

BARBARA MARIA SPRINGER

**MODIFIKATION DES BODENNAHEN
STRÖMUNGSREGIMES UND DIE
DEPOSITION VON SUSPENDIERTEM
MATERIAL DURCH MAKROFAUNA**

74

GEOMAR REPORT



BARBARA MARIA SPRINGER

**MODIFIKATION DES BODENNAHEN
STRÖMUNGSREGIMES UND DIE
DEPOSITION VON SUSPENDIERTEM
MATERIAL DURCH MAKROFAUNA**

GEOMAR
Forschungszentrum
für marine Geowissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

KIEL 1999
GEOMAR REPORT 74

GEOMAR
Research Center
for Marine Geosciences
Christian Albrechts University
in Kiel

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
zum Druck genehmigt am 8.5.1996

Redaktion der Reihe: Gerhard Haass

Managing Editor: Gerhard Haass

GEOMAR REPORT
ISSN 0936 - 5788

GEOMAR REPORT
ISSN 0936 - 5788

GEOMAR
Forschungszentrum
für marine Geowissenschaften
Wischhofstr. 1-3
D - 24148 Kiel
Tel. (0431) 600-2555, 600-2505

GEOMAR
Research Center
for Marine Geosciences
Wischhofstr. 1-3
D - 24148 Kiel
Tel. (49) 431 / 600-2555, 600-2505

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Material und Methoden	5
2.1	Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht	5
2.1.1	Stationsbeschreibung	5
2.1.2	Probennahme	8
2.1.3	Feldexperiment	9
2.1.4	Aufarbeitung der Sedimentproben	10
2.2	Der Strömungskanal	11
2.2.1	Theorie der bodennahen Strömung	11
2.2.2	Konzept und Bau	15
2.2.3	Strömungsmessung	19
2.3	Experimente im Strömungskanal	21
2.3.1	Hälterung der Proben für die Strömungskanalexperimente	21
2.3.2	Bestimmung der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit	22
2.3.3	Einfluß biogener Strukturen auf das Strömungsprofil	22
2.3.4	Verhalten von Makrofauna unter verschiedenen Strömungsbedingungen	24
2.3.5	Partikeldeposition	24
3	Ergebnisse	30
3.1	Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht	30
3.1.1	Meteorologische und hydrographische Situation	30
3.1.2	Korngrößenzusammensetzung	36
3.1.3	Makrofaunagemeinschaften	36
3.1.4	Sedimentanalysen	42
3.1.5	Feldexperiment	46
3.2	Strömungskanal und Laborexperimente	51
3.2.1	Hydrodynamische Eigenschaften des neugebauten Strömungskanals	51
3.2.2	Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit	54
3.2.3	Modifikation der Strömungsprofile durch biologische Strukturen	56
3.2.4	Verhalten der Makrofauna unter verschiedenen Strömungsbedingungen	65
3.2.5	Partikelaufnahme und Deposition	67

4 Diskussion	83
4.1 Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht	83
4.1.1 Hydrographie	83
4.1.2 Makrofauna	84
4.1.3 Durchmischung des Sedimentes	86
4.1.4 Feldexperiment	88
4.2 Eignung des neuen Strömungskanals für Untersuchungen in der BBL	89
4.3 Biologische und physikalische Prozesse im Vergleich	92
4.3.1 Biogene Strukturen und das Strömungsregime	92
4.3.2 Die Aktivität und Biodepositionsleistung der untersuchten Makro- fauna	95
5 Zusammenfassung	100
A Literatur	102
B Makrofaunadaten	108
C Chlorophyllgehalte im Sediment	112

1 Einleitung

„The sea floor rarely is smooth“ (YAGER *et al.*, 1993).

Neben rein topographischen Gegebenheiten verändern Tiere, die im und auf dem Boden leben, durch ihre Aktivität und Bauten kontinuierlich die Oberflächenstruktur und damit das bodennahe Strömungsregime (JUMARS UND NOWELL, 1984; SELF *et al.*, 1989).

Die von der benthischen Makrofauna verursachten Stoff- und Partikeltransporte waren ein Schwerpunkt des BMBF-Projektes „Massenfluß von organischem Kohlenstoff, Nährsalzen und Spurenelementen zwischen Sediment und Wasser der Mecklenburger Bucht“.

Die Mecklenburger Bucht gehört hydrographisch zum Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee und ist eines der salzreicheren Gebiete der Ostsee mit ausgeprägter haliner Schichtung. Zwischen den beiden Wasserkörpern sind Austauschprozesse erschwert und Sauerstoff kann nicht an die untere Schicht weitergegeben werden. So kommt es gerade im Sommer während langanhaltender Stagnationsperioden häufig zu Sauerstoffmangel in den bodennahen Wasserschichten.

Zur Quantifizierung der o.g. Prozesse wurde ein dualer Ansatz gewählt: Einerseits die Beschreibung der Makrofaunaassoziation unter den eben genannten hydrographischen Bedingungen und ein Feldexperiment zur Modifikation des bodennahen Wasserkörper - andererseits detaillierte Studien zur Partikelaufnahme und -deposition, sowie zur Modifikation des bodennahen Strömungsregimes durch die Makrofauna.

Um diese zum Teil eng verknüpften und kleinskaligen Vorgänge für das Untersuchungsgebiet im Labor unter möglichst naturnahen Bedingungen nachstellen zu können, wurde ein Strömungskanal gebaut, der die Simulation naturnaher Bedingungen gewährleistet.

Strömungskanäle haben sich in der Benthosökologie bewährt (z.B. VOGEL (1981); MUSCHENHEIM *et al.* (1986)). Der hier benutzte Strömungskanal lehnt sich in weiten Teilen an die Vorgaben von VOGEL (1981) an. Ein jedoch besonderer Vorteil ergibt sich einerseits in der Möglichkeit, einen Mikrokosmos in der Testsektion selbst erstellen und beobachten zu können oder Multicorerkerne direkt einzusetzen. Andererseits wurde dieser Strömungskanal mit einer Verfahrenseinheit versehen, die präzise Positionierung von Sensoren und Überwachungsoptik gewährleistet. Zudem bietet sich durch Verwendung eines neuartigen Strömungssensors auf Akustik-Doppler-Basis die Möglichkeit, Strömung auch an kleinen Objekten, unbeeinflusst durch den Sensor selbst, kleinskalig zu messen.

Mit Hilfe künstlicher Tracer (Mikrosphären) wurden Versuche zur Partikeldeposition (WITTE, 1994; ZIEBIS, 1992) durchgeführt.

Folgende übergeordneten Fragen sollten beantwortet werden:

- Welchen aktiven und passiven Einfluß hat die Makrofauna auf das bodennahe Strömungsregime?
- Lassen sich Unterschiede in der Biodepositionsleistung einzelner Makrofaunaarten feststellen?
- Welche Bedeutung hat die Biodepositionsleistung der Makrofauna für die Kohlenstoffbilanz der Mecklenburger Bucht?

2 Material und Methoden

2.1 Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht

2.1.1 Stationsbeschreibung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Projektes „Massenfluß von organischem Kohlenstoff, Nährsalzen und Spurenelementen zwischen Sediment und Wasser der Mecklenburger Bucht“, Teilprojekt „B“, angefertigt. Es fanden 11 Ausfahrten statt, die zeitlich so gelegt wurden, daß zu verschiedenen Jahreszeiten Probennahmen stattfanden. Die Termine sind in Tabelle 2.1 angegeben:

Tabelle 2.1: Ausfahrtstermine

Termin	Schiff
01.02.–05.02.93	FS „Alkor“
03.05.–07.05.93	FS „A.v. Humboldt“
30.08.–03.09.93	FS „Alkor“
20.11.–23.11.93	FS „Alkor“
01.02.–07.02.94	FS „A.v. Humboldt“
20.04.–25.04.94	FS „Alkor“
10.10.–12.10.94	FK „Littorina“
07.11.–11.11.94	FS „Alkor“
20.02.–22.02.95	FK „Littorina“
06.09.95	FK „Littorina“
12.09.–15.09.95	FK „Prof. A. Penck“

Beprobt wurden auf jeder Ausfahrt zwei in Nord-Süd-Richtung verlaufende Transekte mit jeweils vier Stationen. Eine Ausnahme bildet die Ausfahrt am 06.09.95 in die Kieler Bucht. Dort wurde auf einer makrofaunareichen Station Material für eine vergleichende Untersuchung gesammelt. Die Abbildung 2.1 zeigt das Untersuchungsgebiet Mecklenburger Bucht mit den Stationen und ihren Bezeichnungen, sowie die Sedimenttypen nach SCHULZ (1969). Das innere Transekt mit den Stationen 23o, 23a und 23c liegt küstennah in dem inneren Bereich der Mecklenburger bzw. der Lübecker Bucht. Hier liegen die Stationen jeweils eine halbe Seemeile auseinander. Das äußere Transekt mit den Stationen 12o, 12a und 12c liegt in der äußeren Mecklenburger Bucht. Die einzelnen Stationen liegen hier 2 Seemeilen auseinander.

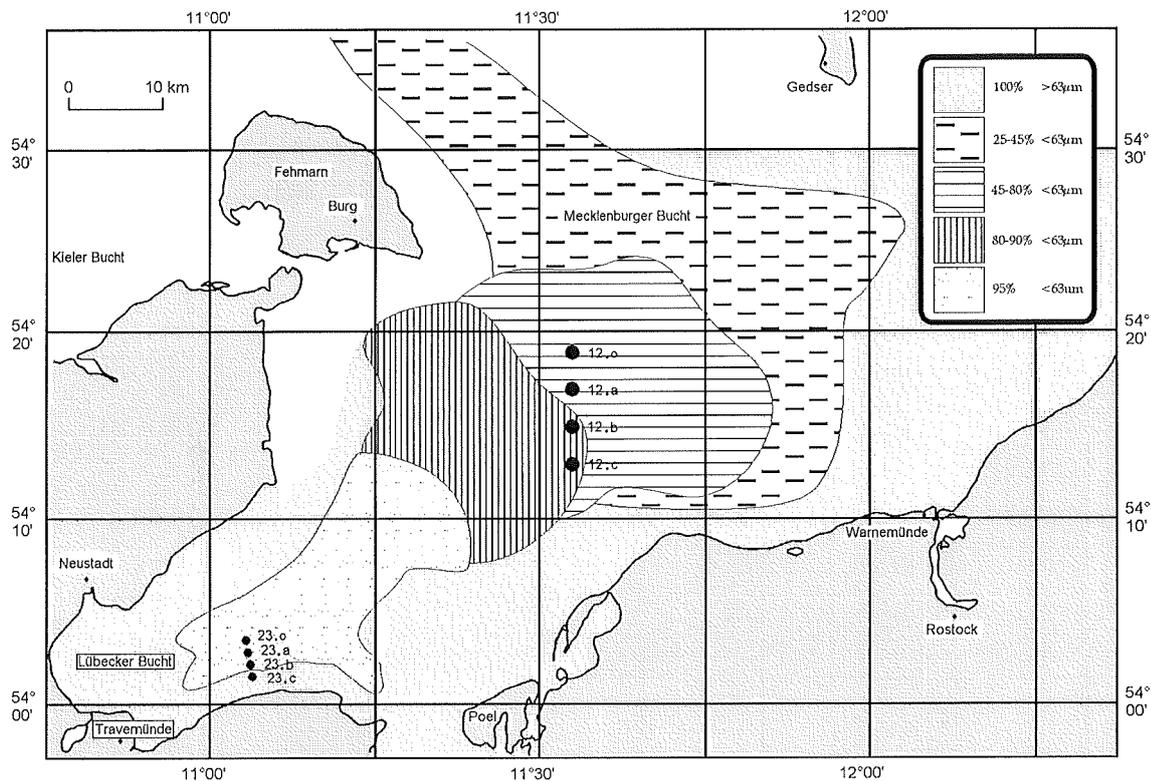


Abbildung 2.1: Die Mecklenburger Bucht mit den von SCHULZ (1969) veröffentlichten Sedimenttypen (ergänzt nach RUCK (1952)) im Schema.

Die Auswahl der Stationen erfolgte nach dem Gesichtspunkt, die unterschiedlichen Sedimenttypen im Gebiet zu beproben. Station 12o ist zudem eine langjährige HELCOM Monitoring-Station. In Abbildung 2.1 ist schematisch die Sedimentverteilung nach SCHULZ (1969) dargestellt, die allerdings nach jetzigen Erkenntnissen nicht mehr uneingeschränkt gültig ist. Die Klassifizierung der Sedimente wurde hier von KOLP (1966) übernommen. Die küstennahen Bereiche (s. Abb. 2.1) stellen sandige Sedimente ($>63 \mu\text{m}$) dar. Koordinaten und Wassertiefe der einzelnen Stationen sind in der Tabelle 2.2 dargestellt.

Die Stationen liegen, Ausnahme Station 23c, im Bereich eines ausgedehnten Schlickgebietes, das sich in der mittleren Bucht unterhalb einer Tiefe von 24 m befindet. Station 23c mit ihren 16 m Wassertiefe zeichnet sich durch sandiges Sediment aus, alle anderen Stationen haben schlickigen Untergrund (siehe auch Abb. 2.1 und 3.3).

Die Mecklenburger Bucht wird ozeanographisch zum Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee gerechnet. Die Strömung in der zentralen Mecklenburger Bucht im direkten Durchgang zur Ostsee wird im wesentlichen von den großräumigen Strömungsverhältnissen zwischen Kattegat und Ostsee geprägt. Gezeitenströme, Triftströmungen und Strömungsanteile aus dem unterschiedlichen Dichteaufbau der Wassermassen oder aus

Tabelle 2.2: Die Stationen und ihre Koordinaten.

Station	Koordinaten		Wassertiefe
12o	54° 18,90'N	11° 33,00' E	26 m
12a	54° 16,90'N	11° 33,00' E	26 m
12b	54° 14,90'N	11° 33,00' E	26 m
12c	54° 12,90'N	11° 33,00' E	26 m
23o	54° 03,50'N	11° 03,30' E	24 m
23a	54° 02,85'N	11° 03,50' E	24 m
23b	54° 02,15'N	11° 03,80' E	24 m
23c	54° 01,60'N	11° 04,00' E	16 m

Eigenschwingungen der Ostsee spielen eine nur untergeordnete Rolle. Für die westliche Mecklenburger Bucht mit der Lübecker Bucht gewinnen die windbedingten Gefälleströmungen zwischen Kattegat und Ostsee erst bei länger andauernden Ein- und Ausstromlagen an Bedeutung. Ein Beispiel für ein typisches Strömungsmuster ist in Abbildung 2.2 nach FENNEL UND STURM (1992) dargestellt. Bei Einstromlagen aus dem Kattegat fließt bodennah salzreiches Wasser in die Bucht ein. Die Bodenströmung verläuft weitgehend küstenparallel und wird durch die Corioliskraft im Uhrzeigersinn abgelenkt. Topographische Variationen im Küstenbereich bewirken die Bildung von Eddies (Wasserwirbel) (FENNEL UND STURM, 1992). Im Oberflächenbereich findet der Ausstrom von salzarmem Wasser statt.

Die Oberflächenströmungsgeschwindigkeit kann bei geringen Windgeschwindigkeiten relativ hoch sein (ca. 50 cm s^{-1}), da die Strömungen nicht nur durch das örtliche und großräumige Windfeld beeinflusst werden, sondern auch durch die Schichtung des Wassers, durch Ein- und Ausstrom sowie durch Wasserstandsunterschiede. Das Windfeld steuert dennoch das Strömungsregime dahingehend, daß Ostwindlagen gut entwickelte „Jet-Ströme“ entlang der Küste entstehen lassen, während bei Westwind-Situationen Eddie-Muster dominieren (FENNEL UND STURM, 1992). Die Bodenströmung wird stark durch die Küstenkonfiguration und die Bodentopographie beeinflusst. In der westlichen Bucht waren nach LANGE (1987) in 8 m Tiefe rund 45% und in 4 m über dem Meeresgrund etwa 66% aller über mehrere Jahre beobachteten Strömungsgeschwindigkeiten kleiner als 13 cm s^{-1} . Weitere Details über die Hydrographie der Mecklenburger Bucht werden in Zusammenhang mit eigenen Daten in der Diskussion erörtert.

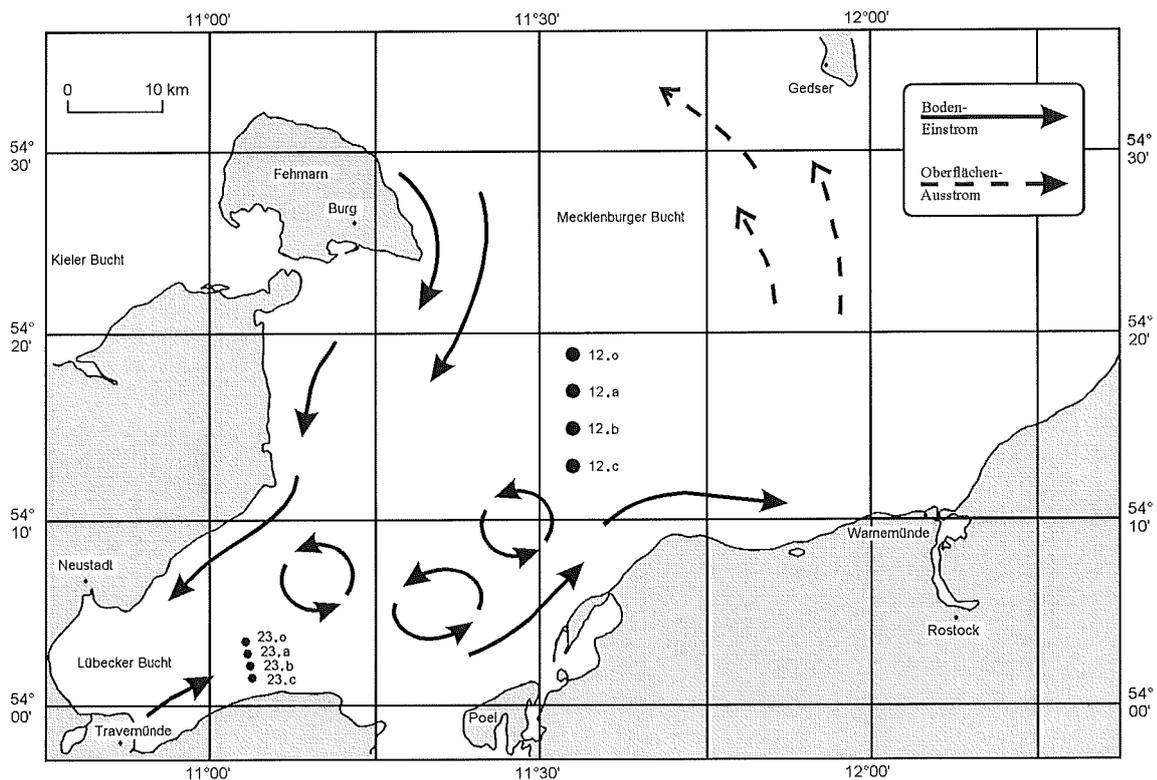


Abbildung 2.2: Die Mecklenburger Bucht mit den Stationen und dem von FENNEL UND STURM (1992) als typisch erachteten Strömungsmuster.

2.1.2 Probennahme

Zunächst wurden an jeder Station die Vertikalprofile von Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt mit einer CTD-Sonde der Firma *ME* bzw. bei den Ausfahrten mit der „Alexander von Humboldt“ mit der CTD, die im Institut für Ostseeforschung in Warnemünde entwickelt wurde, aufgenommen. Dies diente zur Ermittlung des Durchmischungsgrades der Wassersäule und zur Charakterisierung des bodennahen Wasserkörpers aus dem später mit einer Impeller-Pumpe Bodenwasser für die Hälterung der Proben und die Kanalexperimente gefördert wurde.

Für die Beprobung des bodennahen Wasserkörpers wurde während der Projektausfahrten in den Jahren 1993 und 1994 der bei THOMSEN *et al.* (1994) beschriebene Bodenwasserschöpfer eingesetzt. Ein Kompaß und eine Überwachungskamera dienten zur Ermittlung der Strömungsrichtung.

An einem Ausfahrtstermin (Feb. 1994) stand ein ADCP (**A**coustic **D**oppler **C**urrent **P**rofiler) des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) zur Verfügung. Dieser Strömungssensor arbeitet nach dem Doppler-Prinzip (wird in Abschnitt 2.2.3 erläutert).

Die vertikale Tiefenauflösung beträgt 1 m. Weitere Strömungsmessungen wurden aus Videoaufnahmen einer Partikelkamera (THOMSEN *et al.*, *eing.*) durchgeführt. Alle meteorologischen Parameter stammen von der Wetterstation Boltenhagen und wurden für die Zeiträume der Ausfahrten aufgezeichnet. Die Datensätze wurden seitens des Deutschen Wetteramtes nicht geprüft und korrigiert. Zudem liegen meteorologische Aufzeichnungen der jeweiligen Schiffswetterstationen vor.

An allen Stationen wurden Sedimentkerne mit einem Multicorer (10 cm Rohrendurchmesser) oder einem Großkastengreifer mit Einsatz für Sedimentkerne (20 cm Rohraußendurchmesser) entnommen, die für die Bestimmung von Korngrößen, Chlorophyll- und ATP-Gehalt im Sediment und für Experimente im Strömungskanal dienen sollten. Aus den Chlorophylläquivalentgehaltsprofilen im Sediment wurden Bioturbationskoeffizienten nach SUN *et al.* (1991) errechnet, um die Durchmischung der obersten Sedimentschichten durch Aktivität der Makrofauna, wie Nahrungsaufnahme, abzuschätzen.

Die Makrofauna wurde pro Station aus 3 Großkastengreifern oder aus 5 van Veen-Greifern mit einem 1000 μm -Sieb gesiebt und in einem 4% igem, boraxgepufferten Formalin-Seewassergemisch bis zur Zählung aufbewahrt. Da die Makrofauna sehr fleckenhaft verteilt ist, wurde zur besseren Abschätzung dieser „patchiness“ im Februar 1995 zusätzlich ein Videoschlitten (RUMOHR, 1995) eingesetzt, der über die Stationen gezogen wurde. Im September 1995 wurden ebenfalls kurze Videoaufnahmen in der Nähe der Stationen gemacht. Außerdem standen Protokolle von Forschungstauchern zur Verfügung.

Für die Strömungskanalexperimente wurden lebende Exemplare der typischen Makrofaunavertreter sowie bei jeder Ausfahrt Bodenwasser in ausreichender Menge (ca. 400 ℓ) gesammelt.

2.1.3 Feldexperiment

Während der Ausfahrt im November 1994 wurde ein Experiment zur Modifizierung des Bodenwasserkörpers (THOMSEN *et al.*, 1995) in Bezug auf gelöste Stoffe und Seston (TPM) durch die benthische Makrofauna durchgeführt. Dabei wurde, ausgehend von Station 12c, der bodennahe Wasserkörper mit dem Schiff sozusagen „begleitet“ und auf einer Länge von knapp 2 Seemeilen viermal mit dem Bodenwasserschöpfer beprobt (500, 1000, 1500 und 2000 m). Zunächst wurden die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung an der Ausgangsstation bestimmt. Dann wurde abgeschätzt, wann der bodennahe Wasserkörper ungefähr die nächste Station erreichen würde (ungefähr nach 2,7 h) und versucht, dort dann die nächste Probe zu nehmen. Die meteorologischen Parameter Windrichtung und -geschwindigkeit wurden während des gesamten Experimentzeitraumes von 12 Std. aufgenommen.

An jeder Station wurden mit dem Bodenwasserschöpfer in der BBL Wasserproben in vier Höhen über Grund (5,10,20 und 40 cm über Grund) entnommen und später im Labor auf den Gehalt an partikulärem Material (engl. TPM), Chlorophylläquivalentgehalt, Gehalt an partikulärem organischen Kohlenstoff (engl. POC), Bakterienabundanz und Harnstoff untersucht (JÄHMLICH, 1996). Multicorerkerne und Großkastengreiferproben für die Makrofaunabestimmung und für Laborexperimente im Strömungskanal wurden wie im Standardprogramm genommen.

2.1.4 Aufarbeitung der Sedimentproben

Korngrößenanalyse: Die einzelnen Sedimentproben (ca. 5 ml) wurden zunächst in ca. 200 ml Aqua dest. für 48 h in einen Schüttler gegeben. Danach wurden sie zweimal je 4 Minuten lang durch ein 63 μm -Sieb naß gesiebt. Die >63 μm -Kornklasse wurde durch weiteres nasses Sieben in eine 63–125 μm -Fraktion und in eine 125–200 μm -Fraktion unterteilt. Der Probenanteil <63 μm wurde wieder für 24 Stunden im Schüttler geschüttelt und anschließend durch Schlämzung in einem Atterberg-Zylinder weiter in die Fraktionen <6,3 μm , 6,3–20 μm und 20–63 μm aufgetrennt (MÜLLER, 1964). Die beiden kleineren Fraktionen wurden jeweils durch sieben Einzelschlämmungen abgetrennt. Für die gesamte Korngrößenanalyse wurde destilliertes Ammoniakwasser verwendet. Dieser Zusatz wirkt als Stabilisator und verhindert weitgehend die Koagulation. Der Gewichtsanteil jeder Fraktion an der Gesamtprobe wurde nach der völligen Trocknung (bei 60 °C) durch Wägung bestimmt.

Chlorophyllgehalt im Sediment: Die Verteilung der Chlorophylläquivalente spiegelt einerseits den Eintrag von absinkenden Partikeln aus der euphotischen Zone des Wasserkörpers wieder, andererseits wird die Tiefenverteilung der Pigmente durch die Lebensäußerungen der Meio- und Makrofauna, wie zum Beispiel das Anlegen von Bauten, die Nahrungssuche und die Fortbewegung im Sediment (ALLER, 1982), beeinflusst.

Wenn der Transport der Partikel im Sediment ungerichtet und zufällig erfolgt, kann in der Analogie zur Eddie-Diffusion in Wasserkörpern von einem diffusionsähnlichen Prozeß ausgegangen werden (GUINASSO UND SCHINK, 1975). In diesem Fall ist es möglich, einen Bioturbationskoeffizienten D_B mit Hilfe der Gleichung:

$$C(z) = (C_0 - C_\infty) \exp\left(-z \sqrt{\frac{k_d}{D_B}}\right) + C_\infty \quad (2.1)$$

mit

- z : Tiefe im Sediment,
- $C(z)$: Chlorophyllkonzentration im Sediment in der Tiefe z ,
- C_0 : Chlorophyllkonz. für $z=0$,
- C_∞ : Chlorophyllkonz. für $z=\infty$,
- D_B : Bioturbationskoeffizient,
- k_d : Chlorophyllabbaurate (Annahme: konst. in allen Tiefen),

basierend auf dem Modell von BERNER (1980), modifiziert nach SUN *et al.* (1991), zu berechnen. Die Koeffizienten k_d , D_B , C_0 und C_∞ werden an die gemessenen Werte (C_i und z_i) nach dem Prinzip der Minimierung der Fehlerquadrate angepaßt. Ein Maß für die Anpassungsgüte stellt der MSE^* -Wert dar (SACHS, 1992), der wie folgt definiert wird:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C(z_i) - C_i)^2, \quad (2.2)$$

wobei C_i der i -te gemessene Chlorophylläquivalentgehalt, z_i die dazugehörige Tiefe und n die Anzahl der Wertepaare darstellt. Aus Gleichung (2.1) kann man außerdem folgern, daß nur drei Parameter für die Anpassung notwendig sind. Dies sind C_0 , C_∞ und das Verhältnis (k_d/D_B). Demzufolge kann der gesuchte D_B -Wert mit einem bekannten k_d -Wert ermittelt werden.

In dieser Arbeit wurde der Chlorophyllgehalt im Sediment (C_i) nach EDLER (1979) bestimmt.

ATP-Gehalt im Sediment: ATP wurde als Maß für die Biomasse der Meiofauna nach GRAF (1979) bestimmt. Drei Unterproben von 1 cm^3 aus jeder Tiefe eines Multicorerkernes wurden mit kochendem Trispuffer extrahiert und nach der Methode von WITZEL (1979) gemessen und gemittelt. Die Wiederfundrate wurde nach GRAF (1979) bestimmt.

2.2 Der Strömungskanal

2.2.1 Theorie der bodennahen Strömung

An der Grenze zwischen Sediment und Wasser ist die Strömungsgeschwindigkeit theoretisch Null. Grund dafür ist die „no-slip condition“ (z.B. MANN UND LAZIER (1991)), die

*Mean Square Error

besagt, daß Wassermoleküle, die in Kontakt mit einer festen Oberfläche gelangen, an ihr hängenbleiben. Rein physikalisch gesehen muß die Flüssigkeit die Reibung an der festen Oberfläche überwinden, wodurch ein lineares Druckgefälle in der Flüssigkeit erzeugt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wird also vom Boden aus in die Wassersäule hin zunehmen (siehe Abb. 2.3).

Zur Charakterisierung des Strömungsvorganges wird die dimensionslose Reynoldszahl herangezogen. Man unterscheidet so laminare, gleichförmige Strömungsvorgänge von turbulenten, nicht gleichförmigen Strömungsvorgängen. Für Flüssigkeiten ist die Reynoldszahl definiert als:

$$R_e = \frac{u l}{\nu} \quad (2.3)$$

mit

- R_e : Reynoldszahl, dimensionslos,
- u : Strömungsgeschwindigkeit,
- l : charakteristische Länge,
- ν : kinematische molare Viskosität. Sie beträgt
für Seewasser $\sim 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Dieser Ausdruck wurde ursprünglich zur Unterscheidung von Laminarität und Turbulenz von Strömungen in Rohren benutzt. Für die freie Fließstrecke wird der Rohrdurchmesser durch die charakteristische Länge l ersetzt. Je größer die Reynoldszahl wird, desto turbulenter ist die Strömung. Wenn $R_e < 40$ wird die Strömung als laminar, bei $40 < R_e < 200000$ gerichtet turbulent und bei Werten > 200000 als vollständig turbulent bezeichnet (z.B. VOGEL (1981)). Diese Angaben sind als Richtwerte zu verstehen.

Im Meer herrschen vorwiegend turbulente Verhältnisse mit Werten für R_e von über 100000. Der Bereich der Wassersäule, der vom Meeresboden aufwärts bis in die Höhe von 99% der Freistromgeschwindigkeit u_∞ reicht, wird als bodennahe Grenzschicht (engl. „benthic boundary layer“, kurz BBL) bezeichnet (MANN UND LAZIER, 1991). Dies ist eine theoretische Grenzziehung, deren Festlegung über Modelle entwickelt wurde. VOGEL (1981) gibt für die Höhe der BBL z.B. schon einen Wert von 90% der Freistromgeschwindigkeit als ausreichend an. Sie wird in dieser Arbeit in Zusammenhang mit eigenen Ergebnissen mit v_∞ bezeichnet, um eine einheitliche Bezeichnung mit den gemessenen Geschwindigkeitsvektoren $v_{x,y,z}$ im Kanal zu erhalten.

Die Terminologie der BBL ist in der Abbildung 2.3 nach JUMARS (1993) in einer Übersicht dargestellt. Der Bereich des Profils, der logarithmisch verläuft, wird als logarithmische Schicht (engl. „log-layer“) bezeichnet. Innerhalb dieser Schicht ist die Wasser-

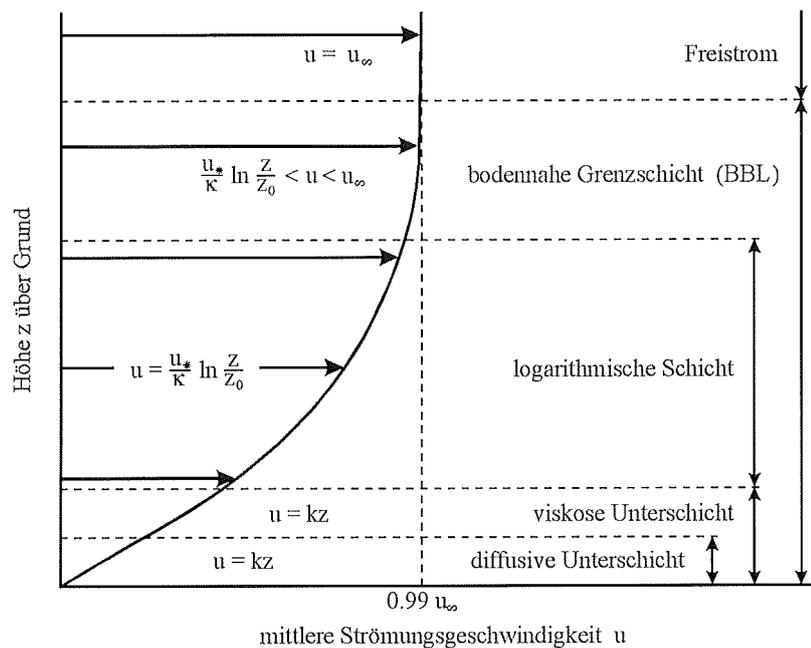


Abbildung 2.3: Theoretisches Strömungsprofil und die Terminologie der Boundary Layer modifiziert nach JUMARS (1993).

bewegung gerichtet turbulent. Oberhalb dieser Schicht ist die Steigung der Kurve nur noch gering, bis die freie Fließgeschwindigkeit erreicht ist. Unterhalb der logarithmischen Schicht kann sich bei sehr langsamen Strömungsgeschwindigkeiten und sehr glattem Untergrund eine viskose Unterschicht einstellen. In ihr ist die Strömung laminar und die Geschwindigkeit steigt linear mit der Höhe über Grund an. Darunter befindet sich die diffusive Unterschicht von weniger als $100 \mu\text{m}$ Schichtdicke, in der theoretisch nur noch viskose Kräfte herrschen. Diese vereinfachten Beschreibungen gelten nur bei horizontal gleichförmiger Bodenmikrotopographie und bei gleichmäßiger Strömung. Die Höhe der einzelnen Anteile der BBL werden bei verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert. So gibt GUST (1989) für Schelfgebiete die Höhe der logarithmischen Schicht mit 5 m und die der viskosen Unterschicht mit 0,1–1 cm an. NOWELL UND JUMARS (1987) geben die Höhe der logarithmischen Schicht mit 30% der gesamten Grenzschicht an.

Die Bodenschubspannung τ_0 (die Kraft, die von der Strömung auf die Einheitsoberfläche ausgeübt wird) ist die Größe, der im Zusammenhang mit Resuspension, Erosion und Sedimenttransport große Bedeutung zukommt. Da sie jedoch schwer zu messen ist, wird in der Strömungsmechanik die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* benutzt, die mit τ_0 über folgende Gleichungen zusammenhängt:

$$\tau_0 = u_*^2 \varrho = u_* \varrho z \kappa \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.4)$$

mit

- τ_0 : Schubspannung,
- u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit,
- ϱ : Dichte des strömenden Mediums,
- z : Höhe über Grund ($z > 0$),
- κ : von Kàrmàn Konstante (0,4).

Durch Integration des rechten Terms der Gleichung (2.4) erhält man:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) . \quad (2.5)$$

Verwendet man statt des natürlichen den dekadischen Logarithmus (z.B. MIDDLETON UND SOUTHARD (1984)), so ergibt sich Gl. (2.5) zu:

$$u(z) = \frac{\ln(10)}{\kappa} u_* \log_{10} \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.6)$$

$$= 5,75 u_* \log_{10} \left(\frac{z}{z_0} \right) . \quad (2.7)$$

Ist z_0 und $u(z)$ in einer bestimmten Höhe z bekannt, läßt sich u_* mit der Formel:

$$u_* = \frac{u(z)}{5,75 \log_{10}(z/z_0)} \quad (2.8)$$

bestimmen. Nach SCHAUER (1982) reicht allerdings in der Praxis eine einmalige Messung von $u(z)$ nicht aus, um u_* hinreichend genau bestimmen zu können. Sie schlägt daher die Aufnahme von mindestens 6 Meßwertepaaren $u(z_i)$ vor, an die dann das logarithmische Strömungsprofil mit den zu bestimmenden Parametern u_* und z_0 anzupassen ist. Nachfolgend kann mit Gleichung (2.4) auch τ_0 bestimmt werden.

Der Rauigkeitsparameter z_0 ergibt sich bei der Integration als eine Art virtueller Nullpunkt für das logarithmische Strömungsprofil an der Stelle, wo die Ordinate (Höhe über Grund) geschnitten wird. Seine Größe steht in Zusammenhang mit der Bodenrauigkeit oder herausragenden Elementen (Makrofauna) und kann, solange sich die Bodenbeschaffenheit nicht ändert, als konstant angesehen werden.

Eine Möglichkeit, die Art des Strömungsregimes direkt in der BBL (Abb. 2.3) zu bewerten, kann über die sogenannte Grenzreynoldszahl R_{e*} geschehen (JUMARS, 1993):

$$R_{e_*} = \frac{\varrho u_* d}{\mu} \quad (2.9)$$

mit

- ϱ : Dichte des strömenden Mediums,
- u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit,
- μ : dynamische Viskosität des Seewassers,
- d : mittlere Höhe der Bodenmikrotopographie.

Bei stark turbulentem Regime ist $R_{e_*} > 100$ und bei schwacher Turbulenz $R_{e_*} < 3,5$ (JUMARS, 1993).

2.2.2 Konzept und Bau

Anforderungen: Für diese Arbeit wurde ein Strömungskanal gebaut, der benthosökologische Untersuchungen möglich macht. Das heißt zunächst, daß das bodennahe hydrodynamische Regime in einer hinreichend genauen Weise nachgestellt werden kann. Weitere Anforderungen sind:

- Da mit Salzwasser und lebenden Tieren gearbeitet wird, müssen alle Materialien korrosionsfrei und ungiftig sein.
- Originalproben (in Form von Sedimentkernen) sollten ungestört in den Kanal eingebracht werden können.
- Das Wasser muß temperierbar sein, um bei unterschiedlichen Temperaturen arbeiten zu können.
- Die Strömungsgeschwindigkeit sollte mit Freistromgeschwindigkeiten von 0,5 bis 20 cm s⁻¹ regelbar sein.
- Die zwei Längsseiten sollten durchsichtig gestaltet werden, um optische Methoden bei den Experimenten zu ermöglichen (z.B. Videobeobachtung).
- Die Sensoren und Probennahmegeräte müssen wiederholgenau und präzise positionierbar sein.

Beim Bau des Kanals (Abb. 2.4) wurden die bereits in der Arbeitsgruppe bestehenden Erfahrungen (ZIEBIS, 1992) mit einem kleineren Strömungskanal, der nach den Maßgaben von VOGEL (1981) konzipiert worden war, berücksichtigt. So wurde ein rezirkulierendes

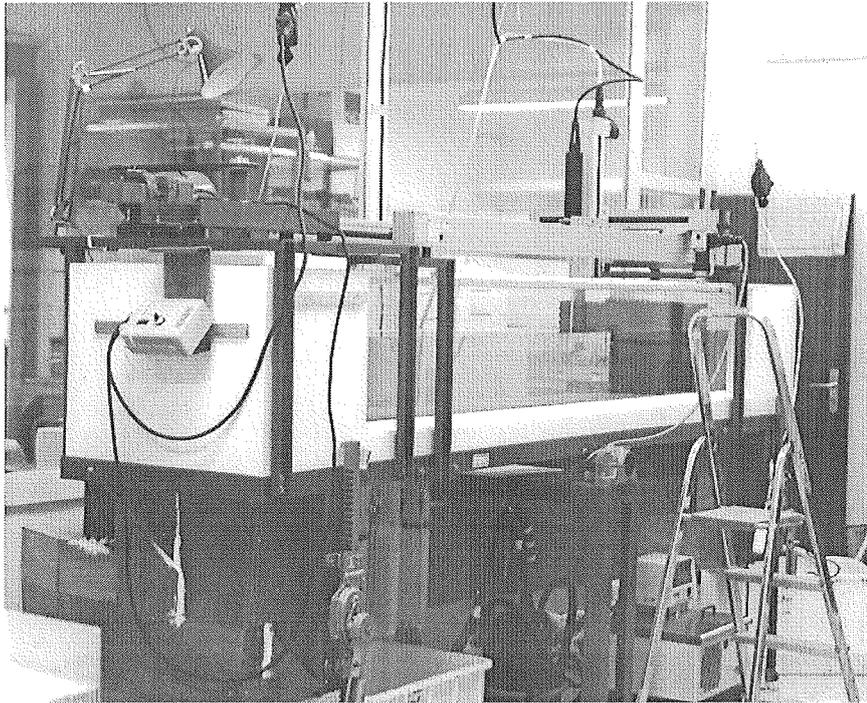


Abbildung 2.4: Der Strömungskanal

System mit Kühlung und integriertem Schienensystem gewählt, in das Sedimentkerne verschiedenen Durchmessers eingebracht werden können. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Strömungskanals, in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt, genauer erläutert.

Maße: Die Rinne des Kanals ist 3 m lang und je 40 cm breit und hoch. Das Grundmaterial der Rinne ist Bootsbausperrholz (AW 100, in den Stärken 15 und 4 mm), das mit Glasseidenmatte und Epoxidharz verstärkt wurde. Als Endbeschichtung wurde eine lebensmittelechte Harzmischung ausgewählt. Dieses Material wird normalerweise für Trinkwasserbehälter benutzt und erfüllt die Vorgabe der Ungiftigkeit und Salzwasserresistenz. Die Längsseitenwände bestehen aus 15 mm starkem Plexiglas, das in die Konstruktion eingearbeitet wurde. Die Rinne ist in ein Stahlgestell eingesetzt, das mit zwei Wandwinden um die Mitte der Längsachse geneigt werden kann. Der Rücklauf (Abb. 2.5 (f)) erfolgt unterhalb der Rinne in einem geschlossenen Rohrsystem (Innendurchmesser 190 mm) mit zwei Inspektionsöffnungen zur Reinigung. Der Rücklauf ist ebenfalls am Stahlgestell aufgehängt. In ihn wurde eine Kühlschlange (g) eingesetzt, die im Gegenstrom betrieben wird und mit einem Kühlaggregat (h) verbunden ist. Das Rohrsystem für den Rücklauf ist, ebenso wie die Kanalarinne, in einen Kasten mit einer Isolierung aus 3 Lagen alukaschierten Polyurethanschaumplatten eingefaßt. Bei einer Wasserstandshöhe von 25 cm

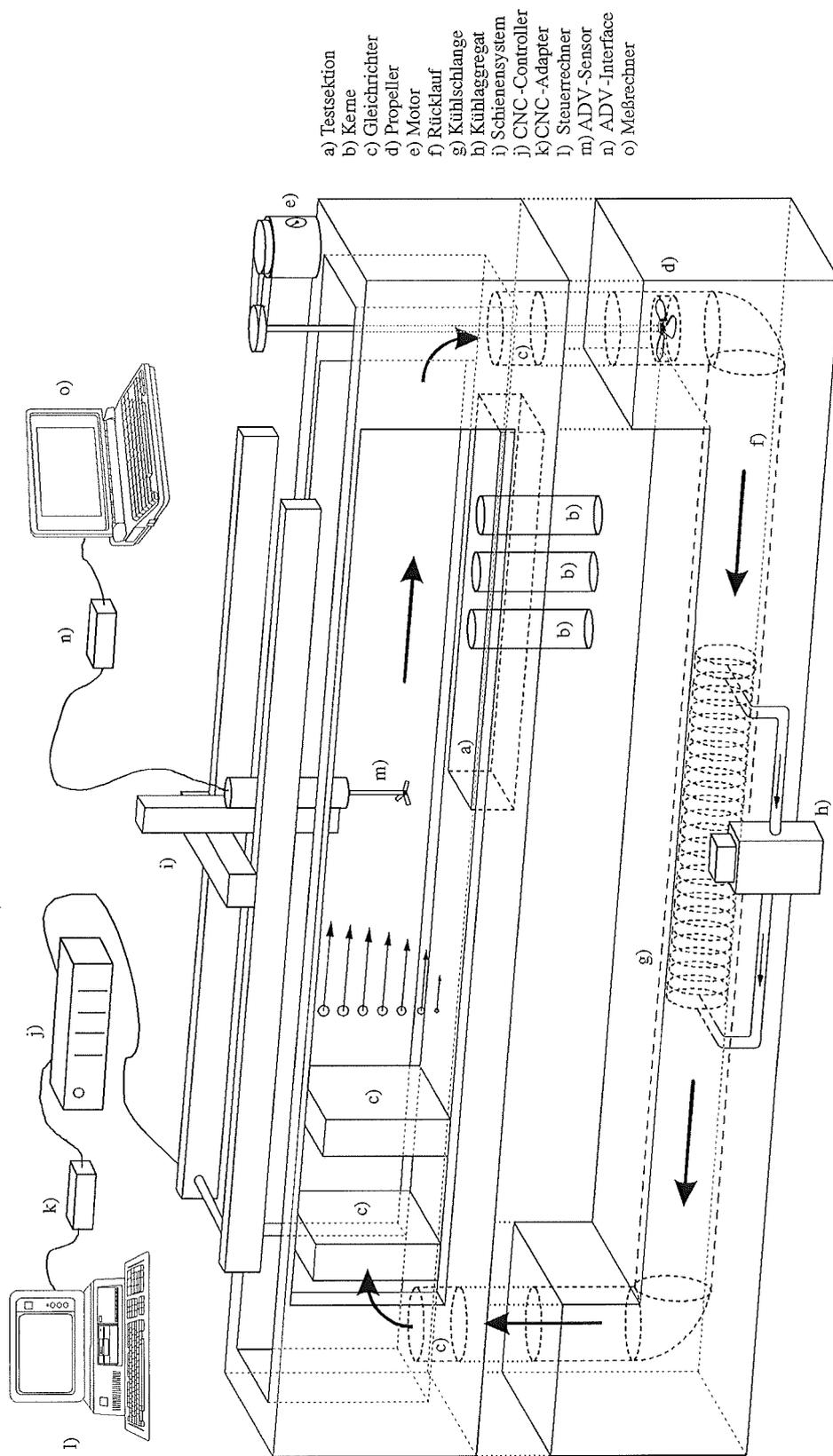


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Strömungskanals.

faßt der Kanal 420 ℓ. Die Temperatur dieser Wassermenge kann entsprechend der „*in situ*“ gemessenen Temperatur (für diese Arbeit war dies der Bereich von 3–12 °C) eingestellt und für längere Zeit konstant gehalten werden.

Antrieb: Der Antrieb erfolgt durch einen Propeller (**d**) *Vetus Bugschraube*, der über eine Welle und eine Keilriemen-Scheibenkombination (Verhältnis 1:1) von einem Motor gedreht werden kann. Der Propeller liegt mit seinem Durchmesser von 180 mm knapp unter dem Durchmesser des Rücklaufrohres und kann so mit geringer Turbulenzerzeugung bei maximalem Vorschub arbeiten. Als Antriebsmotor wurde ein regelbarer Einphasenkondensatormotor (220 V, 350 W und 2700 U min⁻¹) der Firma WEG[†] mit eingebautem Getriebe (Übersetzung 10:1) gewählt (**e**). Die Propellerdrehzahl ist stufenlos einstellbar. Der Motor ist vibrationsarm und für den Dauereinsatz geeignet.

Turbulenzminimierung: Gleichrichter dienen bei Strömungskanälen zur Erzeugung einer turbulent gerichteten Strömung, wobei Turbulenz hauptsächlich nur in x-Richtung, das heißt in die Hauptrichtung der Strömung, zugelassen werden sollte. In dem beschriebenen Strömungskanal dienen als Gleichrichter Blöcke mit Wabenstruktur (**c**). Sie befinden sich an den Übergängen von der Rinne zum Rücklaufrohr. Hier sind sie im Rücklaufrohr mit Abschluß zum Rinnenboden eingelassen. Das Material ist Aramid, der Durchmesser der Waben beträgt 9,6 mm. Im Eingang der Rinne befinden sich ebenfalls zwei Blöcke mit Wabenstruktur als Gleichrichter. Das Material hier ist eine Art wasserfeste Pappe von 10 cm Dicke und einem Wabendurchmesser von 15 mm. Diese Anordnung mit zwei Gleichrichtern in definierten Abständen vom Eingang wurde empirisch ermittelt.

Testsektion: 73 cm vom Gleichrichter entfernt befindet sich der Beginn der eigentlichen Testsektion. Sie ist 103,5 cm lang und 30 cm breit. Der Boden ist an dieser Stelle herausnehmbar und wurde für die Versuche in zwei Varianten hergestellt: Die erste Variante ist ein einfacher Kasten mit 10 cm Tiefe (**a**). Hier kann ein Mesokosmos aus Sediment und Tieren oder künstlichen Strukturen zusammengestellt werden, an dem hydrodynamische Untersuchungen erfolgen. Die zweite Variante ist ein Boden mit drei Löchern von je 10 cm Durchmesser, in die Multicorerkerne eingebracht werden können (**b**). Sie befinden sich 117 cm (Kern A), 132,5 cm (Kern B) und 148,0 cm (Kern C) vom Gleichrichter entfernt. Die Löcher haben eine spezielle Aufnahmevorrichtung für Sedimentkerne aus Gummi, so daß die Rohre von unten fest an den Kanalboden angelegt und mit einer Wantenspannvorrichtung festgestellt werden können. Die Rohre sind mit einem speziellen Boden versehen, der in den Rohren nach oben bewegt werden kann, um die Sedimentoberfläche auf Kanalbodenniveau zu bringen und zu justieren. Der untere Teil der Sedimentkerne, der sich nicht im Kanal befindet, muß extra gekühlt werden. Dies geschieht durch einen Schlauch

[†]WEG-Antriebe, D-72336 Balingen

mit D-förmigen Querschnitt, der mit Kühlflüssigkeit gefüllt ist und um die Kerne gewickelt wird. Dieses Probenkühlsystem wird mit einem separaten Kühlaggregat betrieben. Für die meisten Versuchsanordnungen wird eine 3 cm dicke Sedimentschicht auf dem gesamten Kanalboden ausgelegt, an die die Sedimentkernoberfläche angepaßt werden muß.

Das automatische Positioniersystem: Ein zentraler Aspekt für den Betrieb des Kanals ist die Möglichkeit, Meßpositionen im Kanal wiederholgenau anfahren zu können. Dazu wurde eine mechanische Vortriebseinheit für dreidimensionalen Betrieb ausgewählt. Sie besteht im Prinzip aus zwei Schienen für die x-Richtung (die Längsseiten des Kanals), einer Schiene für die y-Richtung (als Brücke über den Kanal) und einer Schiene für die z-Richtung (senkrecht zur x/y-Ebene). Dieses System wurde mit Schwingungsdämpfern auf das Stahlgestell aufgebaut (i). Die Einzelteile für das Schienensystem stammen von der Firma *Isel**. Sie wurden in der Ausführung als Doppelspurzahnriemenvorschub gewählt. Jede einzelne Schiene besteht aus einem rechteckigen Alu-Profil, ist vollkommen geschlossen und somit gegen Spritzwasser geschützt. Der Antrieb in den drei Richtungen x, y und z besteht aus je einem leistungsstarken Schrittmotor (Drehmoment 1,6 Nm) mit Gehäuse und integrierter Kupplung. Jeder Motor wird von einer Isel-Schrittmotorleistungskarte betrieben, die über Signaleingänge von einem PC (1) angesteuert wird. Die Schrittmotorleistungskarten für die drei Richtungen sind zusammen mit dem Netzteil in einem CNC-Controllergehäuse (j) untergebracht.

Die Steuersoftware: Für die Isel-Anlage wurde von J. Nittikowski ein Computerprogramm erstellt, das es ermöglicht, Sensoren im Kanal per Tastendruck zu bewegen. Es können auch Punkte, Linien, Flächen oder Quader im Kanal definiert und als Parameterdatei abgespeichert werden. Sie können dann automatisch in ebenfalls vorzuwählenden äquidistanten Abtastschrittweiten (Δx , Δy , Δz) und definierten Zeitintervallen abgefahren werden.

2.2.3 Strömungsmessung

Für die Eignungsprüfung des Strömungskanals mußten die Strömungsbedingungen bei verschiedenen Freistromgeschwindigkeiten an signifikanten Stellen im Kanal gemessen werden. Für diese Arbeit wurde ein Strömungsmeßsystem auf Akusti Doppler-Basis benutzt.

*Isel-Automation, Im Leibolzgraben 16, D-36132 Eiterfeld

Der Akustik-Doppler-Strömungssensor (ADV): Dieser Sensor stammt von der Firma *Sontek*** . Er ist in der Abbildung 2.6 halbschematisch dargestellt. Aus dem mittleren Zylinder wird ein gebündelter Ultraschallstrahl (10 Mhz) mit einer Frequenz f_1 ins Wasser gesendet. Wenn sich im Wasser genug Teilchen (mindestens $1 \text{ mg } \ell^{-1}$) mit einer gegenüber dem Wasser größeren Dichte befinden, wird ein Teil des Ultraschallstrahles an diesen Teilchen reflektiert und von den drei sternförmig angeordneten Empfängern detektiert. Nach dem DOPPLER-Gesetz verschiebt sich dann die Frequenz:

$$f_1 - f_2 = 2 f_1 \frac{\cos(\beta)}{v_0} v \quad (2.10)$$

mit

- f_1 : Sendefrequenz,
- f_2 : Dopplerfrequenz,
- v_0 : Schallgeschwindigkeit im Wasser,
- v : Strömungsgeschwindigkeit im Wasser,
- β : Winkel zwischen Strömungs- und Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls.

Sind f_1 , $\cos(\beta)$ und v_0 konstant und setzt man:

$$k_0 = 2 f_1 \frac{\cos(\beta)}{v_0} , \quad (2.11)$$

ergibt sich aus Gleichung (2.10):

$$f_1 - f_2 = k_0 v . \quad (2.12)$$

Die Frequenzverschiebung ist demnach direkt proportional zur örtlichen Strömungsgeschwindigkeit v und kann deshalb zur drucklosen Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden. Durch die geschickte geometrische Anordnung des Sensors mit 3 simultanen Meßpfaden und den entsprechenden 3 Empfängern in definiertem Winkel und Abstand zur Einstrahlachse, können durch die Laufzeitunterschiede beim Empfang der rückgestreuten Signale alle drei Strömungskomponenten detektiert werden. Die Messung findet 5 cm unterhalb des Sensors statt (siehe Abb. 2.6). Daher wird die Störung der Meßgröße durch die Mechanik des Sensors minimiert. Das Meßvolumen ist zylindrisch und beträgt laut Herstellerangaben weniger als 0.25 cm^3 . Somit ist eine kleinskalige räumliche Auflösung erreichbar. Das System ist ab Werk kalibriert, lediglich die Wassertemperatur und die Salinität muß der mitgelieferten Software zur Ansteuerung des Sensors vor jeder Meßsitzung mitgeteilt werden. Eine weitere Kalibrierung ist dann nicht mehr notwendig.

**Sontek, 7940 Silvertown Avenue No. 105, San Diego, CA 92126, USA

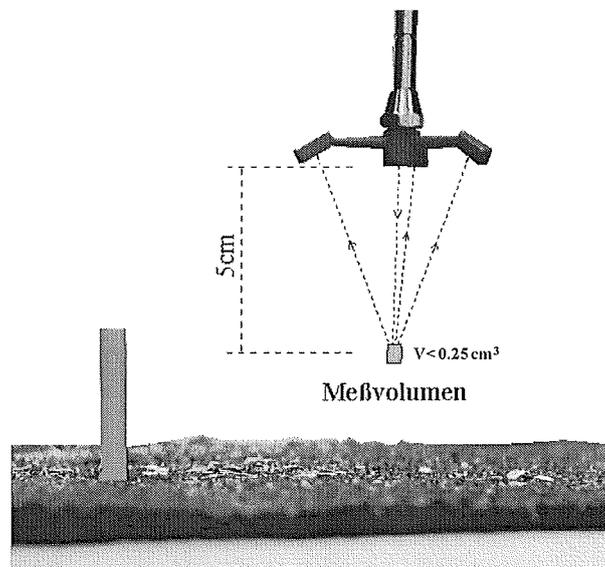


Abbildung 2.6: Der Akustik-Doppler-Strömungssensor mit eingezeichnetem Meßvolumen.

Um zunächst ein grobes qualitatives Bild der Strömungssituation im Kanal zu erhalten, wurde Lebensmittelfarbe direkt vor dem Gleichrichter in den Kanal injiziert. Der gefärbte Wasserkörper zeigte die Ausbildung einer Bodengrenzschicht an. Mit zunächst nur einem der in Abb. 2.5 dargestellten Gleichrichtern in der Rinne wurde das Strömungsbild bei unterschiedlichen Potentiometerstellungen und mit variierender Position des Gleichrichters protokolliert. Es stellte sich dabei heraus, daß ein zweites Gleichrichter-Modul in den Kanal eingesetzt werden muß, um eine kleinskalige Auflösung der Turbulenzen, gerade bei höheren Propellerdrehzahlen, zu gewährleisten.

Die eigentliche Strömungsmessung wurde mit dem Isel-System und dem ADV-Sensor automatisiert. Dazu wurde der Sensor an der z-Schiene des Positioniersystems befestigt und durch den Kanal bewegt. So wurden Vertikalprofile und Ebenen schrittweise abgefahren. Die Rohdaten der drei Geschwindigkeitsvektoren wurden mit den entsprechenden Ortskoordinaten im Kanal (wird vom Kanalprogramm gespeichert) mit einem weiteren Programm verknüpft und dann graphisch dargestellt.

2.3 Experimente im Strömungskanal

2.3.1 Hälterung der Proben für die Strömungskanalexperimente

Direkt nach der Entnahme wurden die Makrofaunaproben, die Sedimentkerne und das Sediment für den Kanalboden an Bord in einer speziellen Hälterungstruhe mit den ent-

sprechenden Wassertemperaturen bei Belüftung gehältert. Der Transportweg vom Schiffsanlegeplatz bis zum Labor betrug maximal eine halbe Stunde, wobei die Kühlkette nicht unterbrochen wurde. Im Labor wurden die Proben wieder in eine temperierte Hälterungstruhe gestellt und bis zum Experimentzeitpunkt aufbewahrt. Wenn die Proben länger in der Hälterung verbleiben mußten, wurde jede Woche das überstehende Wasser aus dem Originalwasserreservoir erneuert.

2.3.2 Bestimmung der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit

In den Kanal wurden Sedimentkerne aus dem Multicorer sowie Originalsediment für die Kanalgrundfläche eingebracht. Der Kanal wurde mit dem Bodenwasser der Station gefüllt und die Bodentemperatur, bei der die Kerne auch schon in der Hälterung aufbewahrt wurden, eingestellt. Das System konnte sich 3–4 Tage akklimatisieren. Mit dem Operationsbinokular wurde durch die durchsichtige Längsseite auf die Testsektion mit den Sedimentkernen fokussiert. Dann wurde in 10-minütigen Abständen die Propellerdrehzahl mit dem Potentiometer des Motors langsam erhöht. Die Wartezeit wurde empirisch ermittelt, um eine Equilibrierung des Strömungsregimes im Kanal zu ermöglichen. Sobald sich die ersten Oberflächenpartikel in Bewegung der x-Richtung setzten (engl. „rolling“), wurde die Drehzahl beibehalten und das Geschehen gefilmt. Dann wurden vor der weiteren Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit Vertikalprofile vor und über dem Sedimentkern bzw. den Kernen aufgenommen. So wurde auch bei der nächsten Phase, dem Springen (engl. „saltation“) und dem schließlichen ersten Abheben der Oberflächenkörner verfahren. Aus diesem Profil wurde dann die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* berechnet. Sie wird in diesem Fall kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_{*krit} genannt (z.B. MIDDLETON UND SOUTHARD (1984)).

Die Herkunft der so untersuchten Sedimente, sowie Temperatur und Salinität werden in der Tabelle 2.3 gezeigt. Für diese Untersuchungen wurden zum Vergleich Sedimentkerne mit hoher Polychaetenröhrendichte von einer Station im Kieler Tief in 19 m Wassertiefe untersucht.

2.3.3 Einfluß biogener Strukturen auf das Strömungsprofil

Zunächst wurde ein Versuch mit zwei Muschelschalen von *Arctica islandica* durchgeführt, die in der Testsektion in den Sand gesteckt wurden. Dabei wurde ein Exemplar mit der Längsachse in Strömungsrichtung und das andere Exemplar quer zur Strömungsrichtung eingebracht. Die einzelnen Strömungskomponenten um die Muscheln wurden untersucht und der Einfluß auf das Strömungsregime ermittelt. Ferner wurden Versuche mit Ori-

Tabelle 2.3: Rahmenparameter der Experimente zur Bestimmung der kritischen Schubspannung.

Station	Koordinaten	Ausfahrt	Temp. (°C)	Sal. (PSU)
12o	54° 18,90'N 11° 33,00' E	Nov. '94	10.0	18.4
Feldexp.(12c)	54° 12,90'N 11° 33,00' E	Nov. '94	10.0	18.4
23c	54° 01,60'N 11° 04,00' E	Apr. '94	11.0	18.2
Kieler Tief	54° 29,20'N 10° 19,30' E	Sept. '95	10.0	18.3

ginalproben durchgeführt. Die Sedimentkerne wurden mit dem Bodenwasser unter „*in situ*“ Temperatur in den Kanal eingebracht, bei der Sandstation 23c diente steriler Sandkistensand der gleichen Korngrößenverteilung als Umgebungssediment der Kerne. Bei den Schlickstationen war es gesiebt Sediment (1000 μm). Das System konnte sich 3 bis 4 Tage akklimatisieren. Danach wurden über den Sedimentkernen in verschiedenen Höhen x/y-Ebenen mit dem Strömungssensor in 1 cm Abständen abgefahren und dort alle 3 Strömungskomponenten erfaßt. Als Vergleich diente die jeweilige Messung unter gleichen Bedingungen an derselben Stelle mit glattem Untergrund. Weiterhin wurden vertikale Strömungsprofile vor, über und hinter den Kernen in mm-Abstand aufgenommen, um die Modifikation der Grenzschicht im Detail feststellen zu können. Die Herkunft der so untersuchten Sedimentkerne, sowie Temperatur und Salinität sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Rahmenparameter der Experimente zur Bestimmung des Einflusses biogener Strukturen auf das Strömungsregime.

Station	Ausfahrt	Temp. in °C	Sal. in PSU
12o	Nov. '94	10.0	18.4
12c	Nov. '94	10.0	18.4
23c	Apr. '94	11.0	18.2
23c	Nov. '94	8.0	18.6
23c	Sept. '95	12.5	17.5
Kieler Tief	Sept. '95	10.0	18.3

2.3.4 Verhalten von Makrofauna unter verschiedenen Strömungsbedingungen

Hierzu wurden Sedimentkerne mit erkennbarer Makrofauna in der Hälterung ohne Strömung mit einem Operationsbinokular beobachtet und bei erkennbarer Aktivität über einen bestimmten Zeitraum gefilmt. Eine Einzelbeobachtung ist in diesem Zusammenhang die Nahrungsaufnahme eines einzelnen Polychaeten (*Polydora ciliata*), dessen Röhre mit dem Sediment abschloß. Um die Röhre herum war der Sedimentboden mit Kotballen, sogenannten „fecal pellets“, bedeckt. Die Aktivität des Tieres wurde ca. 20 min gefilmt. Weiterhin wurden Sedimentkerne oder Makrofaunaindividuen im Kanal bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten gefilmt, um die Aktivitäten in Abhängigkeit von der Strömung zu erkennen. Die Auswertung dieser Videofilme erfolgte über eine Videoanlage, die Einzelbildbeobachtungen zuläßt.

2.3.5 Partikeldeposition

Die künstlichen Partikel: Um den Weg der Partikel aus der Wassersäule ins Sediment verfolgen zu können und in den Tieren wiederzufinden, wurden künstliche Partikel verwendet. Diese sogenannten Mikrosphären^{††} sind fluoreszierende, sphärische Partikel aus Polystyren Latex mit einer Dichte von $1,05 \text{ g cm}^{-3}$. Dieser Wert entspricht ungefähr der Dichte von organischen Partikeln (z.B. SELF UND JUMARS (1978)). Es wurden Größenklassen bis $163 \mu\text{m}$ Durchmesser untersucht. Hier liegt das obere Größenlimit bei den zertifizierten fluoreszierenden Mikrosphären. Im Bodenwasser sind größere Partikel häufig nur aus kleineren zusammengesetzt und unterliegen dann anderen Prozessen (WANNER, 1995; JÄHMLICH, 1996).

Die Vorexperimente: Während der Bauphase des neuen Kanals wurden Vorversuche in dem kleineren Strömungskanal, der in ZIEBIS (1992) beschrieben ist, durchgeführt. Zunächst wurde in diesen Vorexperimenten mit einem breiten Größenspektrum der Mikrosphären Partikel ($1\text{--}163 \mu\text{m}$) bestimmt, welche Größenklassen die Makrofauna der Mecklenburger Bucht bevorzugt aufnimmt. Dabei wurde die Partikelzahl pro Milliliter, wie bei ZIEBIS (1992) beschrieben, übernommen. In den Kanal wurde Originalsediment eingebracht und typische Makrofaunavertreter eingesetzt (*Arctica isl.*, *Astarte bor.*, *Macoma balt.*, *Polydora cil.*). Die Tiere konnten sich 4 Tage akklimatisieren. Am Versuchstag wurde eine Suspension aus Mikrosphären mit 1, 2, 3, 6, 10, 16, 22, 38, 66, 97 und $163 \mu\text{m}$ Durchmesser in den Strömungskanal (100ℓ) gegeben, alle 30 min eine Wasserprobe entnommen und sofort auf $0,2 \mu\text{m}$ -Filter filtriert. Nach 6 h wurde das Wasser wieder

^{††} *Fluorescent Mikrospheres*, Duke Scientific Corporation ®

abgelassen. Dann hatte die Konzentration der Partikel erheblich abgenommen. Die Makrofauna wurde auf Mikrosphärenaufnahme hin untersucht. Die genaue Versuchsmethode wird bei der Beschreibung der Depositionsversuche im neuen Strömungskanal genauer erläutert. Die Vorversuche wurden bei zwei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten sowie mit und ohne „coating“ mit Eiweiß durchgeführt. Für die späteren Experimente wurden dann 7 Partikelgrößen herausgesucht, die in der Tabelle 2.5 genauer dargestellt werden.

Tabelle 2.5: Charakterisierung der Mikrosphären. Mit $\Delta\phi$ in % wird die Abweichung von der Nenngröße (Herstellerangaben) bezeichnet.

Partikel ϕ in μm	$\Delta\phi$ in %	Anreg./Emiss. Maxima in nm	Farbe
1	< 5	541/611	rot
2	< 5	365/446	blau
3	< 5	541/611	rot
10	< 15	469/509	gelb
16	< 15	469/509	grün
22	< 14	469/509	grün
38	< 10	469/509	grün

Dabei ist mit $\Delta\phi$ in % die Standardabweichung von der Nenngröße und mit Farbe die Fluoreszenzfarbe gemeint. Die Mikrosphären können mit einem Epifluoreszenzmikroskop (z.B. von Zeiss) bei 40- bis 400-facher Vergrößerung gut unterschieden und gezählt werden.

Bezug zu der natürlichen Partikelzusammensetzung im Probengebiet: Um die Mikrosphären für quantitative Untersuchungen zu benutzen, sollte zunächst in Erfahrung gebracht werden, welche Partikelzusammensetzung und Größenverteilung ungefähr in natura zu erwarten ist. Danach sollte die Mindestkonzentration an Mikrosphären der einzelnen Größenklassen im Wasser angepaßt werden.

Bodenwasserproben von der Ausfahrt Oktober 1994 wurden direkt nach der Rückkehr bei Dr. F. Jochem, Institut für Meereskunde, Kiel, in einem Durchflußzytometer gemessen. Ferner wurde eine Größenklassenanalyse der Partikel durchgeführt. Die Abbildungen 2.7 und 2.8 zeigen die Partikelzahlen in Klassen der Stationen 12c und 23c vom Oktober 1994, bezogen auf 1 ml Wasser.

Auf Station 12c dominieren die Partikelgrößen bis 50 μm mit Zahlen bis zu 1400 pro Milliliter. Die größeren Partikel sind mit Zahlen bis zu 200 pro Milliliter geringer vertreten. Auf Station 23c dominieren die Partikelgrößen 10–50 μm mit Zahlen von bis zu

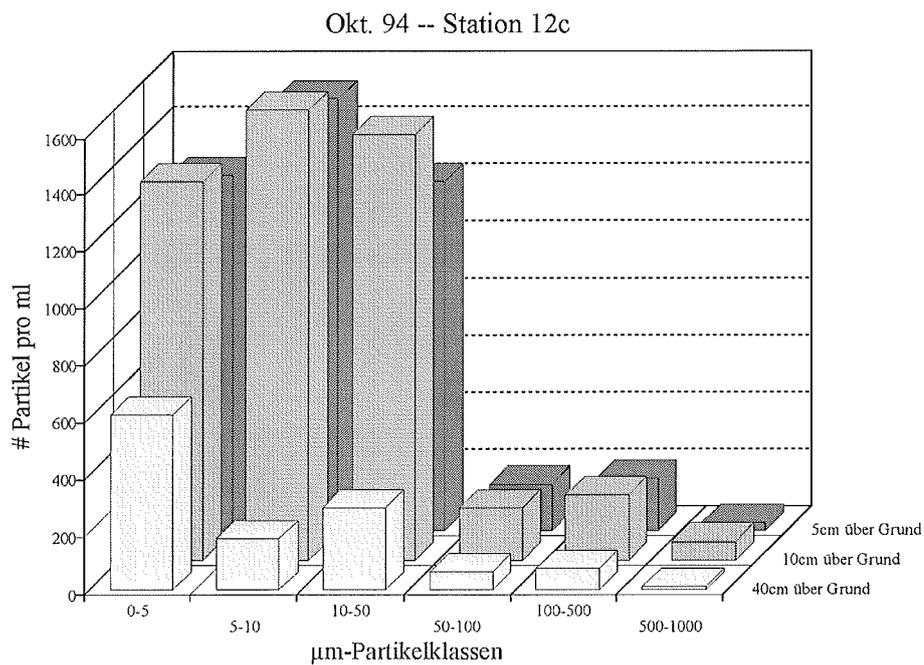


Abbildung 2.7: Partikelanzahl pro ml und Klasse von Station 12c.

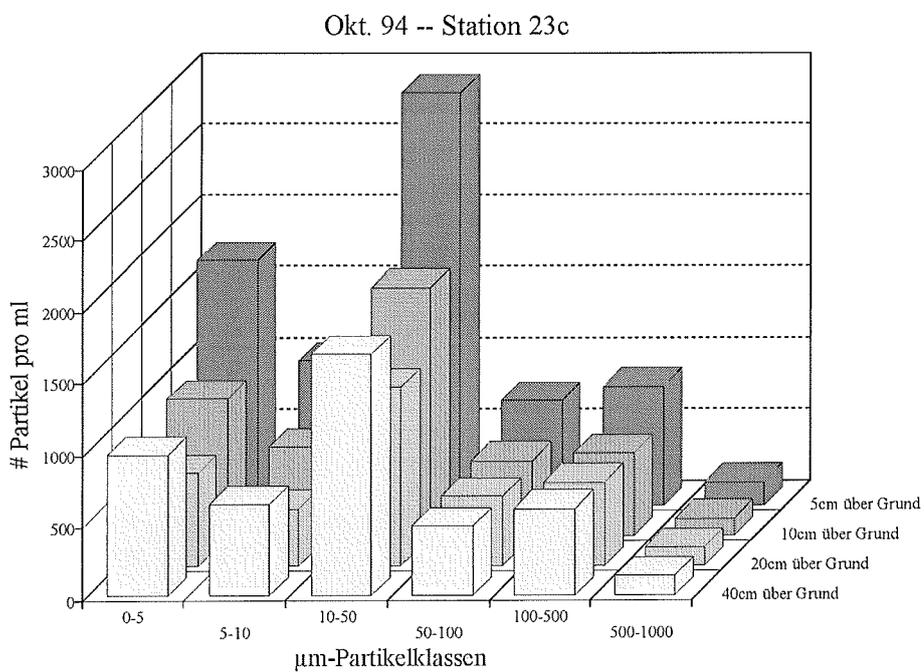


Abbildung 2.8: Partikelanzahl pro ml und Klasse von Station 23c.

2800 pro Milliliter, die kleineren Größenklassen liegen mit Zahlen bis zu 1500 pro Milliliter etwas darunter und die Größenklassen 50–100 und 100–500 erreichen Zahlen bis zu 600 pro Milliliter. Man muß aber davon ausgehen, daß bei der Probennahme durch die Ansaugschlitze des Bodenwasserschöpfers eine große Anzahl von Aggregaten in kleinere Partikel zerschlagen wurde. Dadurch verschiebt sich die Größenklassenzusammensetzung zu kleineren Partikeln hin. Weiterhin ist nicht anzunehmen, daß eine bestimmte Größenklassenverteilung im Feld lange Zeit konstant bleibt. Das bedeutet, daß die oben geforderte Anpassung der Mikrosphärenkonzentration an die Feldbedingungen praktisch nicht korrekt durchführbar ist. Die Vorversuche ergaben, daß aus dem Partikelspektrum von 1–163 μm die kleinen Partikel bis 3 μm bevorzugt aufgenommen wurden. Daher wurden diese Fraktionen im Verhältnis vermehrt in den Kanal gegeben und in Anlehnung an ZIEBIS (1992) die Mikrosphärenkonzentrationen der einzelnen Größenklassen gewählt. Diese Zusammensetzung wurde für jeden Versuch beibehalten.

Vorbereitung der Mikrosphärensuspension: Die Mikrosphären wurden (nach ZIEBIS (1992)) für 420 ℓ Wasser im Kanal (bei 25 cm Wasserhöhe) in Seewasser suspendiert, ständig mit einem Magnetrührer gerührt und ab und zu mit Ultraschall behandelt, um Verklumpungen zu vermeiden. Die Konzentrationen pro $\text{m}\ell$ sind in der Tabelle 2.6 dargestellt.

Tabelle 2.6: Anzahl der Mikrosphären pro $\text{m}\ell$ Kanalwasser.

Partikel \varnothing in μm	Mikrosphären pro $\text{m}\ell$
1	3000
2	3000
3	1000
10	500
22	100
38	25

Ein „coating“ mit Rinderalbumin (ZIEBIS, 1992) wurde nicht durchgeführt, nachdem entsprechende Versuche gezeigt hatten, daß die hier untersuchte Makrofauna die Partikel mit Albumin nicht bevorzugt aufnimmt. Das Albumin hatte zudem die Verklumpung der Partikel stark gefördert.

Die Proben im Strömungskanal: Zunächst wurde Seewasser der entsprechenden Station in den Rücklauf gefüllt und 24 h vorgekühlt. Dann wurde der Kanal 2–3 cm mit Sediment aufgefüllt, für Station 23c mit kommerziellem sterilem Sandkistensand,

der die gleiche Korngrößenzusammensetzung hat wie Station 23c, und mit gesiebttem Originalsediment bei Station 12c. Danach wurden die Kerne in den Kanal gefügt, fixiert und auf die entsprechende Höhe geschoben. Dann wurde das Umgebungssediment nahtlos angefügt. Danach wurde der Kanal auf 22–25 cm Wasserhöhe aufgefüllt und die Strömung langsam die Endgeschwindigkeit angepaßt. Das System konnte sich im Dunklen jeweils 4–6 Tage akklimatisieren.

Experimentdurchführung: Zunächst wurde die Mikrosphärensuspension mit einer Peristaltikpumpe, die auf die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal eingestellt war, unter ständigem Rühren in den Kanal eingeleitet. Diese Prozedur dauerte je nach herrschender Strömungsgeschwindigkeit 15–30 min. Danach wurde in 30 minütigen Abständen je 45–120 ml Wasser an derselben Stelle im Kanal mit der Peristaltikpumpe entnommen und auf schwarzgefärbte Filter (Nucleopore 0,2 μm) abfiltriert. Ein Versuch dauerte maximal 10 h, meistens 6 h, da sich nach dieser Zeit bereits eine deutliche Abnahme der Partikelkonzentration im Wasser des Kanals zeigte. Unter langsamer Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit wurde das Wasser dann abgelassen, bis nur noch wenige Millimeter die Sedimentschicht bedeckten. Dann wurde die Kerne einzeln gefilmt, die biogenen Strukturen beprobt sowie die Makrofauna einzeln entfernt. Die Makrofauna wurde in 4% igem boraxgepuffertem Formalin fixiert. Die Filmsequenzen wurden digitalisiert und als Graphik dargestellt, um die Strömungsprofile und deren Modifikation durch biogene Strukturen darstellen zu können. An ausgewählten Stellen im Kanal wurden Sedimentproben mit einer abgesägten Spritze, die eine Querschnittsfläche von 1 cm² besitzt, entnommen.

Aufarbeitung der Wasserproben: Die Filter wurden mit Immersionsöl auf einen Objektträger gelegt und unter dem Epifluoreszenzmikroskop bei entsprechender Anregung (365 nm für blau, 469 nm für grün und 541 nm für rot) bei unterschiedlicher Vergrößerung ausgezählt (je nach Vergrößerungsfaktor 10–30 Zählgitter des Mikroskopes). Die Kantenlänge eines Zählgitters variiert mit dem Vergrößerungsfaktor. Um vom Mittelwert der einzelnen Zählungen auf den ganzen Filter (176,7 mm²) und dann auf einen ml Probenwasser hochzurechnen, müssen Multiplikatoren eingeführt werden. In Tabelle 2.7 sind einige angegeben.

Die Mikrosphären wurden bei der kleinstmöglichen Vergrößerung gezählt, um den Faktor und damit den Fehler so gering wie möglich zu halten.

Aufarbeitung der Sedimentproben: Die Sedimentproben wurden bei 60 °C über Nacht getrocknet und dann durch eine Dichtentrennung mit Calciumbromid (ZIEBIS (1992), verändert nach THOMSEN (1989)) von den Mikrosphären getrennt. Die CaBr-Lösung mit den Mikrosphären wurde, wie oben beschrieben, filtriert und unter dem Epifluoreszenzmikroskop ausgezählt. Da die Gesamtzahl auf den Filtern geringer war als bei den Wasserproben, wurde der gesamte Filter ausgezählt und auf die Sedimentoberfläche (1 cm²) bezogen.

Tabelle 2.7: Multiplikatoren zur Berechnung der Mikrosphären pro Filter bei verschiedenen Vergrößerungen und Kantenlängen des Gitters.

Vergrößerung	Kantenlänge des Gitters	Multiplikator
40	2500 μm	28,3
100	990 μm	180,3
200	500 μm	706,8

Aufarbeitung der Makrofaunaprobe: Die fixierten Tiere wurden mit Salzwasser abgespült und unter dem Binokular sezirt. Der gesamte Magen- und Darminhalt wurde in Reagenzgläser überführt, getrocknet und dann wie die Sedimentproben in Calciumbromid suspendiert und gefiltert. Zur Bestimmung des aschefreien Trockengewichtes wurden alle Tiere bei 60 °C getrocknet und gewogen. Danach wurden sie bei 500 °C 24 h verascht und danach erneut gewogen.

Abschätzung des Effektes der Kanalkonstruktion auf die Mikrosphärenabnahme während der Experimente: Vor den Experimenten wurden Versuche in dem neuen Kanal mit Mikrosphären ohne Sedimentkerne und mit gesiebttem Sediment bei den gleichen Strömungsbedingungen durchgeführt, die bei 2 der Experimente mit natürlichen Sedimentkernen eingestellt worden waren (5,5 und 8,5 cm s^{-1}). So wurde festgestellt, wie die Abnahme der Mikrosphären über die Zeit erfolgt. Für die Wasserproben konnte so die Menge an Mikrosphären, die im Kanal an wenig zugänglichen Stellen, zum Beispiel im Rücklauf, deponiert werden, prozentual bestimmt werden. Die Deposition von Mikrosphären auf der Testsektion wurde ebenfalls prozentual bestimmt.

Die Rahmenbedingungen der Experimente: Die Herkunft der Sedimentkerne für die Depositionsversuche sowie Temperatur, Salinität und gewählte Freistromgeschwindigkeit sind in Tabelle 2.8 dargestellt.

Tabelle 2.8: Rahmenparameter zur Partikeldeposition durch biologische Strukturen.

Kürzel	Station	Ausfahrt	Temp. in °C	Sal. in PSU	v_{∞} in cm s^{-1}
A	23c	Apr. '94	7.0	16.2	1,0
B	12c	Nov. '94	10.0	17.6	5,5
C	23c	Nov. '94	10.0	17.8	8,5
D	23c	Sept. '95	15.5	14.5	4,0

3 Ergebnisse

3.1 Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht

3.1.1 Meteorologische und hydrographische Situation

Im Folgenden wird die meteorologische und hydrodynamische Situation in der Mecklenburger Bucht vor, während und nach den Ausfahrten dargestellt. Besonderes Augenmerk wird auf die Stationen 12c und 23c gelegt, da mit Material von diesen beiden Stationen im Strömungskanal gearbeitet wurde. Für die Ausfahrten vom Mai 1993, Februar 1994 und vom September 1995 wurden die Messungen vom Institut für Ostseeforschung in Warnemünde erhoben und sind nicht graphisch dargestellt.

Die Ausfahrt vom 01.–05. Februar 1993: Im Januar 1993 war nach 16 Jahren erstmals wieder ein effektiver Salzwassereinbruch vom Kattegat in die Ostsee erfolgt, der unter anderem bei NEHRING *et al.* (1994) beschrieben wird. Dieser Salzwassereinbruch spiegelt sich auch in den CTD-Profilen an unseren Stationen wieder. Auf dem 12er Transekt baute sich während der Ausfahrtswoche eine thermohaline Sprungschicht in 16–18 m Wassertiefe auf. Die Abbildung 3.1a zeigt die Situation auf Station 12c am 4. Februar 1993 morgens. Die Sprungschicht befand sich zu diesem Zeitpunkt in 17–20 m Wassertiefe bzw. 6–9 m über Grund. Der Wasserkörper oberhalb hatte eine Temperatur von 2,6 °C und eine Salinität von 20,5, der Wasserkörper unterhalb der Sprungschicht hatte 4 °C und eine Salinität von 23,3. Dieses Wasser stammt demnach aus dem Kattegat. Auch das 23er Transekt in der Lübecker Bucht war von dem Salzwassereinbruch erfaßt worden. Auf Station 23c (siehe Abbildung 3.1b) befand sich die Sprungschicht in 13–14 m Wassertiefe (2–3 m über Grund). Oberhalb lagen Temperatur und Salinität bei 2 °C bzw. 19, während sie darunter auf 3,8 °C und 22,5 anstiegen.

Der Wind wehte während der Probennahme vorwiegend aus südwestlicher Richtung und wurde im Laufe der Woche stärker (von 1–2 m s⁻¹ auf 10–12 m s⁻¹). Die Bodenwasserströmung lief nach den Kompaßbeobachtungen an der Station 12c nach Norden und an der Station 23c nach Nordost bis Ost (Beobachtungszeitraum war 15 min). Eine Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit nach den Videoaufzeichnungen der Überwachungskamera ergab während der 15-minütigen Beobachtung eine mittlere Geschwindigkeit von 20 cm s⁻¹ in 40 cm über Grund.

Die Ausfahrt vom 03.–07. Mai 1993: Die thermohaline Sprungschicht befand sich auf Station 12c zwischen 14 und 19 m Wassertiefe bzw. zwischen 7 und 12 m über Grund. Der Wasserkörper oberhalb hatte eine Temperatur 9 °C und eine Salinität von 12. Unterhalb der Sprungschicht war die Temperatur 4,5 °C und die Salinität 18. Auf

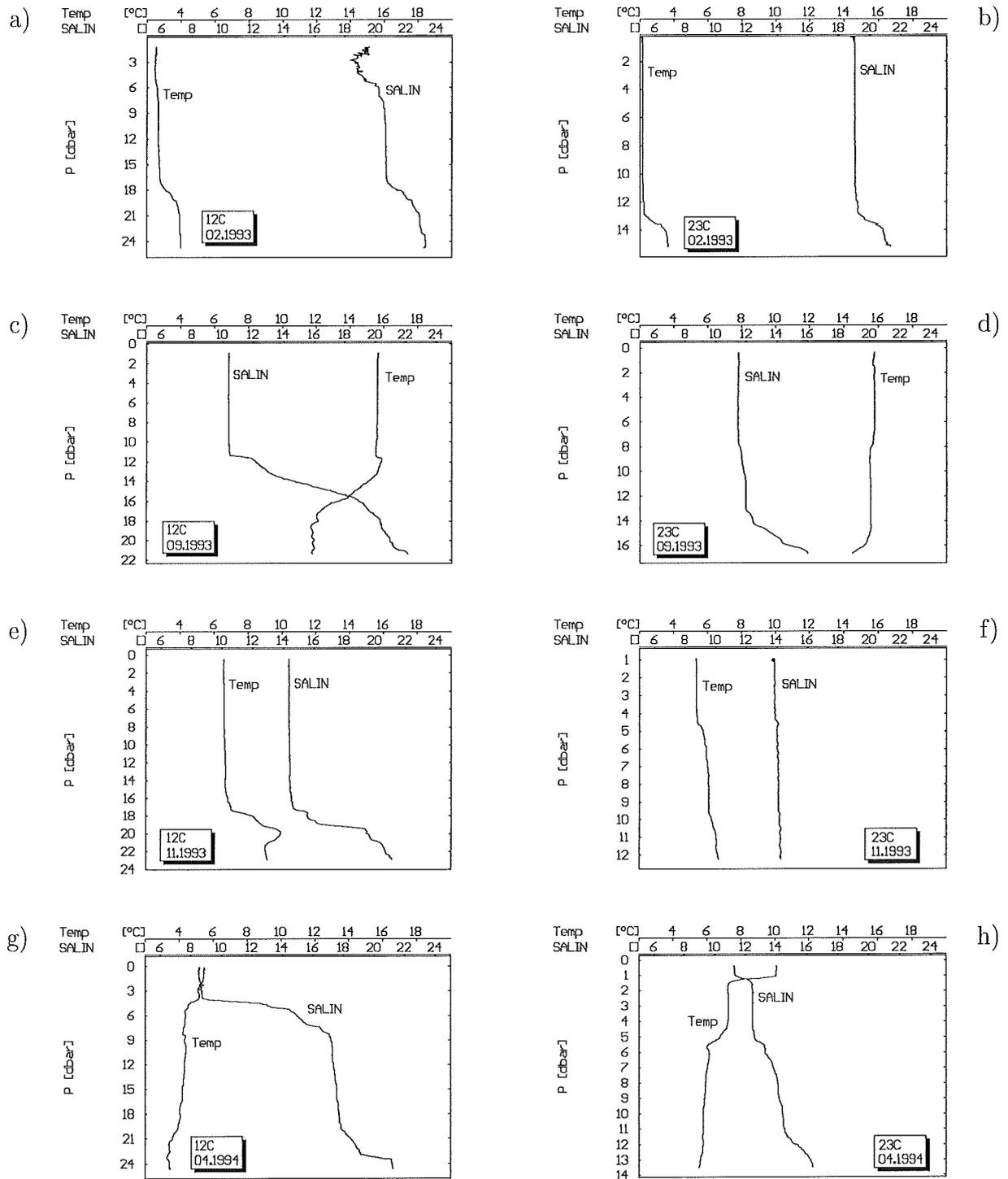


Abbildung 3.1: Die Temperatur- und Salinitätsprofile an den Stationen 12c (a, c, e und g) und 23c (b, d, f und h) zu den Ausfahrten.

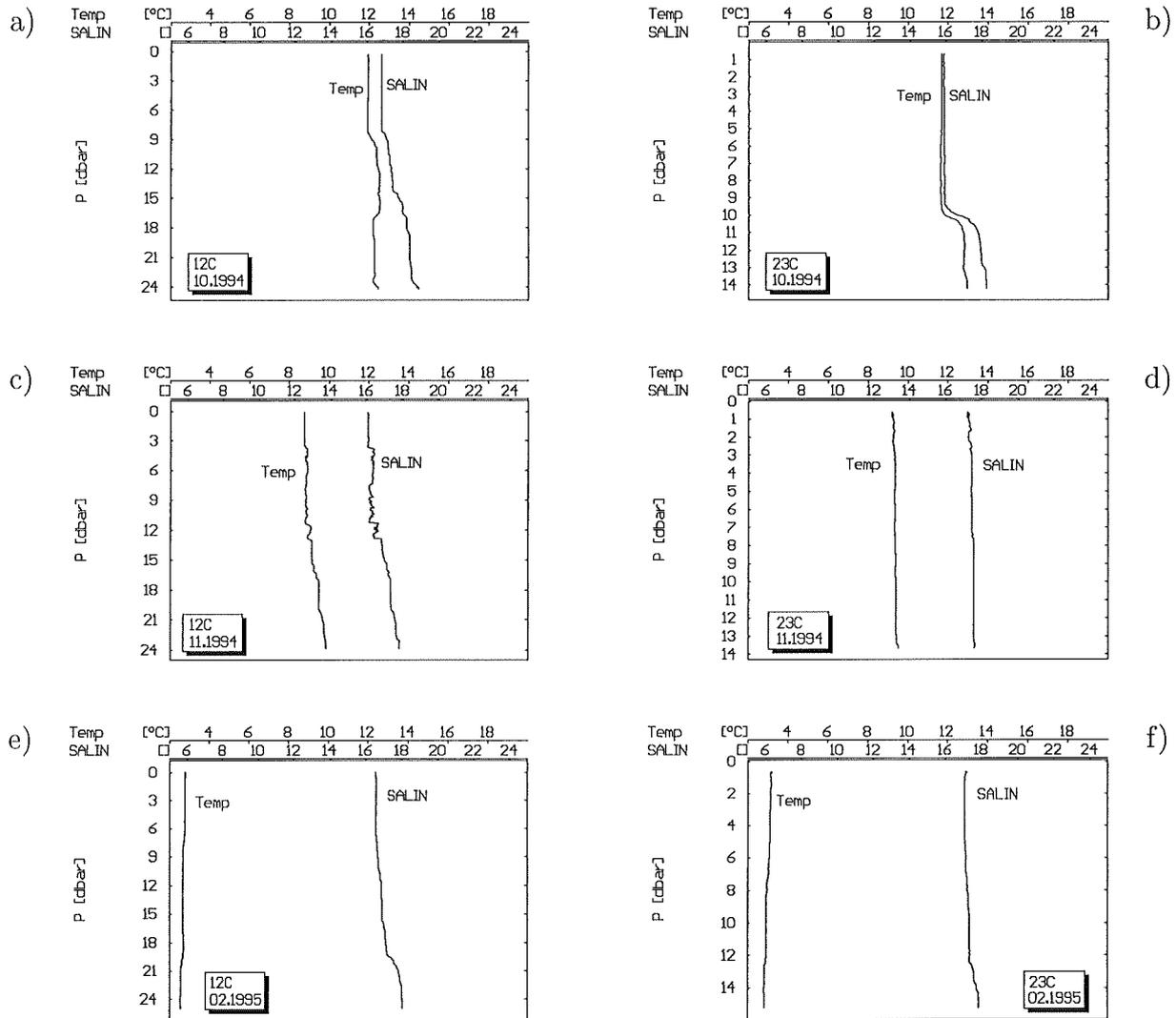


Abbildung 3.2: Fortsetzung der Temperatur- und Salinitätsprofile an den Stationen 12c (a, c und e) und 23c (b, d und f) zu weiteren Ausfahrten.

Station 23c lag die Sprungschicht zwischen 11,5 und 13,5 m Wassertiefe (2,5–3 m ü.Gr.). Der Wasserkörper oberhalb hatte eine Temperatur von 15,5 °C und eine Salinität von 12. Unterhalb der Sprungschicht betrug die Temperatur 5,5 °C und die Salinität 14,5.

Der Wind wehte zunächst mit 3 m s⁻¹ aus Nordost bis Ost, drehte am zweiten Tag (02.05.93) nach Nordwest und wurde etwas stärker (4–5 m s⁻¹). Am dritten Tag wehte er aus West und nahm auf 7–8 m s⁻¹ zu. Am Ende der Ausfahrt schwächte er sich wieder auf 2–4 m s⁻¹ ab und kam aus Norden. Zur Richtung der Bodenwasserströmung liegen nur Informationen von Station 23c vor. Hier ging sie in Richtung Norden. Die Geschwindigkeit kann wiederum nur abgeschätzt werden. Auf der Videoaufzeichnung (Dauer: 30 min) ist zu erkennen, wie sich eine Großalge langsam um den Kompaß legt ($v < 5 \text{ cm s}^{-1}$).

Die Ausfahrt vom 30. Aug.–03. September 1993: Nach einem mäßig warmen Sommer zeigte sich im September folgendes Bild: Die thermohaline Sprungschicht befand sich auf Station 12c in 11,5 bis 16 m Wassertiefe (10–14,5 m über Grund). Oberhalb der Sprungschicht hatte der Wasserkörper eine Temperatur von 15,5 °C und eine Salinität von 10, unterhalb eine Temperatur von 11,5 °C und eine Salinität von 23 (siehe auch Abbildung 3.1b). Auf Station 23c lag die Sprungschicht in 14–16 m (Abbildung 3.1d). Die Temperatur lag bei 15,8 und 14,8 °C. Die Salinität nahm oberhalb einen Wert von 11,2 und unterhalb von 14,5 an.

Der Wind wehte die gesamte Zeit aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen. Am letzten Tag drehte er auf Nord. Die Windgeschwindigkeit schwankte ständig (Tendenz jedoch ansteigend) und lag zwischen 5 und 10 m s⁻¹. Für die Bodenströmungsrichtung auf Station 12c gibt es zwei Angaben, da diese Station zweimal angefahren wurde. Am 31.8. lief sie nach Norden und am 2.9. lief sie nach Südwesten. Auf Station 23c strömte der bodennahe Wasserkörper nach Ost-Nordost.

Die Ausfahrt vom 20.–23. November 1993: An den Tagen vor der Ausfahrt hatten hohe Windgeschwindigkeiten geherrscht. Auf Station 12c war die Sprungschicht noch ungefähr 1 m mächtig (19–20 m bzw. 6–7 m über Grund). Der Wasserkörper oberhalb hatte eine Temperatur von 6,4 °C und eine Salinität von 14 (siehe Abbildung 3.1e). Der Wasserkörper unterhalb der Sprungschicht wies eine Temperatur von 10 °C und eine Salinität von 21,5 auf. Die Wassersäule auf Station 23c war nahezu vollständig durchmischt (siehe Abbildung 3.1f). Die Temperatur betrug 5–6 °C und die Salinität lag bei 14.

Der Wind wehte die ersten beiden Tage stark aus östlicher Richtung (10–14 m s⁻¹) und drehte dann auf südwestliche Richtung und wurde schwächer (5–8 m s⁻¹). Angaben zur Strömungsgeschwindigkeit und -richtung können nicht gemacht werden. Die Sedimentoberfläche war in Platten abgehoben und umgedreht worden, wie die Multicorerkerne zeigten. Dies läßt auf eine starke Bodenströmung ($> 30 \text{ cm s}^{-1}$) schließen.

Die Ausfahrt vom 01.–07. Februar 1994: Auf Station 12c lag eine thermohaline Sprungschicht in 23–24 m Wassertiefe mit der Salinität von 19,5 oberhalb und 24 unterhalb. Die Temperatur betrug oberhalb $2,8^{\circ}\text{C}$ und unterhalb $3,2^{\circ}\text{C}$. Auf Station 23c befand sich die Sprungschicht in 7,5–8,5 m Wassertiefe. Hier wurden Temperaturen von $2,8^{\circ}\text{C}$ oberhalb und $3,8^{\circ}\text{C}$ unterhalb gemessen. Die entsprechende Salinität lag bei 20,4 und 23.

Der Wind wehte zunächst auffrischend aus südwestlichen Richtungen mit Geschwindigkeiten von $5\text{--}13\text{ m s}^{-1}$. Am dritten Tag drehte er und wehte nun aus Osten mit Geschwindigkeiten um 13 m s^{-1} , 48 h später abflauend auf 2 m s^{-1} . Die Bodenströmungsrichtung und -geschwindigkeit wurde mit einem ADCP bestimmt, das über die Stationen geschleppt wurde. Gemessen wurde in 1,5 m über Grund. Auf dem 23er Transekt ging die Bodenströmung in südöstliche Richtung, die Geschwindigkeit schwankte in 6 Stunden Meßzeitraum zwischen $0,2\text{--}5,5\text{ cm s}^{-1}$.

Die Ausfahrt vom 20.–25. April 1994: Die Erwärmung und thermische Schichtung des Wassers setzten 1994 im Mittel 2 Wochen früher ein als im vergangenen Jahr. Der April war sehr warm und windarm gewesen (NEHRING *et al.*, 1994). Die thermohaline Schichtung zeigt sich zum Zeitpunkt der Ausfahrt auf der Station 12c in 2 Sprungschichten (siehe Abbildung 3.1g). Der oberste Wasserkörper (4–7 m Wassertiefe) hatte eine Temperatur von $5,8^{\circ}\text{C}$ und eine Salinität von 8, der mittlere Wasserkörper (7–21 m) $4,5^{\circ}\text{C}$ und 18 und der unterste Wasserkörper (unter 24 m) $3,8^{\circ}\text{C}$ und 22. Auf Station 23c können sogar 4 Wasserkörper unterschieden werden (siehe Abbildung 3.1h): Oberflächenwasser bis in 1,5 m Tiefe mit 10°C und einer Salinität von 11, eine Schicht bis in 5 m Tiefe mit 7°C und einer Salinität von 12,5, eine weitere intermediäre Schicht bis in 13 m Tiefe mit 6°C und einer Salinität von 14 und den untersten Wasserkörper mit 4°C und einer Salinität von 16.

Der Wind wehte die ganze Zeit schwach aus östlichen Richtungen mit maximalen Geschwindigkeiten von $5\text{--}6\text{ m s}^{-1}$. Die Bodenströmung lief während der 20-minütigen Beobachtung auf Station 12c in nordöstliche Richtung und auf Station 23c in südwestliche Richtung.

Die Ausfahrt vom 10.–12. Oktober 1994: Die Wassersäule zeigt auf beiden Transekten nur in Bezug auf die Salinität eine Schichtung. Auf Station 12c zog sich die Sprungschicht in zwei Abschnitten von 7–14 m und von 14–24 m Wassertiefe hin. Die Salinität stieg dabei von 16,8 auf 19 an und die Temperatur in der gesamten Wassersäule betrug um 12°C (siehe Abbildung 3.2a). Auf Station lag die Sprungschicht in 9,5–14 m Wassertiefe. Die Salinität stieg zum Boden von 16 auf 18,3 an. Die Temperatur betrug auch hier in der gesamten Wassersäule um 12°C (siehe Abbildung 3.2b).

Der Wind wehte am ersten Tag aus nordwestlicher Richtung mit $2\text{--}5\text{ m s}^{-1}$. Dann drehte er auf Südwest mit Geschwindigkeiten um 3 m s^{-1} . Die Bodenströmung lief auf Station 12c in süd-südwestliche Richtung und war nach den Videoaufnahmen (aus 40 cm ü.Gr.) zu urteilen, recht stark ($>10\text{ cm s}^{-1}$). Auf Station 23c war die Strömung sehr gering ($<2\text{ cm s}^{-1}$) und ging in westliche Richtung.

Die Ausfahrt vom 07.–11. November 1994: Station 12c wies im Gegensatz zu den anderen beiden Stationen des 12er Transektes keine klare Sprungschicht auf. Die Abbildung 3.2c zeigt das Vertikalprofil von Station 12c. Die Temperatur lag bis zu einer Wassertiefe von 13 m bei $8,8^\circ\text{C}$ und nahm dann zum Boden langsam bis auf 10°C zu. Der Salzgehalt war in den obersten 4 m mit 16,1 konstant und schwankte dann bis in 13 m Wassertiefe zwischen 16,0 und 16,6. Von dort stieg er langsam bis auf 17,8 in Bodennähe an. Auf Station 23c lag eine gute Durchmischung der Wassersäule vor (siehe Abbildung 3.2d). Die Temperatur betrug in der gesamten Wassersäule $9,2\text{--}9,4^\circ\text{C}$ und die Salinität veränderte sich von 17,2 im Oberflächenbereich auf 17,6 in 14 m Tiefe.

Der Wind wehte an den ersten beiden Tagen schwach ($2,4\text{--}5\text{ m s}^{-1}$) aus nordwestlicher Richtung. Am dritten Tag drehte der Wind und kam nun aus östlicher Richtung und wurde stärker (8 m s^{-1}). Die Bodenströmungsrichtung lief auf Station 12c nach Nord-Nordost mit Geschwindigkeiten zwischen $5\text{--}9\text{ cm s}^{-1}$ in 25 cm ü.Gr. (WANNER, 1995). Auf Station 23c ging die Bodenströmung ebenfalls nach Nordost. Mit der Partikelkamera wurde hier in 25 cm ü.Gr. eine Strömungsgeschwindigkeit von $3,5\text{ cm s}^{-1}$ ermittelt.

Die Ausfahrt vom 20.–22. Februar 1995: Der Wasserkörper wies auf Station 12c nur eine schwach ausgebildete Sprungschicht in 18 bis 21 m Wassertiefe auf. Der Salzgehalt stieg von 16,5 im Oberflächenbereich auf 18,1 im Bodenbereich an. Die Temperatur blieb konstant um $2,6^\circ\text{C}$ (siehe Abbildung 3.2e). Auf Station 23c befand sich die schwache Sprungschicht in 13 m Wassertiefe mit der Salinität von 17 oberhalb und 18 unterhalb. Die Temperatur blieb konstant um 3°C (siehe auch Abbildung 3.2f).

Der Wind wehte die ganze Zeit stürmisch aus südwestlicher Richtung mit $17\text{--}20\text{ m s}^{-1}$. Die Bodenströmung lag auf Station 12c bei 5 cm s^{-1} in 50 cm über Grund (Videoauswertung) und ging in südöstliche Richtung. Auf Station 23c lief sie nach Nordost und war ebenfalls gering ($3\text{--}4\text{ cm s}^{-1}$).

Die Ausfahrt vom 12.–15. September 1995: Der Wasserkörper auf Station 12c wies eine starke Sprungschicht in 10–22 m Wassertiefe auf, in der die Temperatur von $16,8^\circ\text{C}$ auf $11,2^\circ\text{C}$ abfiel und die Salinität von 9,5 auf 20 anstieg. Auf Station 23c lag die Sprungschicht in 12–14 m. Hier fiel die Temperatur von 17°C im Oberflächenbereich auf $15,5^\circ\text{C}$ in Bodennähe ab und die Salinität stieg von 11 oberhalb der Sprungschicht auf 13,4 unterhalb an. Der Wind wehte frisch aus Nordost mit zunächst 12 m s^{-1} , später abflauend auf 3 m s^{-1} .

Zusammenfassend kann man sagen, daß in Bezug auf die Hydrographie der Mecklenburger Bucht 1993 der Salzwassereinbruch zu einer Erhöhung der Salinität im Bodenwasser führte, die an allen Ausfahrten 1993 erkennbar war. Die Wassertemperaturen der Oberflächenschicht wurden durch den milden Winter 1993/94, das überdurchschnittlich warme Frühjahr und den kühlen Sommer geprägt. Im November 1993 verursachte ein starker Sturm ein Resuspensionsereignis größeren Umfangs. 1994 gab es wieder Einstromereignisse, sie erreichten jedoch nicht mehr die Intensität des Januars 1993. Demzufolge waren auch die Salzgehalte am Boden an den Ausfahrtterminen etwas geringer. Die Oberflächen- und teilweise auch die Bodenwassertemperaturen wurden von dem ebenfalls milden Winter 1993/94 und von dem sehr warmen und langen Sommer bestimmt.

Die Unterschiede zwischen den beiden Stationen 12c und 23c in Bezug auf die TS-Profile bestanden darin, daß die Ausbildung von Sprungschichten auf der flacheren Station 23c meistens geringer war bzw. ganz entfiel. Die Salinität lag zudem geringer als an Station 12c.

3.1.2 Korngrößenzusammensetzung

Korngrößenverteilung im obersten Sedimentzentimeter: Hier wurden von jedem Transekt 3 Stationen untersucht, um einen Überblick über den Verlauf der Korngrößenverteilung über dem Transekt zu gewinnen.

An den Stationen des 12er Transektes macht der Anteil der Korngrößenfraktion $<63 \mu\text{m}$ 91,3–94,3 Gewichtsprozent aus. Auch an den Stationen 23o und 23a sind 80,6 bzw. 81,7% der Oberflächensedimentkörner kleiner als $63 \mu\text{m}$. Station 23c unterscheidet sich von den anderen durch den hohen Anteil an sandigem Oberflächensediment. Hier entfallen 92,5 Gewichtsprozent auf die Korngrößenfraktion $>63 \mu\text{m}$. Von den untersuchten sechs Stationen ähnelten sich fünf in der Korngrößenzusammensetzung des obersten Sedimentzentimeters stark, wie Abbildung 3.3 zeigt. Dies war ein Grund dafür, daß nur Station 12c und 23c für die weiteren Untersuchungen ausgewählt wurden.

3.1.3 Makrofaunagemeinschaften

Die Zahl der Individuen und die Artenvielfalt der Makrofauna lag an der sandigeren, flacheren Station 23c höher als auf der tieferen, schlickigen Station 12c. Die häufigsten Muschelarten im Untersuchungszeitraum waren *Arctica islandica*, *Astarte borealis*, *Macoma balthica* und *Mytilus edulis*. An Polychaeten wurden hauptsächlich *Polydora ciliata*, *Scoloplos armiger* sowie *Pygospio elegans* gefunden. Sonstige regelmäßig auftretende Makrofaunavertreter waren der Seestern *Asterias rubens*, der Priapulide *Halicryptus spinu-*

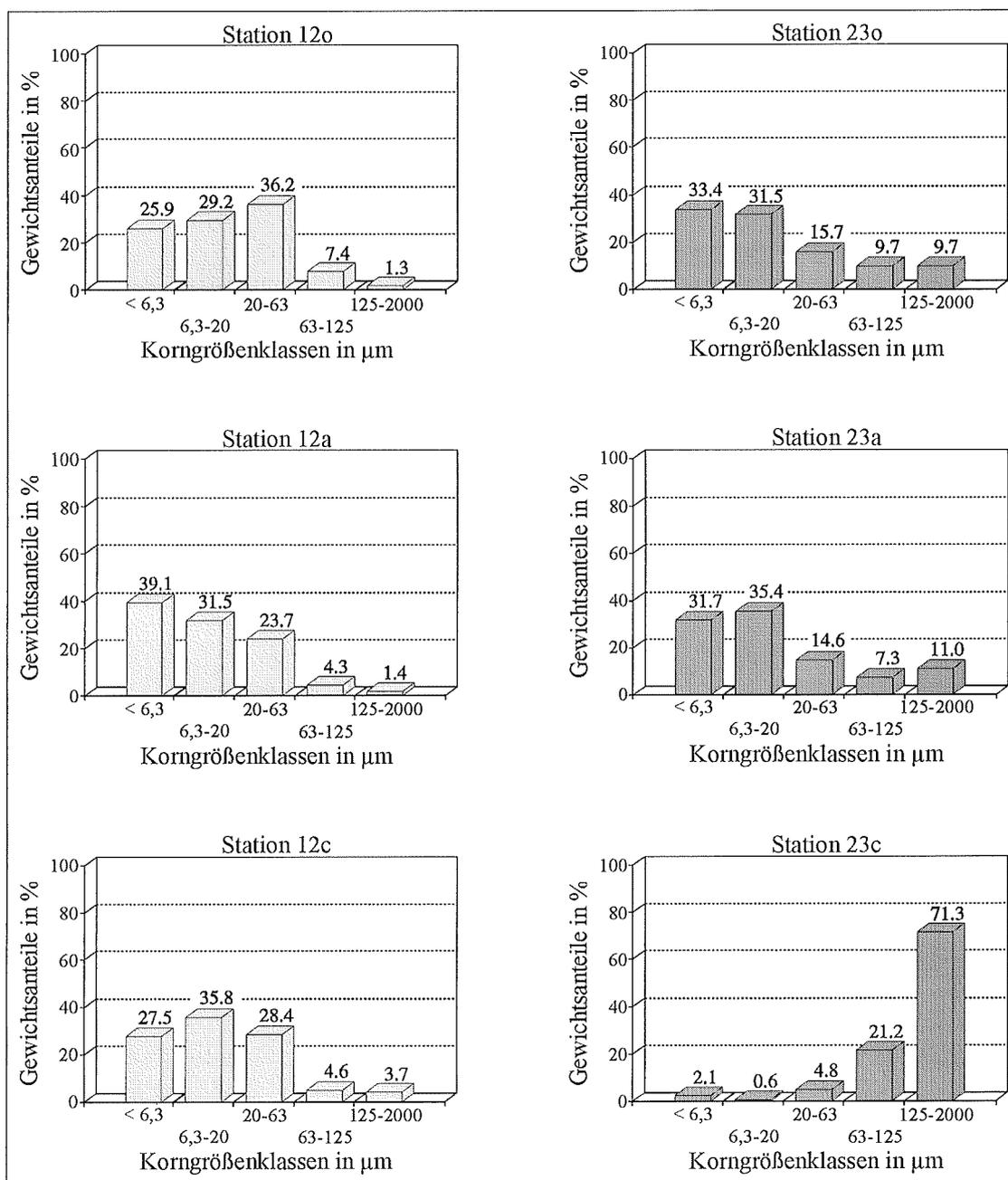


Abbildung 3.3: Prozentualer Gewichtsanteil der einzelnen Korngrößenklassen im obersten Sedimentzentimeter an den Stationen der beiden Transekte.

losus und *Diastylis rathkei* (Cumaceae). *Halicryptus spinulosus* trat vor allem auf Station 12c regelmäßig auf. Insgesamt wurden ca. 20 verschiedene Arten gefunden. Eine Größenklassenverteilung erschien aufgrund der insgesamt geringen Abundanz wenig sinnvoll. Sie wurde nur für ausgewählte Ausfahrten durchgeführt. Im ersten Jahr traten in den Sommermonaten vor allem junge Muscheln bis 1 cm Größe der Arten *Arctica islandica*, *Astarte borealis* und *Astarte elliptica* auf.

Die Makrofauna wird hier nach der Art ihrer Nahrungsaufnahme eingeteilt, da ein Ziel dieser Arbeit die Abschätzung der Biodepositionsleistung der Makrofaunagemeinschaft in der Mecklenburger Bucht sein soll, wobei nicht mit allen an den Feldstationen vorkommenden Arten Strömungskanalexperimente durchgeführt werden können. Die Unterteilung der Organismen aufgrund ihrer Nahrungsaufnahme ist eine Möglichkeit, wie Strömungskanalergebnisse auf die Gemeinschaft im Feld übertragen werden können.

Drei übergeordnete Strategien wurden ausgewählt: Depositfresser, Suspensionsfresser und Carnivore (die räuberisch lebenden Arten sind integriert). Die Arten des Hyperbenthos wurden nicht berücksichtigt, da mit den hier benutzten Probennahmegeräten eine quantitative Beprobung dieser sehr mobilen Arten nicht möglich war.

Die Einteilung wurde nach diversen Literaturangaben und eigenen Beobachtungen durchgeführt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß viele Makrofaunaarten je nach herrschenden Strömungs- und Nahrungsbedingungen zwischen verschiedenen Ernährungsstrategien wechseln. In MILLER *et al.* (1992) ist ein Überblick über diese Wechsel der Nahrungsstrategien beschrieben. Die hier vorgeschlagenen Zuordnung ist daher nur eine von vielen möglichen. Zwei Problemfälle werden dabei besonders herausgestellt.

Die Polychaeten wurden in Anlehnung an BRENCHLEY (1981); BROWN (1982); FAUCHALD UND JUMARS (1979); JUMARS *et al.* (1982); BICK UND GOSSELCK (1985); TAGHON *et al.* (1980); TAGHON UND GREENE (1992) und an eigene Beobachtungen in Depositfresser und Carnivore eingeteilt. Der Spionide *Polydora ciliata* kann laut Literatur (MICHAELIS, 1978; HEMPEL, 1971) bis zu 50% seiner Nahrungsaufnahme durch Suspensionsfressen bestreiten. Hier wird er als Depositfresser bezeichnet.

Die Bivalvia wurden in Anlehnung an ALLER UND YINGST (1985); ANDRÉ *et al.* (1993); BRADFIELD UND NEWELL (1961); CHARLES *et al.* (1995); FRÈCHETTE *et al.* (1989); LASSIG (1965); MARSH UND TENORE (1990); THEEDE (1962) und an eigene Beobachtungen überwiegend als Suspensionsfresser angesehen. Eine Ausnahme bildet die Muschel *Macoma balthica*, die sowohl Suspensionsfressen (REID UND REID, 1969; TAGHON *et al.*, 1980) als auch Depositionsfressen (BRADFIELD UND NEWELL, 1961; ALLER UND YINGST, 1985; SELF UND JUMARS, 1978) oder beides je nach Umweltbedingungen (LEVINTON, 1991) als Ernährungsstrategie nutzt. In dieser Arbeit wird *Macoma balthica* als Depositfresser betrachtet.

Die übrigen vorkommenden Arten sind der Seestern *Asterias rubens* und der Priapswurm *Halicryptus spinulosus*. Die Ernährungsweise beider Arten wird als carnivor bezeichnet (POWILLEIT, 1988; POWILLEIT *et al.*, 1995). In der Tabelle 3.1 sind die hier benutzten Einteilungen für alle gefundenen Arten zusammengefaßt.

Tabelle 3.1: Einteilung in Ernährungstypen der Makrofauna in der Mecklenburger Bucht.

Gattung/Art	Klasse	Stamm	Ernährungstyp
<i>Arctica islandica</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Astarte borealis</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Astarte elliptica</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Abra alba</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Mytilus edulis</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Cerastoderma edulis</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Corbula gibba</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Montagua bidentata</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Mya arenaria</i>	Bivalvia	Mollusca	Suspensionsfresser
<i>Polydora ciliata</i>	Polychaeta	Annelida	Suspensionsfresser
<i>Macoma balthica</i>	Bivalvia	Mollusca	Depositfresser
<i>Lagis koreni</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Aricidea jeffreysii</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Capitella capitata</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Pygospio elegans</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Scoloplos armiger</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Amphytrite</i> sp.	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Nicolea</i> sp.	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Terebellides stroemi</i>	Polychaeta	Annelida	Depositfresser
<i>Eteone longa</i>	Polychaeta	Annelida	Carnivore
<i>Nereis pelagica</i>	Polychaeta	Annelida	Carnivore
<i>Antionella sarsi</i>	Polychaeta	Annelida	Carnivore
<i>Nephtys hombergi</i>	Polychaeta	Annelida	Carnivore
<i>Anaitides groenl.</i>	Polychaeta	Annelida	Carnivore
<i>Asterias rubens</i>	Asteroidea	Echinodermata	Carnivore
<i>Halicryptus</i> spin.		Priapulida	Carnivore

Die Summe der Individuen und die prozentuale Zusammensetzung der drei Ernährungstypen an den Stationen 12c und 23c zu den Probenahmeterminen sind in den Tabellen 3.2 und 3.3 dargestellt.

Die Gesamtzahl der Individuen pro m² ist auf Station 12c mit 36–897 Tieren pro m² deutlich geringer als auf Station 23c mit 544–3281 Individuen. Ein jahreszeitlicher Trend ist weder auf Station 12c noch auf Station 23c klar zu erkennen.

Für Februar 1993 liegen für Station 12c keine Daten vor. Auf Station 23c haben die Suspensionsfresser mit 70,6% den höchsten Anteil. Die hauptsächlich beteiligten Arten sind *Polydora ciliata*, *Arctica islandica* und *Abra alba*.

Im Mai 1993 ist der Anteil der Suspensionsfresser mit 50,2% am größten. Hier kamen

Tabelle 3.2: Makrofaunaabundanz an Station 12c zu den Ausfahrtterminen eingeteilt in Ernährungstypen.

Station 12c	Summe #/m ²	Suspensionsfresser		Depositfresser		Carnivore	
		#/m ²	P in %	#/m ²	P in %	#/m ²	P in %
Mai.'93	464	233 (± 312)	50.2	213 (± 378)	45.9	18 (± 21)	3.9
Sept.'93	897	139 (± 89)	15.5	707 (± 361)	78.8	51 (± 19)	5.7
Nov.'93	37	-	-	10 (± 10)	27.0	27 (± 15)	73.0
Feb.'94	997	940 (± 638)	94.3	-	-	57 (± 13)	5.7
Apr.'94	36	13 (± 5)	36.1	15 (± 10)	41.7	8 (± 5)	22.2
Nov.'94	43	30 (± 16)	69.8	3 (± 5)	7.0	10 (± 8)	23.3

P = prozentualer Anteil an der Summe

Tabelle 3.3: Makrofaunaabundanz an Station 23c zu den Ausfahrtterminen eingeteilt in Ernährungstypen.

Station 23c	Summe #/m ²	Suspensionsfresser		Depositfresser		Carnivore	
		#/m ²	P in %	#/m ²	P in %	#/m ²	P in %
Feb.'93	796	562 (± 235)	70.6	202 (± 148)	25.4	32 (± 31)	4.0
Mai.'93	828	734 (± 232)	88.6	90 (± 78)	10.9	4 (± 9)	0.5
Sept.'93	1732	1210 (± 759)	69.9	444 (± 545)	25.6	78 (± 78)	4.5
Nov.'93	544	218 (± 150)	40.1	298 (± 198)	54.8	28 (± 21)	5.1
Feb.'94	925	570 (± 437)	61.6	240 (± 147)	25.9	115 (± 144)	12.4
Apr.'94	1268	900 (± 637)	71.0	280 (± 191)	22.1	88 (± 76)	6.9
Okt.'94	752	456 (± 423)	60.6	208 (± 78)	27.7	88 (± 38)	11.7
Nov.'94	3281	2385 (± 1286)	72.7	673 (± 554)	20.5	223 (± 101)	6.8

P = prozentualer Anteil an der Summe

hauptsächlich *Corbula gibba* und *Polydora ciliata* vor. Im September lag der Anteil der Depositfresser mit den Arten *Scoloplos armiger* und *Macoma balthica* am höchsten. Auf Station 23c sind die Suspensionsfresser am stärksten vertreten (hier sind es die Arten *Mytilus edulis* und *Polydora ciliata*).

September 1993 waren auf Station 12c die Suspensionsfresser (*Polydora ciliata* und *Arctica islandica*) der dominante Ernährungstyp. Dies ist auch auf 23c der Fall (kleine *Musculus niger*, *Mya arenaria*, *corbula gibba* und *Polydora ciliata*).

Im November 1993 waren auf Station 12c die carnivoren Arten, vertreten durch *Hali-cryptus spinulosus*, mit 73% am wichtigsten. Die Gesamtzahl ist mit 37 Individuen pro m² sehr gering. Auf Station 23c hatten die Depositfresser mit 54,8% den größten Anteil (hauptsächlich *Scoloplos armiger*).

Im Februar 1994 dominieren auf beiden Stationen die Suspensionsfresser mit 94,3% (*Abra alba* und *Corbula gibba*) auf Station 12c und mit 61,6% (juvenile *Arctica islandica*, *Astarte borealis* und *Mytilus edulis*) auf Station 23c.

Im April 1994 lag die Individuenzahl an Station 12c mit 36 pro m² wieder sehr gering. Die Ernährungstypen waren ungefähr gleichverteilt. Die vorkommenden Arten waren *Halicryptus spinulosus*, *Arctica islandica* und *Scoloplos armiger*. Auf Station 23c waren die Suspensionsfresser mit 71% am stärksten vertreten (*Abra alba*, *Astarte borealis*, -*elliptica* und *Polydora ciliata*).

Für Oktober 1994 liegen für Station 12c keine Daten vor. Auf Station 23c war der Anteil der Suspensionfresser am größten (*Polydora ciliata*, *Mytilus edulis* und *Abra alba*).

November 1994 schließlich dominierten wieder die Suspensionsfresser an beiden Stationen (12c: *Polydora ciliata* und *Mytilus edulis* mit 69,8%). An Station 23c erreichten sie 72,7% (*Polydora ciliata*, juvenile *Corbula gibba*, *Astarte elliptica*, *Musculus niger* und *Arctica islandica*).

Im Anhang B sind die Grunddaten angegeben. Die zum Teil hohe Standardabweichung der einzelnen Greiferproben unterstreicht die Fleckenhaftigkeit der Verteilung. Deswegen wurden die Stationen an zwei Ausfahrtterminen zusätzlich mit dem Videoschlitten beobachtet.

Die Ergebnisse der Videoaufnahmen an den Stationen: Im Februar 1995 wurden über die Stationen beider Transekte (Abb. 2.1) je 15-minütige Profile pro Station mit dem Videoschlitten gefahren. Dabei wurden von dem 6sm langen 12er Transekt 1,08sm und von dem 2sm langen 23er Transekt 1,13sm des Untergrundes erfaßt. Es wurde jeweils von der landfernstesten zur landnächsten Station geschleppt. Je nach Neigung der Videokamera zum Boden wurden verschieden große Areale des Bodens abgebildet. Für diese Ausfahrt wurde ein mittlerer Bodenausschnitt von 0,25–0,5m² pro Bild ermittelt. Der Untergrund des 12er Transektes war schlickig und relativ uneben. Schlepsspuren von Netzen waren als tiefe Rillen zu erkennen. Die Bodenunebenheiten erreichen bis zu 20cm Niveauunterschied. Dadurch wurde der Bildausschnitt ständig verändert. In Richtung Land nahm die Anzahl der leeren *Mya arenaria* Schalen an der Oberfläche zu. An Spuren von Tieren waren die offenen Löcher von *Halicryptus*-Bauten (identifiziert nach Aufnahmen von POWILLEIT (1988)) (bis zu 10 Löcher pro Bild), ferner die Spuren von Muscheln zu erkennen.

Auf dem 23er Transekt sah die Situation am Boden in den tiefen Regionen ähnlich wie auf dem 12er Transekt aus. Auch hier beeinflussten tiefe Rillen (von Scherbrettern der Fischerei) das Bodenprofil. Die sichtbare Besiedelung war hier höher. Es waren mehr

Muscheln bzw. ihre „Ausstoßfahnen“ zu sehen, wenn sie die Schalen bei Annäherung des Videoschlittens schlossen. Ab Station 23b landwärts wurde die Bodentopographie von 0,3 bis 0,8 m hohen Blöcken und Steinen geprägt, die als Hartsubstrat eine entsprechende Besiedelung mit Muscheln, Balaniden und Algen besaßen. Hier waren am Boden zuweilen Flecken mit hoher Polychaetenröhrendichte zu erkennen. Hinter dem Geröllfeld wurde die Bodentopographie einheitlicher (flacher) und es lagen sehr viele offene Muschelschalen auf dem Grund (mehr als 10 pro Bild). Die Fleckenhaftigkeit von Makrofauna bzw. ihren Spuren wurde im Prinzip bestätigt.

3.1.4 Sedimentanalysen

Die Chlorophylläquivalentgehalte (im Folgenden CPE-Gehalte genannt) im Sediment der Stationen 12c und 23c, sowie einige sinnvolle Anpassungen an die Modellfunktion nach SUN *et al.* (1991) (siehe Gleichung (2.1)) sind in den Abbildungen 3.4, 3.5 und 3.6 dargestellt.

Im Februar 1993 zeigt das Profil für Station 12c keine kontinuierliche Abnahme (siehe Abb. 3.4a). In 4 cm Tiefe tritt ein Maximum auf. Hier könnte ein Makrofaunagang angeschnitten worden sein. Der CPE-Gehalt nimmt insgesamt von $146 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ an der Oberfläche auf $93,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 6 cm Tiefe ab. Auf Station 23c ist fast kein Gradient zu erkennen (siehe Abb. 3.4b). Hier nehmen die Werte von $42,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ an der Oberfläche auf $23,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 4,5 cm Tiefe ab.

Im Mai 1993 bleibt der CPE-Gehalt auf Station 12c mit Werten um $120 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ bis in 7 cm Tiefe annähernd konstant, danach nimmt er bis in 10 cm Tiefe ab und erreicht $47 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ (Abbildung 3.4c). Auf Station 23c nimmt der CPE-Gehalt mehr oder weniger kontinuierlich ab. Die Werte liegen mit einem geringen MSE von $2,3 \text{ mg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ cm}^{-2}$ (im Folgenden ohne Einheit angegeben) praktisch alle auf der Modellfunktion (siehe Abb. 3.4d).

Im September 1993 fällt der CPE-Gehalt auf Station 12c kontinuierlich von $101,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $31,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 10 cm Tiefe ab (siehe Abb. 3.4e). Das Modell ist mit einem mittleren Fehlerquadrat von 55,6 gut anwendbar. Auf Station 23c verläuft die CPE-Abnahme exponentiell von $142,7 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $10,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 10 cm Tiefe. Der MSE-Wert der Funktion ist hier 25,2 (siehe Abb. 3.4f).

Im November 1993 bleibt an Station 12c der CPE-Gehalt über eine Tiefe von 10 cm mit Werten um $108 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ nahezu konstant (Abbildung 3.5a). Hier wurde durch den Sturm wahrscheinlich das Sediment gut durchmischt. Auf Station 23c ist eine leichte Ab-

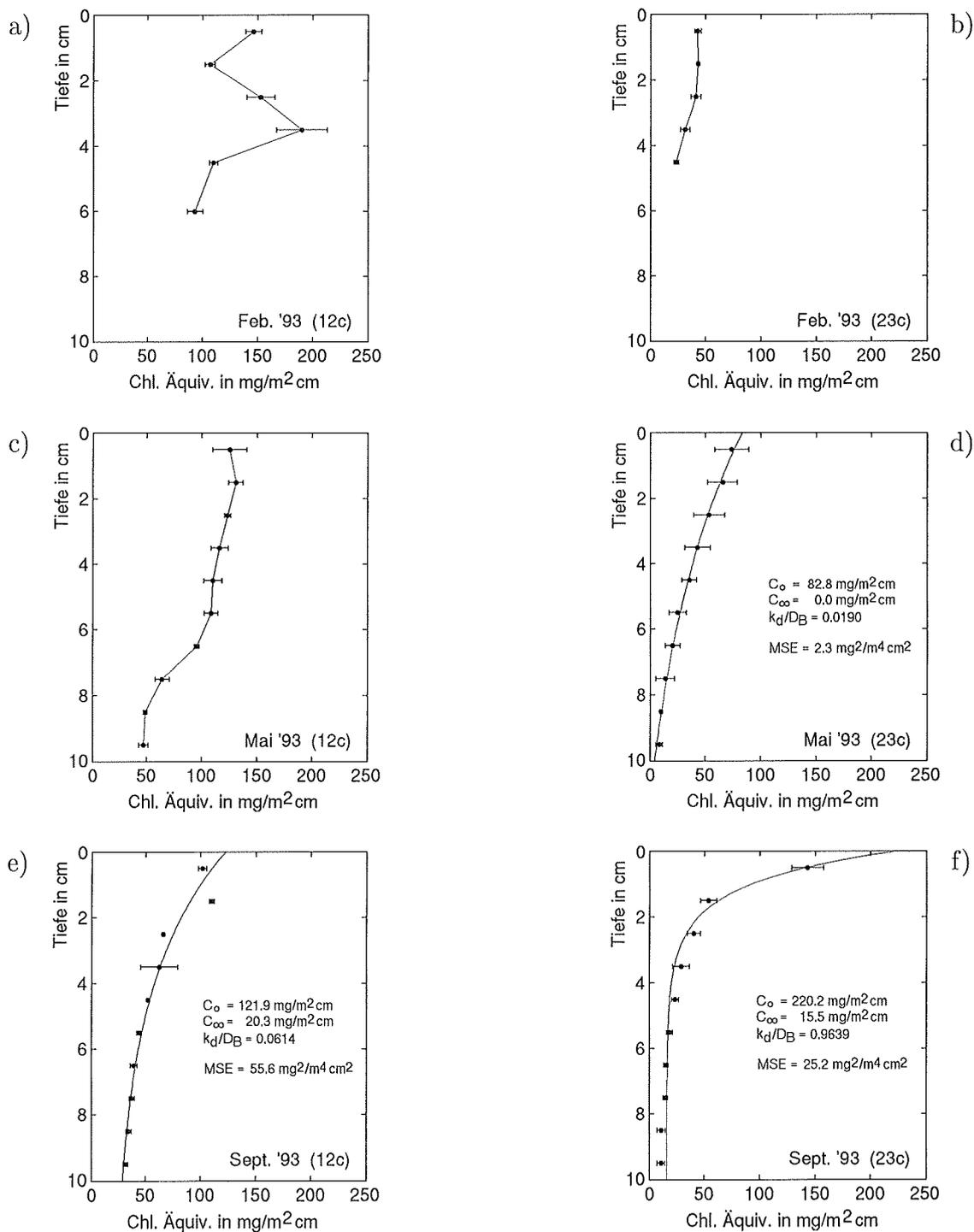


Abbildung 3.4: Der Chlorophylläquivalent-Gehalt im Sediment an den Stationen 12c (a, c und e) und 23c (b, d und f) zu den Ausfahrten. Bei d, e und f ist die Modellfunktion nach Gl. (2.1) eingezeichnet.

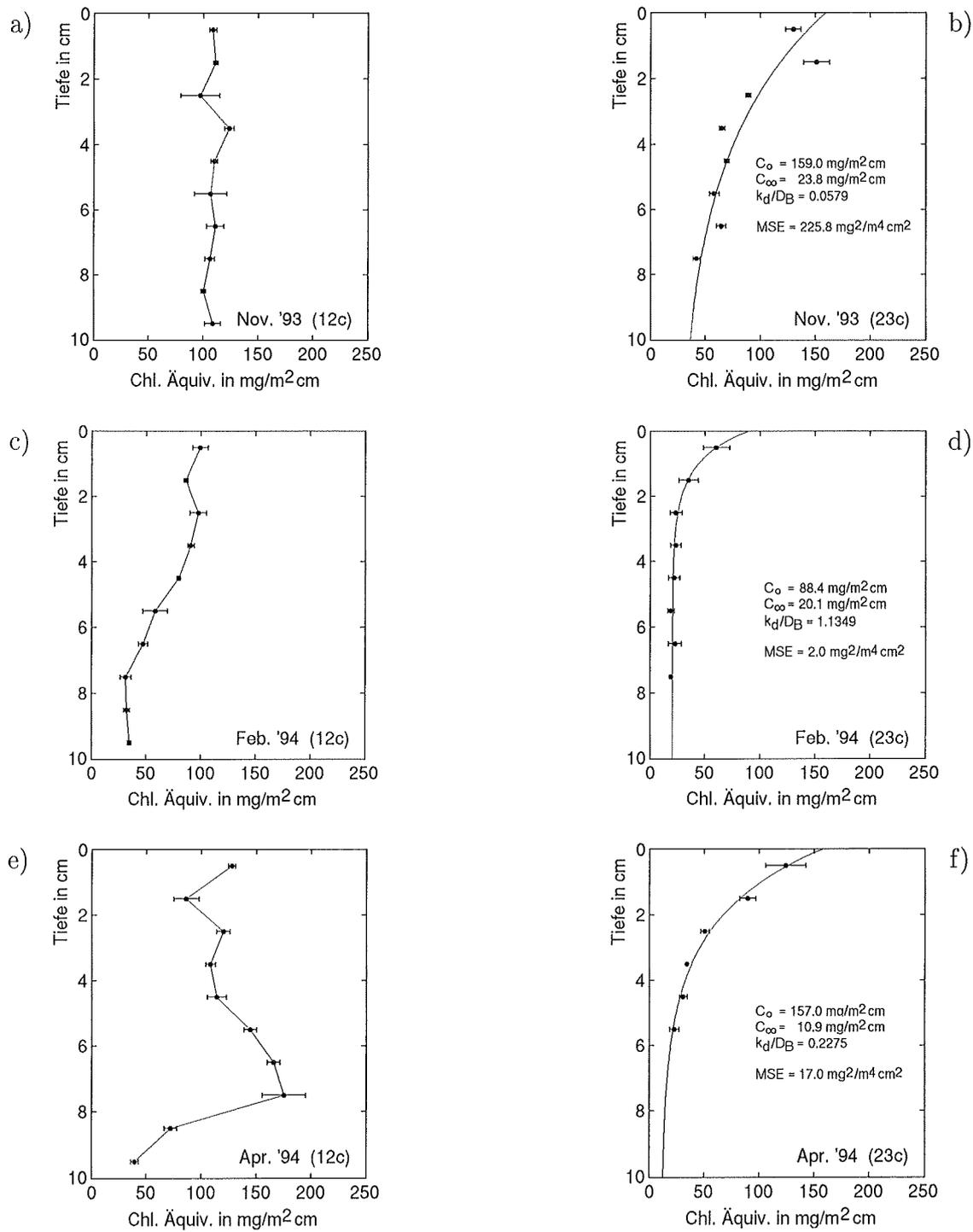


Abbildung 3.5: Der Chlorophylläquivalent-Gehalt im Sediment an den Stationen 12c (a, c und e) und 23c (b, d und f) zu weiteren Ausfahrten. Bei b, d und f ist die Modellfunktion nach Gl. (2.1) eingezeichnet.

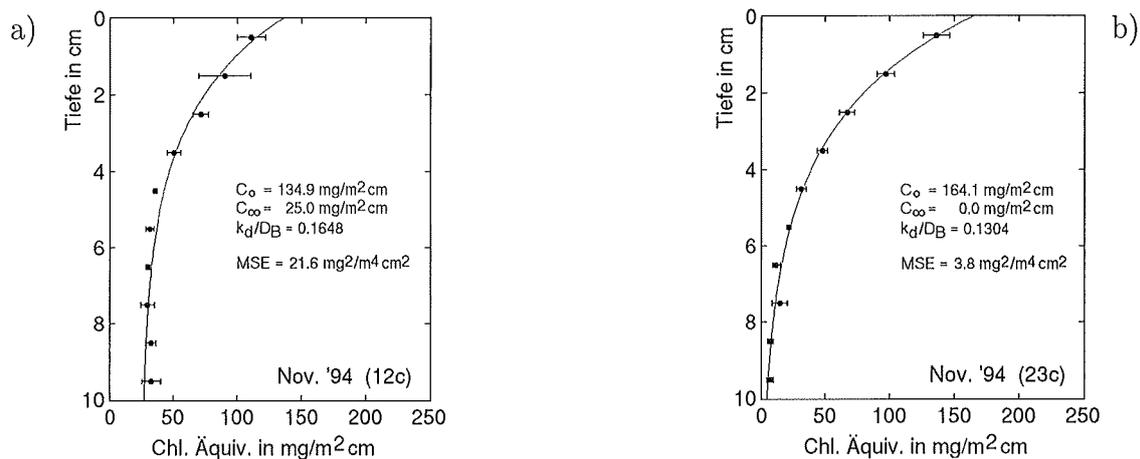


Abbildung 3.6: Die Chlorophylläquivalent-Gehalte im Sediment an den Stationen 12c (a) und 23c (b) zu weiteren Ausfahrten. Bei beiden Profilen ist die Modellfunktion nach Gl. (2.1) eingezeichnet.

nahme im Pigmentgehalt von $129,9 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $42,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 7,5 cm Tiefe festzustellen. Das mittlere Fehlerquadrat bei Anwendung der Funktion (2.1) liegt hier bei 225,8 (Abbildung 3.5b).

Im Februar 1994 verläuft die CPE-Abnahme über die Tiefe an Station 12c unregelmäßig mit Werten von $99,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $33,9 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 10 cm Tiefe (Abb. 3.5c). Auf Station 23c nimmt der Gehalt an CPE exponentiell ab ($60,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ an der Oberfläche und $18,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 7,5 cm Tiefe). Der MSE-Wert ist hier mit 2,0 sehr gering (Abb. 3.5d).

Im April 1994 verläuft das Profil auf Station 12c sehr unregelmäßig. Die Werte nehmen von $127,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $39 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 10 cm Tiefe ab (Abb. 3.5e). In 8 cm Tiefe liegt ein Maximum, das wie im Februar wahrscheinlich auf Tieraktivität zurückzuführen ist. Auf Station 23c nimmt der CPE-Gehalt exponentiell ab ($123,8 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ im ersten Zentimeter auf $22,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ in 5,5 cm Tiefe). Der MSE-Wert beträgt 17.

Im November 1994 zeigen die Profile an Station 12c und 23c (siehe Abbildung 3.6a und b) eine exponentielle Abnahme mit Werten von $110,7 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ (Oberfläche) auf $32,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ (10 cm Tiefe) für 12c und $136 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ (Oberfläche) auf $6,8 \text{ mg m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$ für 23c (10 cm Tiefe). Die MSE-Werte betragen 21,6 für 12c und 3,8 für 23c.

An Station 12c war der Profilverlauf insgesamt uneinheitlicher und gestörter als auf Station 23c. Eine jahreszeitliche und zwischen den Stationen herrschende Unterschiedlich-

keit in den CPE-Gehalten konnte nicht festgestellt werden. Eine exponentielle Abnahme des Pigmentgehaltes, wie sie für bioturbate Sedimente typisch ist, trat an Station 12c nicht so deutlich auf wie an der dichter besiedelten Station 23c. Die Rohdaten sind im Anhang C zusammengestellt.

ATP-Gehalt im Sediment: Der ATP-Gehalt als Maß für die Biomasse der kleineren Organismen unterhalb Makrofaunagröße ($<1000 \mu\text{m}$) schwankt an Station 12c zwischen 557 ng cm^{-3} im Februar 1994 und 2310 ng cm^{-3} im November 1993 (siehe Abbildung 3.7). Die Wiederfundrate lag für alle Proben im Mittel bei 46%. An Station 23c reichte der ATP-Gehalt zwischen 294 ng cm^{-3} im Februar 1994 und 2405 ng cm^{-3} im April 1994 (siehe Abbildung 3.7). Bis auf den April 1994 lag die ATP-Biomasse auf Station 12c deutlich höher als auf Station 23c und im Winter an beiden Stationen jeweils höher als im Sommer (mit Ausnahme der hohen Werte im April 1994).

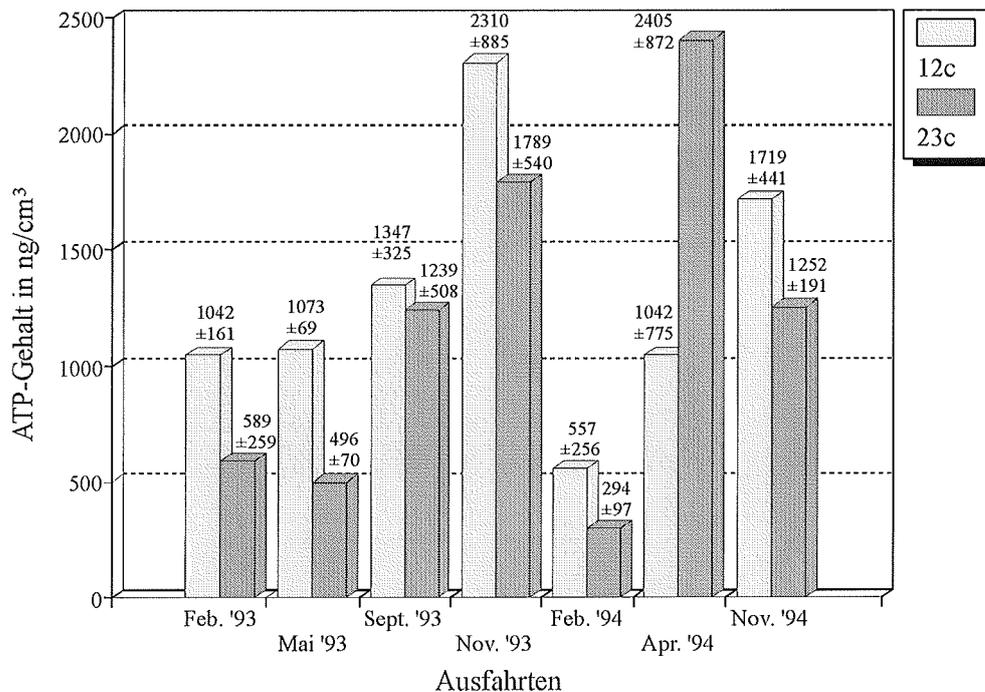


Abbildung 3.7: Der ATP-Gehalt im obersten Sedimentzentimeter an den Stationen 12c und 23c zu den verschiedenen Ausfahrten.

3.1.5 Feldexperiment

Das Feldexperiment fand am 10.11.94, ausgehend von Station 12c, in der Zeit von 06:00 bis 18:00 Uhr statt. Die meteorologischen und hydrodynamischen Bedingungen blieben während des Experimentes annähernd gleich. In dieser Zeit wehte der Wind aus östlicher

Richtung mit Geschwindigkeiten von $3,5$ bis 9 m s^{-1} (siehe Abbildung 3.8). Die Strömungsgeschwindigkeiten in 45 cm über Grund sind nach JÄHMLICH (pers. Mittlg.) in der Tabelle 3.4 dargestellt.

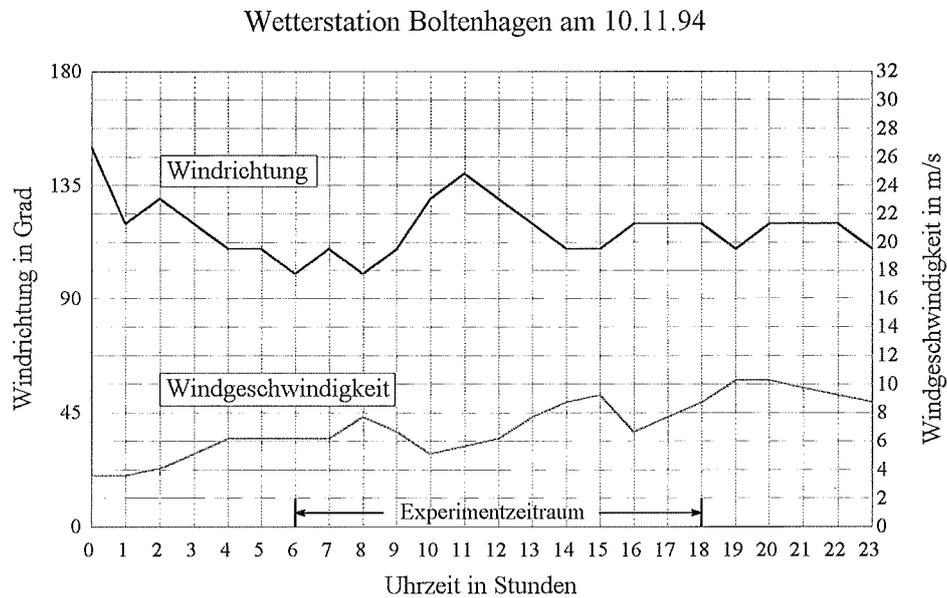


Abbildung 3.8: Windrichtung und -geschwindigkeit während des Feldexperimentes.

Tabelle 3.4: Strömungsgeschwindigkeiten in 45 cm über Grund am 10.11.94 an den Experimentstationen aus Partikelkameraaufnahmen (Daten von JÄHMLICH pers. Mittlg.)

Station	12c = E1	E2	E3	E4	E5
Abstand von Station 12c in m	0	500	1000	1500	2000
Mittelwert in cm s^{-1}	5,0	3,9	5,7	4,4	4,2
Standardabweichung in cm s^{-1}	/	0,8	1,2	1,3	0,9

Gesamtes partikuläres Material: Der Gehalt an TPM in 5 cm über Grund ist stromabwärts nach 500 m mit $49 \text{ mg } \ell^{-1}$ höher als am Startpunkt ($25,64 \text{ mg } \ell^{-1}$). Nach 2000 m ist der Wert $14 \text{ mg } \ell^{-1}$ (siehe Abb. 3.9).

Partikulärer organischer Kohlenstoff: Der POC-Gehalt in 5, 10 und 20 cm über Grund liegt an jedem Meßpunkt der Strecke im Bereich von $0,07 \text{ mg } \ell^{-1}$. Eine deutliche Tendenz ist nicht zu erkennen. In 40 cm Höhe sind die Werte mit $0,18\text{--}0,37 \text{ mg } \ell^{-1}$ deutlich erhöht. Nach 2000 m ist der POC-Gehalt mit $0,05 \text{ mg } \ell^{-1}$ wieder geringer (siehe Abbildung 3.9).

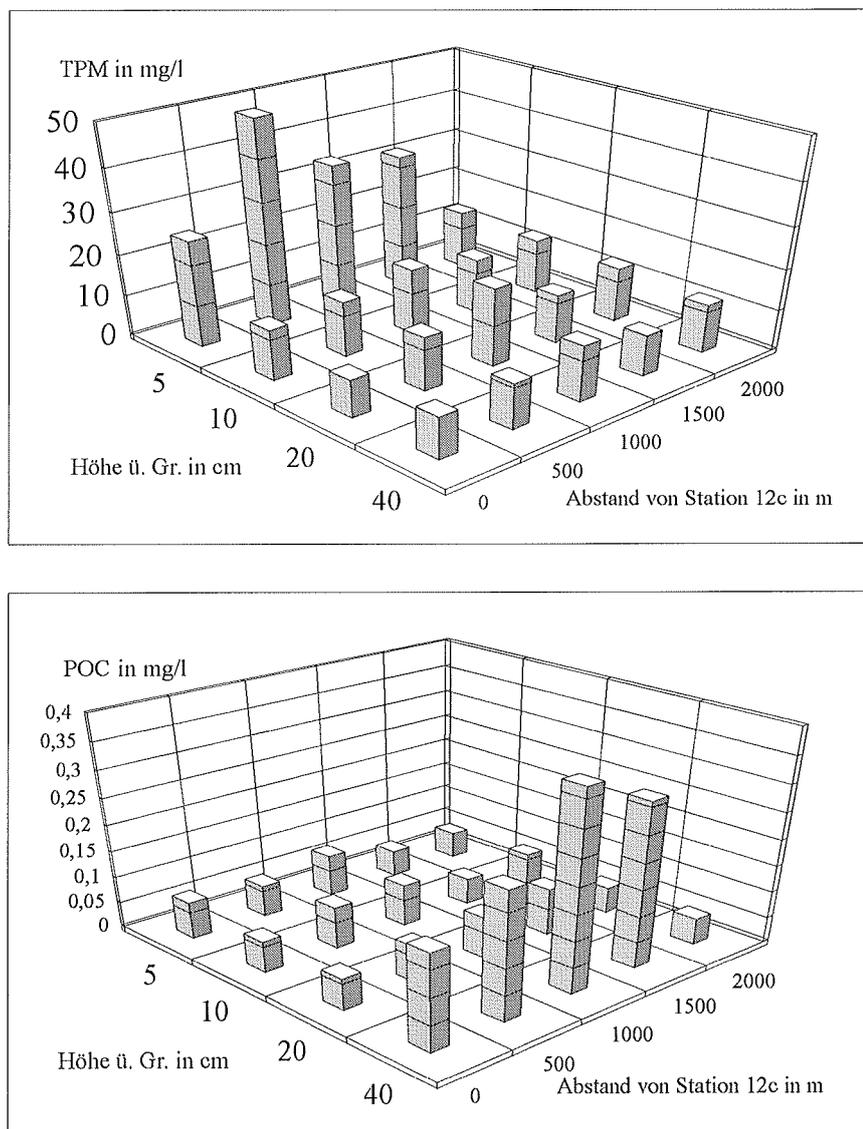


Abbildung 3.9: Der TPM-Gehalt (oben) und der POC-Gehalt im Bodenwasser in Strömungsrichtung an den Experimentstationen (Daten von JÄHMLICH, unveröff.).

Chlorophylläquivalente: Der CPE-Gehalt in 5 cm über Grund ist nach 500 m ebenfalls höher als am Startpunkt (von 4,9 auf $8,32 \mu\text{g } \ell^{-1}$). Am Ende der Versuchsstrecke ist der Gehalt $2 \mu\text{g } \ell^{-1}$ und somit wieder geringer. In 10 cm Höhe über Grund ist dies nicht mehr zu erkennen, hier bewegt sich der Gehalt an jedem Meßpunkt um $3,5 \mu\text{g } \ell^{-1}$. In 20 und 40 cm Höhe über Grund ist der Gehalt nach 500 und 1000 m höher und später dann wieder geringer. Er liegt unterhalb des Wertes der ersten Station (siehe Abbildung 3.10).

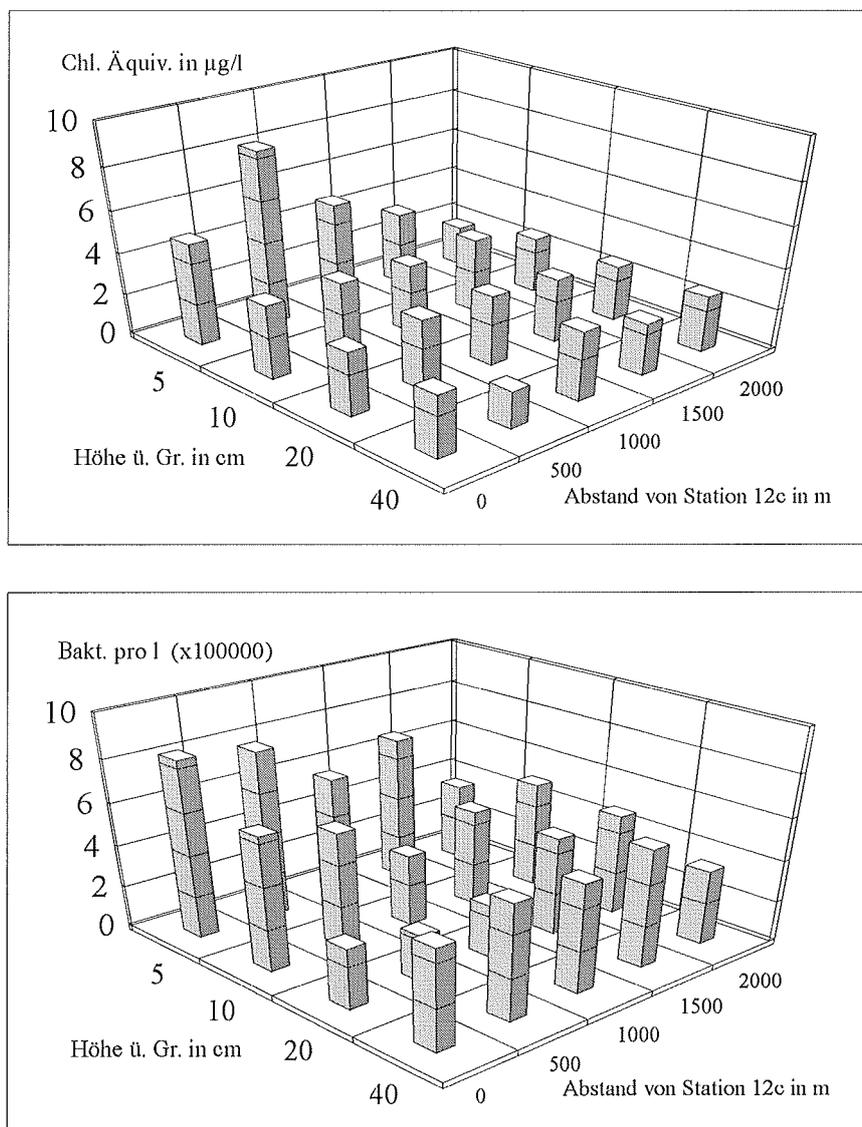


Abbildung 3.10: Der Chlorophylläquivalentgehalt (oben) und die Bakterienabundanz im Bodenwasser in Strömungsrichtung an den Experimentstationen (Daten von JÄHMLICH, unveröff.).

Bakterienabundanz: Die Bakterienanzahl variiert über die Strecke in jeder gemessenen Höhe.

Harnstoff: Der Harnstoffgehalt war nach 1000 m in 5 cm über Grund zunächst höher als am Startpunkt (Anstieg von $0,22$ auf $0,67 \mu\text{mol l}^{-1}$). Am Ende der Strecke war der Wert mit $0,52 \mu\text{mol l}^{-1}$ wieder geringer. In 10 cm Höhe nahm der Harnstoffgehalt zunächst zu (von $0,21$ auf $0,41 \mu\text{mol l}^{-1}$ nach 500 m), blieb dann jedoch bis zum Ende der Versuchsstrecke ungefähr konstant. In 20 und 40 cm über Grund nahm der Harnstoffgehalt über die Versuchsstrecke ab (siehe Abbildung 3.11).

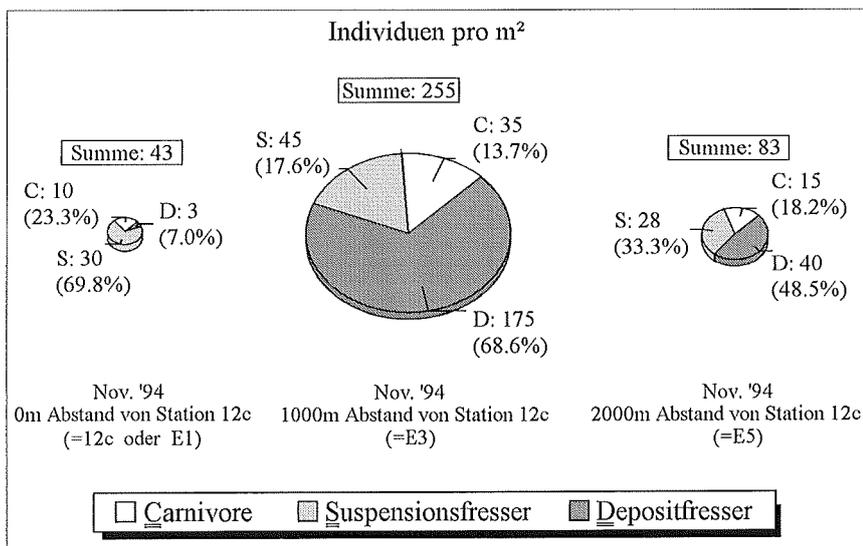
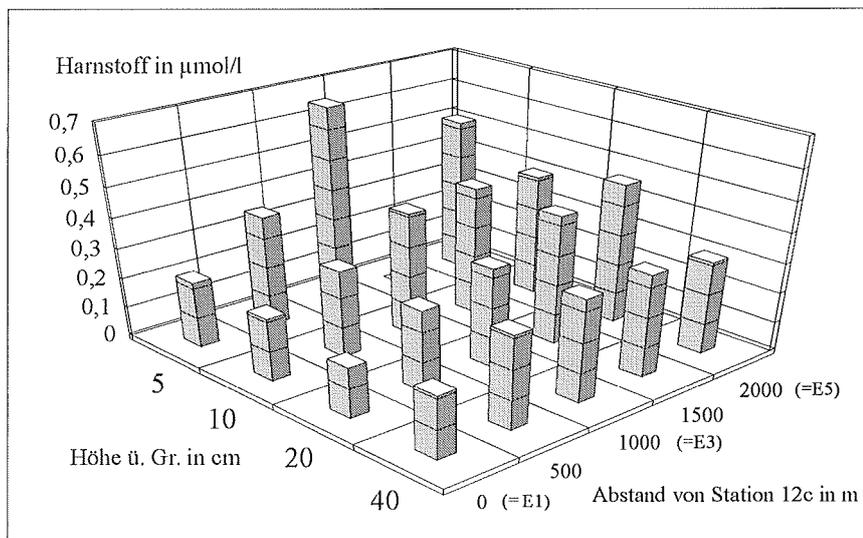


Abbildung 3.11: Der Harnstoffgehalt im Bodenwasser (Daten von JÄHMLICH, unveröff.) und die Makrofaunaabundanz an den Experimentstationen in Strömungsrichtung.

Makrofaunaabundanz: Makrofaunaproben wurden an 3 der 5 Experimentstationen im Abstand von 1000 m bestimmt. Die Daten von Station 1 sind mit denen von 12c identisch. Für den direkten Vergleich mit den anderen Stationen sind sie in Abbildung 3.11 noch einmal alle dargestellt. Die Gesamtmakrofaunazahlen liegen mit 43, 255 und 83 Individuen pro m^2 sehr niedrig im Vergleich zu den Zahlen an den anderen Ausfahrtterminen. Auch hier ist die Fleckenhaftigkeit der Makrofauna an den hohen Standardabweichungen zwischen den Einzelproben zu erkennen. An Station 12c/E1 dominieren die Suspensionsfresser mit 69,8%. Es kamen hauptsächlich *Polydora ciliata* und *Mytilus edulis* vor. An Station E3 und E5 sind die Depositionsfresser mit 68,6% und 48,5% die führende Gruppe. Sie bestanden hier überwiegend aus Polychaeten der Spezies *Scoloplos armiger*.

Zusammenfassend kann man keine Trends bei der Veränderung der Größen der Werte der einzelnen Parameter auf der 2000 m langen Versuchsstrecke feststellen, bis auf den Harnstoff. Dieser Parameter zeigt zunehmende Tendenz über die Strecke.

3.2 Strömungskanal und Laborexperimente

3.2.1 Hydrodynamische Eigenschaften des neugebauten Strömungskanals

Zunächst wurden die grundsätzlichen Eigenschaften des Kanals untersucht. Dazu gehören die Ausbildung einer Grenzschicht, Wandeffekte und generelle Formen von Strömungsprofilen bei verschiedenen Antriebsstärken an unterschiedlichen Stellen und in verschiedenen Höhen. Als Maß für die Antriebsleistung wird der Skalenwert des Stellpotentiometers (1–10) oder die dazugehörige Freistromgeschwindigkeit v_∞ verwendet. Die Ergebnisse zum Strömungsregime im Kanal mit dem Akustik-Doppler-Sensor werden im Folgenden beschrieben.

Das Strömungsregime im Kanal: Zunächst wurde festgestellt, wie sich die verschiedenen Antriebsstärken auf das Strömungsgeschehen auswirken. In 4 cm über Grund wurde am Beginn der Testsektion in Kanalmitte die mittlere Geschwindigkeit in x-Richtung in Abhängigkeit von der Antriebsstärke (Potentiometerskala) gemessen. Es ergibt sich ein fast linearer Zusammenhang (Abbildung 3.12). Die Freistromgeschwindigkeit v_∞ beträgt bei maximalem Antrieb $12,5 \text{ cm s}^{-1}$.

Die Verteilung der x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors über der Kanalgrundfläche an der Testsektion in 5 cm über Grund ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Man erkennt, daß die Wandeffekte an beiden Seiten etwa 10 cm in den Kanal reichen. Die Antriebsstärke ist maximal, das heißt v_∞ ist ca. $12,5 \text{ cm s}^{-1}$. Es wird also der „turbulenteste“

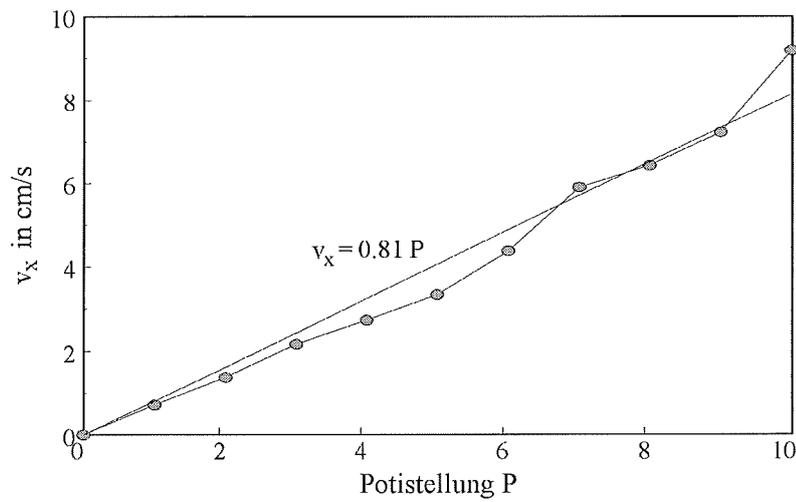


Abbildung 3.12: Zusammenhang zwischen Antriebsstärke und Geschwindigkeit v_x in 4 cm Höhe am Beginn der Testsektion.

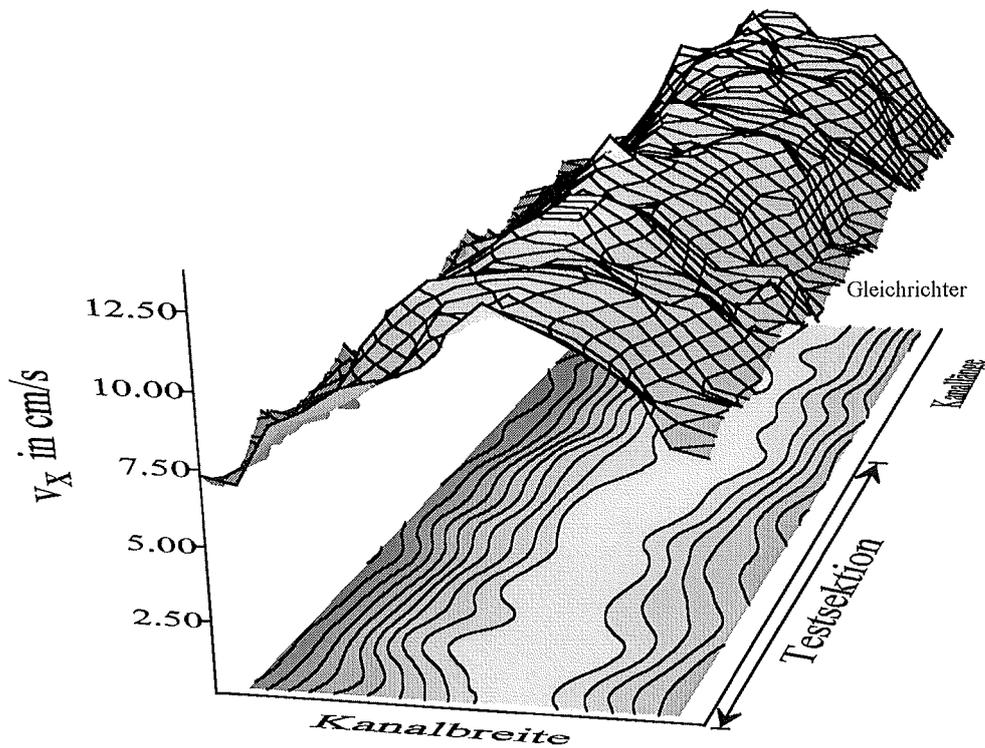


Abbildung 3.13: Verteilung der x-Komponente des Geschwindigkeitsvektors v_x in 5 cm Höhe über Grund über einer ausgewählten Kanalgrundfläche. Die Lage der Testsektion ist eingezeichnet.

Fall gezeigt. Bei geringeren Geschwindigkeiten ist der Verlauf dieses Profils gleichmäßiger und die Wandeffekte werden geringer.

In Abbildung 3.14 wird für zwei Freistromgeschwindigkeiten die Verteilung der Turbulenzintensität berechnet (GAMBI *et al.*, 1990). Hierzu wird die vektorielle Summe der Standardabweichung der drei Geschwindigkeitskomponenten durch die vektorielle Summe der Mittelwerte dividiert und prozentual dargestellt. Gezeigt sind die Verhältnisse in 2 cm Höhe über der Testsektion bei ca. 5 und 10 cm s^{-1} Freistromgeschwindigkeit. In beiden Fällen nimmt die Turbulenzintensität von 10 bis 12% im mittleren Bereich auf 16% an den Seitenwänden zu. Die Schwankungen im Bereich der Mitte der Testsektion liegen ebenfalls zwischen 10 und 12%.

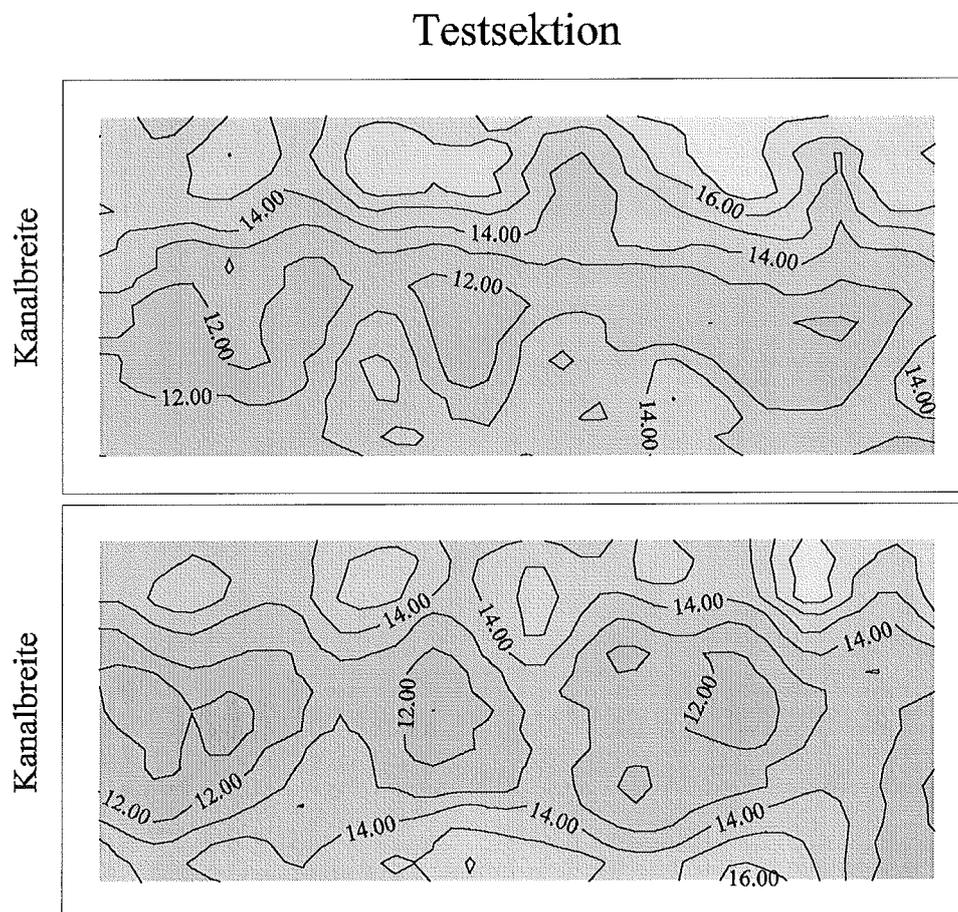


Abbildung 3.14: Verteilung der Turbulenzintensität in 2 cm Höhe über der Testsektion bei zwei Antriebsstärken. Das obere Bild zeigt die Verhältnisse bei v_∞ von ca. 5 cm s^{-1} und das untere Bild bei v_∞ von ca. 10 cm s^{-1} .

Weiterhin wurden Vertikalprofile in der Mitte des Kanals in unterschiedlichen Abständen vom Gleichrichter aufgenommen, um die Ausbildung einer Grenzschicht verfolgen zu

können. Sie werden zusammen mit der Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit im nächsten Abschnitt dargestellt.

3.2.2 Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit

Im Folgenden wird anhand von vier Vertikalprofilen mit Grobsand (Abb. 3.15) und zwei Profilen mit Feinsand (Abb. 3.16) die Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und der Rauigkeitslänge z_0 beschrieben.

Zunächst läßt sich feststellen, daß die „Boundary Layer“ sich vorwiegend bis in 5 cm Wasserhöhe ausbildet. Der darüberliegende Bereich folgt nicht mehr dem durch die Theorie vorgegebenen logarithmischen Strömungsprofil (vgl. Abschnitt 2.2.1), das Grundlage für die Berechnungen von u_* und z_0 ist. Dieser obere Bereich wird deshalb bei der mathematischen Anpassung an die Modellfunktion vernachlässigt. Dies wird in den Abbildungen durch hellere Punkte gekennzeichnet. Die für die Anpassung verwendeten Punkte sind dunkel dargestellt. Ebenso ist die angepaßte Funktion schwarz eingezeichnet. In dem Profil in Abb. 3.15b) konnte keine Funktion angepaßt werden, da sich aufgrund der Position direkt hinter dem Gleichrichter noch keine Grenzschicht ausgebildet hat. Ansonsten lassen sich überall beide Parameter berechnen.

Für beide Sedimenttypen kann festgestellt werden, daß u_* für geringe Freistromgeschwindigkeiten v_∞ klein ist (Abb. 3.15a und 3.16a) und im Bereich zwischen $0,1 \text{ cm s}^{-1}$ und $0,2 \text{ cm s}^{-1}$ liegt. Wird v_∞ größer, so steigt auch u_* für beide Sedimenttypen an (Abb. 3.15c,d) und Abb. 3.16b). Die Werte liegen hier im Bereich von $0,3$ bis $0,5 \text{ cm s}^{-1}$. Der Parameter z_0 verhält sich entgegengesetzt. Er nimmt bei geringen Freistromgeschwindigkeiten Werte von $0,04$ bis $0,06 \text{ cm}$ an, während er bei hohen v_∞ zwischen $0,001$ und $0,01 \text{ cm}$ liegt.

Bei den Profilen in Abbildung 3.15b),c) und d) liegen die Geschwindigkeitswerte in den Höhen $0,9 \text{ cm}$ und $7,6 \text{ cm}$ fast wieder bei Null. Dies ist ein durch Resonanzeffekte des Akustik-Doppler-Sensors bei zwei kritischen Höhen bedingtes Artefakt. Da dies jedoch bekannt ist, kann man durch Wahl anderer Höhen diesen Meßfehler vermeiden.

Die Veränderung der Grenzschicht und der Werte von u_* und z_0 durch biologische Strukturen werden im folgenden Abschnitt gezeigt.

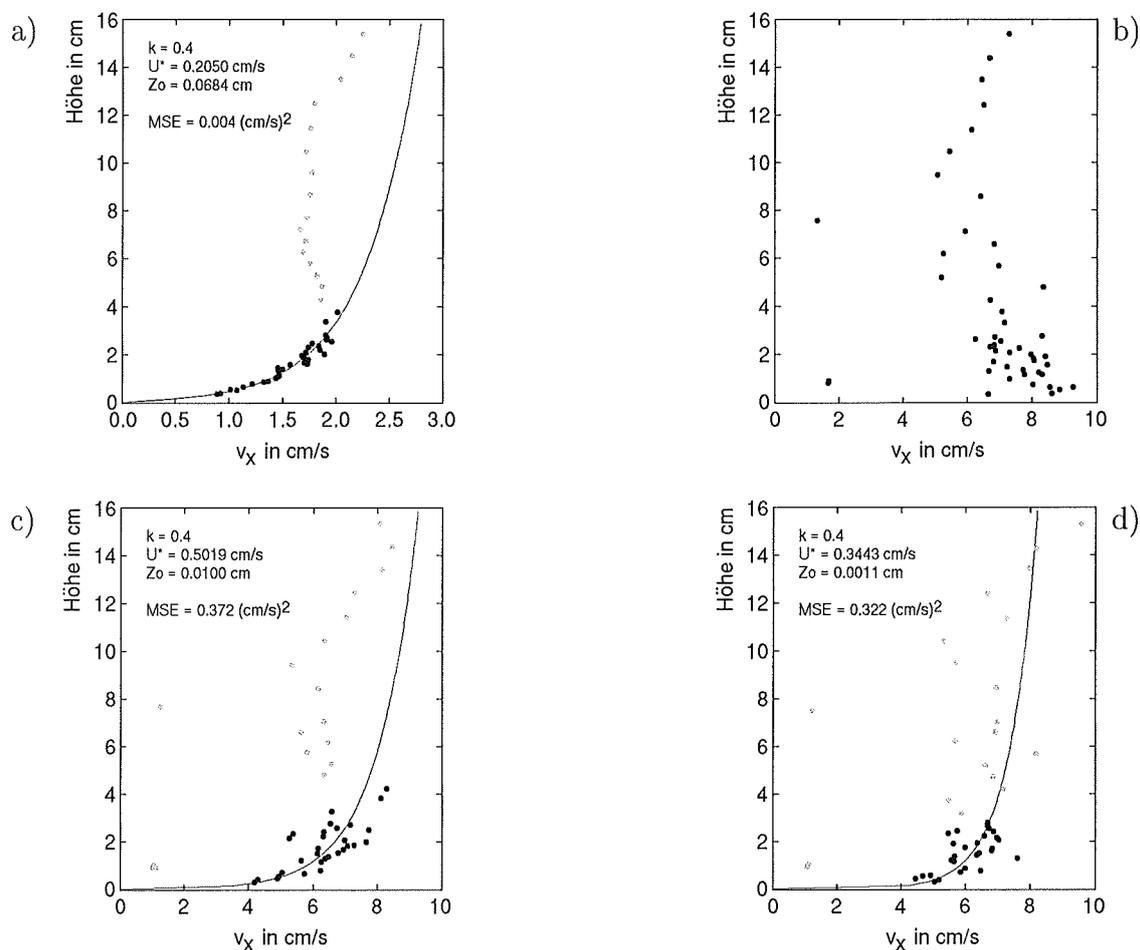


Abbildung 3.15: Vertikalprofile in der Kanalmitte bei unterschiedlichem Abstand vom Gleichrichter und bei zwei verschiedenen Antriebsstärken. Bei a) beträgt die Freistromgeschwindigkeit 2 cm s^{-1} , die Lokation im Kanal ist über dem Kern B. Die Abbildungen b), c) und d) sind bei der Freistromgeschwindigkeit $8,5 \text{ cm s}^{-1}$ direkt hinter dem Gleichrichter, über Kern B und über Kern C entstanden. Die Anpassungsfunktionen wurden in a), c) und d) für den jeweils logarithmischen Teil des Profils nach Gleichung (2.5) vorgenommen.

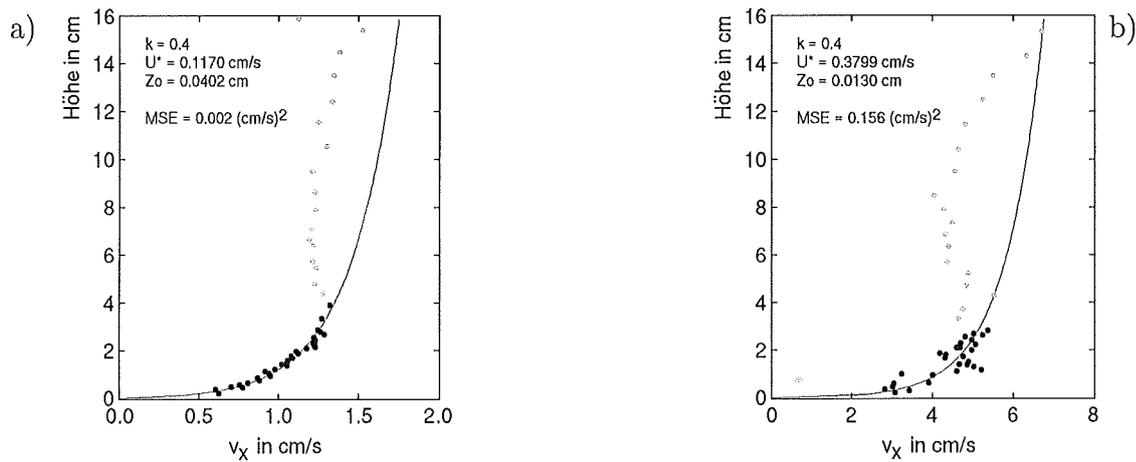


Abbildung 3.16: Vertikalprofile in der Kanalmitte 10 cm vor der Testsektion bei v_∞ von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ a) und $6,5 \text{ cm s}^{-1}$ b) Die Anpassungsfunktion nach Gleichung (2.5) wurde für beide Profile durchgeführt.

3.2.3 Modifikation der Strömungsprofile durch biologische Strukturen

Der Einfluß einzelner *Arctica islandica*: Hier sollte der indirekte Einfluß biogener Strukturen auf das Strömungsregime genauer untersucht werden. In die Testsektion wurden zwei *Arctica islandica* Schalen halb ins Sediment gesteckt. Eine Schale, in den weiteren Ausführungen Muschel „A“ genannt, wurde mit der Längsachse in Hauptstromrichtung und die andere (Muschel „B“) mit der Längsachse quer zur Hauptstromrichtung eingesetzt. In einem Vorexperiment hatten *Arctica islandica*, die im Kanal auf das Sediment gelegt worden waren, sich in ähnlicher Weise eingegraben, wobei 9 von 15 Individuen sich eher längs zur Hauptstromrichtung orientiert hatten.

Der Abstand von den Gleichrichtern betrug für Muschel „A“ 106 cm und für Muschel „B“ 107 cm. Der Abstand zur nächsten Kanalseitenwand betrug für Muschel „A“ 8 cm und 15 cm zur anderen Seitenwand für Muschel „B“. In Abbildung 3.17 ist ein Photo der Muscheln von oben mit der Messung der x-Komponente des Strömungsgeschwindigkeitsvektors in 1 cm über Grund kombiniert. Die Hauptstromrichtung verläuft von links nach rechts. Man erkennt, daß hier der Einfluß von Muschel „B“ mindestens bis 12 cm hinter der Muschel anhält, wohingegen bei Muschel „A“ der Einfluß bis maximal 2 cm hinter die Muschel reicht. Hinter Muschel „B“ verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit von $3,6 \text{ cm s}^{-1}$ auf $0,8 \text{ cm s}^{-1}$ und wird dann wieder größer. Bei Muschel „A“ ist praktisch 2 cm hinter der Muschel die alte Geschwindigkeit wieder erreicht.

Die z-Komponente des Geschwindigkeitsvektors über den Muscheln bei derselben Freistromgeschwindigkeit und in derselben Höhe über Grund zeigt hier bei beiden Muscheln

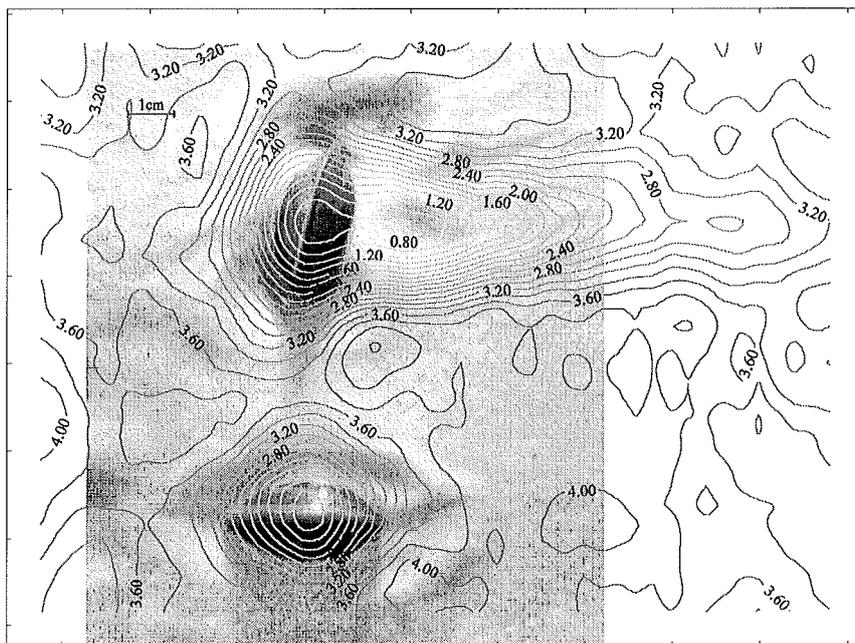


Abbildung 3.17: v_x -Strömungsfeld in 1 cm Höhe über Grund um die Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} . Die Meßpunkte wurden in 5 mm Abstand aufgenommen. Die Strömung verläuft von links nach rechts.

einen Einfluß bis weit hinter die Muscheln, jedoch reicht auch hier der Einfluß der quer zur Hauptströmungsrichtung liegenden Muschel (B) weiter als der mit der Längsachse in Strömungsrichtung liegenden Muschel (A) (siehe Abbildung 3.18). Abnehmende Werte zeigen an, daß diese Strömungskomponente nach unten weist. Der weitere Verlauf hinter Muschel „B“ scheint verwirbelt. Hinter Muschel „A“ ist dieser Effekt nur schwach ausgeprägt. Um nun festzustellen, inwieweit eine Störung aller drei Geschwindigkeitsvektoren des Strömungsregimes durch die Muschelschalen geschieht, wurde der vektorielle Betrag der Standardabweichung ($\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2 + \Delta v_z^2}$) gebildet und über den Schalen aufgetragen (siehe Abbildung 3.19). Hier ist deutlich die Störung durch Muschel „B“ höher und reicht mehr als 12 cm hinter die Schale. Bei Muschel „A“ reicht der Einfluß nur bis 2 cm hinter die Schale.

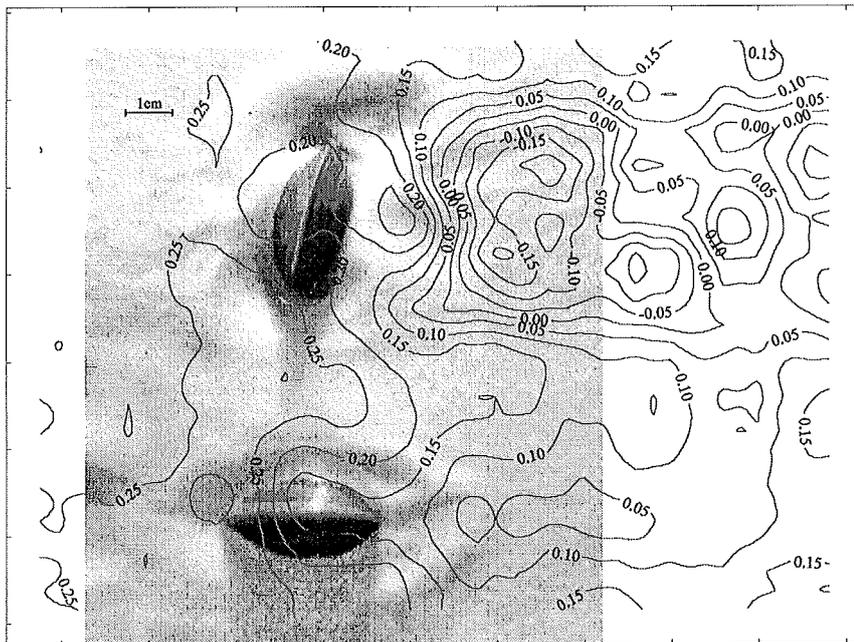


Abbildung 3.18: v_z -Strömungsfeld in 1 cm Höhe über Grund um die Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} .

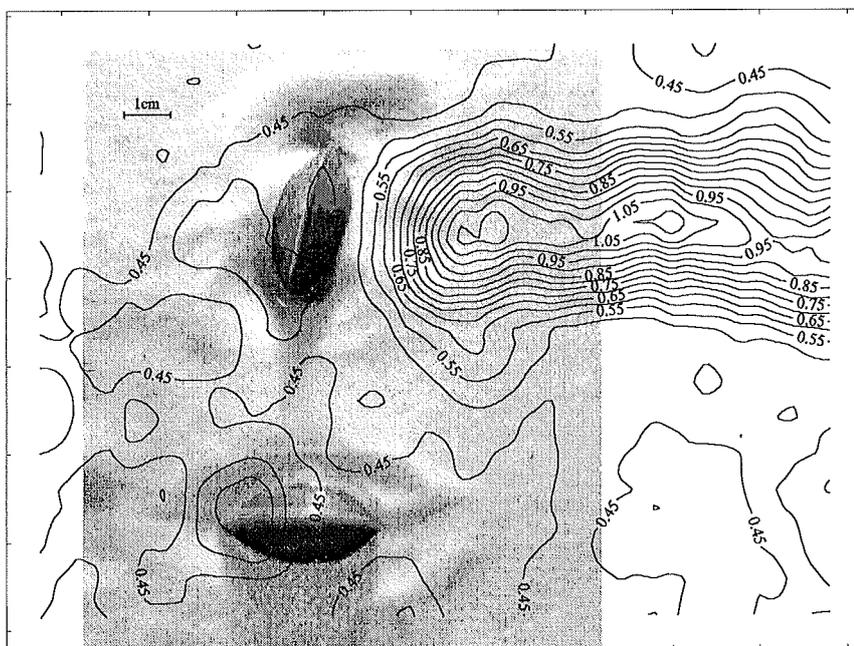


Abbildung 3.19: Δv -Strömungsfeld in 1 cm Höhe über Grund um die Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} .

Ein weiterer Schritt ist die Bestimmung der Turbulenzintensität (GAMBI *et al.*, 1990). Hier wird Δv durch den vektoriellen Betrag der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten ($v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$) dividiert und prozentual dargestellt. Die Abbildung 3.20 zeigt das Ergebnis. Man sieht hier ein ähnliches Bild wie in Abbildung 3.19. Hier spielt eine Muschel selbst jedoch als Störobjekt eine größere Rolle. Hinter Muschel „B“ liegt eine Vertiefung, die, wie man hier sieht, auf den Turbulenzintensitätsgrad von 150% zurückzuführen ist.

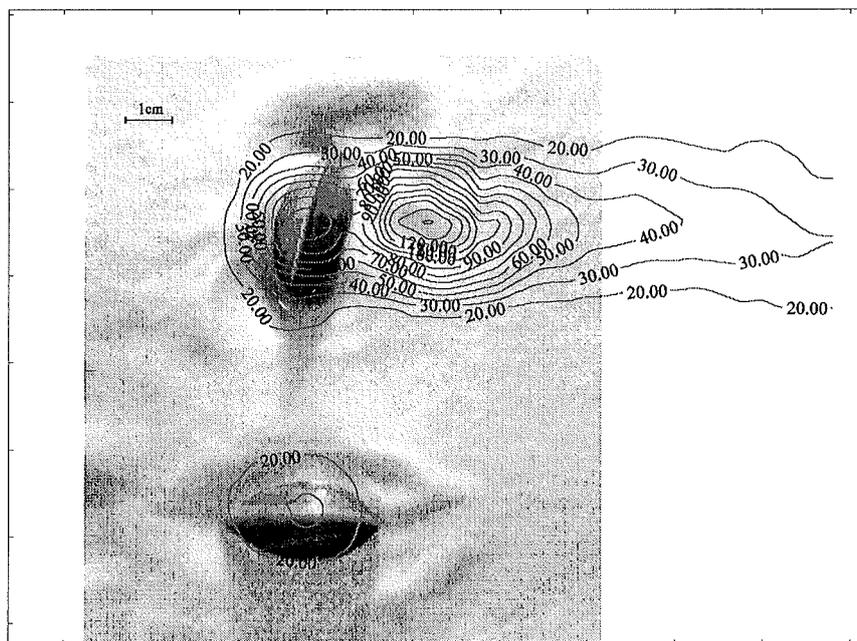


Abbildung 3.20: Turbulenzintensitätsverteilung ($100 \Delta v/v$) in 1 cm Höhe über Grund um die Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} .

Wie weit reicht nun der Einfluß der Muscheln vertikal? In 2,8 cm über Grund wurde wieder die x-Komponente der Strömung dargestellt (Abb. 3.21). Hier ist ein deutlicher Einfluß der Muscheln nicht mehr zu erkennen. Eine Betrachtung der Turbulenzintensität in Abbildung 3.22 bestätigt diesen Eindruck. Die Turbulenzzellen sind über den ganzen Bereich gleichverteilt.

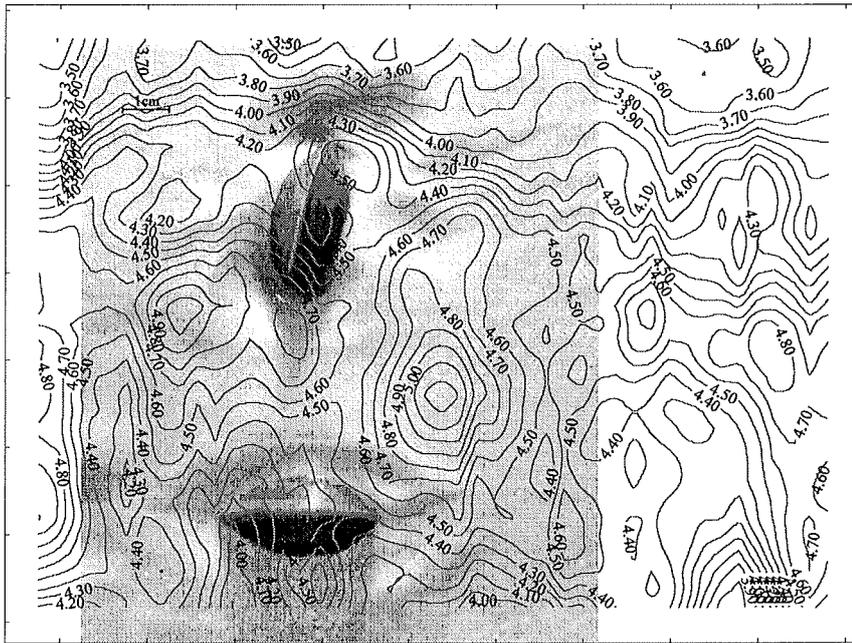


Abbildung 3.21: v_x -Strömungsfeld in 2,8 cm Höhe über Grund über den Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} .

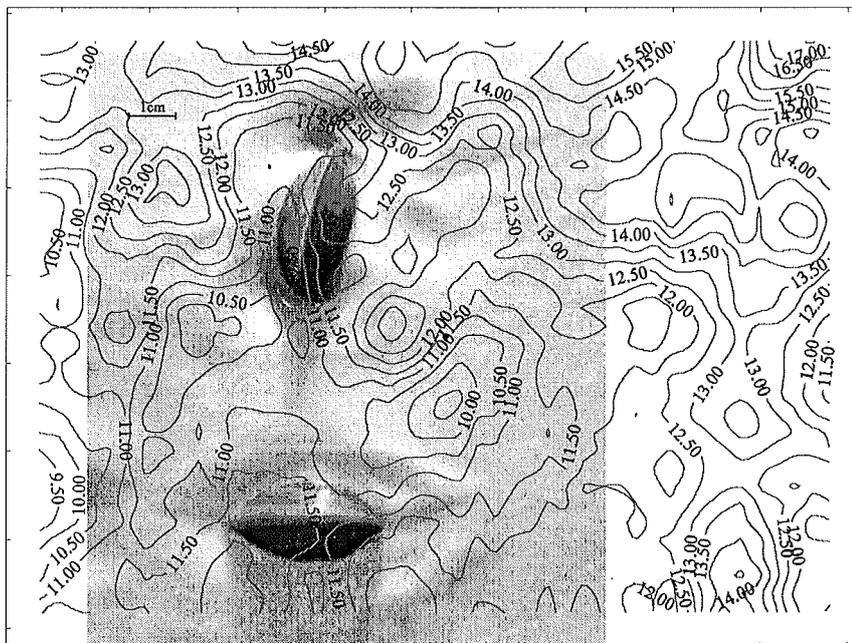


Abbildung 3.22: Turbulenzintensitätsverteilung ($100 \Delta v/v$) in 2,8 cm Höhe über Grund über den Muscheln „B“ (oben) und „A“ (unten). v_∞ beträgt 5 cm s^{-1} .

Wenn man nun die Vertikalprofile vor, über und hinter den beiden Schalen vergleicht (Abb. 3.23), wird auch hier sofort deutlich, daß der Einfluß der quer zur Strömungsrichtung liegenden Muschelschale höher ist, als der längs zur Strömungsrichtung liegenden Muschelschale. Das Profil vor Muschel „A“ zeigt die Ausbildung einer Grenzschicht mit einem u_* von $0,37 \text{ cm s}^{-1}$ und einem z_0 von $0,03 \text{ cm}$. Über der Muschel selbst verläuft das Strömungsprofil ohne erkennbaren Gradienten. 5 cm hinter der Muschel hat sich wieder eine Grenzschicht mit „flacherem“ Funktionsverlauf ausgebildet. u_* und z_0 sind jedoch mit Werten von $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ und $0,06 \text{ cm}$ erhöht.

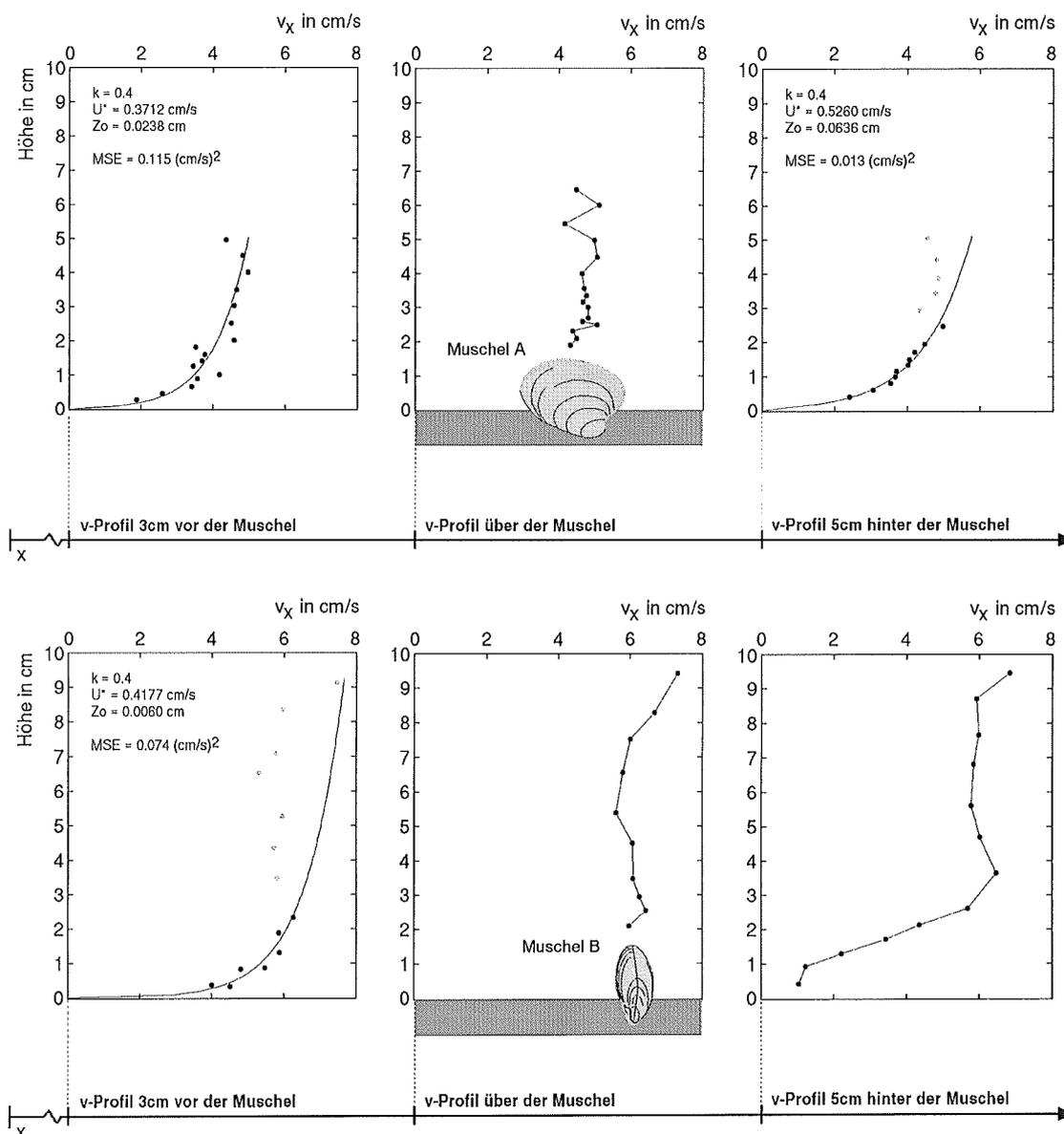


Abbildung 3.23: Vertikalprofile vor, über und hinter den Muscheln „A“ (oben) und „B“ (unten) bei $v_\infty = 5 \text{ cm s}^{-1}$.

Vor Muschel „B“ ist die Höhe der Grenzschicht überraschenderweise geringer mit einem höheren u_* von $0,41 \text{ cm s}^{-1}$. Über der Muschel ist wie über Muschel „A“ ebenfalls kein Gradient zu sehen. 5 cm hinter der Muschel kann keine Grenzschicht über die Anpassung der Funktion gefunden werden.

Vertikalprofile über belebten Sedimentkernen: In Abbildung 3.24 sind Beispiele für Vertikalprofile vor und über belebten Sedimentkernen kurz vor deren Verwendung für die Depositionsexperimente bei unterschiedlichen v_∞ dargestellt. Die Profile a) und b) wurden über Sedimentkernen von den Stationen des Feldexperimentes an den Positionen A und B im Kanal aufgenommen. Die Freistromgeschwindigkeit betrug $5,5 \text{ cm s}^{-1}$. Auf beiden Kernen befanden sich Polychaetenröhren in einer Dichte von 0,12 bzw 0,23 Röhren pro Quadratcentimeter. Über Kern A, am Beginn der besiedelten Oberfläche, ist noch eine Grenzschicht zu erkennen, die auch mit der von Kármán-Prandtl-Gleichung angepaßt werden kann. u_* beträgt $0,42 \text{ cm s}^{-1}$. Über Kern B hingegen, etwa 15 cm weiter stromabwärts gelegen, ist keine Grenzschicht mehr zu finden. Das Profil ist nicht mit der Funktion anzupassen.

Die Profile c) und d) sind über Kernen von Station 23c an den Positionen A und B bei einem v_∞ von $8,5 \text{ cm s}^{-1}$ aufgenommen worden. Die Besiedelung der beider Kerne ist in den Abbildungen 3.35 und 3.38 zu sehen. Eine Anpassung der Funktion ist in beiden Fällen möglich: u_* beträgt über Kern A $0,41 \text{ cm s}^{-1}$ und $0,22 \text{ cm s}^{-1}$ über Kern B.

Die beiden untersten Profile e) und f) (Abbildung 3.24) wurden über Sedimentkernen von Station 23c mit vielen unbewohnten Polychaetenröhren gemessen. Die Freistromgeschwindigkeit betrug 4 cm s^{-1} . Die Röhrendichte betrug ca. 2 pro cm^2 mit einer Höhe von ungefähr 1,5 cm. Beide Profile lassen sich nicht mit der Funktion anpassen. Man erkennt, daß im Bereich zwischen den Röhren ($z < 2 \text{ cm}$) die Geschwindigkeit vermindert ist, mit dem Ende der Röhren eine Art Bruch im Profil entsteht und darüber keine weitere Zunahme der Geschwindigkeit mehr stattfindet.

Alle Vertikalprofile der Abbildung 3.25 wurden über drei Sedimentkernen aus der Kieler Bucht (Station Kieler Tief) mit Polychaetenröhrenbesatz aufgenommen. Die Röhren waren bewohnt und ragten ungefähr 2–2,5 cm in die Wassersäule. Die Besatzdichte betrug ungefähr 0,5 pro cm^2 . Die Profile a) bis d) sind im Abstand von 10 cm über den Röhren bei $v_\infty = 3 \text{ cm s}^{-1}$ erstellt worden. Eine Grenzschicht blieb über die ganze Strecke erhalten. Sehr deutlich ist zu erkennen, daß von Meßpunkt zu Meßpunkt die Werte für u_* ($0,24\text{--}0,5 \text{ cm s}^{-1}$) und z_0 ($0,1\text{--}0,8 \text{ cm}$) ansteigen.

Kritische Schubspannungsgeschwindigkeit: Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für die Sedimenttypen der beprobten Stationen in der Mecklenburger Bucht zu ermitteln. Dies war jedoch nicht möglich, da

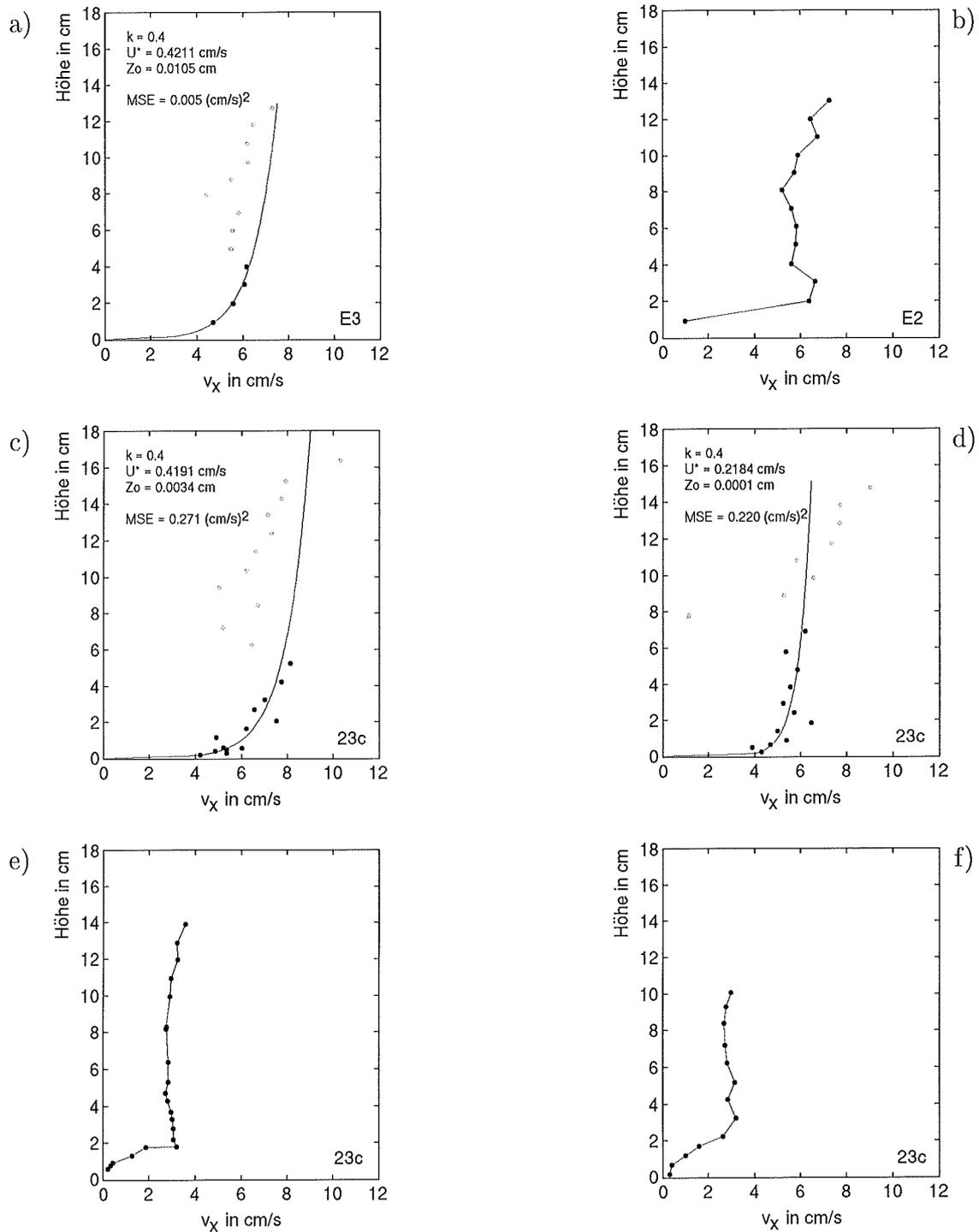


Abbildung 3.24: Vertikalprofile über Sedimentkernen für die Depositionsexperimente (B, C, D). Erläuterung im Text.

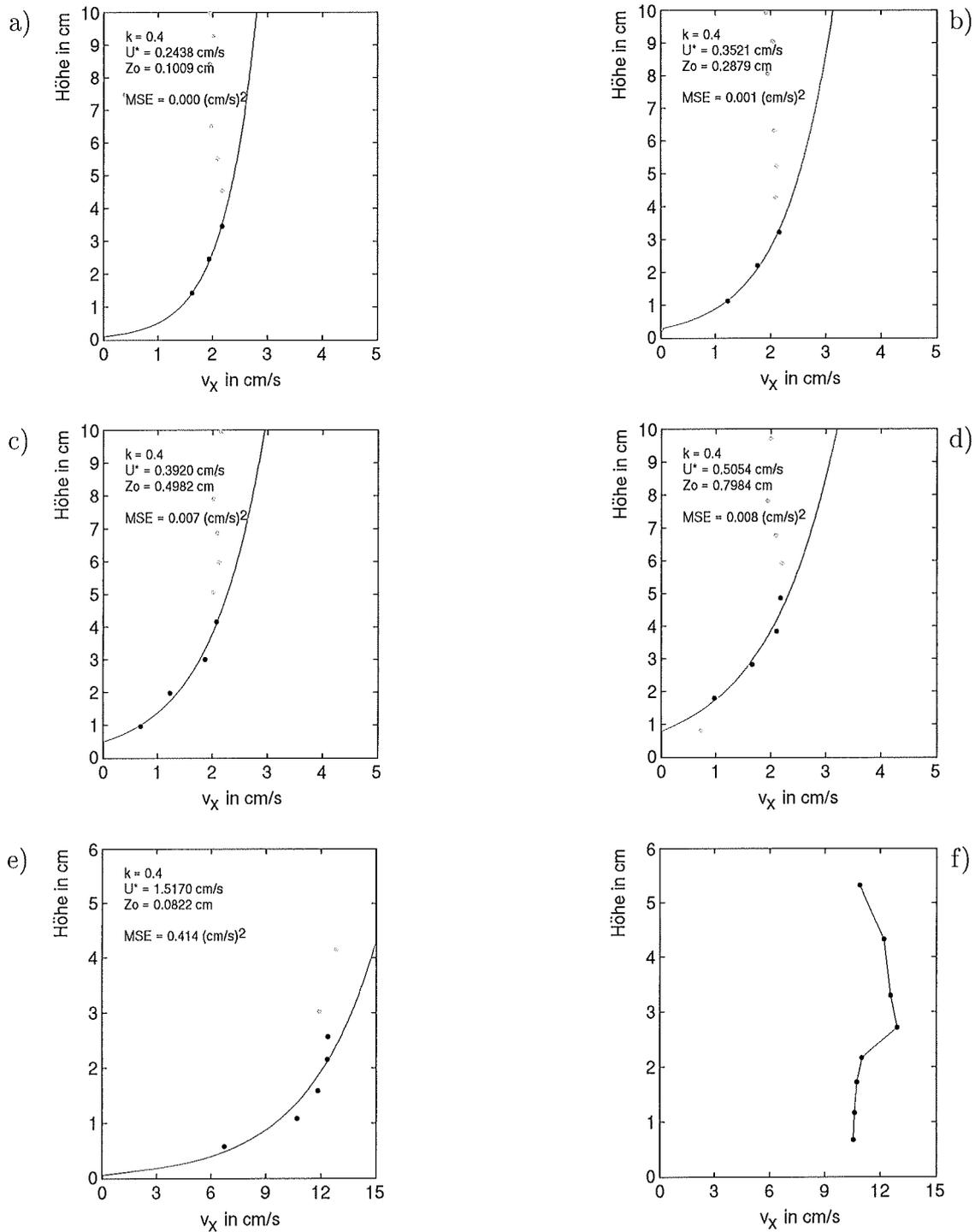


Abbildung 3.25: Vertikalprofile über Sedimentkernen mit Polychaetenbesatz aus dem Kieler Tief. Erläuterung im Text.

die maximal im Strömungskanal erreichbare Freistromgeschwindigkeit die Festigkeit der Sedimente durch Kohäsion und Biofilme nicht überwinden konnte. Einzig an der Station „Kieler Tief“ lösten sich bei Geschwindigkeiten von $v_\infty = 12,5 \text{ cm s}^{-1}$ die obersten Sedimentkörner und -partikel und begannen zu rollen und zu springen. Die Vertikalprofile während dieses Geschehens sind in Abbildung 3.25, e) und f) dargestellt. Über Kern A kann man gerade noch den Profilverlauf mit der Funktion anpassen und u_{*krit} beträgt $1,5 \text{ cm s}^{-1}$. Über dem zweiten Kern jedoch ist keine Profilanpassung mehr sinnvoll, da sich fast kein Geschwindigkeitsgradient, außer einem Knick in Höhe der Röhrenden, mehr ausbildet.

Über Sedimenten mit natürlicher Struktur und Besiedelung ist das typische Profil einer „Boundary Layer“ weniger deutlich ausgeprägt als ohne Besiedelung an den gleichen Stellen.

3.2.4 Verhalten der Makrofauna unter verschiedenen Strömungsbedingungen

Wie verhält sich lebende Makrofauna nun unter verschiedenen Strömungsregimen.

Aktivität eines einzelnen *Polydora ciliata* ohne Strömung: Ein einzelner *Polydora ciliata* wurde ohne Strömung in einem Sedimentkern 20 Minuten lang gefilmt. Der Polychaet saß in seiner Röhre, die nicht über den Boden heraus ragte, und verschob mit seinen ca. 2,5 cm langen Tentakeln die Kotballen in seinem Einzugsbereich. Ein Standbild des Videos ist in Abbildung 3.26 gezeigt. Man erkennt in der Bildmitte den Eingang der Röhre. Rechts davon ausgehend sieht man die beiden Tentakel. Im Bildausschnitt sind ca. 400 Kotballen zu sehen. Diese, auch „fecal pellets“ genannten Ballen, sind ellipsoidförmig mit 2 mm Länge und 1 mm Breite. Das Tier schwang ein Tentakel meist in der Wassersäule umher. Mit dem anderen wurde im Uhrzeigersinn der Boden abgesucht und die Pellets über die Cilien auf den Tentakeln transportiert. Teilweise wurden sie in die Röhre gezogen, verblieben dort ca. 1 Minute und wurden dann wieder heraus befördert und weit von der Röhre abgelegt. Der Aktionsradius des Tieres beträgt ungefähr 3 cm. In der 20minütigen Beobachtungszeit wurden von dem Tier 117 Kotballen in Richtung der Röhre und 51 von ihr weg transportiert. In die Röhre wurden 47 Kotballen gebracht und 58 wieder heraus. Summiert ergibt das 273 bewegte Kotballen. Unter der Annahme, daß ein „pellet“ ein Ellipsoid mit den Halbachsen $a=0,5 \text{ mm}$, $b=1 \text{ mm}$ und $c=0,5 \text{ mm}$ darstellt und n die Anzahl der bewegten „pellets“ ist, kann man mit:

$$V = n \times \frac{4}{3} \pi a b c \quad (3.1)$$

das gesamt bewegte Volumen im Beobachtungszeitraum von 20 Minuten errechnen, in diesem Fall $0,28 \text{ cm}^3$.

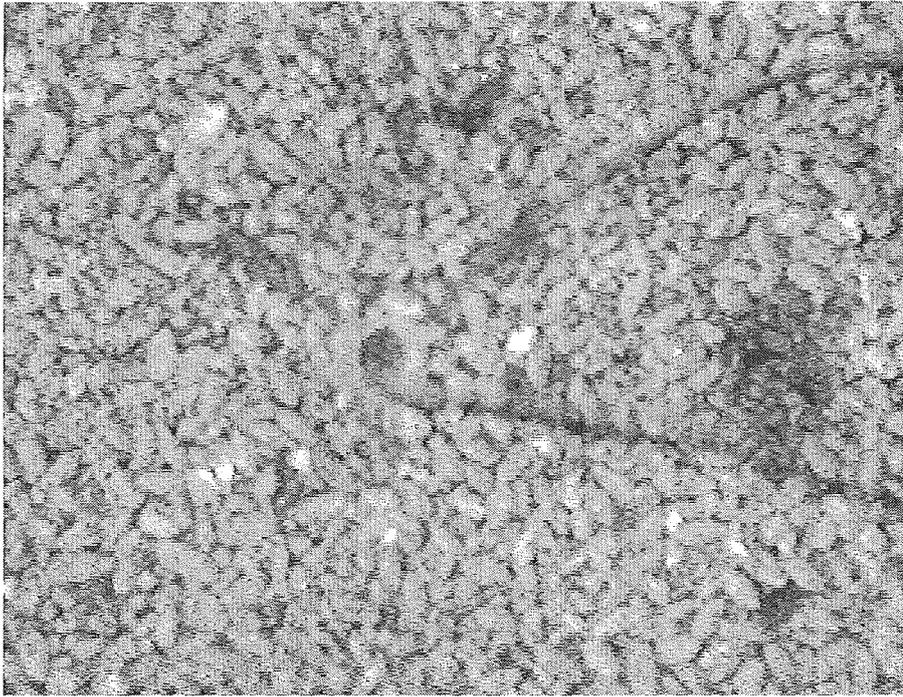


Abbildung 3.26: Depositionsfressen eines einzelnen *Polydora ciliata*. Der Röhreneingang liegt in der Mitte des Bildes. Die Tentakel zeigen nach rechts.

Im Strömungskanal wurden Makrofaunaindividuen vor und während der Experimente beobachtet. Unter leichter Strömung (bis 3 cm s^{-1} Freistrom im Kanal) wechselte *Polydora ciliata* von der eben beschriebenen Verhaltensweise, dem Depositfressen, zu Suspensionsfressen über. Dazu wurden beide Tentakel in die Wassersäule gehalten und bewegt. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit wurde, desto kürzer wurde die Tentakellänge. Ab 8 cm s^{-1} Freistromgeschwindigkeit verschwanden die Polychaeten ganz in den Röhren (siehe auch Abbildung 3.27).

Die Muscheln *Arctica islandica*, *Astarte borealis* und *Macoma balthica* filterten im Strömungskanal bei Freistromgeschwindigkeiten bis $5,5 \text{ cm s}^{-1}$. Bei höheren Geschwindigkeiten wurden entweder die Schalen geschlossen oder der Öffnungswinkel verringert. Depositionsfressen bei *Macoma balthica* wurde unter den herrschenden Strömungsbedingungen im Kanal nicht beobachtet.

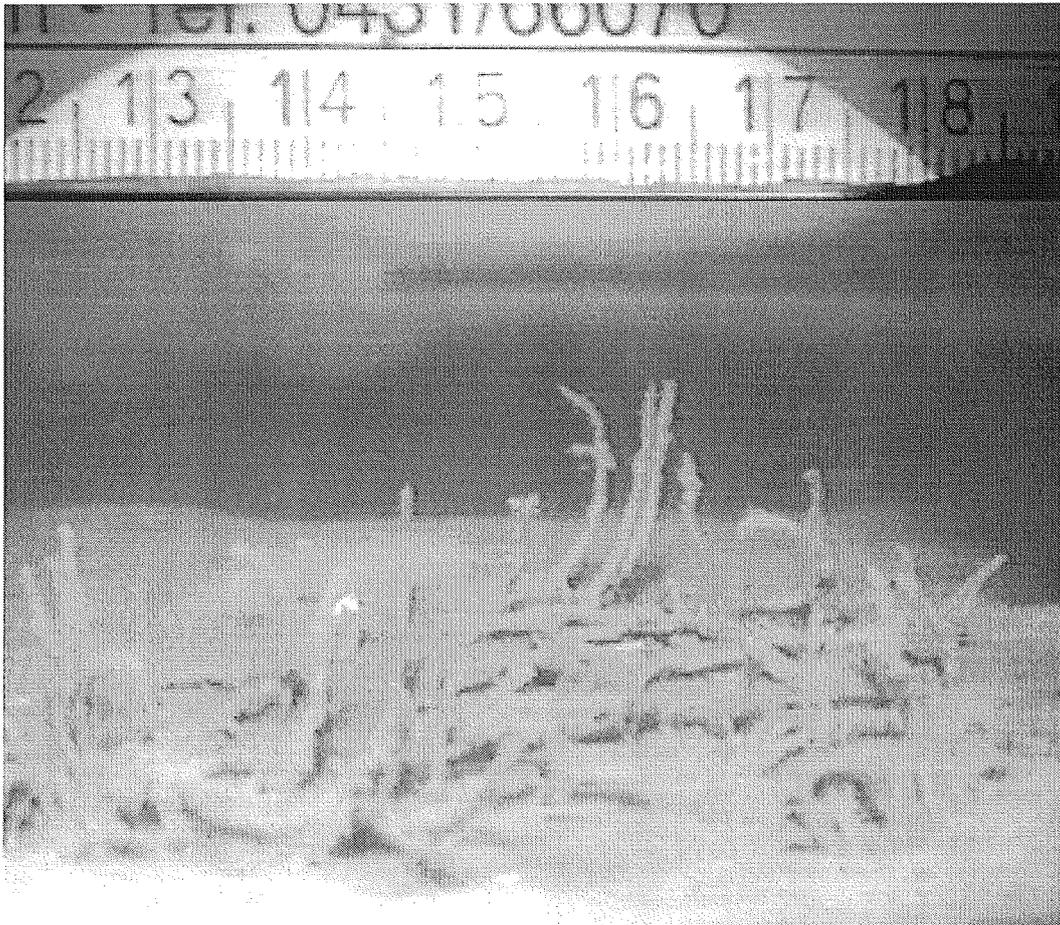


Abbildung 3.27: Sedimentkerne mit Polychaetenröhren von der Station „Kieler Tief“ vom Sept. 1995. Die Aufnahme wurde während des Versuches zur Bestimmung der kritischen Schubspannung u_{*krit} gemacht. v_{∞} lag bei $12,5 \text{ cm s}^{-1}$. Die Röhren bewegten sich in der Strömung und liegen nicht, wie es scheint, am Boden.

3.2.5 Partikelaufnahme und Deposition

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche zur Partikelaufnahme und Deposition mit Mikrosphären dargestellt. Verfolgt wird dabei die Abnahme der Mikrosphären im Wasser, ihre Deposition an verschiedenen Stellen im Strömungskanal und die Aufnahme seitens der Makrofauna. Die jeweiligen Versuche zum Verbleib der Mikrosphären im Kanal ohne Makrofauna und mit glattem Sand als Untergrund werden mit den Ergebnissen der Versuche mit Makrofauna in Bezug gesetzt.

Experiment „A“: Dieses Experiment wurde in dem kleineren Strömungskanal bei 1 cm s^{-1} Freistromgeschwindigkeit durchgeführt. Mit Material der Station 23c vom April 1994 wurde im Bereich der Testsektion ein Mikrokosmos mit 3 *Arctica islandica* aufgebaut. Alle Muscheln saßen im Abstand von 3 cm in der Mitte des Kanals und filterten während der gesamten Versuchszeit. Die Abnahme der Mikrosphären über die Zeit ist in Abbildung 3.28 dargestellt. Die Konzentration der $1 \mu\text{m}$ Partikel nahm während des Versuchszeitraumes auf 54% der Anfangskonzentration ab. Für die 2 und $3 \mu\text{m}$ Mikrosphären lagen die Endkonzentrationen bei 44 bzw. 25% der Anfangskonzentration (Abb. 3.28). Die Mikrosphären mit größerem Durchmesser nahmen noch schneller ab als die kleinen bis $3 \mu\text{m}$. Bei Versuchsende waren von den $10 \mu\text{m}$ Partikeln noch 10%, von den $22 \mu\text{m}$ Partikeln noch 2% und von den $38 \mu\text{m}$ Partikeln 0,2% der Anfangskonzentration vorhanden.

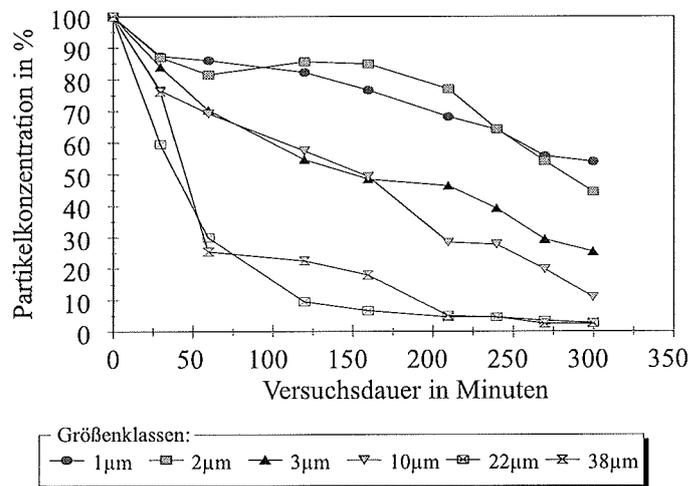


Abbildung 3.28: Abnahme der Mikrosphärenkonzentration im Wasser während des Versuchs „A“.

Die Partikeldeposition auf dem Kanalboden konnte nicht ermittelt werden, da das Sediment zu fein war, um eine erfolgreiche Dichtentrennung durchführen zu können.

Die Größe der einzelnen Makrofaunaindividuen, ihr Gewicht und die aufgenommenen Partikelgrößen sind in Abbildung 3.29 dargestellt. Die drei *Arctica islandica* (Nummer 1, 2 und 3 in der Abbildung) nahmen je nach Größe unterschiedlich viele Partikel auf. Je größer das Tier, desto mehr Partikel wurden aufgenommen. Dabei machten die 1– $3 \mu\text{m}$ Fraktionen den größten Anteil mit jeweils knapp 90% aus. Die Muschel mit der Nummer 4, eine *Astarte borealis*, nahm weniger Partikel auf, war aber auch kleiner. Auch hier wurden die kleinen Fraktionen bevorzugt aufgenommen. Die Astarte mit der Nummer 5 nahm nur sehr wenige Partikel auf. Sie hatte nach 2 Stunden Versuchsdauer die Schalen geschlossen und jede Filtrieraktivität eingestellt.

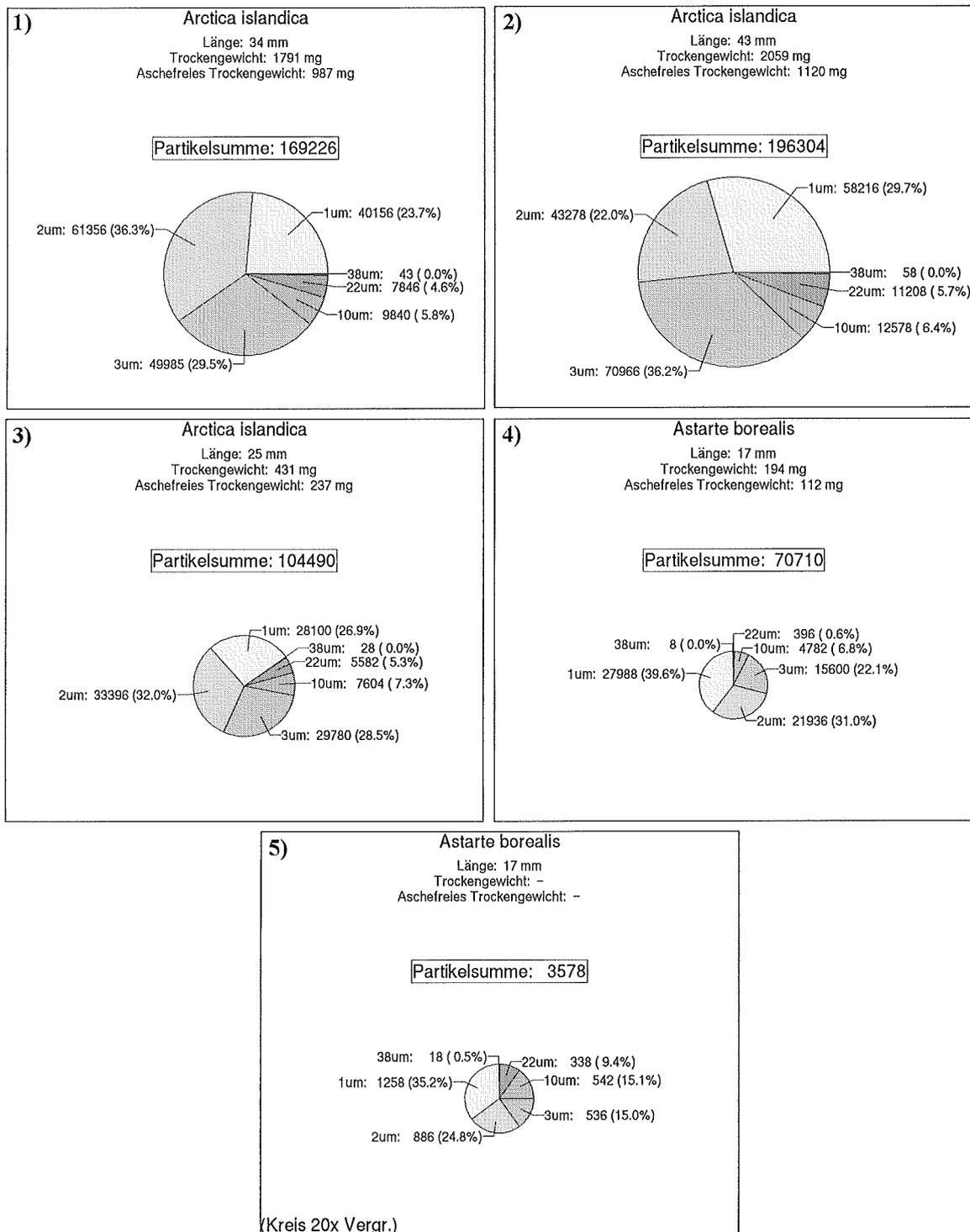


Abbildung 3.29: Die in der untersuchten Makrofauna des Experimentes „A“ gefundenen (hochgerechneten) Mikrosphärenzahlen, aufgeteilt nach Größenklassen.

Experiment „B“: Dieses Experiment wurde in dem neuen Strömungskanal bei einer Freistromgeschwindigkeit von 5,5 cm mit Kernen der Stationen 12c (=E1), E2 und E3 des Feldexperimentes vom November 1994 (12c) durchgeführt. Die Positionen der Kerne im Kanal sind in Abbildung 3.30 dargestellt. Der Sedimentkern der Station 12c befand sich an Position A, der von E2 an Position B und der von E3 an Position C. Die Oberfläche von Kern 12c war eben und ohne Makrofaunabesiedelung. Auf Kern E2 befanden sich 10 Polychaetenröhren, von denen 2 noch bewohnt waren und auf Kern E3 18 Polychaetenröhren mit 3 lebenden *Polydora ciliata* und eine kleine Muschel (*Arctica islandica*). Die Oberfläche der Kerne E2 und E3 wies ebenfalls keine Unebenheiten auf.

Die Abnahme der Mikrosphären über die Zeit ist in Abbildung 3.31 dargestellt. Bei diesem Versuch nahmen die kleinen Partikel (bis 3 μm) sehr schnell ab. Hier waren nach einer Stunde nur noch 56% von den 1 μm , 62% von den 2 μm und nur noch 51% von den 3 μm Partikeln vorhanden. Nach dieser Stunde nahmen diese drei Größen langsam auf 31% (1 μm), 50% (2 μm) und 41% (3 μm) ab. Die größeren Partikel verminderten sich über die Zeit auf 50% (10 μm), 31% (22 μm) und auf 26% (38 μm).

Die Anzahl und Größenzusammensetzung der auf dem Kanalboden deponierten Partikel ist in Abbildung 3.30 dargestellt. Um die verschiedenen Partikelgrößen miteinander vergleichen zu können, obwohl unterschiedliche Anfangskonzentrationen vorlagen, wurde die Anzahl auf gleiche Ausgangskonzentration normiert. Man erkennt, daß die größeren Partikel vermehrt auf dem Kanalboden (hier eher am Ende der Testsektion) deponiert wurden. Allerdings wurden von den 22 μm Partikeln eine größere Anzahl direkt hinter dem Gleichrichter deponiert. Die kleinen Partikel wurden in vergleichsweise geringer Anzahl deponiert. Im Vergleich zu dem Referenzversuch ohne biologische Struktur wurden bei diesem Versuch im Bereich der Testsektion (Abb. 2.5) 48% mehr Mikrosphären auf der Sedimentoberfläche deponiert.

Die Größe der einzelnen Makrofaunaindividuen, ihr Gewicht und die Zahl der aufgenommenen Mikrosphären sind in Abbildung 3.32 dargestellt. Der Polychaet *Polydora ciliata* mit der Nummer 1 (Abbildung 3.32) stammt von Kern E2. Die Gesamtzahl der aufgenommenen Partikel war erheblich geringer als die der Muscheln im Experiment A. Der Anteil der 10 μm Fraktion war hier mit 21% deutlich höher als bei den Muscheln. Ein Artefakt durch die Sektion des Tieres, bei der eventuell an der Röhre haftende größere Partikel mit beprobt wurden, ist nicht auszuschließen. Der gleiche Trend der Partikelaufnahme zeigt sich an einem anderen *Polydora ciliata* Exemplar von Kern E3 (Nummer 2 in der Abbildung 3.32). Aus diesem Kern stammt auch die Muschel *Arctica islandica*, mit 18 mm Länge ein relativ kleines Exemplar. Sie nahm überwiegend die kleinen Partikel von 1–3 μm Größe auf. Die Gesamtzahl lag im Vergleich zu den Muscheln aus Versuch A fast um den Faktor 100 geringer. In dem Kern der Station 12c war keine Makrofauna zu finden.

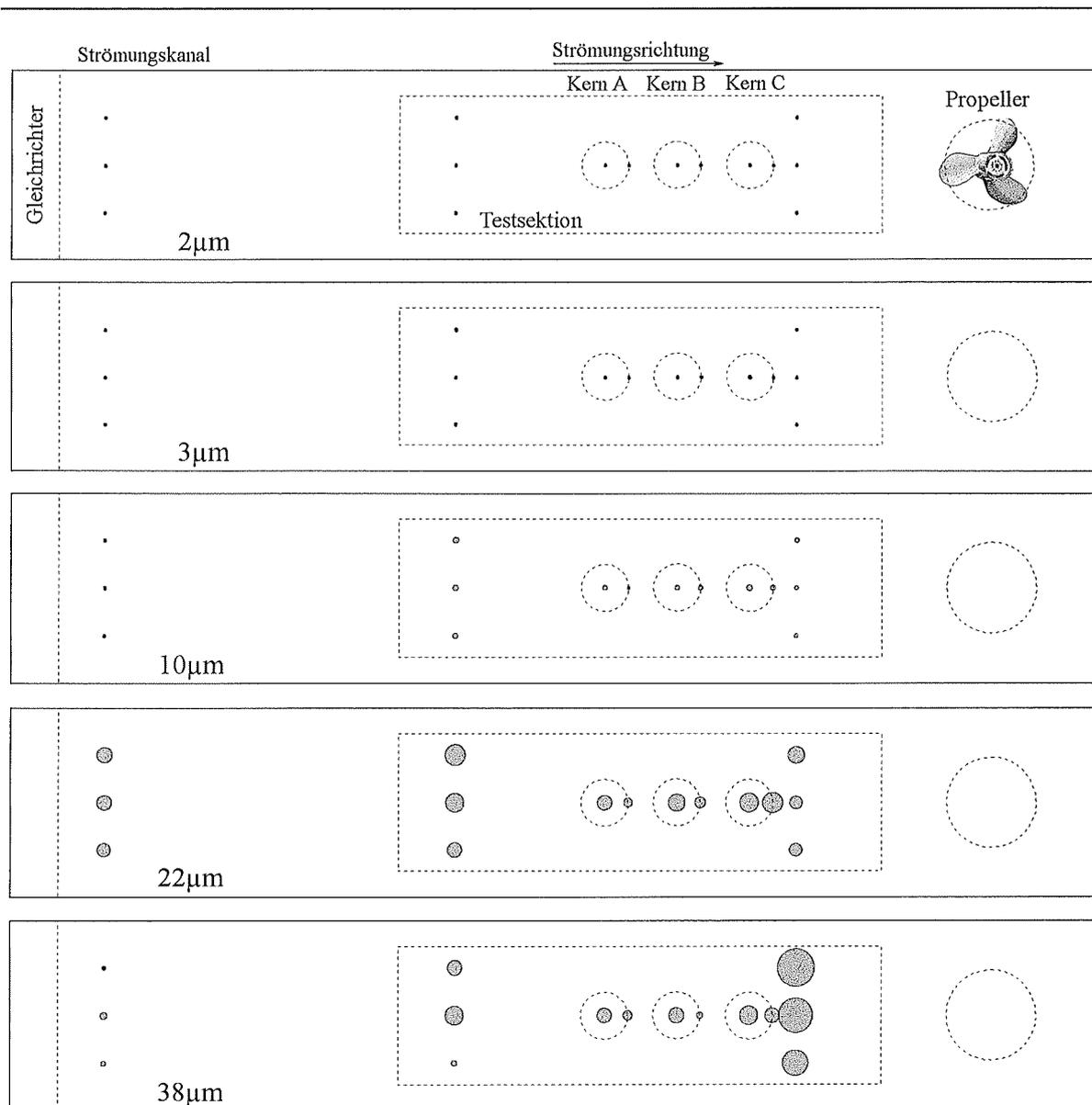


Abbildung 3.30: Deposition der Mikrosphären an verschiedenen Orten im Strömungskanal bei Experiment B. Die verschiedenen Größen sind auf gleiche Anfangskonzentration normiert. Die Position der Sedimentkerne wird mit A, B und C bezeichnet.

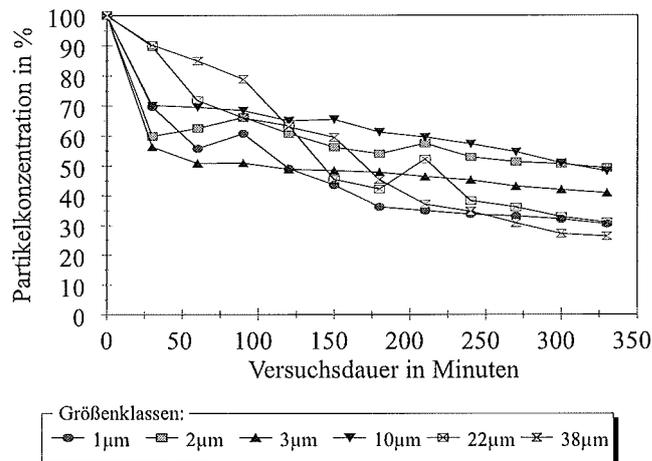


Abbildung 3.31: Die prozentuale Abnahme der Mikrosphären im Wasser während des Versuches B.

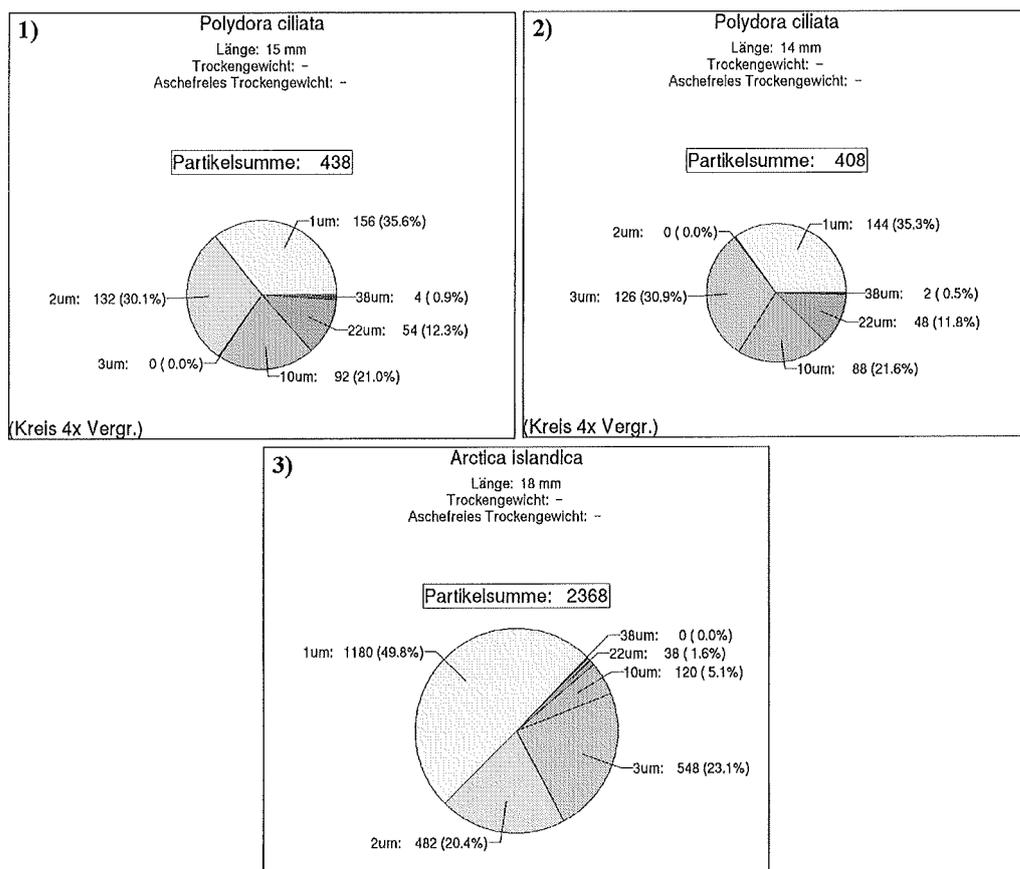


Abbildung 3.32: Die in der untersuchten Makrofauna des Experimentes „B“ gefundenen (hochgerechneten) Mikrosphärenzahlen, aufgeteilt nach Größenklassen.

Experiment „C“: Das Material für diesen Versuch stammte wie bei Versuch „B“ von der Ausfahrt im November 1994, jedoch von Station 23c. Hier wurde die Freistromgeschwindigkeit $v_{\infty} = 8,5 \text{ cm s}^{-1}$ vorgegeben.

Die Abnahme der Mikrosphären im Wasser über die Zeit ist in Abbildung 3.33 dargestellt. Die 1 und 2 μm Partikel nahmen fast gar nicht ab, ihre Anzahl gegen Ende des Versuches beträgt jeweils noch 90% der Anfangskonzentration. Die 3 μm Partikel hingegen verminderten sich linear auf 66% der Anfangskonzentration. Größere Partikel mit Durchmessern von 10 μm und 22 μm verminderten sich stärker als die kleineren (52% für 10 μm und 67% für 22 μm). Am stärksten, jedoch kontinuierlich, nahm die 38 μm -Fraktion über die Zeit ab. Am Ende des Experimentes waren noch 16% der Anfangskonzentration vorhanden.

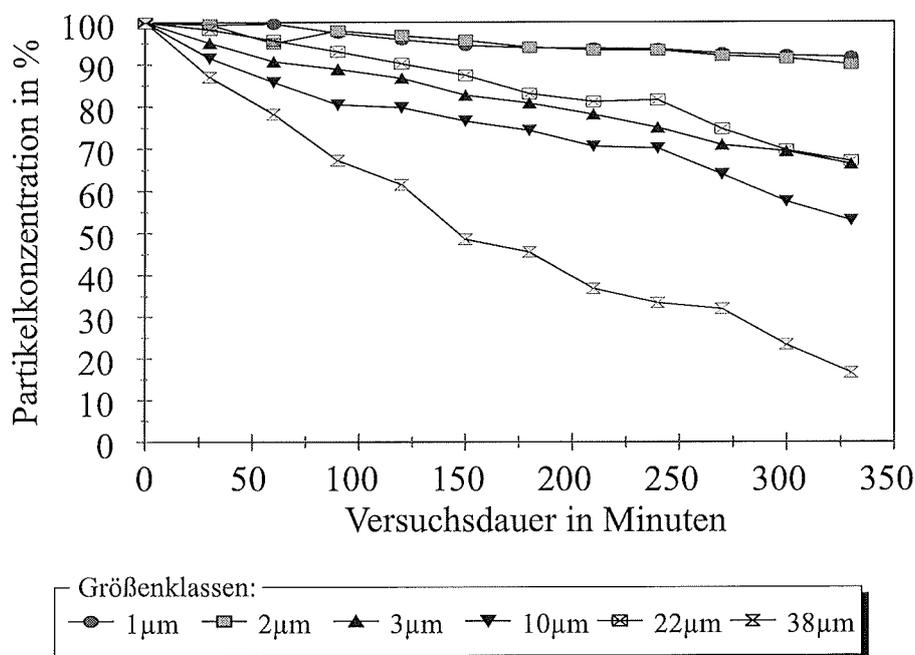


Abbildung 3.33: Die prozentuale Abnahme der Mikrosphären im Wasser während des Versuches C.

Auf dem Sediment im Kanal und auf den Kernen wurden bevorzugt die 22 und 38 μm Partikel deponiert. Hier sind die Bereiche der Kerne A und B hervorzuheben. Die 3 und 10 μm Mikrosphären wurden vermehrt im vorderen Bereich des Kernes A deponiert (Abbildung 3.34). Auch bei diesem Versuch wurden relativ viele Partikel direkt hinter dem Gleichrichter deponiert. Verglichen mit dem Versuch ohne Makrofauna war die Deposition auf der Testsektion um 44% vermindert.

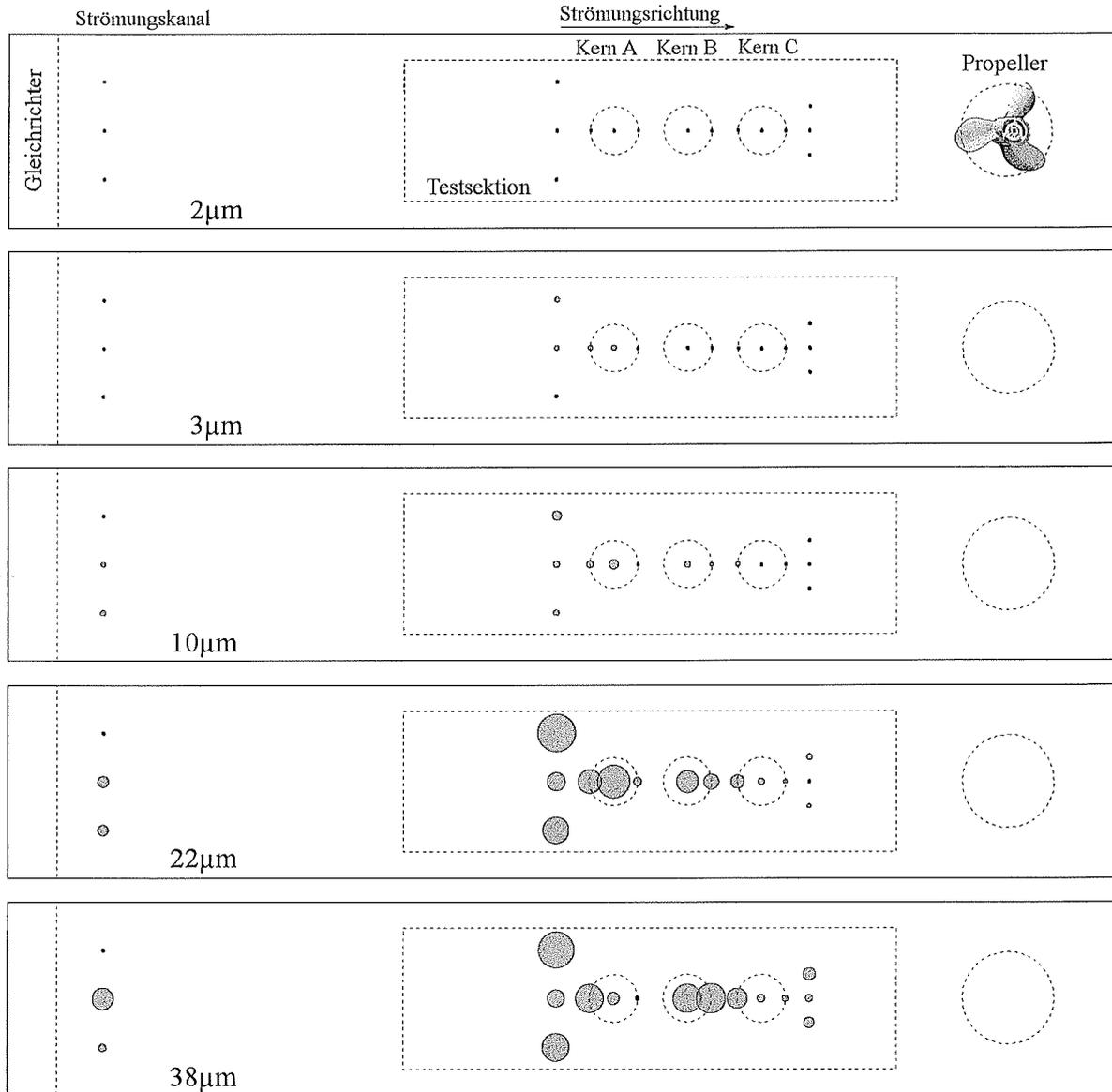


Abbildung 3.34: Deposition der Mikrosphären an verschiedenen Orten im Strömungskanal bei Experiment C. Die verschiedenen Größen sind auf gleiche Anfangskonzentration normiert. Die Position der Sedimentkerne wird mit A, B und C bezeichnet.

Wie bereits erwähnt, befanden sich viele Makrofaunaorganismen auf den Sedimentkernen. Auf dem Kern an der Position A ist in Abbildung 3.35 in der Mitte eine leere Muschelschale mit Röhrenbesatz von *Polydora ciliata* (Abb. 3.36, Nummer 3) zu erkennen. Im Bildrand oben links („11 Uhr“) ist eine *Macoma balthica* sichtbar (Partikelaufnahme dieses Tieres in Abb. 3.36 Nummer 4). Auf „1 Uhr“ ragt eine *Astarte borealis* halb aus dem Sediment (siehe auch Abb. 3.37 Nummer 1) heraus. Eine weitere *Astarte borealis* (auch Abb. 3.37, Nummer 2) befand sich eingegraben rechts neben der leeren Muschelschale. Die *Macoma balthica* nahm wie die anderen Muscheln vorwiegend die Partikelgrößen bis $3\ \mu\text{m}$ auf. Die Gesamtzahl der aufgenommenen Partikel lag relativ hoch. Beide Astarten nahmen unterschiedliche Partikelzahlen auf. Das halb herausragende Tier etwa 3 mal so viel wie die tiefer eingegrabene Muschel.

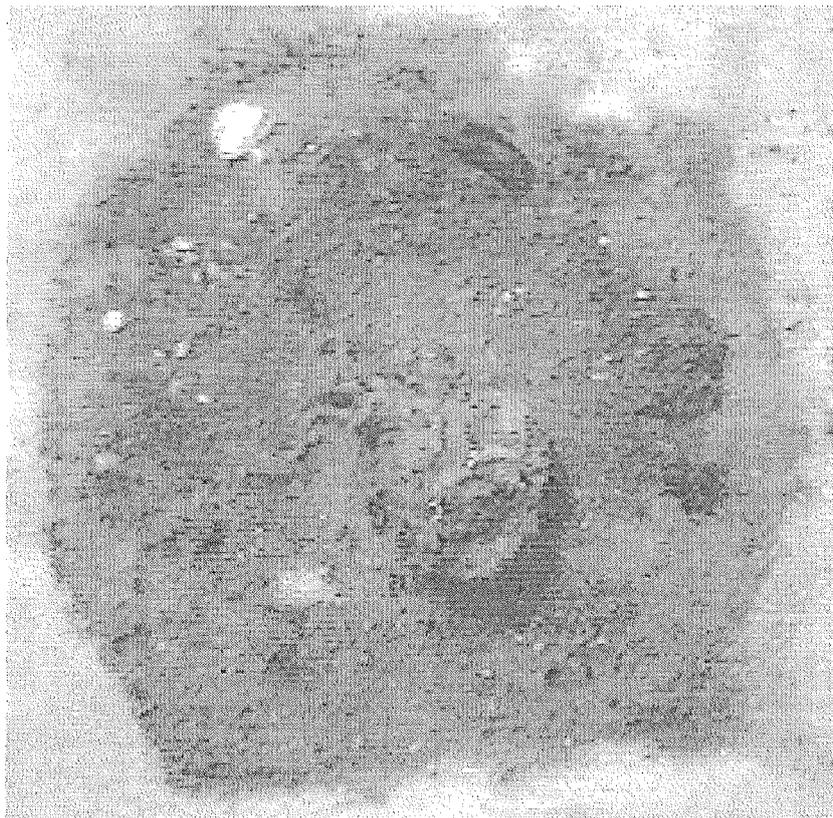


Abbildung 3.35: Kern von Station 23c vom 09.11.94 an Position „A“ im Strömungskanal.
In der Mitte befindet sich eine Muschel mit Polychaetenröhrenbesatz.

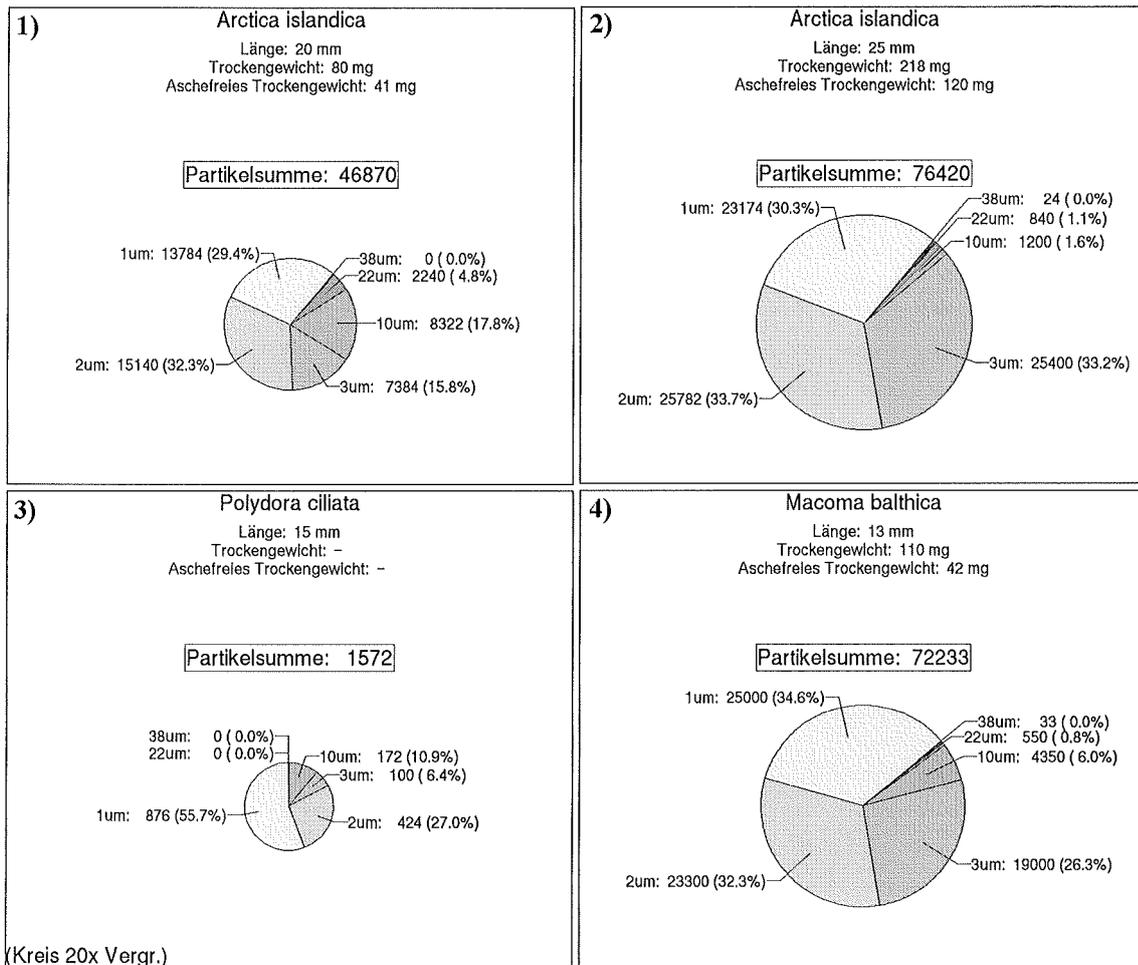


Abbildung 3.36: Die in der untersuchten Makrofauna des Experimentes „C“ gefundenen (hochgerechneten) Mikrosphärenzahlen, aufgeteilt nach Größenklassen.

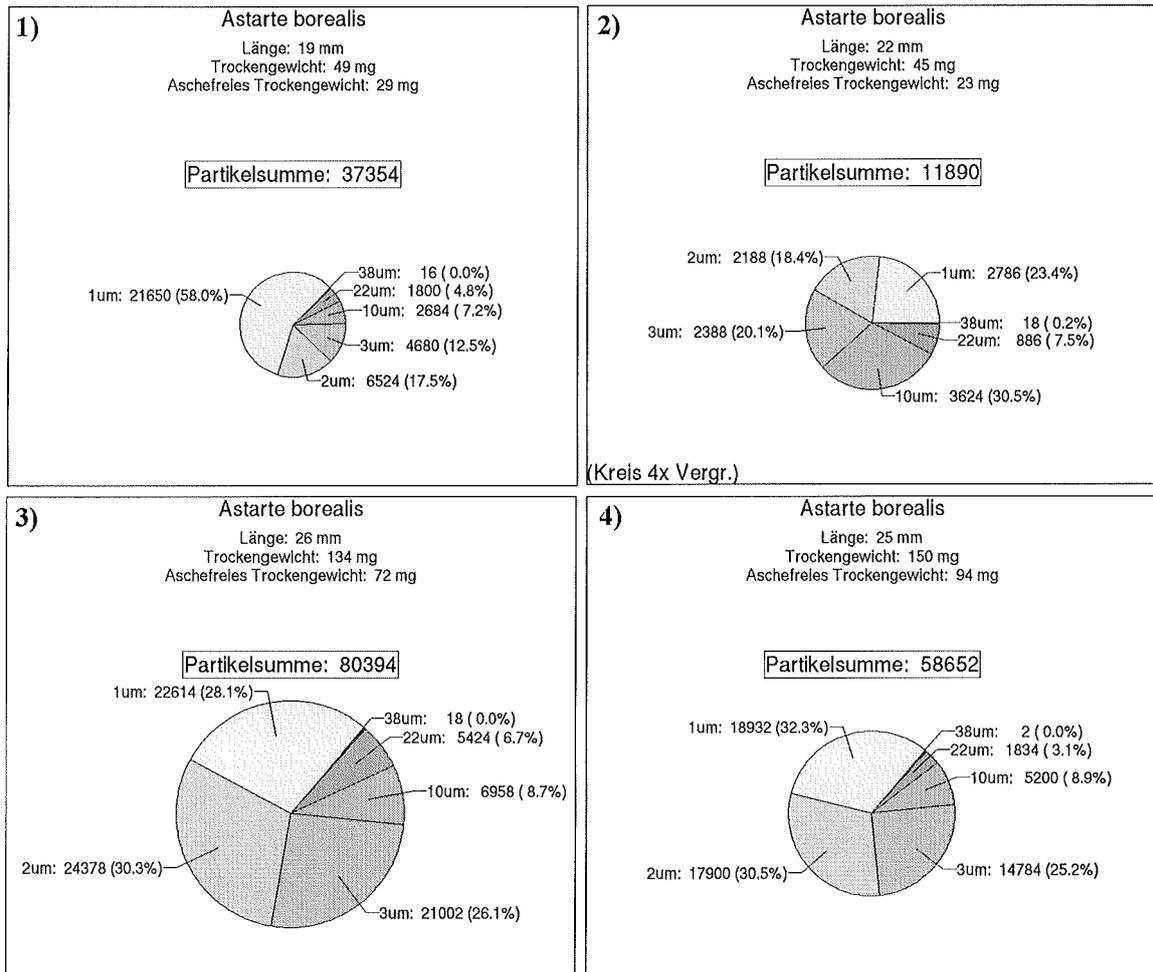


Abbildung 3.37: Fortsetzung der Abbildung 3.36

Kern B (Abb. 3.38) war mit offenen Muschelschalen und jungen *Mytilus edulis* Muscheln bedeckt. Beprobt wurden hier eine *Arctica islandica* auf „1 Uhr“ (Abb. 3.36, Nummer 2), die ca. 1 cm tief im Sediment eingegraben lag und der makrofaunafreie Bereich direkt darunter. Die Muschel filtrierte fast zu 100% die kleineren Partikel (bis 3 μm).

Auch der dritte Kern (C) war mit offenen Muschelschalen bedeckt (siehe Abb. 3.39). Hier wurden zwei *Astarte borealis* (Abb. 3.37 # 3 und 4) auf „11 Uhr“ und „14 Uhr“ beprobt. Des weiteren eine *Arctica islandica* (Abb. 3.36 #1) auf „15 Uhr“. Auch diese drei Muscheln filtrierten vorwiegend Partikel bis 3 μm aus der Wassersäule.

Da diese Sedimentkerne stark strukturiert und zahlreiche Makrofauna vorhanden waren, bot sich bei diesem Versuch eine Untersuchung des hydrodynamischen Regimes an. Es zeigte sich, daß über den Strukturen und Makrofaunaorganismen eine höhere Turbulenzintensität mit mehr als 50% herrschte.



Abbildung 3.38: Kern von Station 23c vom 09.11.94 an Position „B“ im Strömungskanal.
Auf der Oberfläche befinden sich zahlreiche Muschelschalen.

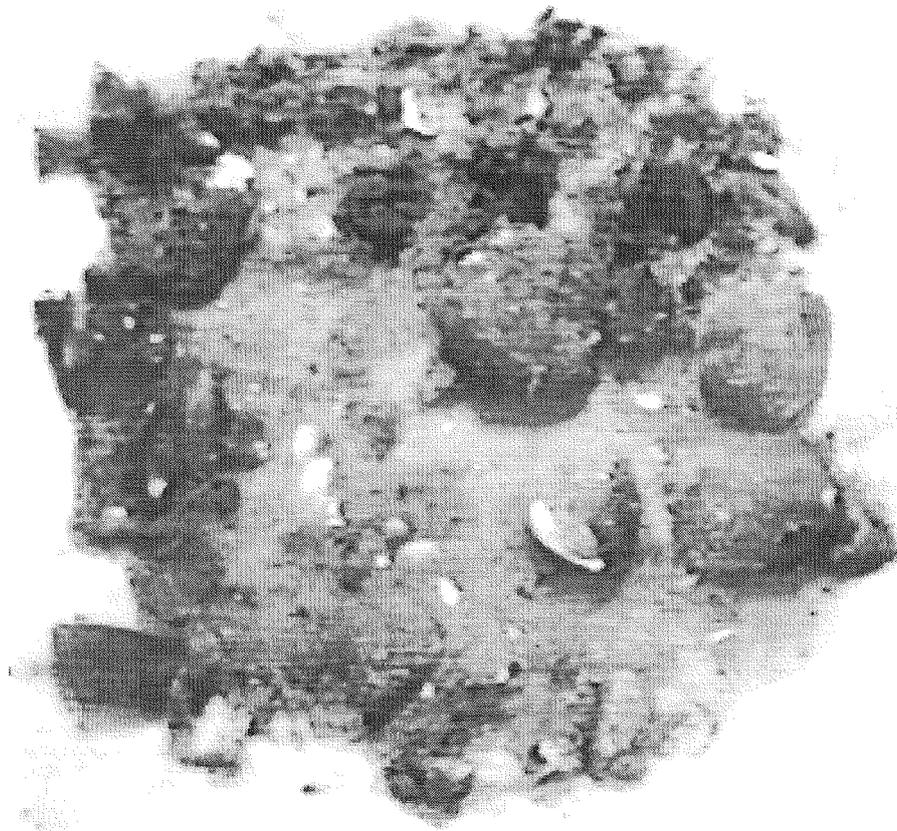


Abbildung 3.39: Kern von Station 23c vom 09.11.94 an Position „C“ im Strömungskanal. Auf der Oberfläche befinden sich zahlreiche Muschelschalen.

Experiment „D“: Dieses Experiment wurde mit Material der Station 23c vom September 1995 unter Freistromgeschwindigkeiten von 4 cm s^{-1} durchgeführt. Die Sedimentkerne an den Positionen A und B waren flach strukturiert und nicht besiedelt. Auf dem Sedimentkern an der Position C befinden sich zwei Muscheln, eine *Mytilus edulis* und eine *Astarte borealis*.

In der ersten Stunde nahmen alle Partikelgrößen stark ab, danach verlief die Abnahme gleichmäßiger. Die Endkonzentrationen der kleinen Partikel waren 69% für $1 \mu\text{m}$, 65% für $2 \mu\text{m}$ und 42% der Anfangskonzentration für die $3 \mu\text{m}$ Fraktion der Mikrosphären. Größere Partikel nahmen schneller ab als kleinere. Die Endkonzentrationen betragen hier 15% für die $10 \mu\text{m}$, 25% für die $22 \mu\text{m}$ und 13% für die $38 \mu\text{m}$ Fraktion (Abb. 3.40).

Alle auf dem Sediment deponierten Partikel wurden hier durch einen größeren Stichprobenumfang als an den vorherigen Experimenten bestimmt. Besonders auf den Kernen wurden mehr Proben genommen (siehe Abbildung 3.41). Bei diesem Experiment wurden überraschenderweise auch die kleinen Partikel bis $3 \mu\text{m}$ relativ stark abgelagert. Im Vergleich zu den Partikeln von 10 bis $38 \mu\text{m}$ Durchmesser war der Prozentsatz wie bei den anderen Experimenten geringer (Abbildung 3.41). Hier war hinter den Gleichrichtern und

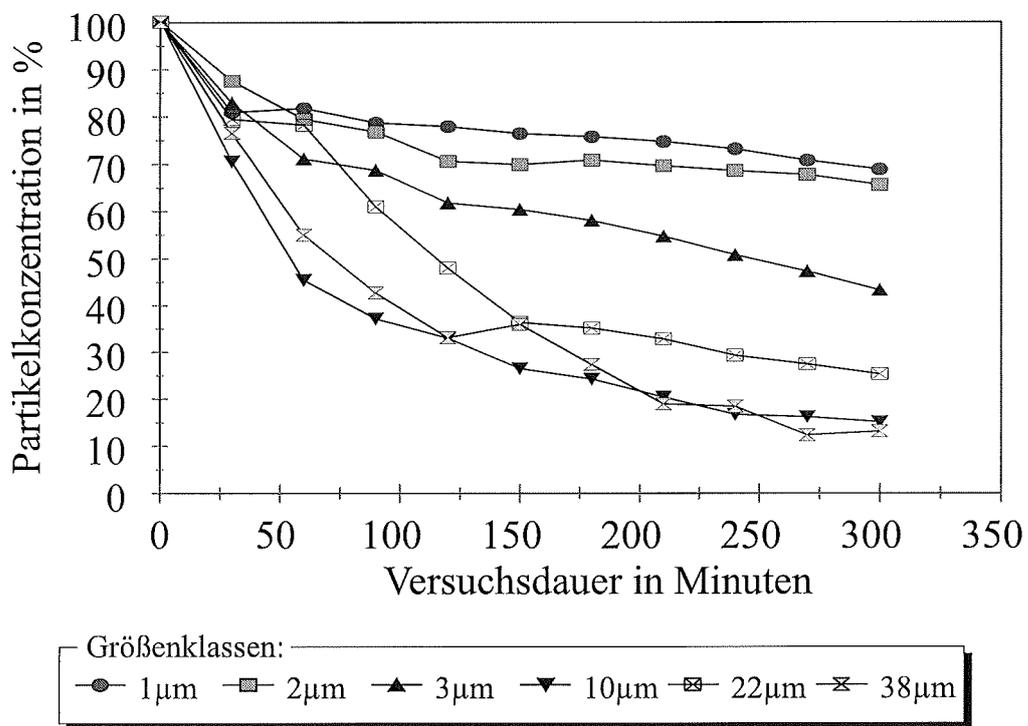


Abbildung 3.40: Die Abnahme der Mikrosphären im Wasser in Versuch D.

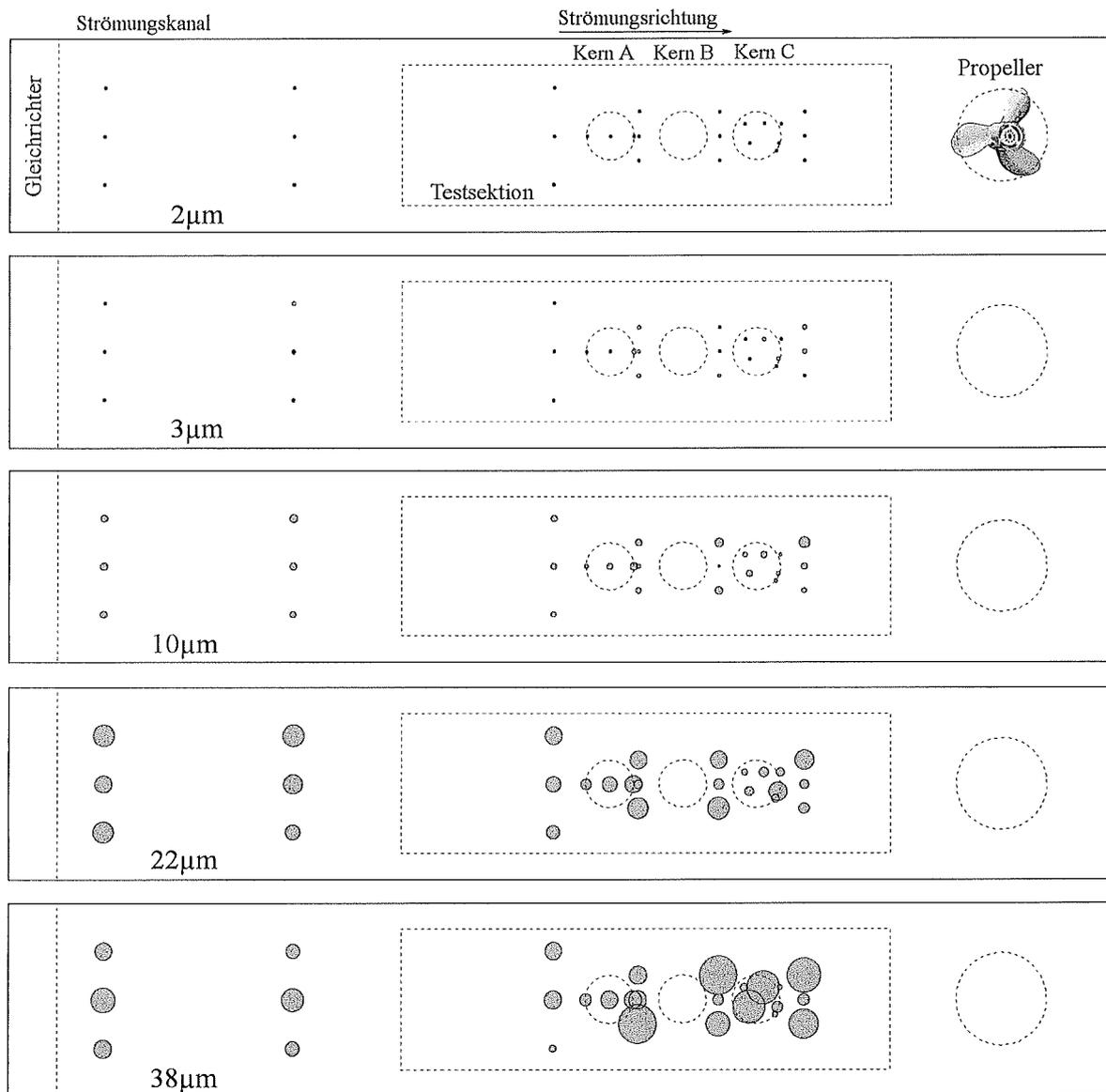


Abbildung 3.41: Deposition der Mikrosphären an verschiedenen Orten im Strömungskanal bei Experiment C. Die verschiedenen Größen sind auf gleiche Anfangskonzentration normiert. Die Position der Sedimentkerne wird mit A, B und C bezeichnet.

vor der Testsektion vermehrte Deposition der 22 und 38 μm Fraktion festzustellen. Im Vergleich zum Experiment ohne Besiedelung ist die Deposition auf der Testsektion um 56% erhöht.

Beide untersuchte Muscheln auf Kern C nahmen vorwiegend die kleineren Mikrosphären bis 3 μm Durchmesser auf (siehe Abb. 3.42). Verglichen mit den anderen Versuchen war die Partikelaufnahme sehr gering.

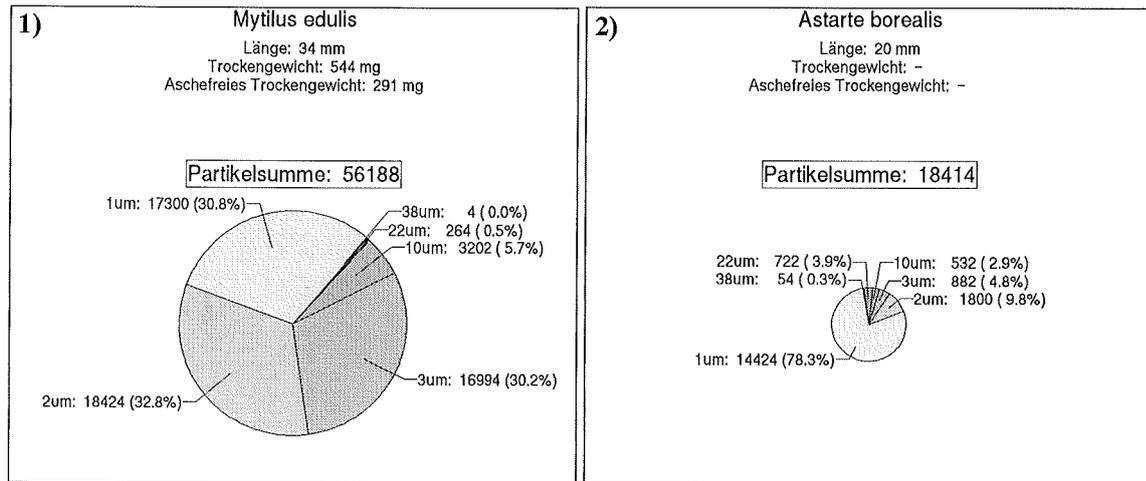


Abbildung 3.42: Partikelaufnahme der Makrofaunaorganismen an Position C in Experiment „D“.

Die Experimente im Vergleich: Der Versuch „A“ fand im kleineren Strömungskanal statt und kann daher nur bedingt mit den anderen drei Experimenten verglichen werden. Die Partikelabnahme im Wasser über die Zeit und die Aufnahme seitens der Makrofauna unterschied sich nicht generell von den Ergebnissen im neuen Strömungskanal. Hier wurden im Kontrollexperiment mit sterilem Sand und ohne Makrofauna 2% der Gesamtmikrosphärenzahl auf dem Kanalsediment deponiert. Ca. 20% der Mikrosphären blieben im Rücklauf oder in den Gleichrichtern und an der Wand hängen. Mit Originalsediment und biogenen Strukturen im Kanal wurden ungefähr 50% mehr Partikel deponiert als im Kontrollexperiment. Dies waren hauptsächlich die größeren Partikel von 10 bis 38 μm Durchmesser. Bei dem Experiment C mit der hohen Freistromgeschwindigkeit wurden weniger Partikel als im Kontrollexperiment deponiert. Die untersuchte Makrofauna nahm vorwiegend die Partikelgrößen bis 3 μm Durchmesser auf. Dabei reichte das Spektrum der Anzahl aufgenommener Partikel von knapp 400 für eine einzelne *Polydora ciliata* bis zu 170 000 für eine *Arctica islandica*. Es gab keinen großen Unterschied in der Partikelaufnahme von Makrofaunaorganismen der Station 12c zu Tieren der Station 23c. Auch jahreszeitliche Unterschiede in der Partikelaufnahme waren nicht festzustellen.

4 Diskussion

4.1 Felduntersuchungen in der Mecklenburger Bucht

4.1.1 Hydrographie

Für die Ostsee sind Wassererneuerungsprozesse durch Einstrom aus dem Kattegat wichtig, da die Abschottung zur Nordsee durch mehrere Schwellen sowie die ausgeprägte Dichteschichtung weitgehend den Wasseraustausch mit der Nordsee verhindert. Seit dem letzten großen Einstromereignis 1976 wurde eine zunehmende Verschlechterung der Sauerstoffsituation im Tiefenwasser der Ostseebecken festgestellt (RUMOHR, 1993; GOSSELCK *et al.*, 1987).

Die Hydrographie in der Mecklenburger Bucht wurde im ersten Untersuchungsjahr von dem großen Salzwassereinbruch im Winter 1992/93 geprägt, bei dem zum erstenmal seit 16 Jahren wieder eine größere Menge sauerstoff- und salzreichen Atlantikwassers in die Ostsee gelangte. Die Strömungsverhältnisse entsprachen in dieser Situation der ersten Ausfahrt (siehe auch die in Abschnitt 2.1.1, Abbildung 2.2 von FENNEL UND STURM (1992) beschriebenen Verhältnisse). Das einströmende Wasser war mit mehr als $300 \mu\text{mol l}^{-1}$ (JÄHMLICH, 1996) voll mit Sauerstoff gesättigt. Bei der nächsten Ausfahrt im Mai war im Bodenwasser 50% Sättigung festzustellen. Im September war der Sauerstoff mit Sättigungswerten von 2–10% fast aufgezehrt (JÄHMLICH, 1996). Das Sturmereignis im November 1993 durchmischte die Wassersäule wieder kräftig und der Sauerstoffgehalt im Boden erreichte wieder die volle Sättigung (JÄHMLICH, 1996).

1994 war die hydrographische Gesamtsituation ähnlich wie 1993. Eine Erfassung der Sommersituation fand nicht statt. Die Sauerstoffsättigung im Bodenwasser lag an allen Ausfahrten dieses Jahres über 50% (JÄHMLICH, 1996).

Bei beiden Ausfahrten im Februar und September 1995 stellten sich besondere Situationen dar. Im Februar herrschte starker Sturm mit Resuspension, wie die Aufnahmen mit dem Videoschlitten zeigen. Der Sauerstoffgehalt am Boden war im September auf 0% abgesunken. Dies spiegelt sich auch in den Makrofaunadaten wieder.

Die Geschwindigkeit und Richtung der Bodenströmung variiert stark, die wenigen Meßwerte lassen keinen Trend über den Untersuchungszeitraum erkennen. Wie FENNEL UND STURM (1992) feststellen, schnüren sich bei weitgehend küstenparalleler Strömung eine Reihe von Eddies ab (s. Abb. 2.2). Somit wäre eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität in beiden Parametern zu erwarten. WANNER (1995) hat bei Kurzzeitvideoaufnahmen auf beiden Transekten festgestellt, daß die Strömungsrichtung im kleinskaligen

Bereich in 25 cm Höhe über Grund schon während 5–10 min mehrmals um bis zu 180 °C wechselte.

4.1.2 Makrofauna

Die Artenzusammensetzung an den beiden untersuchten Stationen 12c und 23c läßt sich keiner bestimmten Gemeinschaft (z.B. *Abra alba* oder *Macoma balthica* Gemeinschaft) zuordnen, wie sie noch vor dreißig Jahren von SCHULZ (1969) beschrieben wurde. Damals kamen im Gebiet des 12er Transektes 14 Arten (ohne das Hyperbenthos) stetig vor. In dieser Untersuchung sind es auf Station 12c 7 Arten, also die Hälfte (siehe Tabelle 4.1 ohne Crustaceen). Von Station 12o dieses Transektes liegen zum Vergleich Informationen zur

Tabelle 4.1: Artenzahlen an ausgewählten Stationen der Mecklenburger Bucht. Zum Vergleich wurden Beobachtungen von RUMOHR (pers. Mittlg.) zu den eigenen Beobachtungen angefügt.

Datum	Station	Mollusken	Crustaceen	Polychaeten	andere	Σ	Quelle
Jun. '91	12o	3	1	7	/	11	RUMOHR (pers. Mittlg.)
Nov. '91	12o	3	1	7	1	12	RUMOHR (pers. Mittlg.)
März '92	12o	3	1	6	1	11	RUMOHR (pers. Mittlg.)
Nov. '92	12o	2	2	1	/	5	RUMOHR (pers. Mittlg.)
März '93	12o	3	/	4	/	7	RUMOHR (pers. Mittlg.)
Sept. '93	12o	3	1	3	1	8	RUMOHR (pers. Mittlg.)
Dez. '93	12o	2	1	3	/	6	RUMOHR (pers. Mittlg.)
Feb. '93	12c	3	3	4	2	12	diese Arbeit
Mai '93	12c	2	1	4	1	8	diese Arbeit
Sept. '93	12c	2	3	1	2	8	diese Arbeit
Nov. '93	12c	1	1	/	1	3	diese Arbeit
Feb. '94	12c	4	1	3	1	9	diese Arbeit
April '94	12c	1	1	1	1	4	diese Arbeit
Nov. '94	12c	3	2	1	2	8	diese Arbeit
Feb. '93	23c	8	3	4	2	17	diese Arbeit
Mai '93	23c	5	2	3	1	11	diese Arbeit
Sept. '93	23c	8	2	3	2	15	diese Arbeit
Nov. '93	23c	6	2	3	1	12	diese Arbeit
Feb. '94	23c	6	2	6	2	16	diese Arbeit
April '94	23c	6	2	4	1	13	diese Arbeit
Nov. '94	23c	9	2	10	2	23	diese Arbeit

Makrofaunazusammensetzung für einen Zeitraum von 2 Jahren vor dieser Untersuchung vor (RUMOHR, pers. Mittlg., siehe Tabelle 4.1). Die Artenzahl auf dem 12er Transekt hat

sich demnach von 1991 bis Ende 1994 unwesentlich verringert.

Für den Bereich des Transekt 23 wird von SCHULZ (1969) das stetige Vorkommen von 18 Arten beschrieben. In der vorliegenden Untersuchung wurden auf Station 23c im Mittel 15 Arten regelmäßig gefunden (Tabelle 4.1). Neuere Untersuchungen im Gebiet der Lübecker Bucht, entsprechend dem Transekt 23 (GOSSELCK *et al.*, 1987), zeigen nach einem Einstromereignis mit darauffolgender Wiederbesiedelung das Vorkommen von 29 Arten mit bis zu 2620 Individuen pro m².

Für die Artenzusammensetzung und Individuenzahlen pro m² paßt eher das von RUMOHR (1993) im Rahmen des Biologischen Monitorings der Ostsee entwickelte Modell der für die Ostsee relevanten Sukzessionsstadien. Das Stadium 2 des Modells beschreibt eine von Muscheln und Polychaeten dominierte und starken Fluktuationen unterworfenen Gemeinschaft. Diese Beschreibung könnte auf die Verhältnisse von Station 23c zutreffen. Dort wurden hauptsächlich Muscheln und Polychaeten gefunden. Die hohe „patchiness“ unterstreicht die Fluktuation. Das gelegentliche Vorkommen des Echinodermen *Asterias rubens* könnte allerdings auch noch auf die erste Modellstufe hindeuten (Klimax-Gemeinschaft).

Stadium 3 des Modells beschreibt den Wechsel zur biomassearmen Kleinpolychaeten-Gemeinschaft mit sehr starken Schwankungen. Dieser Ansatz könnte auf die Verhältnisse auf Station 12c zutreffen. Da die Biomasse in dieser Untersuchung nicht bestimmt wurde, kann sie nicht als Unterstützungskriterium für die Zuordnung herangezogen werden. Die Polychaetenarten *Polydora ciliata*, *Capitella capitata* und *Scoloplos armiger*, sowie die Muscheln *Macoma balthica* und *Corbula gibba* gehören jedoch in Bezug auf die Körpergröße zu den kleineren Arten ihres Stammes. Das Auftreten von *Halicryptus spinulosus*, der auf Station 12c regelmäßig anzutreffen war, wird in RUMOHR (1993) als Zeiger für den hohen Streß der Makrofaunagemeinschaft gedeutet. Die geringe Arten- und Individuenzahl sowie das Vorkommen anderer „Überlebensstrategen“ und Opportunisten wie *Diastylis rathkei*, *Polydora ciliata* und *Antionella sarsi*, bestätigen an dieser Station (seltener auf Station 23c) den Eindruck. Ebenso verhält es sich mit den Videoaufzeichnungen.

Im Beobachtungszeitraum variierte die Individuendichte an beiden Stationen von Ausfahrt zu Ausfahrt. GOSSELCK *et al.* (1987) beschreibt die schnelle Ansiedelung opportunistischer Arten nach Einstrom von sauerstoffreichem Wasser. An den Stationen 12c und 23c war bis September 1993 nach dem Einstromereignis am Beginn des Jahres gleichfalls eine Veränderung der Individuenzahl von 464 auf 897 pro m² für Station 12c und von 796 auf 1732 pro m² auf 23c festzustellen. An dieser Station wurde eine Größenklassenbestimmung durchgeführt. Der Anteil der juvenilen Muscheln bis 5 mm Schalenlänge war mit 1109 von 1186 Muscheln sehr hoch. Es ist also anzunehmen, daß sich die Makrofauna

nach dem Salzwassereinstrom mit „frischem“, sauerstoffreichen Wasser regeneriert hat. Eine solche Rekolonisation wird für eine Situation im Jahr 1981 in der Lübecker Bucht von GOSSELCK *et al.* (1987) beschrieben.

4.1.3 Durchmischung des Sedimentes

Die Stationen 12c und 23c unterscheiden sich nicht nur in Wassertiefe, Sedimentbeschaffenheit und Makrofaunabesiedelung, sondern auch in der Tiefenverteilung der Pigmente. Im Gegensatz zur Station 23c sind die Profile der CPE auf Station 12c weniger einheitlich und zeigen zum Teil in größeren Sedimenttiefen wieder erhöhte Werte in Bezug zur Oberfläche. Welchen Einfluß hat nun die Makrofauna auf diese Tiefenverteilung?

Die Anpassung der Modellfunktion von BERNER (1980) an die Tiefenprofile ist nur dann sinnvoll, wenn davon ausgegangen werden kann, daß durch die vielfältige Aktivität der Makrofauna ein diffusionsanaloger Prozeß vorliegt (ALLER, 1982). Diese Bedingung ist nach ALLER (1982) dann erfüllt, wenn eine genügend hohe Anzahl von Organismen dies durch vielfältige Aktivität gewährleistet.

Auf Station 12c waren die Artenzahl und die Individuenzahlen sehr gering (Tabelle 4.1), daher wurde keine Modellanpassung vorgenommen. Der Priapulide *Halicryptus spinulosus*, der nach POWILLEIT *et al.* (1995) bis zu 25 cm tief im Sediment Gangsysteme anlegt, kam an dieser Station häufig vor. Durch Verfüllen dieser Gänge aufgrund der Aktivität einzelner Tiere könnte der in den Profilen zwischen 4 und 8 cm Sedimenttiefe erhöhte CPE-Gehalt (siehe Abschnitt 3.1.4 Abbildung 3.4a,f und 3.5a,f) erklärt werden.

In das Modell geht die Abbaurate für die Chlorophyll ein. Sie ist in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und Konzentration der Pigmente regionalen und jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen. Obwohl an den beprobten Stationen keine Experimente zum Chlorophyllabbau durchgeführt wurden, konnte auf Literaturdaten zurückgegriffen werden. Aus dem Laborexperiment von GRAF (1987) zur Reaktion des Benthals auf die Simulation einer Planktonblüte läßt sich ein k_d von $0,12 \text{ d}^{-1}$ abschätzen. Für flache Bereiche der Oder-Bucht berichtet POWILLEIT (pers. Mittlg.) über mittlere Abbauraten von ebenfalls $0,12 \text{ d}^{-1}$. In SUN *et al.* (1991) wird für k_d ein Wert von $0,03$ für ein anoxisches Flachwassergebiet im Long Island Sound genannt.

Nimmt man die Anpassung der Modellgleichung für die vorgefundenen Profile einmal mit einer Abbaurate von $k_d = 0,12 \text{ d}^{-1}$ (GRAF (1987), POWILLEIT, pers. Mittlg.) und einmal mit von $0,03 \text{ d}^{-1}$ an, ergeben sich die in Tabelle 4.2 zusammengefaßten Werte für D_B .

Man sieht sofort, daß die Kenntnis der tatsächlichen Abbaurate (Unterschiede um

Tabelle 4.2: Berechnete D_{B1} -Werte aus der Modellfunktion mit in die Gleichung (2.1) eingesetzten k_d von $0,12 \text{ d}^{-1}$. (POWILLEIT, pers. Mittlg.) Zum Vergleich sind die D_{B2} 's mit einem k_d von $0,03 \text{ d}^{-1}$ aus SUN *et al.* (1991) dargestellt

Datum	Station	$D_{B1} \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$	$D_{B2} \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$
September 1993	12c	1,95	0,49
November 1994	12c	0,728	0,18
Mai 1993	23c	6,3	1,58
September 1993	23c	0,12	0,03
November 1993	23c	2,07	0,52
Februar 1994	23c	0,10	0,026
April 1994	23c	0,53	0,13
November 1994	23c	0,92	0,23

Faktor 3) von großer Bedeutung ist. Eine Diskussion der Absolutwerte ist demnach nicht sinnvoll. Die Relationen untereinander können jedoch Information über die Aktivität der Tiere liefern.

Auf Station 12c machte die Anpassung der Funktion nur im September 1993 und November 1994, mathematisch gesehen, Sinn. Der errechnete D_B von 1,95 (0,49) ist im Vergleich zu den anderen hoch. Dies könnte durch die Anzahl von 897 Individuen erklärt werden, zumal es sich hauptsächlich um Depositfresser handelte.

Im November 1994 erfolgte die Probennahme gegen Ende einer Phytoplanktonblüte, die zum Teil bereits abgesunken war (WANNER, 1995). Ein solcher Nahrungseintrag kann die Aktivität der Makrofauna, die mit 43 Individuen zwar nur sehr schwach vertreten war, dennoch steigern (LINKE *et al.*, 1995). An dieser Stelle sei auch noch einmal auf die „patchiness“ der Makrofauna hingewiesen.

Auf Station 23c sind mehr Makrofauna-Arten (im Mittel 15) mit höheren Abundanzen von mehr als 1200 Individuen pro m^2 zu finden. Hier ist die Analogie zu diffusionsähnlichen Vermischungsprozessen im Sediment seitens der Makrofauna-Abundanz wahrscheinlich gerechtfertigt. Rein mathematisch gesehen, können alle Profile bis auf das Profil ohne Gradienten im Februar 1993 (siehe Abbildung 3.4b in Abschnitt 2.1), an die Modellfunktion angepaßt werden.

Nicht unerwähnt bleiben sollen Untersuchungen zur Sedimentdurchmischung, die im Rahmen dieses Projektes mit anderen Methoden erstellt wurden. In beiden Arbeiten wird der Beitrag der Makrofauna als gering erachtet. GESINN (1994) stellte an Sedimentkernen der Station 23c vom Mai und September 1993 mit der Luminophorenmethode (MAHAUT UND GRAF, 1987; TEUCHER, 1991) sehr geringe Mischungskoeffizienten zwischen 0,001

und $0,015 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$ fest. Das Makrofaunavorkommen in den verwendeten Sedimentkernen war sehr niedrig im Vergleich zu den Greiferproben von derselben Station 23c. KITLAR (pers. Mittlg.) hat parallel dazu in einem Versuch mit der Bromid-Methode (KITLAR, 1991) zur Quantifizierung des Flüssigkeitstransportes gleichfalls einen geringen Einfluß der Makrofauna konstatiert. Der Flüssigkeitsaustausch durch die Grenzfläche ($K_{BIO}=1-2$) wird in der Untersuchung als rein diffusionsähnlich eingeschätzt. Durch die Aktivität der verarmten Makrofaunagemeinschaft wird der Stoffaustausch zwar erhöht, liegt aber mit K_{BIO} 's von 2,7–5,7 deutlich niedriger als in der Kieler Bucht oder der südlichen Nordsee, wo Werte bis zu 20 gemessen wurden (KITLAR, pers. Mittlg.).

Insgesamt gesehen sollten für eine bessere Einschätzung der Durchmischung neben CPE-Profilen noch Chlorophyll- α Profile und Profile von Radionukliden (Thorium²³⁴, Blei²¹⁰) zum Vergleich gemessen werden. Bei hoher „patchiness“ werden jedoch immer Probleme bei der Übertragung vom Labor auf das Feld bleiben.

4.1.4 Feldexperiment

Die Meßdaten zeigen, daß innerhalb des beprobten Wasserkörpers an jeder Station bodennah (5 cm ü.Gr.) mehr TPM und bodenfern (40 cm ü.Gr.) mehr POC vorkam. Dies könnte auf eine hydrodynamische Sortierung hindeuten.

Hydrodynamische Sortierung bedeutet nach MUSCHENHEIM (1987), daß sich Partikel mit unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit in gleichförmiger Strömung auf bestimmten „Bahnen“ parallel zum Boden bewegen. In einem natürlichen Partikelgemisch, bestehend aus Sandkörnern, Aggregaten, Plankton und benthischen Mikroalgen bewegen sich Partikel mit größerer Dichte eher in Bodennähe, die leichtere organische Fraktion hingegen in größerem Abstand vom Boden (MUSCHENHEIM, 1987). Während des Experimentes lag die Strömungsgeschwindigkeit in 45 cm über Grund an den einzelnen Stationen zwischen $3,9$ und $5,7 \text{ cm s}^{-1}$ mit maximalen Abweichungen von $1,3 \text{ cm s}^{-1}$ (JÄHMLICH, 1996). Die Vorgabe einer gleichförmigen Strömung wäre also, wenn auch nur bedingt, gegeben.

Die Chlorophyllgehaltsverteilung hingegen paßt nicht zu dieser These. Hier wäre thesenunterstützend zu erwarten, daß, wenn die sich die leichtere Fraktion in größerem Abstand vom Boden bewegt, dann auch der CPE-Gehalt dort am höchsten ist. Der wiederum ist in geringerem Abstand zum Boden zusammen mit dem TPM-Gehalt am größten. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen:

Erstens, es könnte die Resuspension einer Planktonblüte stattgefunden haben. Daß sich zu dieser Zeit schon eine Planktonblüte im Wasser befand, wurde schon an anderer Stelle konstatiert (WANNER, 1995). Zweitens, es könnte in der untersten Probe Sediment

eingesaugt worden sein. THOMSEN *et al.* (1995) interpretiert in einer Studie am Barentsee-
Hang ähnliche Profile als resuspendierte Planktonblüte.

In unserem Fall kann ohne genauere Kenntnis der hydrodynamischen Situation über
Messung eines oder mehrerer Strömungsprofile nicht entschieden werden, ob eine Resus-
pension stattgefunden hat.

Trends über die Experimentstrecke konnten für TPM, POC, Chlorophyll und Bakte-
rienabundanz nicht festgestellt werden.

Eine Tendenz im Parameter Harnstoff ist deutlich erkennbar. Harnstoff nimmt im
Laufe der Versuchsstrecke am Boden zu ($0,22-0,67 \mu\text{mol l}^{-1}$) und wird am Ende wieder
geringer. Eine mögliche Quelle ist die benthische Makrofauna. Diese war an den drei be-
probten Experimentstationen mit sehr geringen Abundanzen (43, 255 und 83 Ind. pro m^2)
gering vertreten. Die Abundanz war dort am höchsten, wo auch der höchste Harnstoffge-
halt auftrat. Da nach TURLEY (1980) ein schneller Abbau in der Wassersäule geschieht,
ist es daher möglich, daß Makrofauna-Organismen die Harnstoffproduzenten gewesen sein
könnten.

Zur besseren Einschätzung des Vorkommens der Makrofauna müßten ergänzend Vi-
deobeobachtungen oder Bodenphotos aufgenommen werden. Die Entnahme von Parallel-
proben und die Verankerung von Strömungsmessern über die Versuchsstrecke würden ein
detaillierteres Bild schaffen.

4.2 Eignung des neuen Strömungskanals für Untersuchungen in der BBL

Der im Rahmen dieser Arbeit gebaute Strömungskanal war konzipiert worden, um die
Strömungsverhältnisse im bodennahen Wasserkörper zu simulieren und so Experimente
unter naturnahen Bedingungen durchführen zu können. Diese naturnahen Bedingungen
werden in Bezug auf das Strömungsregime in einer „Theorie der bodennahen Grenzschicht“
(Boundary Layer) zusammengefaßt und in zahlreichen Lehrbüchern beschrieben (z.B. VO-
GEL (1981); MIDDLETON UND SOUTHARD (1984); MANN UND LAZIER (1991); JUMARS
(1993)). Einige dieser Grundlagen wurden in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt.

Es ist daher für die Beurteilung von Auswirkungen zum Teil kleiner Makrofauna-
Organismen und Strukturen auf das Strömungsregime von entscheidender Bedeutung,
wie gut die hydrodynamischen Verhältnisse im Strömungskanal mit den Gegebenheiten
im Freiland übereinstimmen. Sowohl zur Feststellung dieses Sachverhaltes als auch für
die Modifikationsmessungen muß man zunächst möglichst präzise und wiederholgenau die

Strömungsgeschwindigkeit messen können. Der Aufbau des automatischen Schienensystems mit dreidimensionaler Verfahrstrecke zusammen mit dem Akustik-Doppler-Strömungssensor, der alle drei Geschwindigkeitskomponenten erfassen kann, erwies sich als geeignete Lösung dieser Vorgabe. Die Möglichkeit, automatisch Positionen anfahren zu können, bzw. gelegte Meßgitter automatisch zu beproben, macht eine erweiterte Meßwertaufnahme sehr zeitsparend. Mit einer Abtastschrittweite des Positioniersystems von 0,2 mm und der Meßgenauigkeit des Akustik-Doppler Sensors von $0,1 \text{ mm s}^{-1}$ mit 0,5% Abweichung über den gesamten Meßbereich von 0 bis $2,5 \text{ m s}^{-1}$ konnten auch kleine Objekte und Veränderungen des Strömungsregimes meßtechnisch erfaßt werden.

In dem beschriebenen Kanal können Freistromgeschwindigkeiten v_∞ von 0 bis ca. $12,5 \text{ cm s}^{-1}$ bei einer Wasserhöhe von 25 cm erzeugt werden. Die Strömung in der Rinne ist gerichtet und über der Testsektion gleichmäßig mit Turbulenzintensitäten von 10–12% verteilt (siehe Abschnitt 3.2.1, dort Abbildung 3.13 und 3.14). Die Bedingungen für die Ausbildung einer Boundary Layer sind somit erfüllt. Die Vertikalprofile in Abbildung 3.15 (Abschnitt 3.2.1) zeigen den typischen Verlauf eines Boundary Layer Profils an (siehe Abbildung 2.3). Schon 10 cm hinter dem Gleichrichter, der als Startpunkt der Ausbildung, das sogenannte „leading edge“ (z.B. VOGEL (1981)), angesehen wird, beginnt bei geringen v_∞ ($1,5 \text{ cm s}^{-1}$) die Ausbildung der Schicht. In der Literatur werden verschiedene Formeln zur Berechnung der Schichtdicke σ der Boundary Layer in einer Distanz x vom „leading edge“ für Feldverhältnisse angegeben.

MANN UND LAZIER (1991) geben eine Formel nach PRANDTL (1969) an. Sie gilt für 99% der Ausdehnung der Grenzschicht:

$$z = \sqrt{\frac{x \nu}{v_\infty}} \quad (4.1)$$

mit z = Schichtdicke, x = Abstand vom „leading edge“, ν = kinematische Viskosität des strömenden Mediums und v_∞ = Freistromgeschwindigkeit.

VOGEL (1981) gibt eine ähnliche Formel, basierend auf einer Näherungslösung der Navier-Stokes'schen Gleichung an, mit der Nebenbedingung, daß keine Querströmung auftritt. Sie gilt ebenfalls für 99% der Ausdehnung der Grenzschicht bei laminaren Bedingungen:

$$z = 5 \sqrt{\frac{x \nu}{v_\infty}} \quad (4.2)$$

Für den turbulenten Fall (mit Reynoldszahlen > 500000) wird in der gleichen Quelle folgende Berechnung der Schichtdicke angegeben:

$$z = 0,376 x \sqrt[5]{\frac{\nu}{x v_{\infty}}} \quad (4.3)$$

Die einzelnen Formeln sind zusammen mit der Berechnung für den Fall von der Freistromgeschwindigkeit von 5 cm s^{-1} , die für einige Experimente geherrscht hatte, in Abbildung 4.1 angegeben. In einem Strömungskanal ist die Höhe der Grenzschicht vor allem durch die Wasserstandshöhe vorgegeben. Eine direkte Anwendung der Formeln ist daher nur begrenzt sinnvoll. Eine Erweiterung der genannten Formeln um einen entsprechenden Term für die zweite Grenzschicht Wasser–Luft wäre denkbar.

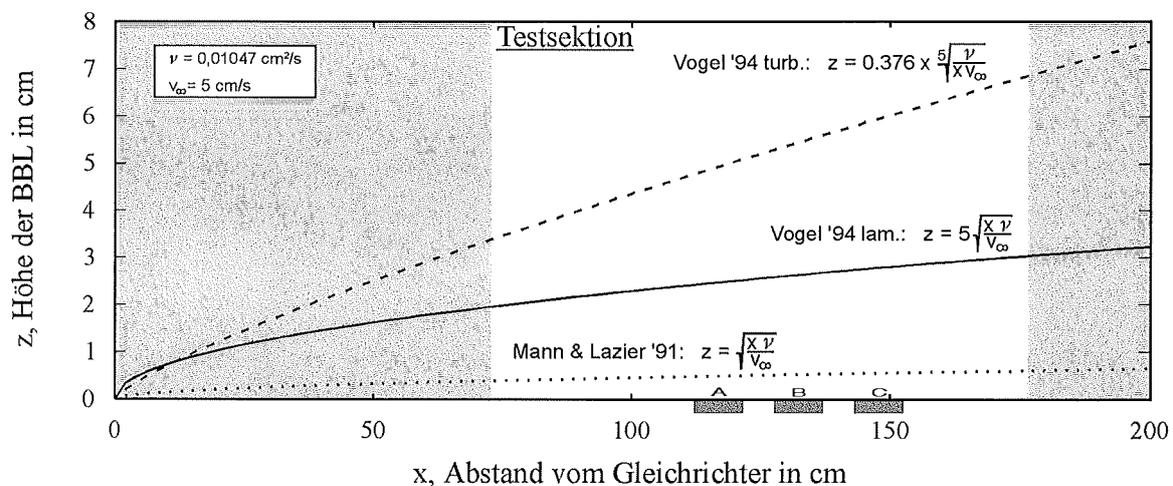


Abbildung 4.1: Zusammenstellung einiger Literaturformeln für die Berechnung der allgemeinen Schichtdicke der Grenzschicht. Die Abmessungen des Kanals sind eingezeichnet. In Strömungskanälen wird die Schichtdicke maßgeblich von der Wasserstandshöhe vorgegeben.

NOWELL UND JUMARS (1987) halten die Bauweise eines Strömungskanals, wie ihn VOGEL (1981) vorschlägt, für Untersuchungen an Grenzschichten ungeeignet. Ihrer Ansicht nach ist die Dimensionierung zu klein, um die Ausbildung einer Grenzschicht zu ermöglichen. Zusätzlich würden dreidimensionale Strömungsmuster stören. Der hier beschriebene Kanal lehnt sich im Prinzip an die Bauweise von VOGEL (1981) an, jedoch ist er sehr viel größer und die Art des Antriebs wurde modifiziert. Die Ausbildung einer Boundary Layer konnte nachgewiesen werden (siehe Abbildung 3.15, 3.16).

Die Vertikalprofile bei glattem Untergrund im Strömungskanal zeigen eine Schichtdicke von maximal 5 cm bei $v_{\infty}=1,5 \text{ cm s}^{-1}$. Sie wird bei höherer v_{∞} bis 10 cm s^{-1} auf unter 2 cm zusammengedrückt. Bei einem v_{∞} von 5 cm s^{-1} erreicht die Schichtdicke 3,5 cm. Damit liegt sie im Bereich der von VOGEL (1981) für laminare Verhältnisse angegebenen

Formelumsetzung in der Graphik 4.1.

Die für diese Verhältnisse berechnete Grenzschichtreynoldszahl von ungefähr 45 (siehe Abschnitt 2.2.3, Gleichung (2.9)) und die Reynoldszahl (siehe Abschnitt 2.2.3, Gleichung (2.3)) von ungefähr 53000, mit einer Wasserhöhe von 22 cm bzw. für 110 cm Abstand vom Gleichrichter, zeigen hingegen ein gerichtet turbulentes Geschehen im Kanal an. Die geringe Turbulenzintensität von 10–12% im Bereich der Testsektion über einen Freistromgeschwindigkeitsbereich von 5–10 cm s⁻¹ unterstützen diese Annahme.

Sedimentkerne und Mesokosmen konnten über längere Zeit im Strömungskanal unter „in situ“ ähnlichen Bedingungen gehältert, beobachtet und gefilmt werden. Die Wassertemperatur in der Anlage ließ sich in dem für die Experimente benutzten Bereich von 8,5 bis 15,5 °C mit einer maximalen Abweichung von 1 °C über den Experimentzeitraum einstellen.

4.3 Biologische und physikalische Prozesse im Vergleich

4.3.1 Biogene Strukturen und das Strömungsregime

Schubspannungsgeschwindigkeit und Rauigkeitslänge: In Tabelle 4.3 ist die Berechnung von u_* und z_0 bei ausgewählten v_∞ dargestellt. Daraus lassen sich mehrere Dinge ablesen. Erstens, daß die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die Rauigkeitslänge z_0 bei gleichförmigem Untergrund (Feinsand, Grobsand) mit zunehmender Freistromgeschwindigkeit größer werden. Zweitens, daß die Besiedelung der Experimentkerne eine Erhöhung beider Parameter bewirkt.

Weiterhin lassen die Ergebnisse der Anpassung der Funktion an unterschiedliche Strömungsprofile vermuten, daß generell die Besiedelung durch Makrofauna beide Parameter dahingehend modifiziert, daß u_* in Strömungsrichtung ansteigt, ebenso wie z_0 . Häufig war sogar eine Berechnung beider Parameter nach der theoretischen Formel (siehe Abschnitt 2.2.1, Gleichung (2.5)) nicht mehr in hinreichender Güte möglich ist (vgl. z.B. Abb. 3.24b,e,f und 3.25f in Abschnitt 3.2.3).

Viele der Berechnungen zum bodennahen Partikel- und Stofftransport, wie z.B. Rouse-Zahl, Dissipationsenergie (MIDDLETON UND SOUTHARD, 1984; JUMARS, 1993; MANN UND LAZIER, 1991) setzen aber die Kenntnis dieser beiden Parameter u_* und z_0 voraus. Es ist daher wichtig zu prüfen, ob die logarithmische Schicht, die die Grundlage der Berechnung darstellt, ausgebildet ist. Schwierig ist dies vor allem bei Feldstudien. In einer Untersuchung in der Kieler Bucht zur Bestimmung der mittleren Schubspannung aus der mittleren Strömung am Meeresboden problematisiert SCHAUER (1987) die Schwierigkei-

Tabelle 4.3: Berechnete u_* -Werte bei unterschiedlichen v_∞ auf besiedeltem (b) und unbesiedeltem (u) Untergrund im Bereich der Testsektion des Strömungskanals. Die besiedelten Sedimentkerne stammen aus den Experimenten.

Untergrund	v_∞ in cm s^{-1}	u_* in cm s^{-1}	z_0 in cm
Feinsand (u)	1,5	0,1	0,03
Feinsand (u)	6,5	0,4	0,01
Grobsand (u)	1,5	0,2	0,04
Grobsand (u)	8,5	0,5	0,006
Kieler Tief (b)	4	0,24	0,1
Kieler Tief (b)	4	0,35	0,3
Kieler Tief (b)	4	0,4	0,5
Kieler Tief (b)	4	0,5	0,8
Kieler Tief (b)	12,5	1,5	0,08
Exp. B (b)	5,5	0,42	0,01
Exp. C (b)	8,5	0,4	0,003
Exp. C (b)	8,5	0,21	0,001

ten bei der Anpassung von Geschwindigkeitsmessungen an das theoretische Profil. Sie ermittelte über die Profilmethode (siehe Abschnitt 2.2.1) die Schubspannung mit einer Mehrfachströmungsmesserverankerung und fand nach statistischen Abschätzungen eine Abweichung vom logarithmischen Profil. Überdies fand sie hohe Werte für z_0 und eine zunehmend konkave Verformung des Profils bei hohen Stromgeschwindigkeiten, weiterhin Werte für u_* , die nach der klassischen Berechnung (Profilmethode) um einen Faktor 4 zu hoch liegen. Sie erklärt dies mit Effekten, bedingt durch den Einfluß des geschichteten Suspensionsgehaltes auf das Profil und einer gegenüber der Theorie veränderten Turbulenzskala in der Wassersäule. Eine Modifikation des Prandtlschen Mischungsweegeansatzes lieferte eine teilweise Erklärung dieser Abweichung.

GROSS UND NOWELL (1983) schlagen längere Meßzeiten vor, um die statistische Sicherheit bei der Bestimmung von u_* und z_0 zu erhöhen.

Hier besteht Bedarf an der Überprüfung der Ausbildung der logarithmischen Schicht durch Messung von räumlich hochaufgelösten Horizontal- und Vertikalprofilen im Feld mit moderner Strömungsmesstechnik (z.B. ADCP).

Kleinskaliger Einfluß einzelner *Arctica islandica*: Das Beispiel mit den zwei Muscheln, die quer und längs zur Hauptstromrichtung in das Sediment gesteckt wurden, zeigt detailliert die Modifikation durch 2 Einzelstrukturen. Der Einfluß, der durch die quer zur Strömungsrichtung liegenden Muschel entstand, reichte mindesten 12 cm weit nach hinten. Durch die dahinter entstandene Erhöhung der Turbulenzintensität auf bis

zu 150% wurde in der Mitte eine Vertiefung geschaffen, das Sediment dort also lokal mit einer Art „bedload transport“ bewegt.

Die Muschel längs zur Hauptstromrichtung bewirkte keine starke Turbulenz mit Sedimenttransport auf dem dahinterliegenden Sediment. Die Schubspannungsgeschwindigkeit war jedoch um $0,15 \text{ cm s}^{-1}$ erhöht. Die Boundary Layer blieb erhalten. Das logarithmische Profil war vor und hinter der Muschel für eine Berechnung der Schubspannungsgeschwindigkeit geeignet. Sie erhöhte sich von $0,37 \text{ cm s}^{-1}$ vor auf $0,53 \text{ cm s}^{-1}$ hinter der Muschel.

Ähnliche hydrodynamischen Verhältnisse fand O'RIORDAN *et al.* (1993) einem Refiltrationsexperiment mit Modellorganismen. Dort wird bei v_∞ von $7,8 \text{ cm s}^{-1}$ ein u_* von $0,37 \text{ cm s}^{-1}$ errechnet. Das sind ungefähr 5%. In diesem Experiment sind es ungefähr 7–8%.

Der Einfluß auf das Strömungsregime in vertikaler Richtung reichte bis maximal 1 cm über das obere Ende der Muscheln hinaus, was bei einem Herausragen der Muscheln von 1,5 cm insgesamt 2,5 cm (etwa 50% der Höhe der Boundary Layer) ausmacht. Das erscheint wenig, aber die Muscheln filterten nicht aktiv (es waren nur die Schalen). Von O'RIORDAN *et al.* (1993) wird berichtet, daß sich die Filtrationsaktivität von Muscheln im Feld innerhalb des inneren Bereiches der Boundary Layer abspielt. Zusätzlich wurde die Boundary Layer zumindest von der quer zu Strömungsrichtung liegenden Muscheln erheblich in ihrer vertikalen Form beeinflußt.

Hier wäre es lohnend, in weiteren Experimenten mit lebenden Muscheln und höherer Dichte pro Fläche festzustellen, wie sich die Ausdehnung und Struktur der Boundary Layer ändert, wenn die Tiere filtern.

Einfluß der besiedelten Kerne im Strömungskanal: Es zeigt sich, daß die Organismen durch ihre Aktivität und Bauten die Werte für die Bodenrauigkeit z_0 erhöhten. In einigen Fällen verschwand aber auch die Struktur des typisch exponentiell ansteigenden Profils. Der Profilverlauf nahm andere Formen an (siehe z.B. Abb. 3.24). So war zum Beispiel über den Polychaetenröhren (Besatzdichte $0,5 \text{ pro cm}$) stromabwärts der Beginn einer zweiten Boundary Layer über den Röhren festzustellen. u_* erhöhte sich dort um den Faktor 2 von $0,23$ auf $0,5 \text{ cm s}^{-1}$. Der gleiche Effekt wurde von GAMBI *et al.* (1990) über einer Seegrasswiese mit ähnlicher Dichte beobachtet. Dort erhöhte sich u_* um den Faktor 2 bis 11.

Die Rauigkeitslänge z_0 erhöhte sich von $0,1 \text{ cm}$ vor den Röhren auf $0,8 \text{ cm}$ über den Röhren. Dies stützt die allgemeine Annahme JUMARS (1993), daß die Höhe der Rauigkeitslänge z_0 unter turbulenten Bedingungen ungefähr ein Drittel der Korngröße oder der mittleren Höhe der Bodentopographie, in diesem Fall der Röhrenhöhe, darstellt. Die

Röhren hatten eine mittlere Höhe von 2–2,5 cm.

Die Turbulenzintensität war direkt (0,5 cm) über den Sedimentkernen mit hoher Besiedlungsdichte (siehe Experiment C, Abschnitt 3.2.5 und Abbildung 3.14) an prägnanten Stellen auf bis 160% zu Orten vor der Testsektion erhöht. Trotzdem kam es zu keiner sichtbaren Resuspension oder zu keinem Partikeltransport. Hier könnte eine Verfestigung des Sedimentes durch Mucusbildung mit enormen adhäsiven Kräften die Ursache sein (JUMARS, 1993; PATERSON *et al.*, 1994; DADE *et al.*, 1990).

Der einzige Fall, in dem Resuspension zumindest im Anfangsstadium gelang, war das bereits genannte Experiment mit den Röhren. Die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit lag bei $1,5 \text{ cm s}^{-1}$. Ein Bezug zur Korngröße kann wegen der fehlenden Korngrößenbestimmung an dieser Station nicht hergestellt werden. Bei Betrachtung der Sedimentkerne im Anschnitt kann man jedoch annehmen, daß der Schlickanteil überwiegt.

Aus Literaturangaben ist bekannt, daß die Lebensspuren von Polychaeten und Muscheln die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit um 20% herabsetzen können (NOWELL *et al.*, 1981) und daß kleine Krebse, dadurch, daß sie Mikroflora vom Sediment fressen, saisonal die Erosionsschwelle herabsetzen (GRANT UND DABORN, 1994).

4.3.2 Die Aktivität und Biodepositionsleistung der untersuchten Makrofauna

Zunächst wird die Methode der Nutzung von Mikrosphären als Tracer für den Verbleib von Partikeln in der Boundary Layer, die Deposition auf dem Sediment und die Aufnahme seitens der Makrofauna diskutiert.

Problematisch ist vor allem, die Größenverteilung der künstlichen Tracer an die Größenverteilung natürlicher Partikel im Wasser anzupassen. Es gibt zwar genaue Meßgeräte (Coulter-Counter, Durchflußzytometer), die präzise Messungen der Partikel in einer Wasserprobe erlauben. Das Problem beginnt aber schon bei der Probennahme selbst: Fragile größere Aggregate zerfallen bei konventionellen Probennahmegeräten aufgrund von Scherung sofort in viele kleinere Partikel oder werden spätestens im Coulter-Counter zerstört. In dieser Arbeit wurde das Größenklassenverhältnis der Mikrosphären demnach nur abgeschätzt, dann aber in allen Versuchen gleich gehalten.

Die Abnahme der kleineren Mikrosphären im Wasser während des Versuchs „A“ (der in dem kleineren Strömungskanal durchgeführt wurde) verläuft kontinuierlich. Das entspricht der Situation, wie sie ZIEBIS (1992) für ein Experiment bei annähernd gleichem v_∞ in demselben Strömungskanal gefunden hat. Die anderen Experimente in dem neuen Strömungskanal zeigen je nach Freistromgeschwindigkeit eine längere oder kürzere Aufenthaltsdauer in der Wassersäule während des Experimentes. Aus den Kontrollversuchen

konnte ein mittlerer Schwund der Mikrosphären von 30% festgestellt werden. Das überrascht nicht, wenn man bedenkt, an wie vielen Stellen im Rücklauf oder in den Gleichrichtern die Mikrosphären hängenbleiben können.

Die Deposition auf dem Kanalsediment zeigte bei den Versuchen „B“ und „D“, die mit einem v_∞ von 5,5 bzw. 4 cm s^{-1} durchgeführt worden waren, eine Erhöhung der deponierten Partikel im Vergleich zu den Kontrollexperimenten um 48 und 56%. Hier hat die Struktur der Oberfläche und des Sedimentes einen Einfluß. Ein vermehrtes Deponieren der kleineren Partikel, wie es bei ZIEBIS (1992) beschrieben ist, konnte nicht festgestellt werden. Sowohl im Kontrollexperiment als auch in den Experimenten mit Makrofauna wurden vorwiegend die größeren Partikel (10–38 μm Durchmesser) deponiert. Wenn man hier wieder von der hydrodynamischen Sortierung (MUSCHENHEIM, 1987) ausgeht, müssen die größeren Mikrosphären entgegen den Herstellerangaben eine größere Dichte besitzen oder aufgrund des größeren Durchmessers und dem kleinskaligen Strömungsregime bevorzugt bodennah transportiert worden sein. Das würde dann die Wahrscheinlichkeit des Absinkens auf den Grund erhöht haben.

Bei geringerem v_∞ wurden prozentual auch mehr Mikrosphären auf dem Sediment deponiert. Der Faktor ist hier 1,48 bzw. 1,56 im Vergleich zu den Kontrollexperimenten. ZIEBIS (1992) gibt einen Wert von 3,5 bei ähnlichen Experimenten an. Dieser Wert wurde jedoch in Bezug zu unbesiedelten Vergleichsflächen innerhalb der Testsektion im laufenden Experiment ermittelt und kann nicht direkt verglichen werden.

In dem Experiment „C“ wurde eine um insgesamt 44% verminderte Deposition im Vergleich zum Kontrollexperiment festgestellt. Hier könnte aufgrund erhöhter Turbulenzintensität über den Sedimentkernen (siehe Abbildung 4.2) eine verminderte Deposition stattgefunden haben. Resuspension wurde hingegen nicht beobachtet.

Die Aufnahme der Mikrosphären seitens der Makrofauna kann bei richtiger Präparation genau bestimmt werden, da sie gut wiederzufinden sind. Die Partikelaufnahme durch die Makrofauna kann hier jedoch nicht eindeutig mit dem Strömungsregime in Bezug gesetzt werden (siehe Abschnitt 3.2.5).

Für weitere Berechnungen wird die Annahme gemacht, daß die aufgenommene Partikelmenge in ihrer Gesamtheit deponiert wird. Zunächst wird die Mikrosphärenaufnahme der Tiere in 6 Stunden in Milligramm Seston aus dem Volumen und der Dichte der Mikrosphären umgerechnet und auf 24 Stunden bezogen, zunächst für jedes Tier einzeln. Zur weiteren Unterscheidung der einzelnen Größen wird dieser Wert auf das Trockengewicht (TG) normiert (siehe Tabelle 4.4).

Alle untersuchten Tiere wurden dem Nahrungstyp Suspensionsfresser zugeordnet bis

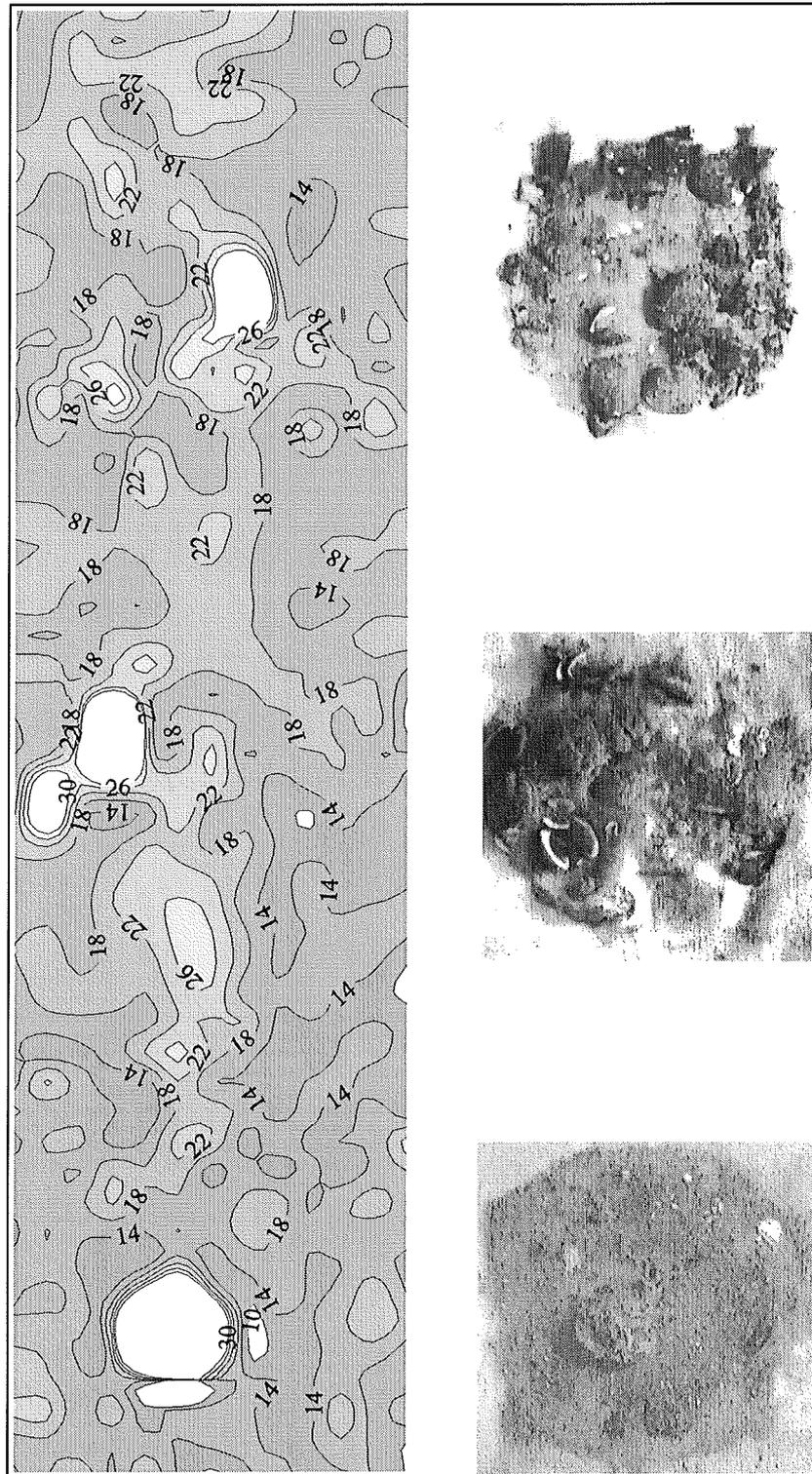


Abbildung 4.2: Turbulenzintensität in 2 cm Höhe über Grund dreier Sedimentkerne der Testsektion (links). Rechts daneben sind Photos dieser besiedelten Kerne des Experimentes „C“ im gleichen Maßstab dargestellt. Die Orte höherer Turbulenzintensität sind heller. Man beachte den Bezug zu Strukturen auf den Sedimentkernen.

Tabelle 4.4: Biodeposition durch Makrofauna in den 4 Experimenten.

Art	Experiment	Sestondeposition in mg pro Tag	Sestondeposition in mg pro mg _{TG} und Tag
Arctica islandica	A	0,22	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Arctica islandica	A	0,29	$1,45 \cdot 10^{-4}$
Arctica islandica	A	0,15	$3,57 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	A	0,02	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	A	0,01	/
Polydora ciliata	B	0,22	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Polydora ciliata	B	0,22	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Arctica islandica	B	0,22	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	C	0,05	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	C	0,03	$17,6 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	C	0,03	$13,6 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	C	0,06	$8,5 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	C	0,55	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Arctica islandica	C	0,02	$2,02 \cdot 10^{-4}$
Arctica islandica	C	0,07	$88,3 \cdot 10^{-4}$
Macoma balthica	C	0,03	$8,35 \cdot 10^{-4}$
Mytilus edulis	D	0,007	$0,14 \cdot 10^{-4}$
Astarte borealis	D	0,01	/

auf die Muschel *Macoma balthica*. Eine konservative Übertragung der Biodepositionsleistung auf Verhältnisse in der Mecklenburger Bucht kann wiederum nur unter der weiteren hypothetischen Annahme geschehen, daß die Größenklassenverteilung der hier untersuchten Stichprobe mit der Population im Feld vergleichbar ist. Durch Kombination des Mittelwertes der Biodepositionsleistung pro Tier von 0,128 mg Seston pro Tag mit den gefundenen Abundanzen ergibt sich eine Biodeposition pro Quadratmeter für die Suspensionsfressergemeinschaft (Tabelle 4.5). Wenn nun noch der Anteil der organischen Substanz am Sestongehalt bekannt ist (JÄHMLICH, 1996), kann der Anteil deponierten Kohlenstoffs berechnet werden.

Man sieht, daß der Beitrag der Makrofauna zur Deposition nach dieser Rechnung sehr gering ausfällt. Hier wird nur von den deponierten Mikrosphären ausgegangen und die oben genannten Vorannahmen erschweren eine Interpretation. Sie sind daher nur ein Richtpunkt für eine mögliche Biodeposition in diesem Gebiet. In anderen Untersuchungen mit zum Teil anderen Methoden wird über einen deutlich höheren Beitrag der Makrofauna berichtet. Eine Zusammenfassung findet sich in (GRAF UND ROSENBERG, im Druck). Die Biodepositionsraten bezogen auf den Kohlenstoff sind dort zum Teil erheblich höher.

Tabelle 4.5: Depositionsleistung (Seston) der Suspensionsfressergemeinschaft zu den einzelnen Ausfahrtterminen. Dargestellt sind die Abundanzen der Suspensionsfresser (SF) pro Quadratmeter, sowie die Biodepositionsleistung in $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Ausfahrt	# SF auf 12c	Deposition in $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$	# SF auf 23c	Deposition in $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Feb. '93	/	/	562	74
Mai '93	233	31	734	97
Sept. '93	139	18	1210	160
Nov. '93	/	/	218	29
Feb. '94	940	123	570	75
April '94	13	2	900	119
Okt. '94	/	/	456	60
Nov. '94	30	4	2385	314

Bei einer mittleren Sestonbiodeposition von ca. $35 \text{ mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bei Station 12c, ca. $120 \text{ mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bei Station 23c und einem mittleren TPM:POC-Verhältnis von 55:1 (JÄHMLICH, 1996) ergeben sich Kohlenstoffdepositionsraten von ca. $0,64 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Station 12c) bzw. $2,2 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Station 23c). Der Kohlenstoffbedarf der Sedimentlebensgemeinschaft, ermittelt aus der im Projekt bestimmten O_2 -Zehrung (SCHELZ, pers. Mittlg.), beträgt dagegen ca. $30\text{--}90 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ für Station 12c und ca. $12\text{--}90 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ für Station 23c.

Während also der Einfluß der Makrofauna für Austauschprozesse an der Sediment/Wasser-Grenzschicht durchaus nachgewiesen werden konnte (Chlorophyllprofile im Sediment, Harnstoffeintrag in die Wassersäule), spielt sie für eine zu erstellende Kohlenstoffbilanz eine nur untergeordnete Rolle.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, in Labor- und Felduntersuchungen, den Einfluß der Makrofauna der Mecklenburger Bucht auf das bodennahe Strömungsregime zu untersuchen und ihren biodepositären Beitrag zur Kohlenstoffbilanz abzuschätzen.

Dazu wurde ein rezirkulierender Strömungskanal gebaut, in den Sedimentkerne eingesetzt werden können und in dem die räumlich kleinskalige Aufnahme von Strömungsprofilen in allen drei Dimensionen mit einem Schienensystem und einem Akustik-Doppler-Strömungsgeschwindigkeitssensor möglich ist. In diesem Kanal werden bei 20 cm Wassershöhe $12,5 \text{ cm s}^{-1}$ als maximale Freistromgeschwindigkeit erreicht. Eine Boundary Layer ließ sich bei allen Freistromgeschwindigkeiten nachweisen. Ihre vertikale Ausdehnung beträgt maximal 5 cm. Hydrodynamisch interessante Größen wie Schubspannungsgeschwindigkeit, Rauigkeitslänge und Turbulenzintensität wurden aus Vertikal- bzw. Horizontalprofilen ermittelt. Sie wiesen charakteristische Unterschiede je nach Freistromgeschwindigkeit und Besiedelungsdichte auf.

Die Sedimente der Mecklenburger Bucht konnten in dem Strömungskanal nicht in Resuspension gebracht werden, da die maximal im Kanal erreichbare Freistromgeschwindigkeit nicht ausreichte. An Sedimentkernen einer Vergleichsstation in der Kieler Bucht konnte jedoch bei einer errechneten Schubspannungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ im Strömungskanal eine Vorstufe der Resuspension, das Rollen und Springen der oberen Sedimentpartikel, beobachtet werden.

Der Einfluß von Makrofauna auf das Strömungsregime in einer Boundary Layer konnte anhand von räumlich kleinskalig aufgenommenen horizontalen Strömungsprofilen rund um die Strukturen beobachtet werden. Das Vertikalströmungsprofil wurde in seiner Form verändert und die Turbulenzintensität von 20% vor den Strukturen auf zum Teil 160% dahinter erhöht. Im Feld hingegen kann ein solcher Einfluß kleinskalig ohne erweiterte Meßtechnik nur schwer abgeschätzt werden.

In der Mecklenburger Bucht wird die Makrofauna von Muscheln und Kleinpolychaeten beherrscht, wobei sie starken Fluktuationen unterworfen ist. Auf einer flacheren Sandstation (16 m) war absolut gesehen, die Makrofauna Abundanz und Artenvielfalt höher als auf einer tieferen Schlickstation (28 m). Der Einfluß der Makrofauna auf die Tiefenverteilung der Chlorophylläquivalente als Spiegel für den Eintrag von absinkenden Partikeln einerseits und als Maß für die Lebensäußerungen der Meio- und Makrofauna wurde mit einem Bioturbationsmodell getestet.

In einem Feldexperiment zur Modifikation des bodennahen Wasserkörpers durch die Makrofauna zeigte sich bei geringer Makrofauna Abundanz kein signifikanter Gesamteffekt.

In Tracerexperimenten im Strömungskanal wurde für die Suspensionsfressergemeinschaft der Mecklenburger Bucht anhand zweier unterschiedlicher Stationen, einer flacheren, sandigeren Station und einer tieferen, schlickigeren Station, der Beitrag zur Sestondeposition bestimmt. Sie betrug im Mittel $35 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ auf der Schlickstation und $120 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ auf der Sandstation. Daraus ergeben sich Kohlenstoffdepositionsraten von $0,64 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Schlick) bzw. $2,2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Sand). Gemessen an einem über die Sauerstoffzehrung im Sediment ermittelten Kohlenstoffbedarf von ca. $12\text{--}90 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ für beide Stationen, spielt die Sestonbiodeposition mit ca. 1% für eine Kohlenstoffbilanz eine untergeordnete Rolle.

A Literatur

Literatur

- ALLER, R. (1982). The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water. In P. McCall und M. Tevesz, Hrsg., *Animal-Sediment Relations-The Biogenic Alteration of Sediments*, 53–102. Plenum Press, New York.
- ALLER, R. UND YINGST, J. (1985). Effects of the marine deposit-feeders *Heteromastus filiformis* (Polychaeta), *Macoma baltica* (Bivalvia), and *Tellina texana* (Bivalvia) on averaged sedimentary solute transport, reaction rates, and microbial distributions. *Journal of Marine Research*, **43**, 615–645.
- ANDRÉ, C., JONSSON, P., UND LINDEGARTH, M. (1993). Predation on settling bivalve by benthic suspension feeders: the role of hydrodynamics and larval behaviour. *Marine Ecology Progress Series*, **97**, 183–192.
- BERNER, R. (1980). *Early Diagenesis: A Theoretical Approach*. Princeton Univ. Press.
- BICK, A. UND GOSSELCK, F. (1985). Arbeitsschlüssel zur Bestimmung der Polychaeten der Ostsee. *Mitteilungen des zoologischen Museums Berlin*, **61**, 171–272.
- BRADFIELD, A. UND NEWELL, G. (1961). The behaviour of *Macoma balthica* (L.). *Journal Marine Biology Association United Kingdom*, **40**, 81–87.
- BRENCHLEY, G. A. (1981). Disturbance and community structure: an experimental study of bioturbation in marine soft-bottom environments. *Journal of Marine Research*, **39**, 767–785.
- BROWN, B. (1982). Spatial and temporal distribution of a deposit-feeding polychaete on a heterogeneous tidal flat. *Journal of Experimental of Marine Biology and Ecology*, **65**, 213–227.
- CHARLES, F., GRÉMARE, A. AND AMOUROUX, M. (1995). Utilisation of ¹⁴C formaldehyde to infer ingestion rates and absorption efficiencies by benthic deposit-feeders. *Marine Ecology Progress Series*, **127**, 121–129.
- DADE, W. B. *et al.* (1990). Effects of bacterial exopolymer adhesion on the entrainment of sand. *Geomicrobiology Journal*, **8**, 1–16.
- EDLER, L. (1979). Recommendation methods for marine biological studies in the Baltic Sea-phytoplankton and chlorophyll. *BMB Publications*, **5**, 25–31.
- FAUCHALD, K. UND JUMARS, P. A. (1979). The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. *Oceanography and Marine Biology Annual Review*, **17**, 193–284.

- FENNEL, W. UND STURM, M. (1992). Dynamics of the western Baltic. *Journal of Marine Systems*, **3**, 183–205.
- FRÈCHETTE, M., BUTMAN, C. AND GEYER, W. (1989). The importance of boundary-layer flows in supplying phytoplankton to the benthic suspension feeder *Mytilus edulis* L. *Limnology and Oceanography*, **43**, 19–36.
- GAMBI, M. C., NOWELL, A. R. M., UND JUMARS, P. A. (1990). Flume observations on flow dynamics in *Zostera marina* (eelgrass) beds. *Marine Ecology Progress Series*, **61**, 159–169.
- GESINN, S. (1994). *Untersuchungen zur Bioturbation der Endofauna mit Hilfe von Partikeltracern*. Diplomarbeit, Universität Kiel.
- GOSSELCK, F., DOERSCHEL, F., UND DOERSCHEL, T. (1987). Further Developments of Macrozoobentos in Lübeck Bay, Following recolonisation in 1980/81. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie*, **72**, 631–638.
- GRAF, G. (1979). *Energy-charge Messungen im marinen Benthos*. Dissertation, Universität Kiel.
- GRAF, G. (1987). Benthic energy flow during a simulated autumn bloom sedimentation. *Marine Ecology Progress Series*, **39**, 23–29.
- GRAF, G. UND ROSENBERG, R. (im Druck). Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Science*.
- GRANT, J. UND DABORN, G. (1994). The effects of bioturbation on sediment transport on an intertidal mudflat. *Netherlands Journal of Sea Research*, **32**, 63–72.
- GROSS, T. UND NOWELL, A. (1983). Mean flow and turbulence scaling in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research*, **2**, 109–126.
- GUINASSO, N. UND SCHINK, D. (1975). Quantitative estimates of biological mixing rates in abyssal sediments. *Journal of Geophysical Research*, **80**, 3032–3043.
- GUST, G. (1989). The benthic boundary layer. In Landolt–Börnstein, Hrsg., *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik*, Neue Serie, Gruppe 5, Bd. 3b (Ozeanographie), Seiten 345–398, Springer Berlin/Heidelberg.
- HEMPEL, C. (1971). Über den Röhrenbau und die Nahrungsaufnahme einiger Spioniden (*Polychaeta sedentaria*) der deutschen Küsten. *Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, **6**, 101–135.
- JÄHMLICH, S. (1996). *Untersuchungen zur Partikeldynamik in der Bodengrenzschicht der Mecklenburger Bucht*. Dissertation, Universität Kiel.

- JUMARS, P. (1993). *Concepts in Biological Oceanography*. Oxford University Press.
- JUMARS, P. UND NOWELL, A. (1984). Effects of benthos on sediment transport: difficulties with functional grouping. *Continental Shelf Research* **3**, 115–130.
- JUMARS, P. A., SELF, R. F., UND NOWELL, A. R. (1982). Mechanics of Particle Settling by tentaculate Deposit-Feeders. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **64**, 47–70.
- KITLAR, J. (1991). Der Einfluß der Bioturbation auf den Transport gelöster Stoffe im Porenwasser. *Berichte aus dem Institut f. Meereskunde*, **210**, Kiel.
- KOLP, O. (1966). Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung. *Beiträge zur Meereskunde*, **17/18**.
- LANGE, W. (1987). Statistical results of current measurements in the western Baltic Sea. In *Proc. 15th Conf. Baltic Oceanographers*, 1–32.
- LASSIG, J. (1965). The distribution of marine and brackishwater lamellibranchs in the northern Baltic area. *Commentationes Biologicae, Societas Scientiarum Fennica*, **28**, 1–41.
- LEVINTON, J. (1991). Variable feeding behavior in three species of *Macoma* (Bivalvia: Tellinaceae) as a response to water flow and sediment transport. *Marine Biology*, **110**, 375–383.
- LINKE, P., ALTENBACH, A., GRAF, G., UND HEEGER, T. (1995). Response of deep-sea benthic foraminifera to a simulated sedimentation event. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**, 75–82.
- MAHAUT, M. UND GRAF, G. (1987). A luminophore tracer technique for bioturbation studies. *Oceanologica Acta*, **102**, 323–328.
- MANN, K. UND LAZIER, J. (1991). *Dynamics of Marine Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications.
- MARSH, A. G. UND TENORE, K. R. (1990). The role of nutrition in regulating the population dynamics of opportunistic, surface deposit feeders in a mesohaline community. *Limnology and Oceanography*, **35**, 710–724.
- MICHAELIS, H. (1978). Zur Morphologie und Ökologie von *Polydora ciliata* und *P. ligni* (Polychaeta, Spionidae). *Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, **31**, 102–116.
- MIDDLETON, G. UND SOUTHARD, J. (1984). *Mechanics of Sediment Movement*. S.E.P.M. Short Course Number 3, Providence, USA.

- MILLER, D. C., BOCK, M. J. AND TURNER, E. J. (1992). Deposit and suspension feeding in oscillatory flows and sediment fluxes. *Journal of Marine Research*, **50**, 489–520.
- MÜLLER, G. (1964). Teil 1: Methoden der Sedimentuntersuchung. In H. F. W. von Engelhardt und G. Müller, Hrsg., *Sediment-Petrologie*, Seiten 81–88. Schweizerbart, Stuttgart.
- MUSCHENHEIM, D. (1987). The dynamics of near bed seston flux and suspension-feeding benthos. *Journal of Marine Research*, **45**.
- MUSCHENHEIM, D. K., GRANT, J. AND MILLS, E. L. (1986). Flumes for benthic ecologists: theory, construction and practice. *Marine Ecology Progress Series*, **28**, 185–196.
- NEHRING, D., MATTHÄUS, W., LASS, H., UND NAUSCH, G. (1994). Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993. In *Meereswissenschaftliche Berichte*. Institut für Ostseeforschung, Warnemünde.
- NOWELL, A. R. UND JUMARS, P. A. (1987). Flumes: Theoretical and experimental considerations for simulation of benthic environments. *Oceanography and Marine Biology Annual Review*, **25**, 91–112.
- NOWELL, A. R., JUMARS, P. A., UND ECKMAN, J. E. (1981). Effects of biological activity on the entrainment of marine sediment. *Marine Geology*, **42**, 133–153.
- O'RIORDAN, C., MONISMITH, S., UND KOSEFF, J. (1993). A study of concentration boundary layer formation over a bed of model bivalves. *Limnology and Oceanography*, **38**, 1712–1729.
- PATERSON, D., YALLOP, M. AND GEORGE, C. (1994). North sea sediment stabilisation. In W. Krumbein, D. Paterson, und L. Stal, Hrsg., *Biostabilisation of Sediments*, 401–450. BIS-Verlag, Oldenburg.
- POWILLEIT, M. (1988). *Die Bioturbationsleistung des Priapuliden Halicryptus spinulosus in der Kieler Bucht*. Diplomarbeit, Universität Kiel.
- POWILLEIT, M., KITLAR, J. AND GRAF, G. (1995). Particle and fluid bioturbation caused by the priapulid worm *Halicryptus spinulosus* (v. Seibold). *Marine Biology*, **116**, 109–117.
- PRANDTL, L. (1969). *The essentials of fluid dynamics*. Blackie, London.
- REID, R. UND REID, A. (1969). Feeding processes of members of the genus *Macoma* (Mollusca: Bivalvia). *Canadian Journal of Zoology*, **47**, 649–657.

- RUCK, K. W. (1952). Seegrundkartierung in der Lübecker Bucht. *Die Küste*, **1**, 55–57.
- RUMOHR, H. (1993). Erfahrungen und Ergebnisse aus 7 Jahren Benthosmonitoring in der südlichen Ostsee. In P. D. J. Duinker, Hrsg., *Das Biologische Monitoring der Ostsee im Institut für Meereskunde Kiel 1985 –1992*. Berichte aus dem Institut f. Meereskunde **240**, Kiel.
- RUMOHR, H. (1995). Monitoring the marine environment with imaging methodes. *Scientia Marina*, **95**, 129–138.
- SACHS, L. (1992). *Angewandte Statistik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- SCHAUER, U. (1982). Zur Bestimmung der Bodenschubspannung am Meeresboden aus der mittleren Strömung. *Berichte aus dem Institut f. Meereskunde*, **105**, Kiel.
- SCHAUER, U. (1987). Determination of bottom boundary layer parameters at two shallow sea sites using the profile method. *Continental Shelf Research*, **7**, 1211–1230.
- SCHULZ, S. (1969). Benthos und Sediment in der Mecklenburger Bucht. In *Beiträge zur Meereskunde*, **24/25**, Akademie-Verlag, Berlin.
- SELF, R. UND JUMARS, P. (1978). New resource axes for deposit-feeders. *Journal of Marine Research*, **36**, 627–641.
- SELF, R. F., NOWELL, A. R., UND JUMARS, P. A. (1989). Factors controlling critical shears for deposition and erosion of individual grains. *Marine Geology*, **86**, 181–199.
- SUN, M., ALLER, R., UND LEE, C. (1991). Early diagenesis of chlorophyll- α in Long Island Sound sediments: A measure of carbon flux and particle reworking. *Journal of Marine Research*, **49**, 379–401.
- TAGHON, G. L. UND GREENE, R. R. (1992). Utilization of deposited and suspended particulate matter by benthic „interface“ feeders. *Limnology and Oceanography*, **67**, 1370–1391.
- TAGHON, G. L., NOWELL, A. R., UND JUMARS, P. A. (1980). Induction of Suspension Feeding in Spionids Polychaetes by High Particulate Fluxes. *Science*, **210**, 562–564.
- TEUCHER, M. W. (1991). Luminophoren und ein neues Bildauswertungssystem zur Darstellung des bioturbaten Partikeltransportes in marinen Systemem. *Berichte aus dem Institut f. Meereskunde*, **267**, Kiel.
- THEEDE, H. (1962). Experimentelle Untersuchungen über die Filtrationsleistung der Miesmuschel *Mytilus edulis* L. *Berichte aus dem Institut f. Meereskunde*, Kiel, 20–41.

- THOMSEN, L. (1989). Bakterien und Meiofauna in Gangsystemen der Makrofauna. *Berichte aus dem SFB 313*, **19**, Kiel.
- THOMSEN, L., JÄHMLICH, S., RITZRAU, W., SPRINGER, B., FRIEDRICHS, M., AND GRAF, G.(einger). An instrument for aggregate studies in the benthic boundary layer. *Marine Geology*.
- THOMSEN, L., GRAF, G., MARTENS, V., UND STEEN, E. (1994). An instrument for sampling water from the benthic boundary layer. *Continental Shelf Research*, **14**, 871–882.
- THOMSEN, L., GRAF, G., VON JUTERZENKA, K., UND WITTE, U. (1995). An in situ experiment to investigate the depletion of seston above an interface feeder field on the continental slope of the western Barents Sea. *Marine Ecology Progress Series*, **123**, 295–300.
- TURLEY, C. (1980). *Distribution and biodegradation of urea in coastal waters*. Dissertation, University of Wales.
- VOGEL, S. (1981). *Life in moving fluids*. Princeton University Press, New Jersey.
- WANNER, S. (1995). *Aggregate in der Bodennepheloidschicht*. Diplomarbeit, Universität Kiel.
- WITTE, U. (1994). *Reproduktion, Energiestoffwechsel und Biodepositionsleistung dominanter Porifera aus der Tiefsee des europäischen Nordmeeres*. Dissertation, Universität Kiel.
- WITZEL, K. (1979). The adenylate energy charge as a measure of microbial activities in aquatic habitats. *Archiv für Hydrobiologie*, **19**, 146–165.
- YAGER, P. L., NOWELL, A. R., UND JUMARS, P. A. (1993). Enhanced deposition to pits: A local food source for benthos. *Journal of Marine Research*, **51**, 209–236.
- ZIEBIS, W. (1992). Experimente im Strömungskanal zum Einfluß der Makrofauna auf den bodennahen Partikeltransport. *Berichte aus dem SFB 313*, **37**, Kiel.

Tabelle B.3: Individuenanzahl pro m² (September 1993)

Tierart	Station 12c			Station 23c				
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	5.
<i>Abra alba</i>	0	0	0	0	50	0	0	0
<i>Amphitrite</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anaitides groenlandica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Antionella sarsi</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Arctica islandica</i>	36	110	180	10	30	10	20	0
<i>Aricidea jeffreysii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Asterias rubens</i>	0	10	20	0	80	0	0	0
<i>Astarte borealis</i>	0	0	0	0	90	100	0	10
<i>Astarte elliptica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Capitella capitata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cerastoderma edulis</i>	0	0	0	0	50	0	0	0
<i>Corbula gibba</i>	0	0	0	10	60	80	0	0
<i>Eteone longa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Halicyptus spinulosus</i>	32	40	50	0	120	80	90	0
<i>Macoma balthica</i>	240	40	620	0	0	0	0	0
<i>Montagua bidentata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Musculus niger</i>	0	0	0	1970	920	1300	800	0
<i>Mya arenaria</i>	0	0	0	0	140	120	160	0
<i>Mytilus edulis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nephtys hombergi</i>	0	0	0	0	0	0	0	20
<i>Nereis pelagica</i>	20	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nicolea</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Lagis coreni</i>	0	30	60	0	0	0	0	0
<i>Pervicarium fasciatum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Polydora ciliata</i>	0	80	10	0	50	30	40	0
<i>Pygospio elegans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Retusa obtusata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scoloplos armiger</i>	100	0	0	0	0	30	0	0
<i>Terebelli stroemi</i>	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle B.4: Individuenanzahl pro m² (November 1993)

Tierart	Station 12c			Station 23c			
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.
<i>Abra alba</i>	0	0	0	0	50	0	0
<i>Amphitrite</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anaitides groenlandica</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Antionella sarsi</i>	0	0	0	0	10	0	0
<i>Arctica islandica</i>	0	0	0	10	30	20	50
<i>Aricidea jeffreysii</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Asterias rubens</i>	0	0	0	50	20	0	30
<i>Astarte borealis</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Astarte elliptica</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Capitella capitata</i>	10	20	0	0	0	0	0
<i>Cerastoderma edulis</i>	0	0	0	30	50	0	0
<i>Corbula gibba</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Eteone longa</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Halicyptus spinulosus</i>	40	30	10	0	0	0	0
<i>Macoma balthica</i>	10	20	0	60	40	0	50
<i>Montagua bidentata</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Musculus niger</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Mya arenaria</i>	0	0	0	90	30	0	0
<i>Mytilus edulis</i>	0	0	0	210	60	0	80
<i>Nephtys hombergi</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nereis pelagica</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nicolea</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0
<i>Lagis coreni</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pervicarium fasciatum</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Polydora ciliata</i>	0	0	0	70	20	30	40
<i>Pygospio elegans</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Retusa obtusata</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scoloplos armiger</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Terebelli stroemi</i>	0	0	0	30	10	0	20

Tabelle B.7: Individuenanzahl pro m² (Oktober 1994)

Tierart	Station 23c			
	1.	2.	3.	4.
<i>Abra alba</i>	0	0	0	0
<i>Amphitrite</i> sp.	40	0	0	0
<i>Anaitides groenlandica</i>	0	0	0	0
<i>Antionella sarsi</i>	0	0	30	0
<i>Arctica islandica</i>	10	210	30	0
<i>Aricidea jeffreysi</i>	50	20	90	0
<i>Asterias rubens</i>	0	70	0	50
<i>Astarte borealis</i>	60	500	20	0
<i>Astarte elliptica</i>	30	20	20	0
<i>Capitella capitata</i>	0	20	0	0
<i>Cerastoderma edulis</i>	0	0	0	0
<i>Corbula gibba</i>	0	0	0	0
<i>Eteone longa</i>	10	0	0	0
<i>Halicyrtus spinulosus</i>	0	0	0	0
<i>Macoma balthica</i>	90	120	130	110
<i>Montagua bidentata</i>	0	0	0	0
<i>Musculus niger</i>	0	0	0	0
<i>Mya arenaria</i>	60	40	0	0
<i>Mytilus edulis</i>	50	40	0	0
<i>Nephtys hombergi</i>	50	50	90	0
<i>Nereis pelagica</i>	0	0	0	0
<i>Nicolea</i> sp.	0	10	0	0
<i>Pectinaria coreni</i>	20	10	0	0
<i>Pervicarium fasciatum</i>	0	0	0	0
<i>Polydora ciliata</i>	270	60	40	0
<i>Pygospio elegans</i>	30	0	0	0
<i>Retusa obtusata</i>	0	0	0	0
<i>Scoloplos armiger</i>	10	20	0	0
<i>Terebelli stroemi</i>	20	0	0	0

Tabelle B.8: Individuenanzahl pro m² (November 1994)

Tierart	Station 12c				Station 23c			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
<i>Abra alba</i>	0	0	0	0	0	0	340	370
<i>Amphitrite</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Anaitides groenlandica</i>	0	0	0	0	0	130	0	0
<i>Antionella sarsi</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Arctica islandica</i>	0	0	0	10	30	30	20	80
<i>Aricidea jeffreysi</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Asterias rubens</i>	0	0	0	230	50	10	0	0
<i>Astarte borealis</i>	0	0	0	30	150	10	0	0
<i>Astarte elliptica</i>	0	0	0	30	40	260	0	0
<i>Capitella capitata</i>	0	10	0	0	0	0	0	0
<i>Cerastoderma edulis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Corbula gibba</i>	0	0	0	0	20	0	0	400
<i>Eteone longa</i>	0	0	0	0	0	0	10	0
<i>Halicyrtus spinulosus</i>	10	10	0	0	0	0	0	0
<i>Macoma balthica</i>	0	0	0	160	250	140	280	280
<i>Montagua bidentata</i>	0	0	0	40	520	0	0	0
<i>Musculus niger</i>	0	0	0	0	0	860	140	140
<i>Mya arenaria</i>	0	0	0	10	0	10	20	20
<i>Mytilus edulis</i>	0	10	0	20	110	10	0	0
<i>Nephtys hombergi</i>	0	10	0	60	140	160	100	100
<i>Nereis pelagica</i>	0	0	0	0	10	10	10	10
<i>Nicolea</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Lagis coreni</i>	0	0	0	10	0	0	0	0
<i>Pervicarium fasciatum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Polydora ciliata</i>	50	20	10	780	1710	880	330	330
<i>Pygospio elegans</i>	0	0	0	0	950	10	10	10
<i>Retusa obtusata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scoloplos armiger</i>	0	0	0	70	30	0	0	0
<i>Terebelli stroemi</i>	0	0	0	0	20	0	0	0

C Chlorophyllgehalte im Sediment

Chlorophyllgehalt im Sediment		Feb. '93		Mai '93		Sept. '93		Nov. '93			
Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm	Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm	Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm	Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm
0,5	14,6	4,26	0,5	12,5	7,37	0,5	10,15	14,27	0,5	10,86	12,99
1,5	10,68	4,31	1,5	13,04	6,54	1,5	11	5,36	1,5	11,11	15,09
2,5	15,24	4,1	2,5	12,32	5,28	2,5	6,6	4	2,5	9,7	8,9
3,5	19	3,1	3,5	11,6	4,25	3,5	6,23	2,83	3,5	12,34	6,51
4,5	11	2,32	4,5	11	3,5	4,5	5,22	2,3	4,5	10,98	6,95
6	9,31	0	5,5	10,84	2,45	5,5	4,4	1,8	5,5	10,64	5,82
			6,5	9,54	1,99	6,5	3,88	1,48	6,5	11,09	6,45
			7,5	6,42	1,34	7,5	3,71	1,43	7,5	10,58	4,22
			8,5	4,83	0,94	8,5	3,42	1,04	8,5	10,01	
			9,5	4,7	0,78	9,5	3,13	1,04	9,5	10,86	

		Feb. '94		Apr. '94		Nov. '94		
Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm	Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm	Tiefe(cm)	12c ug/ccm	23c ug/ccm
0,5	9,92	6,01	0,5	12,75	12,38	0,5	11,07	13,6
1,5	8,58	3,46	1,5	8,62	8,94	1,5	9	9,7
2,5	9,74	2,31	2,5	11,99	5,07	2,5	7,14	6,68
3,5	9,07	2,3	3,5	10,82	3,41	3,5	5,05	4,78
4,5	7,93	2,15	4,5	11,41	3,06	4,5	3,57	3,1
5,5	5,82	1,86	5,5	14,44	2,26	5,5	3,14	2,14
6,5	4,7	2,24	6,5	16,56		6,5	3	1,17
7,5	3,06	1,86	7,5	17,51		7,5	2,97	1,43
8,5	3,15		8,5	7,2		8,5	3,23	0,69
9,5	3,39		9,5	3,9		9,5	3,26	0,68

Danksagung

Prof. Dr. G. Graf danke ich für die Betreuung und das in mich gesetzte Vertrauen.

Wolfgang Queisser hat die „Hardware“ des Strömungskanales erstellt und mich bei vielen praktischen Fragen beraten.

Die Techniker des SFB 313 und des Geomar - Forschungszentrums halfen bei der Lösung vieler kleiner und großer technischer Probleme.

Ohne die vielen nützlichen Computerprogramme von Jörg Nittikowski und Hartmut Schirmer wäre die Datenflut nicht so zeitsparend zu bearbeiten gewesen.

Das Arbeitsklima während der Ausfahrten wurde vor allem durch Andreas, Carolin, Michael, Susanne Th., Susanne W., Stefan, Wolfgang und das Mitwirken der Mannschaften von FK „Littorina“, FS „Alkor“ und FS „Alexander von Humboldt“ so geprägt, daß die Schiffahrten eine Freude waren.

Frau A. Scheltz führte die Sedimentanalysen durch.

Nikolaus von Mirbach stellte mir Videomaterial über Polychaeten zur Verfügung.

Dr. Sabine Jähmlich, Dr. Laurenz Thomsen und Dr. Heye Rumohr danke ich für Überlassung unveröffentlichter Daten.

Von den Diskussionen mit Freunden und Kollegen im SFB 313, Geomar und dem IOW-Warnemünde habe ich viele Anregungen und Hilfen bis zur Fertigstellung der Arbeit erhalten.

Martin, Stefan und vor allem Ursula haben mich in der Endphase der Arbeit motiviert und gestützt.

Mein Freund Jörg hat mich trotz zunehmender zeitlicher Belastung ertragen können und mich entlastet, wo immer es möglich war.

Ihnen und allen anderen Menschen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben gilt mein Dank.



GEOMAR REPORTS

- 1 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. BERICHT FÜR DIE JAHRE 1987 UND 1988. 1989. 71 + 6 pp. In German
- 2 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1989. 1990. 96 pp. In German and English
- 3 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1990. 1991. 212 pp. In German and English
- 4 ROBERT F. SPIELHAGEN
DIE EISDRIFT IN DER FRAMSTRASSE WÄHREND DER LETZTEN 200.000 JAHRE. 1991. 133 pp.
In German with English summary
- 5 THOMAS C. W. WOLF
PALÄO-OZEANOGRAPHISCH-KLIMATISCHE ENTWICKLUNG DES NÖRDLICHEN NORDATLANTIKS SEIT DEM SPÄTEN NEOGEN (ODP LEGS 105 UND 104, DSDP LEG 81). 1991. 92 pp. In German with English summary
- 6 SEISMIC STUDIES OF LATERALLY HETEROGENOUS STRUCTURES – INTERPRETATION AND MODELLING OF SEISMIC DATA. Ed. by ERNST R. FLUEH
Commission on Controlled Source Seismology (CCSS), Proceedings of the 8th Workshop Meeting, held at Kiel – Fellhorst (Germany), August 27-31, 1990. 1991. 359 pp. In English
- 7 JENS MATTHIESSEN
DINOFLAGELLATEN-ZYSTEN IM SPÄQUARTÄR DES EUROPÄISCHEN NORDMEERES: PALÖKOLOGIE UND PALÄO-OZEANOGRAPHIE. 1991. 104 pp. In German with English summary. Out of print
- 8 DIRK NÜRNGERG
HAUPT- UND SPURENELEMENTE IN FORAMINIFERENGHÄUSEN – HINWEISE AUF KLIMATISCHE UND OZEANOGRAPHISCHE ÄNDERUNGEN IM NÖRDLICHEN NORDATLANTIK WÄHREND DES SPÄTQUARTÄRS. 1991. 117 pp. In German with English summary. Out of print
- 9 KLAS S. LACKSCHEWITZ
SEDIMENTATIONSPROZESSE AM AKTIVEN MITTELOZEANISCHEN KOLBEINSEY RÜCKEN (NÖRDLICH VON ISLAND). 1991. 133 pp. In German with English summary. Out of print
- 10 UWE PAGELS
SEDIMENTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN UND BESTIMMUNG DER KARBONATLÖSUNG IN SPÄTQUARTÄREN SEDIMENTEN DES ÖSTLICHEN ARKTISCHEN OZEANS. 1991. 106 pp.
In German with English summary
- 11 FS POSEIDON. EXPEDITION 175 (9.10.-1.11.1990)
175/1: OSTGRÖNLÄNDISCHER KONTINENTALRAND (65°N)
175/2: SEDIMENTATION AM KOLBEINSEYRÜCKEN (NÖRDLICH VON ISLAND).
Hrsg. von J. MIENERT und H.-J. WALLRABE-ADAMS. 1992. 56 pp. + app. In German with some English chapters
- 12 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1991. 1992. 152 pp. In German and English.
Out of print
- 13 SABINE E. I. KÖHLER
SPÄTQUARTÄRE PALÄO-OZEANOGRAPHISCHE ENTWICKLUNG DES NORDPOLARMEERES UND EUROPÄISCHEN NORDMEERES ANHAND VON SAUERSTOFF- UND KOHLENSTOFF-ISOTOPENVERHÄLTNISSEN DER PLANKTISCHEN FORAMINIFERE *Neogloboquadrina pachyderma* (sin.). 1992. 104 pp. In German with English summary
- 14 FS SONNE. FAHRTBERICHT SO78 PERUVENT: BALBOA, PANAMA - BALBOA, PANAMA, 28.2.1992-16.4.1992
Hrsg. von ERWIN SUESS. 1992. 120 pp. In German with some English chapters. Out of print
- 15 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PALEOCEANOGRAPHY (ICP IV): SHORT- AND LONG-TERM GLOBAL CHANGE: RECORDS AND MODELLING. 21-25 SEPTEMBER 1992, KIEL/GERMANY.
PROGRAM & ABSTRACTS. 1992. 351 pp. In English
- 16 MICHAELA KUBISCH
DIE EISDRIFT IM ARKTISCHEN OZEAN WÄHREND DER LETZTEN 250.000 JAHRE. 1992. 100 pp.
In German with English summary
- 17 PERSISCHER GOLF: UMWELTGEFÄHRDUNG, SCHADENSERKENNUNG, SCHADENSBEWERTUNG AM BEISPIEL DES MEERESBODENS; ERKENNEN EINER ÖKOSYSTEMVERÄNDERUNG NACH ÖLEINTRÄGEN. Schlußbericht zu den beiden BMFT-Forschungsvorhaben 03F0055 A + B. 1993. 108 pp. In German with English summary
- 18 TEKTONISCHE ENTWÄSSERUNG AN KONVERGENTEN PLATTENRÄNDERN / DEWATERING AT CONTINENTAL MARGINS. Hrsg. von/ed. by ERWIN SUESS. 1993. 196 + 32 + 68 + 16 + 22 + 38 + 4 + 19 pp.
Some chapters in English, some in German
- 19 THOMAS DICKMANN
DAS KONZEPT DER POLARISATIONSMETHODE UND SEINE ANWENDUNGEN AUF DAS SEISMISCHE VEKTORWELLENFELD IM WEITWINKELBEREICH. 1993. 121 pp. In German with English summary
- 20 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1992. 1993. 139 pp. In German and English

- 21 KAI UWE SCHMIDT
PALYNOMORPHE IM NEOGENEN NORDATLANTIK - HINWEISE ZUR PALÄO-OZEANOGRAPHIE UND
PALÄOKLIMATOLOGIE. 1993. 104 + 7 + 41 pp. In German with English summary
- 22 UWE JÜRGEN GRÜTZMACHER
DIE VERÄNDERUNGEN DER PALÄO GEOGRAPHISCHEN VERBREITUNG VON *Bolboforma* - EIN BEITRAG ZUR
REKONSTRUKTION UND DEFINITION VON WASSERMASSEN IM TERTÄR. 1993. 104 pp.
In German with English summary
- 23 RV PROFESSOR LOGACHEV. Research Cruise 09 (August 30 - September 17, 1993): SEDIMENT DISTRIBUTION ON
THE REYKJANES RIDGE NEAR 59°N. Ed. by H.-J. WALLRABE-ADAMS & K.S. LACKSCHEWITZ. 1993. 66 + 30 pp.
In English
- 24 ANDREAS DETTMER
DIATOMEEN-TAPHOZÖNOSEN ALS ANZEIGER PALÄO-OZEANOGRAPHISCHER ENTWICKLUNGEN IM
PLIOZÄNEN UND QUARTÄREN NORDATLANTIK. 1993. 113 + 10 + 25 pp. In German with English summary
- 25 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-
UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1993. 1994. 69 pp. In German and English
- 26 JÖRG BIALAS
SEISMISCHE MESSUNGEN UND WEITERE GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN AM SÜD-SHETLAND
TRENCH UND IN DER BRANSFIELD STRASSE - ANTARKTISCHE HALBINSEL. 1994. 113 pp.
In German with English summary
- 27 JANET MARGARET SUMNER
THE TRANSPORT AND DEPOSITIONAL MECHANISM OF HIGH GRADE MIXED-MAGMA IGIMBRITE TL, GRAN
CANARIA: THE MORPHOLOGY OF A LAVA-LIKE FLOW. 1994. 224 pp. In English with German summary. Out of print
- 28 GEOMAR LITHOTHEK. Ed. by JÜRGEN MIENERT. 1994. 12 pp + app. In English. Out of print
- 29 FS SONNE. FAHRTBERICHT SO 97 KODIAK-VENT; KODIAK - DUTCH HARBOR - TOKYO - SINGAPUR, 27.7.-
19.9.1994. Hrsg. von ERWIN SUESS. 1994. Some chapters in English, some in German. Out of print
- 30 CRUISE REPORTS:
RV LIVONIA CRUISE 92, KIEL-KIEL, 21.8.-17.9.1992: GLORIA STUDIES OF THE EAST GREENLAND CONTINENTAL
MARGIN BETWEEN 70° AND 80°N
RV POSEIDON PO200/10, LISBON-BREST-BREMERHAVEN, 7.-23.8.1993: EUROPEAN NORTH ATLANTIC
MARGIN: SEDIMENT PATHWAYS, PROCESSES AND FLUXES
RV AKADEMIK ALEKSANDR KARPINSKIY, KIEL-TROMSÖ, 5.-25.7.1994: GAS HYDRATES ON THE NORTHERN
EUROPEAN CONTINENTAL MARGIN
Edited by JÜRGEN MIENERT. 1994. 186 pp.
In English; report of RV AKADEMIK ALEKSANDR KARPINSKIY cruise in English and Russian
- 31 MARTIN WEINELT
BECKENENTWICKLUNG DES NÖRDLICHEN WIKING-GRABENS IM KÄNOZOIKUM -
VERSENKUNGSGESCHICHTE, SEQUENZSTRATIGRAPHIE, SEDIMENTZUSAMMENSETZUNG. 1994. 85 pp.
In German with English summary
- 32 GEORG A. HEISS
CORAL REEFS IN THE RED SEA: GROWTH, PRODUCTION AND STABLE ISOTOPES. 1994. 141 pp.
In English with German summary
- 33 JENS A. HÖLEMANN
AKKUMULATION VON AUTOCHTHONEM UND ALLOCHTHONEM ORGANISCHEM MATERIAL IN DEN
KÄNOZOISCHEN SEDIMENTEN DER NORWEGISCHEN SEE (ODP LEG 104). 1994. 78 pp.
In German with English summary
- 34 CHRISTIAN HASS
SEDIMENTOLOGISCHE UND MIKROPALÄONTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR ENTWICKLUNG DES
SKAGERRAKS (NE NORDSEE) IM SPÄTHOLOZÄN. 1994. 115 pp. In German with English summary
- 35 BRITTA JÜNGER
TIEFENWASSERERNEUERUNG IN DER GRÖNLANDSEE WÄHREND DER LETZTEN 340.000 JAHRE / DEEP
WATER RENEWAL IN THE GREENLAND SEA DURING THE PAST 340,000 YEARS. 1994. 6 + 109 pp.
In German with English summary
- 36 JÖRG KUNERT
UNTERSUCHUNGEN ZU MASSEN- UND FLUIDTRANSPORT ANHAND DER BEARBEITUNG
REFLEXIONSSEISMISCHER DATEN AUS DER KODIAK-SUBDUKTIONSZONE, ALASKA. 1995. 129 pp.
In German with English summary
- 37 CHARLOTTE M. KRAWCZYK
DETACHMENT TECTONICS DURING CONTINENTAL RIFTING OFF THE WEST IBERIA MARGIN: SEISMIC
REFLECTION AND DRILLING CONSTRAINTS. 1995. 133 pp. In English with German summary
- 38 CHRISTINE CAROLINE NÜRNBERG
BARIUMFLUSS UND SEDIMENTATION IM SÜDLICHEN SÜDATLANTIK - HINWEISE AUF
PRODUKTIVITÄTSÄNDERUNGEN IM QUARTÄR. 1995. 6 + 108 pp. In German with English summary
- 39 JÜRGEN FRÜHN
TEKTONIK UND ENTWÄSSERUNG DES AKTIVEN KONTINENTALRANDES SÜDÖSTLICH DER KENAI-HALBINSEL,
ALASKA. 1995. 93 pp. In German with English summary
- 40 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-
UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1994. 1995. 125 pp. In German and English.
Out of print
- 41 FS SONNE. FAHRTBERICHT / CRUISE REPORT SO 103 CONDOR 1 B: VALPARAISO-VALPARAISO, 2-21.7.1995.
Hrsg. von ERNST R. FLUEH. 1995. 140 pp. Some chapters in German, some in English

- 42 RV PROFESSOR BOGOROV CRUISE 37: CRUISE REPORT "POSETIV"; VLADIVOSTOK-VLADIVOSTOK, September 23 - October 22, 1994. Edited by CHRISTOPH GAEDICKE, BORIS BARANOV, and EVGENY LELIKOV. 1995. 49 + 33 pp. In English
- 43 CHRISTOPH GAEDICKE
DEFORMATION VON SEDIMENTEN IM NANKAI-AKKRETIONSKEIL, JAPAN. BILANZIERUNG TEKTONISCHER VORGÄNGE ANHAND VON SEISMISCHEN PROFILEN UND ERGEBNISSEN DER ODP-BOHRUNG 808. II + 89 pp. In German with English summary
- 44 MARTIN ANTONOW
SEDIMENTATIONSMUSTER UM DEN VESTERIS SEAMOUNT (ZENTRALE GRÖNLANDSEE) IN DEN LETZTEN 250.000 JAHREN. 1995. 121 pp. In German with English summary
- 45 INTERNATIONALE CONGRESS: CORING FOR GLOBAL CHANGE - ICGC '95. KIEL, 28 - 30 June, 1995. Edited by JÜRGEN MIENERT and GEROLD WEFER. 1996. 83 pp. In English
- 46 JENS GRÜTZNER
ZUR PHYSIKALISCHEN ENTWICKLUNG VON DIAGENETISCHEN HORIZONTEN IN DEN SEDIMENTBECKEN DES ATLANTIKS. 1995. 96 pp. In German with English summary
- 47 INGO A. PECHER
SEISMIC STUDIES OF BOTTOM SIMULATING REFLECTORS AT THE CONVERGENT MARGINS OFFSHORE PERU AND COSTA RICA. 1996. 159 pp. In English with German summary
- 48 XIN SU
DEVELOPMENT OF LATE TERTIARY AND QUATERNARY COCCOLITH ASSEMBLAGES IN THE NORTHEAST ATLANTIC. 1996. 120 pp. + 7 pl. In English with German summary
- 49 FS SONNE - FAHRTBERICHT/CRUISE REPORT SO108 ORWELL: SAN FRANCISCO - ASTORIA, 14.4. - 23.5.1996 Edited by ERNST R. FLUEH and MICHAEL A. FISHER. 1996. 252 pp. + app. In English with German summary
- 50 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1995. 1996. 93 pp. In German and English
- 51 THOMAS FUNCK
STRUCTURE OF THE VOLCANIC APRON NORTH OF GRAN CANARIA DEDUCED FROM REFLECTION SEISMIC, BATHYMETRIC AND BOREHOLE DATA. 1996. VI, 144 pp. In English with German summary
- 52 PETER BRUNS
GEOCHEMISCHE UND SEDIMENTOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS SEDIMENTATIONSVERHALTEN IM BEREICH BIOSTRATIGRAPHISCHER DISKONTINUITÄTEN IM NEOGEN DES NORDATLANTIK, ODP LEG 104, SITES 642B UND 643A. 1996. V, 73 pp. In German with English summary
- 53 CHRISTIANE C. WAGNER
COLD SEEPS AN KONVERGENTEN PLATTENRÄNDERN VOR OREGON UND PERU: BIOGEOCHEMISCHE BESTANDSAUFNAHME. 1996. 108, XXXVI pp. In German with English summary
- 54 FRAUKE KLINGELHÖFER
MODEL CALCULATIONS ON THE SPREADING OF SUBMARINE LAVA FLOWS. 1996. 98 pp. In English with German summary
- 55 HANS-JÜRGEN HOFFMANN
OBJEKTORIENTIERTE ANALYSE UND MIGRATION DIFFRAKTIRTER WELLENFELDER UNTER VERWENDUNG DER STRAHLENMETHODE UND DER EDGE-WAVE-THEORIE. 1996. XXI, 153 pp. In German with English summary
- 56 DIRK KLÄSCHEN
STRAHLENSEISMISCHE MODELLIERUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON MEHRFACHDIFFRAKTIONEN MIT HILFE DER EDGE-WAVES: THEORIE UND ANWENDUNGSBEISPIELE 1996. X, 159 pp. In German with English summary
- 57 NICOLE BIEBOW
DINOFAGELLATENZYSTEN ALS INDIKATOREN DER SPÄT- UND POSTGLAZIALEN ENTWICKLUNG DES AUFTRIEBSGESCHEHENS VOR PERU. 1996. IV, 100, 17, 14 (7 pl.) pp. In German with English summary
- 58 RV SONNE. CRUISE REPORT SO109: HYDROTRACE ASTORIA-VICTORIA-ASTORIA-VICTORIA. MAY 23 - JULY 8, 1996. Ed. by PETER HERZIG, ERWIN SUESS, and PETER LINKE. 1997. 249 pp. In English
- 59 RV SONNE. CRUISE REPORT SO110: SO - RO (SONNE - ROPOS). VICTORIA-KODIAK-VICTORIA. JULY 9 - AUGUST 19, 1996. Ed. by ERWIN SUESS and GERHARD BOHRMANN. 1997. 181 pp. In English
- 60 RV AKADEMIK M. A. LAVRENTYEV CRUISE 27. CRUISE REPORT: GREGORY. VLADIVOSTOK-PUSAN-OKHOTSK SEA-PUSAN-VLADIVOSTOK. SEPTEMBER 7 - OCTOBER 12, 1996. Ed. by DIRK NÜRNBERG, BORIS BARANOV, and BORIS KARP. 1997. 143 pp. In English
- 61 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT / ANNUAL REPORT 1996. 1997. 169 pp. In German and English
- 62 FS SONNE. FAHRTBERICHT/CRUISE REPORT SO123: MAMUT (MAKRAN MURRAY TRAVERSE - GEOPHYSIK PLATTENTEKTONISCHER EXTREMFÄLLE). Maskat - Maskat, 07.09 - 03.10.1997. Ed. by ERNST R. FLUEH, NINA KUKOWSKI, and CHRISTIAN REICHERT. 1997. 292 pp. In English with German summary
- 63 RAINER ZAHN
NORTH ATLANTIC THERMOHALINE CIRCULATION DURING THE LAST GLACIAL PERIOD: EVIDENCE FOR COUPLING BETWEEN MELTWATER EVENTS AND CONVECTIVE INSTABILITY. 1997. 133 pp. In English
- 64 FS SONNE. FAHRTBERICHT/CRUISE REPORT SO112 HIRESBAT (HIGH RESOLUTION BATHYMETRY). Victoria, B.C., Canada - Apra Harbor, Guam. 17.09 - 08.10.1996. Hrsg. von WILHELM WEINREBE. 1997. 90 pp. Some chapters in German, some in English

- 65 NIELS NØRGAARD-PEDERSEN
LATE QUATERNARY ARCTIC OCEAN SEDIMENT RECORDS: SURFACE OCEAN CONDITIONS AND PROVENANCE OF ICE-RAFTED DEBRIS. 1997. 115 pp. In English with German summary
- 66 THOMAS NÄHR
AUTHIGENER KLINOPTILOLITH IN MARINEN SEDIMENTEN - MINERALCHEMIE, GENESE UND MÖGLICHE ANWENDUNG ALS GEOTHERMOMETER. 1997. 119, 43 pp. In German with English summary
- 67 MATTIAS KREUTZ
STOFFTRANSPORT DURCH DIE BODENGRENZSCHICHT: REGIONALISIERUNG UND BILANZIERUNG FÜR DEN NORDATLANTIK UND DAS EUROPÄISCHE NORDMEER. 1998. IV, 166 pp. In German with English summary
- 68 AMIT GULATI
BENTHIC PRIMARY PRODUCTION IN TWO DIFFERENT SEDIMENT TYPES OF THE KIEL FJORD (WESTERN BALTIC SEA). 1998. 139 pp. In English with German summary
- 69 RÜDIGER SCHACHT
DIE SPÄT- UND POSTGLAZIALE ENTWICKLUNG DER WOOD- UND LIEFDEFJORDREGION NORDSPITZBERGENS. 1998. 187 pp. In German with English summary
- 70 GEOMAR FORSCHUNGSZENTRUM FÜR MARINE GEOWISSENSCHAFTEN DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL. JAHRESBERICHT/ANNUAL REPORT 1997. 1998. 155 pp. In German and English
- 71 FS SONNE. FAHRTBERICHT/CRUISE REPORT SO118 BIGSET (BIOGEOCHEMICAL TRANSPORT OF MATTER AND ENERGY IN THE DEEP SEA), MUSCAT (OMAN) - MUSCAT (OMAN). 31.03.-11.05.1997. Ed. by OLAF PFANNKUCHE and CHRISTINE UTECHT. 1998. 188 pp. In English
- 72 FS SONNE. FAHRTBERICHT/CRUISE REPORT SO131 SINUS (SEISMIC INVESTIGATIONS AT THE NINETY EAST RIDGE OBSERVATORY USING SONNE AND JOIDES RESOLUTION DURING ODP LEG 179). KARACHI - SINGAPORE. 04.05-16.06.1998. Ed. by ERNST R. FLUEH and CHRISTIAN REICHERT. 1998. 337 pp. In English
- 73 THOMAS RICHTER
SEDIMENTARY FLUXES AT THE MID-ATLANTIC RIDGE: SEDIMENT SOURCES, ACCUMULATION RATES, AND GEOCHEMICAL CHARACTERISATION. 1998. IV, 173 + 29 pp. In English with German summary
- 74 BARBARA MARIA SPRINGER
MODIFIKATION DES BODENNAHEN STRÖMUNGSREGIMES UND DIE DEPOSITION VON SUSPENDIERTEM MATERIAL DURCH MAKROFAUNA. 1999. 112 pp. In German