplanktons der oberen 100 m in Zeiten mit intensivem Auftrieb  $250 \cdot 10^3$  -  $300 \cdot 10^3$  ppm Verdrängungsvolumen. In oligotrophen Regionen der antizyklonischen Wirbel beiderseits des Äquators, die zu den produktionsärmsten Zonen des Ozeans zählen (Zeitzschel, 1969), beträgt die Zooplanktonbiomasse der oberen 100 m nur  $15 \cdot 10^3$  -  $20 \cdot 10^3$  ppm Verdrängungsvolumen (Vinogradov, 1970). In der auftriebsarmen Zeit von Februar bis Mai unterscheidet sich die Zooplanktonbiomasse der Äquatorregion im Betrag nur unwesentlich von der der oligotrophen Bereiche (Vinogradov, 1981). Während des Stationschnitts betrug das Copepodenvolumen der oberen 100 m im Mittel etwa  $23 \cdot 10^3$  ppm. Für einen Vergleich mit Vinogradovs Angaben muß berücksichtigt werden, daß seine Ergebnisse in der Regel mit Netzen von 180  $\mu$ m Maschenweite gewonnen wurden. Die Multinetzfänge decken zusätzlich den Größenbereich bis 100  $\mu$ m ab. Weil jedoch in den Multinetzfängen nur Copepoden registriert wurden, Vinogradovs Angaben dagegen für das gesamte Netzzooplankton stehen, wird angenommen, daß die Ergebnisse annähernd vergleichbar sind. Damit liegen die eigenen Biomassewerte, wie gegen Ende der Auftriebssaison zur erwarten, nur leicht über denen der oligotrophen antizyklonischen Wirbel.

Die Vertikalverteilung des Zooplanktonvolumens liefert einen weiteren Hinweis für die saisonale Einstufung des Untersuchungszeitraums. Nach Vinogradov (1970) ist das Maximum der Zooplanktonbiomasse im äquatorialen Auftriebsgebiet in einer Tiefe zwischen 25 und 50 m zu finden. In den oligotrophen Regionen des tropischen Ozeans konzentriert sich das Maximum, bedingt durch Vertikalwanderung, in der Nacht

im Bereich 0 - 25 m. Tagesrhythmische Änderungen in der Vertikalverteilung der Zooplanktonbiomasse konnten in den äquatorialen Divergenzonen nicht beobachtet werden (Vinogradov, 1970). Eine Ausnahme macht die Untersuchung von Le Borgne (1977). In den eigenen Ergebnissen sind wie bei denjenigen Vinogradovs keine Hinweise für Vertikalwanderungen zu erkennen, und doch befindet sich das Biomassewachstum wie in den oligotrophen Regionen im Tiefenbereich 0 - 25 m.

Die Tatsache, daß der Biomassebetrag und die Position des Biomassemaximums in der Wassersäule an die oligotrophen Bereiche der antizyklonischen Wirbel erinnert, wird als Bestätigung für einen normalen saisonalen Verlauf im Untersuchungsgebiet gewertet. Die Biomasse verringert sich noch bis Ende März, bleibt bis Anfang Mai klein und steigt Mitte Mai mit Beginn der Auftriebssaison wieder deutlich an (Rolke, 1981).

Der Untersuchungszeitraum fällt somit in den Beginn der produktionsarmen Zeit. Ein saisonal bedingter Aufenthalt von Copepoden unterhalb der euphotischen Zone bis zum Beginn der Auftriebssaison ist denkbar. Ein weiteres Indiz für die Hypothese ist in den wechselnden Mengenverhältnissen von Anzahl und Volumen zwischen den Tiefenstufen enthalten. Daraus wurde geschlossen, daß im Tiefenbereich 200 - 300 m die mittlere Organismengröße sinkt. Auch die mediane Lage der Volumemaxima in den Größenhäufigkeitsverteilungen deutet auf ein verstärktes Auftreten von kleinen Organismen. Allgemein wird jedoch angenommen, daß die Größe der Planktonorganismen mit wachsender Tiefe zunimmt (Longhurst, 1976). Dieser Widerspruch ließe sich dadurch erklären, daß einige Copepoden, wie verschiedentlich beobachtet wurde (Longhurst, 1976), die produktionsarme Zeit im Entwicklungsstadium überbrücken.

Die zweite Erklärung für die hohen Biomassewerte im Tiefenbereich 200 - 300 m stützt sich auf den Einfluß meridionaler Zirkulationszellen. Es wird angenommen, daß die Copepoden durch sie in die Tiefe transportiert werden. Ein Einfluß von Zirkulationszellen auf die Vertikalverteilung des Zooplanktons im Bereich der äquatorialen Divergenzonen wird auch von Flint (1977) für wahrscheinlich gehalten. Zwei Paar Zirkulationszellen konvergieren im Bereich des Stromkerns des

Äquatorialen Unterstroms. Von dort divergiert ein Paar zur Oberfläche, das zweite nach unten in die Thermocline.

Die Position des Stromkerns des Äquatorialen Unterstroms ist in der Nähe des Salzgehaltsmaximums lokalisiert (s. Kap. 2). Das Salzgehaltsmaximum lag während des Stationsschnitts etwa bei  $0^{\circ}40'S$  und ca. 70 m Tiefe (vgl. Abb. A1 im Anhang). Im Einfluß der meridionalen Zirkulationszellen werden die Copepoden somit aus den Fangstufen zwischen 50 m und 200 m in die Tiefe transportiert. Dieses "downwelling" hat eine meridionale Ausdehnung von etwa 90 nm beiderseits des Stromkerns (Fahrbach, 1983). Mit der Lage des Stromkerns bei  $0^{\circ}40'S$  ist also im Bereich von  $2^{\circ}10'S$  bis  $0^{\circ}50'N$  "downwelling" zu erwarten. In dieser Region fällt die relativ homogene Verteilung der in der Clusteranalyse gefundenen Gruppe 1 auf. Die große Ähnlichkeit der Häufigkeitsverteilungen wird auf Vermischungsprozesse durch die Zirkulationszellen zurückgeführt. Obwohl die Größenstruktur nach den Ergebnissen der Clusteranalyse sehr ähnlich ist, deuten die Volumen-Anzahl-Verhältnisse und die mediane Lage der Maximalwerte an, daß sich im Oberflächenbereich im Mittel größere und in der Tiefe 200 - 300 m im Mittel kleinere Copepoden aufhalten, als nach der Vorstellung, daß die Größe der Planktonorganismen mit der Tiefe zunimmt, zu erwarten ist. Diese Verteilungsstruktur wäre ebenfalls durch die Zirkulationszellen erklärbar. Danach würden in der Deckschicht relativ große Copepoden aus der Tiefe zur Oberfläche und unterhalb des Stromkerns des Äquatorialen Unterstroms relativ kleine Copepoden in die Tiefe transportiert. Der Einfluß von Zirkulationszellen liefert so eine logische Erklärung für die vertikale Verteilung der Copepoden. Berücksichtigt man jedoch die von Fahrbach (1982) gefundenen Vertikalgeschwindigkeiten von bis zu 1,5 m /Tag im Bereich des "downwelling" und von 3,3 m /Tag gegen Ende Februar im Bereich des "upwelling", so stellt sich die Frage, ob die Copepoden nicht doch in der Lage sind, gegen diese geringen Strömungsgeschwindigkeiten ihre Position in der Wassersäule zu halten.

## 5.2 Die Vertikalverteilung der Gruppen Schweber, Schwimmer, Schlängler und Nauplien

Alle Gruppen mit Ausnahme der Schlängler zeigen in der Vertikalverteilung ein deutliches Maximum von Anzahl und Volumen im Bereich 0 - 25 m. Bis in 200 m Tiefe fallen die Werte und steigen in der Tiefenstufe 200 - 300 m wieder an. Diese Verteilungsstruktur deutet wieder auf den Einfluß der Zirkulationszellen. Nimmt man für die hohen Werte im Bereich 200 - 300 m saisonale Vertikalwanderungen an, so wäre ein gezielter Anstieg der Werte einer Gruppe zu erwarten. Selbst wenn man in Erwägung zieht, daß sowohl die Schweber als auch die Schwimmer solche Wanderungen durchführen, dürfte keine Zunahme der Nauplien erfolgen, da die Überbrückung der produktionsarmen Zeit in der Regel in Form einer Diapause eines höheren Entwicklungsstadiums stattfindet (Longhurst, 1976).

Die Schlängler sind in der gesamten Wassersäule schwach vertreten. Nur im Bereich 0 - 25 m ist ihr Vorkommen mit sechs Individuen pro m<sup>3</sup> ein wenig gesteigert. Erstaunlich ist jedoch ihr gleichmäßiges Vorkommen. Mit einer Ausnahme sind sie in jedem Netzfang vertreten. Es handelt sich nahezu ausnahmslos um Microsetella spec. Microsetella spec. zählt zu den wenigen harpacticoiden Copepoden, die im ozeanischen Pelagial anzutreffen sind. Der Lebensraum der Harpacticoiden ist in der Regel an Substrat gebunden (z. B. Spandl, 1925, Kaestner, 1967, Raymont, 1983). Beobachtungen während der Vorsortierung der Proben für die bildanalytische Auswertung weisen darauf hin, daß Microsetella spec. auch im ozeanischen Pelagial nicht auf Substrat verzichtet. Der Copepode war gehäuft in den in Kap. 3.2.5 geschilderten Aggregaten verstrickt, so daß vermutet werden kann, daß er sie als Transportmittel und Lebensraum benutzt. Eine ähnliche Beobachtung erwähnt Raymont (1983) für Macrosetella. Dieser harpacticoiden Copepode scheint die Filamente der Blaualge Trichodesmium als Substrat für seine Entwicklungsstadien zu nutzen.

Die Vertikalverteilung der Nauplien zeigt ähnliche Tendenzen wie die der Schweber und der Schwimmer. Sie tragen allerdings nur mit einem kleinen Volumenanteil zur Gesamtbiomasse bei und sind im

Vergleich auch zahlenmäßig schwach vertreten. Um eine Einstufung der Situation zu ermöglichen, soll ihr Vorkommen mit Ergebnissen aus dem zentralen Sargassomeer verglichen werden. Dort wurde in Netzfängen von 55  $\mu\text{m}$  Maschenweite aus den oberen 100 m der Wassersäule ein Nauplienanteil von 51 - 68 % der Gesamtabundanz aller taxonomischen, im Netzfang enthaltenen Zooplanktongruppen gefunden (Böttger, 1982). In den eigenen Netzfängen beträgt der mittlere Nauplienanteil im vergleichbaren Tiefenbereich 17 % der Summe aller Copepoden. Bei diesem Vergleich muß die unterschiedliche Maschenweite in Betracht gezogen werden. Wie eingangs bereits angesprochen, wird nicht ausgeschlossen, daß die Nauplien bei einer Maschenweite von 100  $\mu\text{m}$  nicht quantitativ erfaßt werden. Es wird jedoch angenommen, daß der Unterschied von nahezu 50 % nicht durch eine Maschenweitendifferenz von 45  $\mu\text{m}$  hervorgerufen werden kann. So ist der Nauplienanteil auch im Vergleich mit den Ergebnissen aus der oligotrophen Region des Sargassomeers verschwindend klein. Als Erklärung wird vermutet, daß die Copepoden in der auftriebsarmen Zeit zu wenig Nahrung finden, um einen Teil davon in ihre Reproduktion zu investieren. Sie benötigen die gesamte erreichbare Nahrung, um ihren Grundumsatz aufrecht zu erhalten und die produktionsarme Zeit überbrücken zu können.

Ein interessantes Bild läßt sich aus dem Wechselspiel der Volumen-Anzahl-Verhältnisse von Schwebern und Schwimmern zwischen den Tiefenstufen ableiten. Das Volumenverhältnis zwischen den Gruppen bleibt in allen Tiefen relativ konstant, die Anzahl variiert jedoch. Während die Schwebler im Oberflächenbereich deutlich in der Anzahl überwiegen, nimmt die Bedeutung der Schwimmer mit wachsender Tiefe zu und zeigt eine leichte Dominanz im Tiefenbereich 200 - 300 m. Da die größten Vertreter der Schwimmer im Mittel noch um die Hälfte kleiner sind als die Schwebler, können sie auch bei zahlenmäßiger Oberlegenheit nicht im Gesamtvolumen überwiegen. Das konstante Volumenverhältnis kann bei schwindender Oberlegenheit in der Anzahl nur durch wachsende Körpergröße aufrecht erhalten werden. Entsprechend deuten die mediane Lage der Maximalwerte und der mediane Größenbereich einen durchschnittlichen Größenzuwachs der Schwebler mit zunehmender Tiefe an. Die Schwimmer hingegen zeigen eine durchschnittliche Größenreduzierung.

Diese Beobachtungen führen zu Überlegungen über die Effektivität des Nahrungserwerbs beider Gruppen. Im Hinblick darauf wird angenommen, daß sie um denselben Nahrungspool konkurrieren. Ein Hinweis auf die mögliche Relevanz dieser Annahme läßt sich den Ergebnissen Bauerfeinds (1983) entnehmen. Seine Phytoplanktonzählungen bestätigen eine relativ homogene Zusammensetzung mit einer Dominanz von Organismen  $< 30 \mu\text{m}$ . Deutlich größere Formen treten selten auf, unterhalb der euphotischen Zone nie (Bauerfeind, pers. Mitt.). Die Schweber können sich mit ihrer vorwiegend lauenden, abwartenden Haltung in der Wassersäule angesichts der Nahrungspartikelkonzentration in der Deckschicht eine relativ kleine Körpergröße erlauben und dabei das Volumenverhältnis zwischen den beiden Gruppen aufrecht erhalten. Die vorwiegend aktive Nahrungssuche der Schwimmer verlangt hier eine relativ große Körpergröße. Unterhalb der euphotischen Zone ist das Nahrungsangebot drastisch reduziert. Hier scheint die aktive Nahrungssuche so vorteilhaft zu sein, daß sich die Schwimmer eine Reduzierung der Körpergröße leisten können. Die Schweber können das Volumenverhältnis nur durch eine Steigerung der Körpergröße aufrecht erhalten.

### 5.3 Die regionale Verteilung der Summe aller Copepoden

Die Beurteilung der regionalen Verteilung wird durch fleckenhaftes Auftreten des Planktons im Untersuchungsgebiet erschwert. Flecken mit deutlichen Unterschieden in der Zooplanktonbiomasse wurden während des Untersuchungszeitraums beobachtet (Rolke, 1981). Für die Entstehung dieser Flecken macht Vinogradov (1981) die starke räumliche und zeitliche Variation der Transportvorgänge (vgl. Kap. 2) verantwortlich. Sie resultiert in der Formation von nährstoffreichen Wasserkörpern mit einer Ausdehnung von einigen hundert Metern. Die Wasserkörper werden mit den Strömungen in zonaler und meridionaler Richtung verfrachtet (Vinogradov und Voronina, 1962). Frisches Auftriebswasser ist arm an Zooplankton, so daß eine Blüte erst in beträchtlichem Abstand vom Auftriebsereignis stattfindet. So wurden maximale Anzahlen der Copepoden Undinula darwini und Rhincalanus cor-

nutus zwischen  $0^{\circ}30'$  und  $1^{\circ}$  beiderseits des Äquators gefunden (Vinogradov, 1981). Die zeitliche und räumlich Distanz zwischen einem Auftriebsereignis und der Entwicklung einer Copepodenpopulation läßt somit keinen direkten Bezug zur gleichzeitig aufgenommenen hydrographischen Situation (s. Abb. A1 im Anhang) zu. Sie wird unter Berücksichtigung der in diesem Zeitraum zu erwartenden hydrographischen Verhältnisse mit in die Diskussion einbezogen. Danach deutet die regionale Verteilung der Copepoden auf einen Einfluß der meridionalen Zirkulationszellen. Im Tiefenbereich 50 - 100 m, in dem die Zellen nach Lage des Unterstromkerns (s. Abb. A1 im Anhang) konvergieren, werden zwischen  $0^{\circ}40'S$  und  $2^{\circ}S$  höhere Volumenwerte beobachtet. Damit verbunden ist eine Verlagerung der medianen Maximalwerte innerhalb der Größenhäufigkeitsverteilungen südlich  $1^{\circ}N$ . Diese Verteilungsstruktur deutet auf eine Verfrachtung der Copepoden in Richtung Unterstromkern in dieser Tiefenstufe. Oberhalb und unterhalb dieses Tiefenbereichs divergieren die Zirkulationszellen meridional. Hier werden in den Tiefen 25 - 50 m und 100 - 200 m zwischen  $1^{\circ}N$  und  $1^{\circ}45'S$  höhere Volumenwerte registriert. Eine Verlagerung der medianen Maximalwerte innerhalb der Größenhäufigkeitsverteilungen findet südlich  $1^{\circ}45'N$  statt. Dies entspricht dem Bild eines vertikal und meridional aus dem Bereich des Unterstromkerns divergierenden Copepodentransports. Im Tiefenbereich 0 - 25 m sind erst nördlich  $0^{\circ}$  und in der Tiefenstufe 200 - 300 m zwischen  $2^{\circ}40'N$  und  $3^{\circ}N$  höhere Copepodenvolumina zu erkennen. Die Lage der medianen Maximalwerte deckt hier keine offensichtlichen regionalen Unterschiede auf. Die Volumenwerte deuten einen in der Oberflächennähe und im unteren Bereich der Thermoclast meridional divergierenden Transport an. Wegen der Begrenzung des Untersuchungsgebiets lassen sich im Süden keine entsprechenden Beobachtungen machen.

## 6. Literaturverzeichnis

- Anraku, M. and M. Omori 1963: Preliminary survey of the relationship between the feeding habit and the structure of mouth parts of marine copepods. *Limnol. Oceanogr.* 8, 116 - 126
- Banse, K. 1976: Rates of growth, respiration and photosynthesis of unicellular algae as related to cell size. A review. *J. Phycol.* 12, 135 - 140
- Bauerfeind, E. 1983: Untersuchungen zur Primärproduktion und Ökologie des Phytoplanktons im zentralen äquatorialen Atlantik. Diss. Univ. Kiel, 144 pp
- Bauerfeind, E., R. Boje, E. Fahrbach, J. Lenz, M. Meyerhöfer, M. Rolke 1983: Planktological and chemical data from the equatorial Atlantic at 22°W obtained in February to June 1979 ("FGGE - Equator '79"). *Berichte aus dem Institut für Meereskunde Kiel, Nr. 110*, 157 pp
- Bauerfeind, E., C. Brockmann, E. Fahrbach, J. Meincke, H.-J. Panitz, G. Rohardt, A. Sy 1984: A compendium of the oceanographic data obtained during "FGGE -Equator '79", Cruise No. 51 of R.V. "Meteor". "Meteor" Forsch.-Ergebnisse Reihe A/B, 25, 108 pp
- Bauerfeind, E. 1986: Primary production and phytoplankton biomass in the equatorial region of the Atlantic at 22° West. *Oceanol. Acta*, im Druck
- Bé, A.W.H., M. Ewing, L.W. Linton 1959: A quantitative multiple opening and closing plankton sampler for vertical towing *J. Cons. perm. int. Explor. Mer* 25, 36 - 46
- Bé, A.W.H. 1962: Quantitative multiple opening and closing plankton samplers. *Deep-Sea Res.* 9, 144 - 151
- Bock, H.H. 1974: Automatische Klassifikation. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 480 pp
- Bölter, M., M. Meyer, B. Probst 1980: A statistical scheme for structural analysis in marine ecosystems. *Ecological Modelling* 9, 143 - 151
- Böttger, R. 1982: Studies on the small invertebrate plankton of the

- Sargasso Sea. Helgoländer Meeresunters. 35, 369 - 383
- Boyd, C.M. and G.M. Johnson 1969: Studying zooplankton populations with an electronic zooplankton counting device and the LINC-8 computer. Trans. Applic. of Sea Going Computers Symp.; Mar. Tech. Soc., pp 83 - 90
- Boyd, C.M. 1973: Small scale spatial patterns of marine zooplankton examined by an electronic in situ zooplankton detecting device. Neth. J. Sea Res. 7, 103 - 111
- Boyd, C.M. 1976: Selection of particle sizes by filter feeding copepods: A plea for reason. Limnol. Oceanogr. 21, 175 - 180
- Brooks, J.L. and S.I. Dodson 1965: Predation, body size and composition of plankton. Science 150, 28 - 35
- Buskey, E.J. 1984: Swimming pattern as an indicator of the roles of copepod sensory systems in the recognition of food. Mar. Biol. 79, 165 - 175
- Cambridge Instruments: Gebrauchsanweisung für das Bildanalysesystem "Quantimet 720". Cambridge Scientific Instruments Ltd., Cambridge, United Kingdom, Kap. 1 - 16
- Conover, R.J. 1978: Feeding interactions in the pelagic zone. Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer 173, 66 - 76
- Cooke, R.A., L.D.B. Terhune, J.S. Ford, W.H. Bell 1970: An opto-electronic plankton sizer. Fish. Res. Board Can. Tech. Rep. 172, 40 pp
- Coulter, W.H. 1957: High speed automatic blood cell counter and cell size analyzer. Proc. Natl. Electron. Conference 12 (1956), 1034 - 1042
- Cushing, D.H. and H.F. Nicholson 1966: Method of estimating algal production rates at sea. Nature 212, 310 - 311
- Cushing, D.H., H.F. Nicholson, G.P. Fox 1968: Coulter Counter for phytoplankton. In: Stein, J.R. (Ed.), Handbook of phycological methods, culture methods and growth measurements. Cambridge University Press, 1973, pp 346 - 358
- Dauphinee, T.M. 1977: Zooplankton measurements using a conductance cell. MTS-IEEE Oceans '77 Session 39B, 1 - 5
- Davis, A.S. and G.J. Paulik 1965: The design, operation and testing of

- a photoelectric fish egg counter. The Progressive Fish Culturist 27, 185 - 192
- Dietrich, A. 1980: Möglichkeiten der automatischen Bildanalyse für die Auswertung von Planktonproben. Dipl. Arbeit Univ. Kiel, 91 pp
- Dietrich, A. and G. Uhlig 1984: Stage specific classification of copepods with automatic image analysis. Crustaceana 7 Suppl., 159 - 165
- Dietrich, G. K. Kalle, W. Krauss, G. Siedler 1975: Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie. 3. neubearbeitete Auflage. Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 593 pp
- Dodson, S.I. 1970: Complementary feeding niches sustained by size selective predation. Limnol. Oceanogr. 15, 131 - 137
- Düing, W., P. Hisard, E. Katz, J. Meincke, L. Miller, K.V. Moroshkin, G. Philander, A.A. Ribinkov, K. Voigt, R. Weisberg 1975: Meanders and long waves in the equatorial Atlantic. Nature 257, 280 - 284
- El-Sayed, S.Z. and B.D. Lee 1963: Evaluation of an automatic technique for counting unicellular organisms. J. Mar. Res. 21, 59 - 73
- Fahrbach, E. and E. Bauerfeind 1982: The variability of equatorial thermocline spreading as an indication of equatorial upwelling in the Atlantic Ocean. Oceanogr. Trop. 117, 121 - 128
- Fahrbach, E. 1983: Transportprozesse im zentralen äquatorialen Atlantik und ihr Einfluß auf den Wärmehaushalt. Berichte aus dem Institut für Meereskunde Kiel, Nr. 113, 140 pp
- Fawell, J.K. 1976: Electronic measuring devices in the sorting of marine zooplankton. In: Steedmann, H.F. (Ed.) Zooplankton fixation and preservation. UNESCO Press, Paris, pp 201 - 206
- Fenchel, T. 1974: Intrinsic rate of natural increase: The relationship with body size. Oecologia 14, 317 - 326
- Flint, M.V. 1977: Trophic structure and vertical distribution of mesoplankton. Trophic groups at the Equator 97°W. Pol. Arch. Hydrobiol. 24, Suppl., 315 - 322
- Frost, B.W. 1977: Feeding behaviour of Calanus pacificus in mixtures of food particles. Limnol. Oceanogr. 22, 472 - 491

- Frost, B.W. 1980: The inadequacy of body size as an indicator of niches in the zooplankton. In: Kerfoot, W.C. (Ed.) Evolution and ecology of zooplankton communities. University Press of New England, Hanover, New Hampshire and London, England, pp 742 - 753
- Fulton, J. 1972: Trials with an automated plankton counter. J. Fish. Res. Board Can. 29, 1075 - 1078
- Fulwyler, M.J. 1966: Electronic separation of biological cells by volume. Science 150, 910 - 911
- Furuya, K. 1982: Measurement of phytoplankton standing stock using an image analyzing system. Bull. Plankt. Soc. Japan 29, 131 - 132
- Garzoli, S.L., E.J. Katz, H.-J. Panitz, P. Speth 1982: In situ wind measurements in the equatorial Atlantic during 1979. Oceanol. Acta 5, 281 - 288
- Gauld, D.T. 1966: The swimming and feeding of planktonic copepods. In: Barnes, H. (Ed.) Some contemporary studies in marine science. Allen and Unwin, London, pp 313 - 334
- Greene, C.H. 1983: Selective predation in freshwater zooplankton communities. Int. Rev. ges. Hydrobiol. 68, 297 - 315
- Greene, C.H. 1985: Planktivore functional groups and patterns of prey selection in pelagic communities. J. Plankton Res. 7, 35 - 40
- Greze, V.N., K.T. Gordijava, A.A. Shmeleva 1969: Distribution of zooplankton and biological structure in the tropical Atlantic. Proc. Symp. Oceanogr. Fish. Res. Trop. Atl. 1, 85 - 90
- Hamner, W.M., L.P. Madin, A.L. Alldredge, R.W. Gilmer, P.P. Hamner 1975: Underwater observations of gelatinous zooplankton: Sampling problems, feeding biology and behaviour. Limnol. Oceanogr. 20, 907 - 917
- Hamner, W.M. 1985: The importance of ethology for investigations of marine zooplankton. Bull. Mar. Sci. 37, 414 - 424
- Hellermann, S. 1976: Charts of the variability of the windstress over the tropical Atlantic. Deep-Sea Res. GATE-Suppl. II to Vol. 26, 63 - 75
- Herman, A.W. 1977: In situ chlorophyll and plankton measurements with

- the Batfish vehicle. MTS-IEEE Oceans '77 Session 39D, 1 - 5
- Herman, A.W. and T.M. Dauphinee 1980: Continuous and rapid profiling of zooplankton with an electronic counter mounted on a Batfish vehicle. *Deep-Sea Res.* 27A, 79 - 96
- Herman, A.W. and M.R. Mitchell 1981: Counting and identifying copepod species with an in situ electronic zooplankton counter. *Deep-Sea Res.* 28, 739 - 755
- Hewlett Packard 1976: Bedienungs- und Programmierhandbuch für den Tischrechner 9825A. Hewlett Packard, U.S.A., 169 pp
- Hoppe, G.H. 1981: Vergleichende Untersuchungen über die bakterielle Aktivität und deren Ursachen im Brackwasser der Kieler Förde und einem verunreinigten Fluß. *Habil.-Schr.*, Univ. Kiel, 127 pp
- Hülsemann, K. 1984: First results on Copepoda calanoida from the equatorial Atlantic (R.V. "Meteor" Cruise 51). *Crustaceana* 7 Suppl., 249 - 257
- Huntley, M.E., K.-G. Barthel, J.L. Star 1983: Particle rejection by Calanus pacificus: Discrimination between similiary sized particles. *Mar. Biol.* 74, 151 - 160
- Jeffries, H.P., K. Sherman, R. Maurer, C. Katsinis 1980: Computer-processing of zooplankton samples. In: Kennedy, V.S. (Ed.) *Estuarine perspectives*. Academic Press, New York, pp 303 - 316
- Jeffries, H.P., M.S. Berman, A.D. Poularikas, C. Katsinis, I. Melas, K. Sherman, L. Bivins 1984: Automatic sizing, counting and identification of zooplankton by pattern recognition. *Mar. Biol.* 78, 329 - 334
- Kaestner, A. 1967: *Lehrbuch der speziellen Zoologie*. Band I: Wirbellose 2. Teil, Crustacea. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, pp 849 - 1242
- Kamentsky, L.A., M.R. Melamed, H. Derman 1965: Spectrophotometer: New instrument for ultrarapid cell analysis. *Science* 150, 630 - 631
- Kamentsky, L.A. 1967: Spectrophotometric cell sorter. *Science* 156, 630 - 631

- Katz, E.J. and Collaborators 1977: Zonal pressure gradient along the equatorial Atlantic. *J. Mar. Res.* 35, 293 - 307
- Katz, E.J., J.G. Bruce, B.D. Petrie 1979: Salt and mass flux in the Atlantic equatorial undercurrent. *Oceanol. Acta* 5, 265 - 267
- Kerr, S.R. 1974: Theory of size distribution in ecological communities. *J. Fish. Res. Board Can.* 31, 1859 - 1862
- Kinzer, J. and K. Schulz 1985: Vertical distribution and feeding patterns of midwater fish in the central equatorial Atlantic. *Mar. Biol.* 85, 313 - 322
- Knoll, M., W. Zenk, E. Bauer 1982: Some XBT-observations on the thermal structure of the Warmwassersphäre in equatorial and lower latitudes of the eastern Atlantic. *Dt. Hydrogr. Z.* 35, 73 - 81
- Köhne, A. and P. Speth 1982: Variation of the ITCZ in the Atlantic during FGGE. *Tropical-Ocean-Atmosphere Newsletter* 9, 7
- Krey, J. 1961: Der Detritus im Meere. *J. Cons. int. Explor. Mer* 26, 263 - 288
- Landry, M.R. 1977: A review of important concepts in the trophic organization of pelagic ecosystems. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 30, 8 - 17
- Landry, M.R. 1980: Detection of prey by *Calanus pacificus*: Implications on the first antennae. *Limnol. Oceanogr.* 25, 545 - 549
- Le Borgne, R. 1977: Etude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4°W. II. Biomass et peuplements du zooplancton. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér Océanogr.* 15, 333 - 348
- Lenz, J. 1968: Die Teilchengrößenanalyse und Mengenbestimmung des Detritus in Seewasserproben. *Kieler Meeresforsch.* 24, 85 - 94
- Lenz, J. 1981: Produktionsbiologische Bedeutung von Auftriebsvorgängen im Meer. *Naturwiss. Rundschau* 34, 405 - 413
- Lienert, G.A. 1962: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, 361 pp
- Longhurst, A.R. 1976: Vertical migration. In: Cushing, D.H. and J.J. Walsh (Eds.) *The ecology of the seas*. pp 116 - 140
- Lopes, P.do C. 1983: Distribution and abundance of ichthyoplankton in

- the upper 250 m of the equatorial central Atlantic. Diss. Univ., Kiel, 132 pp
- Lough, R.G. and D.C. Potter 1983: Rapid shipboard identification and enumeration of zooplankton samples. *J. Plankton Res.* 5, 775 - 782
- Mackas, D.L., T.A. Curran, D. Sloan 1981: An electronic zooplankton counting and sizing system. *Oceans* 12, 783 - 786
- Maddux, W.S. and J.W. Kanwisher 1965: An in situ particle counter. *Limnol. Oceanogr.* 10 Suppl., R 162 - R 168
- McEwen, G.F., M.W. Johnson, Th.R. Folsom 1954: A statistical analysis of the performance of the 'Folsom Plankton Sample Splitter' based upon test observations. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. A* 7, 502 - 527
- Meyer, M. und M. Böltner 1981: Programmblock zur Strukturanalyse von Ökosystemen. Reports Sonderforschungsbereich 95, Univ. Kiel, Nr. 58, 47 pp
- Meyer, M. 1983: Strukturanalytische Untersuchungen am Phytobenthos der Kieler Bucht mittels mathematischer Methoden (zum Problem der Anwendung klassischer und moderner Konzepte in der marinen Vegetationskunde). Diss. Univ. Kiel, 251 pp
- Meyerhöfer, M. 1980: Ökologische Untersuchungen im äquatorialen Atlantik. Diplomarbeit, Univ. Kiel, 75 pp
- Mitson, R.B. 1963: Marine fish culture in Britain. V.: An electronic device for counting the Nauplii of Artemia salina L. *J. Cons. int. Explor Mer.* 28, 262 - 269
- Mullin, M.M. 1965: Size fraction of particulate organic carbon in the surface waters of the western Indian Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 10, 459 - 462
- Mullin, M.M. 1966: Selective feeding by calanoid copepods from the Indian Ocean. In: Barns, H. (Ed.) Some contemporary studies in marine science. Allen and Unwin, London, pp 545 - 554
- Neumann, G. 1969: The equatorial undercurrent in the Atlantic Ocean. *Proc. Symp. Oceanogr. Fish Res. Trop. Atl.* 1, 33 - 44
- Nishizawa, S., M. Fukuda, N. Inoue 1954: Photographic study of suspended matter and plankton in the Sea. *Bull. Fac. Fish.*

- Hokkaido Univ. 5, 36 - 40
- Ostapoff, F. 1982: More on the zonal pressure gradients in the equatorial Atlantic. *Oceanol. Acta* 5, 265 - 267
- Paffenhöfer, G.A. 1984: Food ingestion by the marine planktonic copepod Paracalanus in relation to abundance and size distribution of food. *Mar. Biol.* 80, 323 - 333
- Panitz, H.-J. 1981: Untersuchungen des meteorologischen Einflusses auf das äquatoriale Stromsystem im Atlantik während FGGE 1979. Diplomarbeit, Univ. Köln, 80 pp
- Parrish, B.B., I.G. Baxter, M.J.D. Mowat 1960: An automatic fish egg counter. *Nature* 185, 777
- Parsons, T.R. 1969: The use of particle size spectra in determining the structure of a plankton community. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 25, 172 - 181
- Parsons, T.R. and H. Seki 1969: A short review of some automated techniques for the detection and characterization of particles in seawater. *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr. Spec. Nr. (Prof. Uda's commemorative papers)*, 173 - 177
- Parsons, T.R. and R.J. LeBrasseur 1970: The availability of food to different trophic levels in the marine food chain. In: Steele, J.H. (Ed.) *Marine food chains*. Oliver and Boyd, Edinburgh, pp 325 - 343
- Parsons, T.R. 1973: The use of the Coulter Counter for the determination of marine primary productivity. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer* 32, 131 - 151
- Parsons, T.R. and M. Takahashi 1973: Environmental control of phytoplankton cell size. *Limnol. Oceanogr.* 93, 511 - 515
- Parsons, T.R., M. Takahashi, B. Hargrave 1984: *Biological oceanographic processes*. 3rd Edition. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 330 pp
- Philander, G. and W. Düing 1979: The oceanic circulation of the tropical Atlantic and its variability as observed during GATE. *Deep-Sea Res.: GATE Suppl. 2 to Vol. 26*, 1 - 28
- Platt, T. and K. Denman 1977: Organization in the pelagic ecosystem. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 30, 575 - 581

- Platt, T. and K. Denman 1978: The structure of pelagic marine ecosystems. Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer 173, 60 - 65
- Pugh, P.R. 1978: The application of particle counting to an understanding of the small-scale distribution of plankton. In: Steele, J.H. (Ed.) Spatial pattern in plankton communities. Plenum Press, New York and London, pp 111 - 129
- Raymont, J.E.G. 1980: Plankton and productivity in the Oceans. 2nd Edition Vol. 1: Phytoplankton. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 489 pp
- Raymont, J.E.G. 1983: Plankton and productivity in the Oceans. 2nd Edition Vol. 2: Zooplankton. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 824 pp
- Riley, G.A. 1963: Organic aggregations in seawater and the dynamics of their formation and utilization. Limnol. Oceanogr. 8, 372 - 381
- Rinkel, M.O. 1969: Some features of relationship between the Atlantic equatorial undercurrent and its associated salinity level. Proc. Symp. Oceanogr. Fish. Res. Trop. Atl. 1, 193 - 212
- Rolke, M. 1981: Die Biomasse des kleineren Zooplanktons in den oberen 300 m des äquatorialen Atlantiks (Ergebnisse der "Meteor-Äquator-Expedition 1979"). Diplomarbeit Univ. Kiel, 57 pp
- Rolke, M. and J. Lenz 1984: Size structure analysis of zooplankton samples by means of an automated image analyzing system. J. Plankton Res. 6, 637 - 645
- Ryther, J.H. and J.G. Sanders 1980: Experimental evidence of zooplankton control of species composition and size distribution of marine phytoplankton. Mar. Ecol. Progr. Ser. 3, 273 - 283
- Sars, G.O. 1903: An account of the crustacea of Norway. Vol. IV Copepoda Calanoida. Published by the Bergen Museum, Bergen, Alb. Commermeyer's Forlag, Christiania, 171 pp
- Schärf, J. 1979: Tischcomputer-BASIC für Anfänger. R. Oldenbourg Verlag, Wien, München, 199 pp
- Schemainda, R., W. Kaiser, D. Nehring, S. Schulz 1979: Ozeanologische Untersuchungen im tropischen Nordatlantik auf 30°W zwischen 2°N - 15°N. Geol. Geoph. Veröff., R. IV 17, 1 - 56

- Schlimpert, O., D. Uhlmann, M. Müller, E. Höhne 1980: Automated pattern recognition of phytoplankton.-Procedure and results. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 65, 427 - 437
- Semina, H.J. 1972: The size of phytoplankton cells in the Pacific Ocean. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 57, 177 - 205
- Sheldon, R.W. and T.R. Parsons 1967a: A practical manual on the use of the Coulter-Counter in marine science. Coulter Electronics, Toronto, 66 pp
- Sheldon, R.W. and T.R. Parsons 1967b: A continuous size spectrum for particulate matter in the Sea. *J. Fish. Res. Board Can.* 24, 909 - 915
- Sheldon, R.W. 1969: A universal grade scale for particulate materials. *Proc. geol. Soc. London*, 1659, 293 - 295
- Sheldon, R.W., A. Prakash, W.H. Sutcliffe, Jr. 1972: The size distribution of particles in the Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 17, 719 - 733
- Sheldon, R.W., H. Sutcliffe, Jr., A. Prakash 1973: The production of particles in the surface waters of the Ocean with particular reference to the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.* 18, 719 - 733
- Sheldon, R.W., H. Sutcliffe, Jr., M.A. Paranjape 1977: Structure of pelagic food chain and relationship between plankton and fish production. *J. Fish. Res. Board Can.* 34, 2344 - 2353
- Sieburth, J. McN., V. Smetacek, J. Lenz 1978: Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23, 1256 - 1263
- Siedler, G. 1975: Das ozeanographische Unterprogramm. *Promet, Meteorologische Fortbildung* 5, 28 - 32
- Silvert, W. and T. Platt 1980: Dynamic energy flow model of the particle size distribution in pelagic ecosystems. In: Kerfoot, W.C. (Ed.) *Evolution and ecology of zooplankton communities*. University Press of New England, Hanover, New Hampshire and London, England, pp 754 - 763
- Sorokin, C. 1973: Dry weight, packed cell volume and optical density.

- In: Stein, J.R. (Ed.) Handbook of phycological methods, culture methods and growth measurements. Cambridge Univ. Press, pp 321 - 343
- Sournia, A. 1982: Form and function in marine phytoplankton. Biol. Rev. 57, 347 - 394
- Spandl, H. 1925: Copepoda. Ruderfußkrebse. In: Schulze, P. (Ed.), Biologie der Tiere Deutschlands. Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin, pp 15.01 - 15.78
- Spiegel, M.R. 1976: Statistik. McGraw-Hill Book Company, 358 pp
- Sprules, W.G. and L.B. Holtby 1979: Body size and feeding ecology as alternatives to taxonomy for the study of limnetic zooplankton structure. J. Fish. Res. Board Can. 36, 1354 - 1363
- Steele, J.H. and B.W. Frost 1977: The structure of plankton communities. Proc. R. Soc. London Phil. Trans. B. 280, 485 - 534
- Timonin, A.G., N.M. Voronina 1977: Net plankton distribution along the equator in the eastern Pacific Ocean. Pol. Arch. Hydrobiol. 24 Suppl., 315 - 322
- Uhlmann, D., O. Schlimpert, W. Uhlmann 1978: Automated phytoplankton analysis by a pattern recognition method. Int. Rev. ges. Hydrobiol. 63, 575 - 583
- Vinogradov, M. and N. Voronina 1967: The distribution of different groups of plankton in accordance with their trophic level in the Indian equatorial current area. Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer 153, 200 - 204
- Vinogradov, M.E. 1970: The vertical distribution of the oceanic zooplankton. Izdatel'stov "Nauka" Moskva 1968. Translated from Russian, Israel programm for scientific translations, Jerusalem 1970, 339 pp
- Vinogradov, M.E. 1981: Ecosystems of equatorial upwellings. In: Longhurst, A.R. (Ed.) Analysis of marine ecosystems. Academic Press, London, pp 69 - 93
- Wehnes, H. 1984: FORTRAN 77. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 185 pp
- Weikert, H., H.-Ch. John 1981: Experiences with a modified Bē multiple opening-closing plankton net. J. Plankton Res. 3, 167 - 176

- Wilson, D.S. 1973: Food size selection among copepods. *Ecology* 54, 909 - 914
- Zeitzschel, B. 1969: Productivity and microbiomass in the tropical Atlantic in relation to the hydrographical conditions (with emphasis on the eastern area). *Proc. Symp. Oceanogr. Fish. Res. Trop. Atl.* 1, 69 - 84
- Zeitzschel, B. 1978: Oceanographic factors influencing the distribution of plankton in space and time. *Micropaleontology* 24, 139 - 159

7. Anhang

Tab. A1: Stationsdaten

Abb. A1: Hydrographische Parameter

Abb. A2: Die regionale und vertikale Verteilung der  
Biomasse des kleineren Zooplanktons (aschefreies  
Trockengewicht)

Tab. A1: Stationsdaten eines Stationsschnitts der "Meteor-Äquator-expedition 1979". Angegeben sind Stationsnummer, Datum, Zeitpunkt der Probennahme (GMT) und geographische Positionsangaben

Datum	Stat.Nr.	Zeit (GMT)	Geographische	
			Breite	Länge
02.02.79	10	09.45	03°00.5'N	22°00.0'W
02.02.79	11	13.20	02°45.7'N	22°01.0'W
02.02.79	13	19.25	02°19.2'N	22°01.8'W
03.02.79	15	02.30	01°45.6'N	22°01.4'W
03.02.79	17	09.30	01°20.2'N	22°00.6'W
03.02.79	18	14.00	01°01.9'N	21°58.8'W
03.02.79	20	20.15	00°39.9'N	22°01.6'W
04.02.79	22	01.15	00°20.2'N	21°59.8'W
04.02.79	24	07.45	00°00.7'N	22°00.2'W
04.02.79	27	19.17	00°18.6'S	22°59.6'W
05.02.79	29	00.43	00°39.3'S	21°59.9'W
05.02.79	31	06.09	00°59.9'S	21°58.0'W
05.02.79	33	11.47	01°20.3'S	21°59.7'W
05.02.79	35	20.47	01°45.0'S	22°00.1'W
06.02.79	36	00.43	02°00.0'S	22°00.1'W

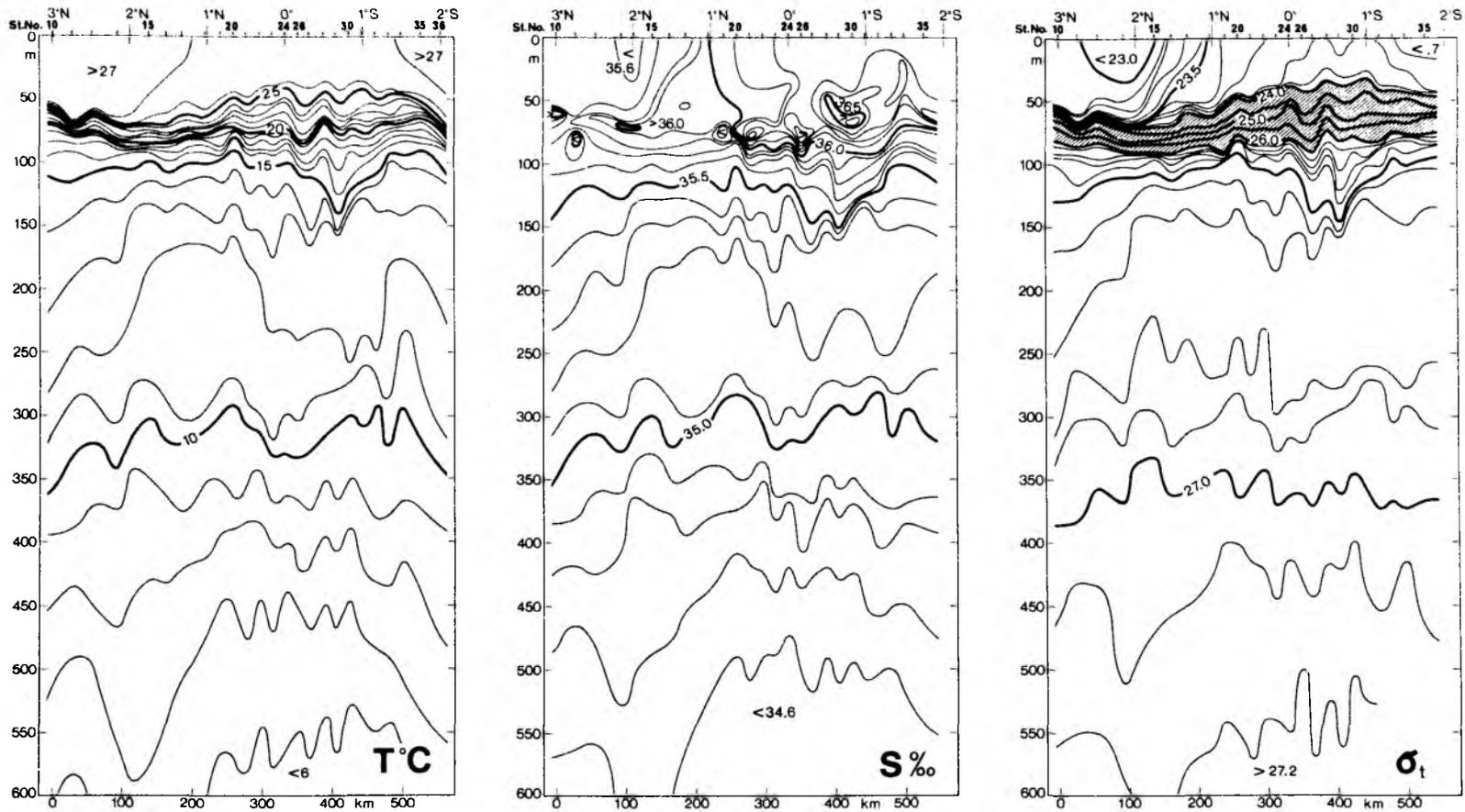


Abb. A1: Die Temperatur-, Salzgehalts- und Dichteverteilung im zentralen äquatorialen Atlantik bis 600 m Tiefe. (Stationsschnitt von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 02.02. bis 06.02.1979) (aus Bauerfeind et. al., 1984)

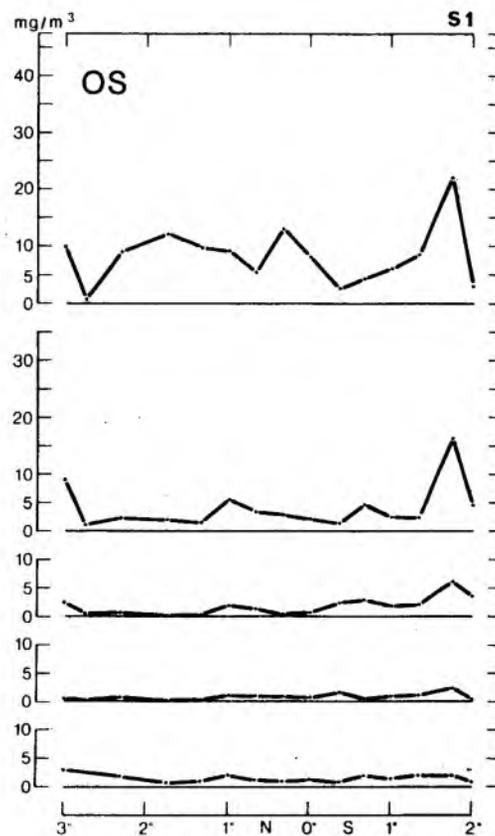


Abb. A2: Die regionale und vertikale Verteilung der Biomasse des kleineren Zooplanktons (aschefreies Trockengewicht, 'OS') in  $\text{mg}/\text{m}^3$  in den fünf Tiefenstufen bis 300 m Tiefe im zentralen äquatorialen Atlantik. (Stationsschnitt von 3°N nach 2°S auf 22°W in einem Zeitraum vom 02.02. bis 06.02.1979)(aus Rolke, 1981)