

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Das Werk bzw. der Inhalt darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtsinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

Copyright and Moral Rights for this thesis are retained by the author and/or other copyright owners. The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

18. Dez. 1992

66b

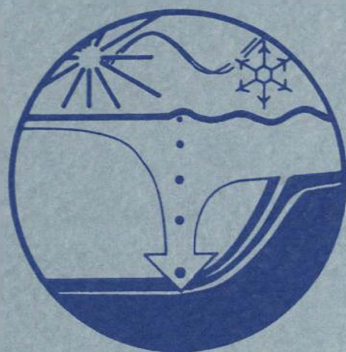
Z 945-1

BERICHTE

aus dem

SONDERFORSCHUNGSBEREICH 313

VERÄNDERUNGEN DER UMWELT - DER NÖRDLICHE NORDATLANTIK



Nr. 37

Experimente im Strömungskanal zum Einfluß der
Makrofauna auf den bodennahen Partikeltransport

WIEBKE ZIEBIS

666

Z 945

Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel	Nr. 37	S. 1-83	1.8.1992
--	--------	---------	----------

Nr. 37

**Experimente im Strömungskanal
zum Einfluß der Makrofauna
auf den bodennahen Partikeltransport**



Wiebke Ziebis

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Material und Methoden	3
2.1.	Strömungskanal	3
2.1.1.	Anforderungen an einen Strömungskanal für benthosbiologische Untersuchungen	3
2.1.2.	Beschreibung des selbstgebauten Kanals	6
2.2.	Strömungsmessung	10
2.2.1.	Zur Theorie bodennaher Strömung und Definition der Grenzschicht	10
2.2.2.	Thermistorsonde	14
2.2.3.	Strömungsmessungen im Kanal	16
2.3.	Messung der Sestonkonzentration im Kanal	17
2.4.	Experimente zur Partikeldeposition	19
2.4.1.	Probennahme	19
2.4.2.	Experimente	20
2.4.2.1.	Vorbereitung	21
2.4.2.2.	Experimentdurchführung	24
2.4.2.3.	Probenbearbeitung	25
3.	Ergebnisse	28
3.1.	Vertikale Strömungsprofile im Kanal	28
3.1.2.	Ermittlung der Schubspannungsgeschwindigkeit U_* aus den Strömungsprofilen	32
3.2.	Sestonkonzentrationen und Partikelfluß	34
3.3.	Experimente zur Deposition	38
3.3.1.	Die Makrofauna in den Depositionsversuchen	39
3.3.2.	Experiment 1 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $5,5 \text{ cm s}^{-1}$	40
3.3.2.1.	Wasserproben	40
3.3.2.2.	Sedimentproben	41

	Inhalt	
3.3.2.3.	Mageninhalte	43
3.3.2.4.	Vergleich der Partikeldeposition auf den untersuchten Sedimentflächen	47
3.3.3.	Experiment 2 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 cm s ⁻¹	51
3.3.3.1.	Wasserproben	51
3.3.3.2.	Sedimentproben	51
3.3.3.3.	Mageninhalte	53
3.3.3.4.	Vergleich der Partikeldeposition auf den untersuchten Sedimentflächen	57
3.3.4.	Vergleich der beiden Experimente	60
4.	Diskussion	62
4.1.	Die Eignung des beschriebenen Strömungskanal für benthosbiologische Untersuchungen	62
4.2.	Das Resuspensionsexperiment	64
4.3.	Mikrosphären als Tracer für den Partikelfluß	66
4.4.	Die Bedeutung der Makrofauna für die Biodeposition	68
5.	Zusammenfassung	74
	Literaturangaben	76

1. Einleitung

In der Benthosökologie haben Strömungskanäle schon vielfach ihre Anwendung gefunden und gewinnen zunehmend an Bedeutung, da eine Vielzahl von biologisch interessanten Prozessen innerhalb der Bodengrenzschicht und in den obersten Sedimentschichten stark von der Wasserbewegung über dem Sediment beeinflusst wird (Nowell et. al., 1980; Taghon et. al., 1980; Carey, 1983; Vogel, 1983; Nowell & Jumars 1984,1987; Eckman, 1985; Okamura, 1985, 1990; Muschenheim et. al., 1986; Vogel & LaBarbera,1987; Armonies, 1988; Butman et al.,1988; Hunter,1989, Wainright,1990). Im Strömungskanal können diese Vorgänge unter kontrollierbaren physikalischen Bedingungen (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Partikelkonzentration) im Labor simuliert werden. Im Mittelpunkt neuer benthosökologischer Untersuchungen stehen biologisch beeinflusste Wasser-Sediment Interaktionen, die Transportwege darstellen für partikuläres Material, Nährstoffe sowie Schadstoffe (Wainright,1990; Amouroux et. al., 1991, Forster, 1991; Kitlar, 1991; Teucher, 1991). Die Prozesse innerhalb der Bodengrenzschicht verbinden pelagische mit benthischen Nahrungsketten. Um die Bedeutung der Makrofaunaorganismen für den Partikeltransport an der Sediment-Wasser-Grenzschicht ermessen zu können, müssen diese unter Bedingungen untersucht werden, die die Verhältnisse im Feld simulieren. Dies erfordert die Ermittlung der hydrodynamischen Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit, Entwicklung eines Geschwindigkeitsgradienten an der Grenzschicht, wirkende Schubspannung, Transportraten resuspendierten Materials. Die Strömung über einer Sedimentfläche bewirkt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit die Resuspension von Substanzen von der Sedimentfläche in die Wassersäule. Dies hat eine Anreicherung der Partikelkonzentration im bodennahen Wasser zur Folge. Der horizontale Partikelfluß ist von wesentlicher Bedeutung für die Nahrungszufuhr benthischer Organismen (Wildish & Kristmanson, 1984; Grant, 1985; Graf, 1989). Die benthische Besiedlung der Sedimente ihrerseits hat wiederum einen Einfluß auf die Resuspensions- und Depositionsraten partikulärer Substanzen.

In dieser Arbeit sollen die hydrodynamischen Parameter in einem selbstgebauten Strömungskanal gemessen werden, um die erzeugten

Strömungsverhältnisse zu beschreiben. Diese Messungen geben auch Aufschluß über die Möglichkeit Feldbedingungen zu simulieren; ihre Ergebnisse stellen ein Kriterium für die Eignung des Kanals für benthosökologische Untersuchungen dar. Der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Resuspension und den horizontalen Transport partikulären Materials soll untersucht werden. Mittels künstlicher Tracer (Mikrosphären) wird versucht den Partikeltransport zwischen den Kompartimenten Wasser, Sediment und Makrofaunaorganismen zu verfolgen und den Einfluß der Tiere auf die Deposition partikulärer Substanz abzuschätzen. Hierbei soll eine natürliche Makrofaunagemeinschaft ('Mikrokosmos') betrachtet werden, um auch die Interaktionen zwischen den Arten zu berücksichtigen.

2. Material und Methoden

2.1. Strömungskanal

Je nach Untersuchungsschwerpunkt gibt es verschiedene Möglichkeiten der Konstruktion von Strömungskanälen, die sich vor allem in ihren Dimensionen und zusätzlicher Ausstattung unterscheiden. Im wesentlichen bestehen sie aus einer horizontalen Rinne, in der das Wasser, angetrieben durch einen Niveauunterschied, in eine Richtung fließt. Dieser kann z.B. durch Neigung der Rinne um einen Drehpunkt erzeugt und reguliert werden, oder er wird durch die Wasserversorgung aus einem Vorratsbehälter mit konstantem Volumen erzeugt. Eine andere Art des Antriebs bieten Pumpen oder Propeller, vor allem für zirkulierende Systeme, bei denen das Wasser nach Verlassen der Rinne in einem Rückfluß wieder an den Anfang transportiert wird. Im Gegensatz zu Durchflußsystemen sind diese wassersparend und bieten den Vorteil eines konstanten Wasservolumens.

2.1.1. Anforderungen an einen Strömungskanal für benthosbiologische Untersuchungen

Auch wenn bei der Untersuchung benthischer Gemeinschaftstrukturen und Prozesse die biologischen Aspekte im Vordergrund stehen, kann die Hydrodynamik nicht vernachlässigt werden. Hauptvoraussetzung für alle Untersuchungen in Strömungskanälen ist, eine geregelte und reproduzierbare Strömung herzustellen, die mit den Strömungsverhältnissen im Feld vergleichbar ist. Der Wasserfluß in der Rinne ist so einzustellen, daß in vertikaler und horizontaler Ausdehnung eine gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung erreicht und die Ausbildung einer Bodengrenzschicht (= charakteristischer Gradient in der Strömungsgeschwindigkeit, s.u.) ermöglicht wird. Biologische Untersuchungen an lebenden Systemen erfordern zusätzliche Maßnahmen.

Es müssen folgende Anforderungen berücksichtigt werden, die in 4 Bereiche unterteilt werden können:

I. Dimensionen

Länge: Sehr lange Kanäle ermöglichen einen glatteren Fließvorgang, erfordern aber auch viel Platz und ein großes Wasservolumen und sind für biologische Untersuchungen oft nicht notwendig. Jedoch muß die Rinne lang genug sein, damit sich eine gerichtete Strömung einstellt und sich eine Bodengrenzschicht entwickeln kann. Das Verhältnis Länge zu Breite sollte mindestens 4:1 betragen (Vogel, 1981).

Breite: Grenzschichten bilden sich sowohl auf dem Kanalboden, als auch an den Wänden aus. Die Breite des Kanals muß so gewählt sein, daß über der Testsektion eine gleichförmige, von Wandeffekten unbeeinflusste, Strömung gewährleistet ist. Hierfür ist es auch wichtig, daß die Wände möglichst glatt sind. Um Feldbedingungen simulieren zu können, in denen meist ein zweidimensionales Strömungsmuster vorliegt, muß der Kanal also so breit wie möglich sein. Mit der Breite erhöht sich jedoch auch das zu bewegende Wasservolumen, was bei der Bemessung der Antriebskapazität zu berücksichtigen ist.

Tiefe: Für die Wassertiefe gilt ähnliches. Auch hier entstehen zusätzliche Zirkulationsmuster an der Grenzfläche Wasser/Luft, die die Testfläche nicht beeinflussen sollen. Die Ausbildung einer Bodengrenzschicht, ausreichend dick, um z.B. Makrofaunaorganismen aufzunehmen, soll gewährleistet sein, denn Benthosorganismen leben immer in einem Geschwindigkeitsgradienten und machen nie die Erfahrung einer freifließenden Strömung. Die Wassertiefe sollte mindestens dreimal die Objekthöhe betragen (Nowell & Jumars, 1984), um Strömungsartefakte zu vermeiden. Für viele benthosbiologische Untersuchungen wurde eine Wassertiefe von 10 cm als ausreichend angesehen (Carey, 1983; Vogel, 1981).

II. Einstrom- und Ausstrombedingungen

Einstrom: Die Eingangsbedingungen sind wesentlich für die Ausbildung einer gleichförmigen, gerichteten Strömung. Am Anfang der Rinne muß die stark turbulente Wasserbewegung, die durch das Pumpen oder jede andere Art der Wasserversorgung entsteht, geglättet werden. Ein Gleichrichter unterteilt die Strömung in kleinskaligere Turbulenzen und verteilt sie über die gesamte Breite des Kanals. Oft besteht er aus einem Block zusammengefügter Röhrchen (Vogel, 1981; Carey, 1983), durch die das Wasser strömt. Allerdings stellt diese

Konstruktion auch einen Widerstand dar, an dem ein Druckabfall verursacht wird, der abhängig ist von der Länge, dem Durchmesser und der Wandstärke der Rohre. Aufgrund eines geringeren Materialvolumens hat sich eine Wabenstruktur aus hexagonalen Zellen besonders bewährt. Die Länge der Rohre oder Zellen sollte etwa das Zehnfache des Durchmessers betragen (Nowell & Jumars, 1987). Es gibt noch zahlreiche andere Möglichkeiten, z.B. in Form von Gitter- oder Lamelleneinsätzen (Muschenheim 1986), den Wasserfluß zu formen. Mit allen Konstruktionen wird das Ziel verfolgt, eine kleinskalig turbulente, gerichtete Strömung herzustellen, die über die Breite des Kanals gleichförmig ist.

Ausstrom: Um rückwirkende Effekte auf den Wasserfluß in der Rinne zu vermeiden, sollte für einen möglichst glatten Abfluß gesorgt werden. Das Wasser sollte weder abrupt abfallen, noch sollte es gestaut werden. Einstrom- und Ausstrombedingungen, sowie die Wasserhöhe bestimmen die Durchflußrate in der Rinne.

III. Antrieb

Die Dimensionen des Kanals, d.h. das zu bewegende Wasservolumen und die erwünschten Strömungsgeschwindigkeiten bestimmen die Wahl des Antriebs.

Ziel ist es, den Wasserdurchfluß innerhalb eines erwünschten Geschwindigkeitsbereiches zu regulieren und eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit für die Dauer einer Untersuchung konstant zu halten. Für biologische Untersuchungen haben sich zirkulierende Systeme bewährt, in denen der Wasserfluß durch Pumpen oder Propeller angetrieben wird. Ein Problem in kleineren Anlagen kann die Erwärmung des Wassers durch die Reibungswärme an der Antriebsvorrichtung sein. Bei ausreichendem Wasservolumen und Kühlung während des Rückflusses kann dieser Effekt vermieden werden. Je nach Untersuchungsschwerpunkt kann auch eine andere, sanftere Art des Wassertransportes gewählt werden. Eine Form von Schaufelrad- oder Fließbandkonstruktion wurde z.B. für die Untersuchung suspendierter Partikel verwendet (Nowell & Jumars, 1984).

IV. Testsektion

Für die Untersuchung benthischer Grenzschichtprozesse sollte die Testsektion groß genug sein, daß eine Simulation von Feldbedingungen möglich wird. Die Position der Testfläche muß so gewählt werden, daß die Strömung über der gesamten Testfläche gleichförmig ist, d.h. die Wandeffekte müssen minimiert werden. Außerdem sollte die Testsektion im Bereich der maximal entwickelten Bodengrenzschicht liegen.

Ausschlaggebend für biologische Untersuchungen ist eine Vorrichtung im Kanalboden, die es ermöglicht, intakte Sedimentkerne oder lebende Organismen in ihrem natürlichen Zustand in das System einzufügen. Die Arbeit mit lebenden marinen Systemen erfordert außerdem, daß die Anlage seewasserfest ist, das Wasser temperiert werden kann und das verwendete Material nicht toxisch ist.

Zusätzlich sollte die Testfläche gut zugänglich sein für Messungen und detaillierte Beobachtungen sowie für photographische Dokumentationen.

2.1.2. Beschreibung des selbstgebauten Kanals

Aus der biologischen Fragestellung, den Anforderungen und Möglichkeiten hat sich das Design des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Kanals entwickelt. Im wesentlichen ist er nach einem Modell von S. Vogel konstruiert, das sich für benthosbiologische Untersuchungen bewährt und schon mehrfach Anwendung gefunden hat (S. Vogel, 1983; B. Okamura 1985, 1990; D.A. Carey, 1983).

Dimensionen

Es handelt sich um ein zirkulierendes System. Die Rinne besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff, der mit Polyesterharz beschichtet ist. Die Innenwände sind glatt, während der Kanalboden durch eine Schicht in das Harz eingestreuter Sandkörner ($\varnothing = 200 \mu\text{m}$) aufgeraut ist. Die Gesamtlänge beträgt 2 m, die Tiefe 30 cm und die Breite 30 cm. Der Rückfluß erfolgt unterhalb der Rinne in einem geschlossenen System aus PVC-Rohren mit einem Durchmesser von 12 cm. Am Anfang und Ende der Rinne fällt der Kanalboden leicht ab und geht in eine runde Öffnung über, in die das Einstrom- bzw.

Abflußrohr einlaminieren. Der Übergang konnte so völlig glatt gestaltet werden. Bei einem Wasserstand von 10 cm faßt der Kanal ein Wasservolumen von 100 Litern.

Antrieb

Die Energie für die Erzeugung der Strömung liefert ein regelbarer Einphasen-Kondensatormotor (350 Watt) mit eingebauten Getriebe (Übersetzung 10:1) der Firma WEG. Der Motor treibt über einen Keilriemen und eine Keilscheibenkombination eine Welle an, an deren Ende ein Propeller oder ähnliches befestigt wird, um den Wasserstrom zu produzieren. Für diesen Kanal wurde eine Schneckenkonstruktion mit einer bestimmten Gewindesteigung verwendet, die aus PVC hergestellt wurde. Sie wird im oberen Ende des Abflußrohres positioniert und befördert dort, bei ausreichender Umdrehungszahl, das Wasser nach unten, so daß es durch das Rückflußsystem strömt, bis es am anderen Ende wieder aufsteigt und durch die Rinne fließt. Die Schnecke hat den Vorteil, daß der Wassertransport relativ sanft erfolgt, d.h. die verursachten Turbulenzen und die Zerstörung von im Wasser suspendierten Partikeln sind geringer als mit einem Propellerantrieb. Die stufenlose Geschwindigkeitsregulierung erfolgt über ein dem Motor vorgeschaltetes Drehzahlregelgerät. An einem Sollwertpotentiometer kann eine Sollwertvorgabe von 0 bis 100 % eingestellt werden. Die Grobeinstellung des gewünschten Geschwindigkeitsbereiches kann durch Verändern der Übersetzung zwischen Motor und Welle erfolgen. Der Motor wird luftgekühlt und ist für Dauerbetrieb geeignet, eine sehr wichtige Voraussetzung für längere Versuchszeiträume.

Gleichrichter

Als Gleichrichter befindet sich am Anfang der Rinne ein Block einer Wabenkonstruktion (Euro-Composites®), der die gesamte Breite und Höhe der Rinne einnimmt, seine Dicke beträgt 10 cm. Die Wabe besteht aus phenolharzbeschichteten Aramidfasern. Die hexagonalen Zellen haben einen Durchmesser von 9,6 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Während der Testphase hat sich das Einfügen eines zweiten Gleichrichters, aus gleichem Material, in das Einstromrohr als notwendig erwiesen. So werden die großskaligen Turbulenzen des ankommenden Wasserstroms hinreichend aufgelöst.

Testfläche und Kernaufnahme

85 cm stromabwärts vom Gleichrichter befindet sich im Kanalboden eine runde Öffnung mit einem Durchmesser von 23 cm. Unterhalb dieser Öffnung ist ein Kasten aus GFK (Höhe: 69 cm, Breite: 31 cm, Tiefe: 30 cm) an den Kanalboden angefügt. Er wird mit Seewasser gefüllt und bietet die Aufnahme für die Sedimentkerne. In die Anlage können wahlweise Plexiglasrohre mit einem Innendurchmesser von 10 cm (Multicorer, Taucherstechrohre) oder 20 cm (modifizierter Großkastengreifer) eingefügt werden. Die Rohre werden mit einem speziellen Boden aus 'Delrin' versehen, der in den Rohren nach oben bewegt werden kann und als Stempel dient. Gummidichtungen verhindern ein Auslaufen der Probe. Am Boden des Schachtes befindet sich ein Zylinder aus PVC, in dem ein Kolben, mittels Druckluft (4 bar), um 8 cm angehoben werden kann. Der Zylinder hat oben eine runde Öffnung, so daß auf den Kolben ein Stahlrohr gesetzt werden kann. Auf dieses Rohr wird der Sedimentkern gestellt. Die Delrinböden haben eine entsprechende Führung an der Unterseite. Das Stahlrohr kann ausgetauscht werden, seine Länge richtet sich nach der Länge des Sedimentkernes. Hiermit kann das Sediment in dem Plexiglasrohr schon ungefähr auf die gewünschte Höhe geschoben werden. Nachdem der Sedimentkern passend in die Anlage gefügt wurde, wird ein Plexiglasring mit entsprechendem Innendurchmesser (wahlweise 10 oder 20 cm) von oben auf den Kern gesetzt und mit dem Kanalboden verschraubt. Er hat eine Führung an der Unterseite und hält das Probenrohr in Position. Der Kanalboden wird etwa einen Zentimeter hoch mit Sediment aufgefüllt. Nun erfolgt die Feineinstellung. Das Sediment wird in dem Plexiglasrohr pneumatisch nach oben geschoben, bis die Kernoberfläche mit der Sedimentfläche auf dem Kanalboden plan abschließt, der Plexiglasring dient dabei als Widerlager. Anschließend wird der Kanal vorsichtig mit Seewasser aufgefüllt. Diese Konstruktion ermöglicht es, die Sedimentproben mit den enthaltenen Organismen so in die Anlage einzufügen, wie sie am Meeresboden entnommen worden sind.

Auf der Höhe der Probefläche ist in eine Kanalwand eine Plexiglasscheibe (40 cm x 20 cm) als Fenster eingefügt. Der Kanal steht in einem mit Becken aus glasfaserverstärktem Kunststoff, in dem das Wasser über einen externen Kreislauf temperiert wird. Die Wassertemperatur in der Anlage kann so entsprechend der jeweiligen gemessenen *in situ*-Temperatur für einen Bereich zwischen 1 °C und 28 °C eingestellt und für längere Zeiträume konstant gehalten werden.

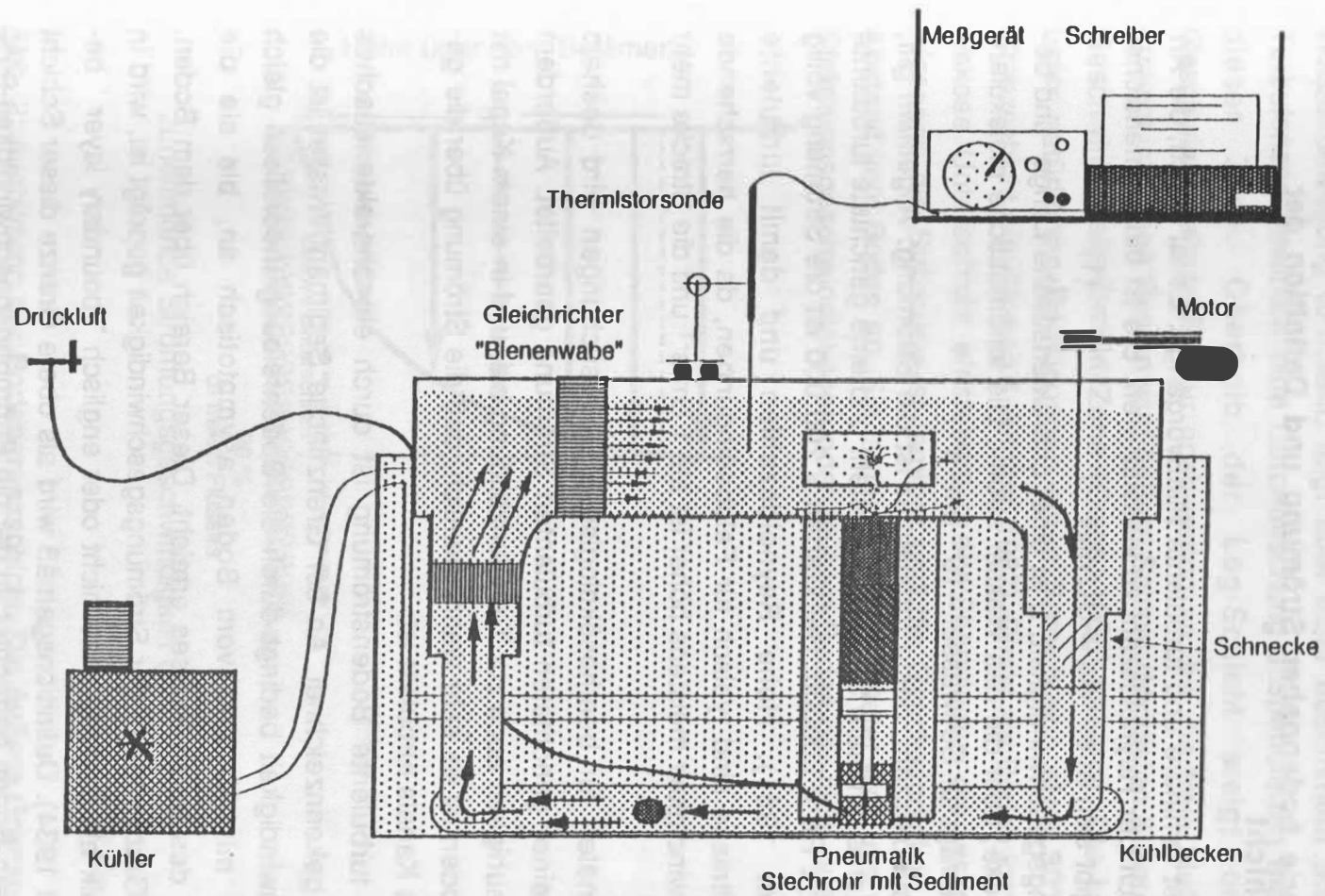


Abb. 1: Strömungskanal: Die Gesamtlänge der Rinne beträgt 2 m, die Tiefe 30 cm und die Breite 30 cm. Die Anlage steht in einem Kühlbecken, in dem das Wasser durch einen externen Kreislauf temperiert wird.

2.2. Strömungsmessung

2.2.1. Zur Theorie bodennaher Strömung und Definition der Grenzschicht

Man unterscheidet laminare und turbulente Fließvorgänge. Es ist üblich, die Art der Strömung nach der Reynoldszahl zu klassifizieren. Sie ist eine dimensionslose Zahl und ergibt sich aus: $Re = UL/v_{mol}$ (1)

U ist die Strömungsgeschwindigkeit, L ist eine 'charakteristische Länge' und bezeichnet die Strecke, über die das Wasser strömt. Die kinematische molekulare Viskosität v_{mol} beträgt für Seewasser $\sim 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Je größer die Reynoldszahl, desto turbulenter ist die Strömung. Allgemein gilt, daß bei $Re < 40$ eine laminare Strömung besteht und eine gerichtete turbulente Strömung bei $40 < Re < 200000$. Bei Werten > 200000 ist die Strömung völlig turbulent (Vogel 1981). Hohe Reynoldszahlen und damit turbulente Strömungsverhältnisse sind typisch für Feldbedingungen, da die herrschende Strömungsgeschwindigkeit meistens höher ist als 1 cm s^{-1} und die Strecke mehr als 1 cm beträgt.

In Strömungskanälen für benthosökologische Untersuchungen wird deshalb vorwiegend mit einer gerichteten turbulenten Strömung gearbeitet. Außerdem trägt die Bodenrauigkeit auch zur Turbulenzbildung bei, und in einem Kanal mit einem rauhen Boden ist es sehr wahrscheinlich, daß die Strömung über die gesamte Länge des Kanals turbulent ist.

Eine gerichtete turbulente Bodenströmung ist durch ein charakteristisches Strömungsprofil gekennzeichnet. An der Grenzfläche Sediment/Wasser ist die Strömungsgeschwindigkeit bedingt durch die Bodenreibung theoretisch gleich null und steigt mit Abstand vom Boden asymptotisch an, bis sie die Geschwindigkeit des freien Flusses erreicht. Dieser Bereich über dem Boden, der durch einen Gradienten in der Strömungsgeschwindigkeit geprägt ist, wird in der Hydrodynamik als Bodengrenzschicht oder englisch 'boundary layer' bezeichnet (Prandtl 1934). Definitionsgemäß wird als obere Grenze dieser Schicht die Höhe über dem Boden betrachtet, in der die Strömungsgeschwindigkeit 99% der Geschwindigkeit des freien Flusses beträgt. Jedoch ist dies eine theoretische Betrachtungsweise und die Festlegung willkürlich. Vogel (1983) gibt einen Wert von 90% als ausreichend an.

Der Bereich des Strömungsprofils, in dem die Kurve einen logarithmischen Verlauf aufweist, wird als Log-Schicht bezeichnet, seine Ausdehnung beträgt einige Zentimeter bis Dezimeter. Innerhalb dieser Region ist die Wasserbewegung turbulent, folgt aber einer bestimmten Stromrichtung. Die Turbulenzen bewirken eine Durchmischung suspendierten Materials innerhalb dieser Zone. Oberhalb der Log-Schicht steigt die Kurve des Geschwindigkeitsprofils nur noch gering an, bis die freie Flußgeschwindigkeit erreicht ist. Diese Region wird äußere Schicht (Middleton & Southard 1984) oder Geschwindigkeits-Defekt Zone (Coles, 1956) genannt. Die Logschicht nimmt unter natürlichen Bedingungen einen Bereich von etwa 30% der gesamten Grenzschicht ein (Nowell & Jumars, 1987). Direkt am Boden kann sich noch eine viskose Unterschicht einstellen. In ihr überwiegen die viskosen Kräfte des Wassers, die Strömung ist laminar und die Geschwindigkeit steigt linear mit Abstand vom Boden an. Sie ist nur einige Millimeter dick und wird bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten oder rauhem Boden gar nicht ausgebildet.

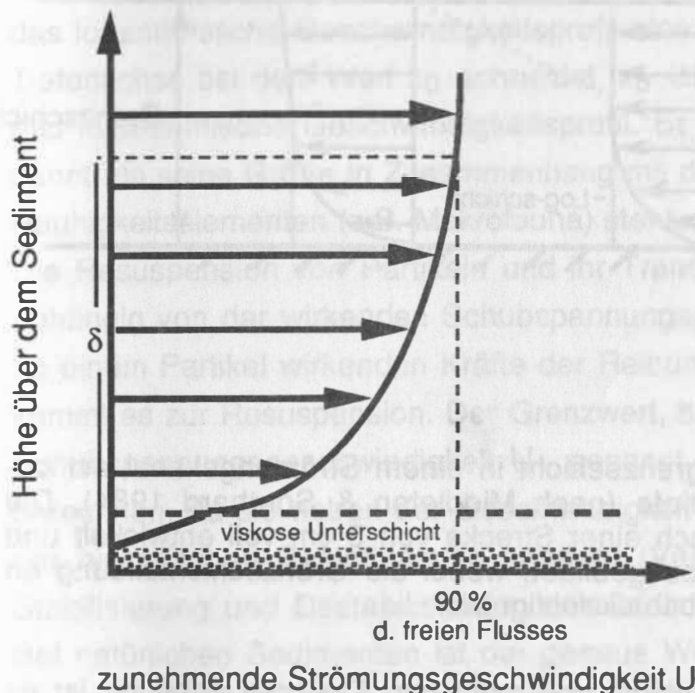


Abb. 2: Ausbildung der Bodengrenzschicht. Die äußere Grenze der Log-Schicht ist erreicht, wenn ca. 90 % der Strömungsgeschwindigkeit des freien Flusses erreicht sind. Die Schichtdicke δ der minimalen Ausdehnung der Bodengrenzschicht kann hieraus ermittelt werden. Direkt am Boden ist eine viskose Unterschicht ausgebildet, in der die Strömungsgeschwindigkeit linear ansteigt.

Für eine turbulente Grenzschicht kann die minimale Schichtdicke δ (gemeint ist hier die Ausdehnung der Logschicht) berechnet werden nach:

$$\delta = 0,38 L (v / UL)^{0,2} \quad (\text{Schlichting 1960}) \quad (2)$$

U ist die Geschwindigkeit, v die kinematische Viskosität und L bezeichnet die Strecke stromabwärts ausgehend von dem Ausgangspunkt der Grenzschichtausbildung.

Für diese Berechnung wird angenommen, daß sich in einem Strömungskanal die Grenzschicht am Anfang der Rinne, direkt hinter dem Gleichrichter aufbaut. L ist somit die Länge der Rinne. Die Grenzschicht in einem Kanal mit begrenzter Wassertiefe (z.B. 10 cm) ist nach einer kurzen Strecke stromabwärts (ca. 5 cm) völlig ausgeprägt, so daß die gesamte Wassertiefe sozusagen Grenzschicht ist (Middleton & Southard, 1984).

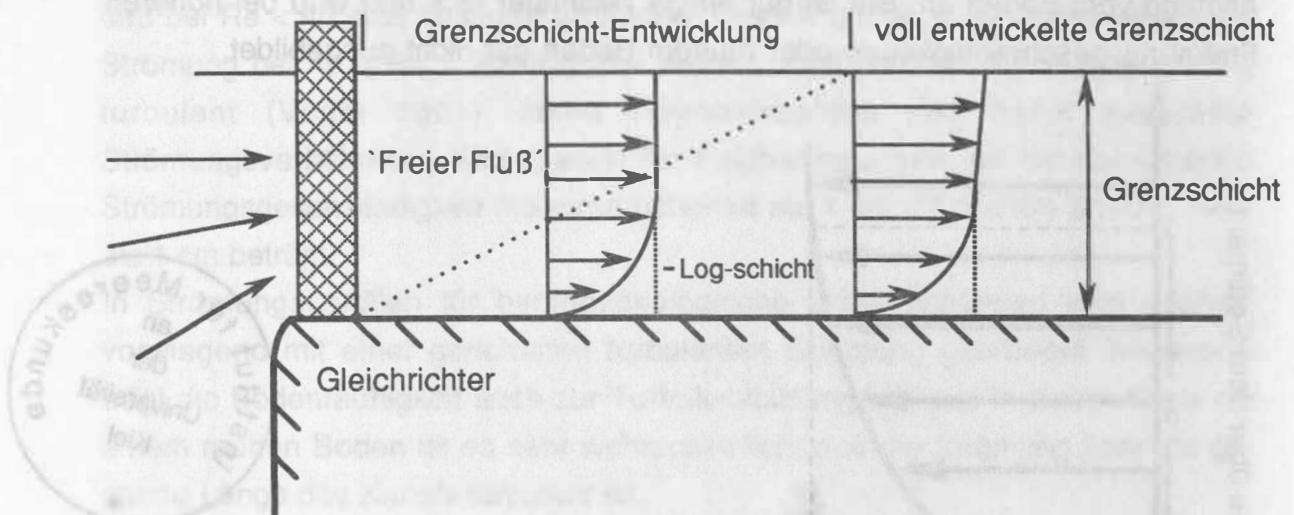


Abb.3: Entwicklung der Bodengrenzschicht in einem Strömungskanal mit begrenzter (z.B. 10 cm) Wassertiefe (nach Middleton & Southard 1984). Die Bodengrenzschicht ist schon nach einer Strecke von 5 cm voll entwickelt und über die gesamte Wassertiefe ausgebildet, wobei die Grenzschichtbildung an der Wasseroberfläche hier nicht berücksichtigt ist.

Da die Entwicklung der Grenzschicht von mehreren Faktoren abhängt, ist es sinnvoller, die Geschwindigkeitsprofile in einem Strömungskanal experimentell zu ermitteln, indem die Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Abständen vom Boden gemessen werden. Zugleich stellt die Erstellung von Strömungsprofilen, sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung, eine gute Kontrolle dar, ob die Ausbildung einer gerichteten zweidimensionalen Strömung über der Testsektion gegeben, und somit der Kanal für die Untersuchung geeignet ist.

Innerhalb der Grenzschicht übt die Strömung eine Schubspannung T_0 (Einheit: N m^{-2}) auf den Boden aus, die Resuspension und Partikeltransport verursacht. T_0 ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und zwar proportional zu dem Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Boden. In der Strömungsmechanik wird der Begriff Schubspannungsgeschwindigkeit U^* verwendet, T_0 und U^* sind durch folgende Beziehung miteinander verbunden:

$$U^* = (T_0 / \rho)^{1/2} \quad (\text{Einheit: m s}^{-1} \text{ bzw. cm s}^{-1}) \quad (3)$$

ρ ist die Dichte des Seewassers, U^* kann nach folgender Beziehung aus dem logarithmischen Strömungsprofil ermittelt werden:

$$U_z = U^* / \chi \ln z / z_0 \quad (4) \quad (\text{Profilmethode})$$

U_z ist die Strömungsgeschwindigkeit in der Höhe z über dem Boden. χ ist eine universelle Konstante, die Karman-Konstante genannt wird, für die ein Wert von 0,4 angenommen wird.

Wenn der Geschwindigkeitsgradient semi-logarithmisch dargestellt wird, ergibt das logarithmische Geschwindigkeitsprofil eine Gerade, deren Extrapolation die Tiefenachse bei dem Wert z_0 schneidet. z_0 ist somit ein virtueller Nullpunkt für das logarithmische Geschwindigkeitsprofil. Er wird auch Rauigkeitslänge genannt, da seine Größe in Zusammenhang mit der Bodenrauigkeit oder anderen Rauigkeitselementen (z.B. Makrofauna) steht.

Die Resuspension von Partikeln und ihr Transport im bodennahen Wasser ist abhängig von der wirkenden Schubspannungsgeschwindigkeit. Wenn diese die an einem Partikel wirkenden Kräfte der Reibung und der Gravitation überwiegt, kommt es zur Resuspension. Der Grenzwert, bei dem dies eintritt, wird kritische Schubspannungsgeschwindigkeit U^*_c genannt. Seine Größe ist nicht einfach zu berechnen, da sie neben der Geschwindigkeit und der Partikelgröße auch von der biologischen Beeinflussung abhängt (Verdichtung durch Schleimbildung, Stabilisierung und Destabilisierung der Sedimente durch biogene Strukturen). Bei natürlichen Sedimenten ist der genaue Wert deshalb nur experimentell zu ermitteln. Die Deposition von Partikeln ist unter anderem ebenfalls abhängig von der Schubspannung. Kritische Schubspannungsgeschwindigkeit und kritische Depositionsgeschwindigkeit, U^*_d , haben theoretisch denselben Wert. Allerdings hängt die Partikeldeposition auch sehr stark von der biologischen Aktivität an der Sedimentoberfläche ab (aktives Eingreifen der Organismen in den Partikelfluß, biogene Strukturen). In der Grenzschicht kommt es zur Anreicherung von suspendiertem Material aus Sedimentation, Resuspension und horizontalem

Eintrag, das aufgrund der turbulenten Wasserbewegung in Suspension gehalten und über weite Strecken transportiert werden kann (laterale Advektion). Dies hat zu den Begriffen Benthische Trübezone BTZ (Rhoads 1984) oder Bottom Nepheloid Layer, BNL, (McCave, 1982; Gardner, 1985) geführt. Die Turbulenzen verleihen den in Suspension geratenen Partikeln die Tendenz, aufwärts transportiert zu werden, und eine mit optischen Mitteln gemessene Trübezone kann sich über den Bereich der hydrodynamisch definierten Grenzschicht hinaus erstrecken. Allgemein ist die Partikelkonzentration am Boden am höchsten und nimmt mit steigender Höhe ab; die obere Grenze der Trübezone ist erreicht, wenn die Partikelkonzentration auf ein Maß abgenommen hat, das dem darüberliegenden Wasserkörper entspricht. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (Sinkgeschwindigkeit) des suspendierten Materials bewirken eine hydrodynamische Sortierung innerhalb der Grenzschicht (Muschenheim, 1987). In Bodennähe kommt es zu einer Anreicherung von dichteren Partikeln, während leichteres Material länger in Suspension gehalten und transportiert wird.

2.2.2. Thermistorsonde

Für die Strömungsmessung wurde eine temperatur-kompensierte Thermistorsonde verwendet (Konstruktion von V. Martens, IfM Kiel nach Vogel, 1981). Diese Sonde funktioniert nach dem Prinzip der Anemometrie. Das Meßprinzip beruht auf der konvektiven Wärmeabgabe eines elektrisch geheizten Thermistors als Funktion der Strömung. Die Abkühlung des Thermistors bewirkt eine Veränderung seines elektrischen Widerstandes, der resultierende Spannungsunterschied wird mit einem Voltmeter registriert, und die Signale werden auf einem Schreiber oder Magnetband aufgezeichnet. Damit sich Temperaturschwankungen des Wassers nicht auf die Messung auswirken, ist ein zweiter Thermistor mit dem Strömungsthermistor in einer Brückenschaltung in Serie geschaltet und dient als Temperaturkompensator. Die Temperaturkompensation gilt für einen Bereich von ± 5 °C der durchschnittlichen Umgebungstemperatur und muß vor der Messung entsprechend eingestellt werden. Die Thermistoren sind kugelförmig und haben einen Durchmesser von 1 mm. Der Strömungsthermistor befindet sich an der Spitze und der Kompensationsthermistor 1,5 cm oberhalb an einer 30 cm langen und 8 mm dicken Lanze. Jede Sonde erfordert aufgrund des

spezifischen Gerätewiderstandes eine eigene Kalibrierung, um die genaue Beziehung zwischen Spannungsänderung und Strömungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Die Kalibrierung erfolgt in einer Durchflußkonstruktion nach Vogel (1981). Die Sonde wird am Ende eines Rohres ($l = 1.2\text{m}$; $\varnothing = 1,8\text{ cm}$) positioniert. Der Wasserfluß (Wasservolumen pro Zeit) in dem Rohr kann reguliert werden und wird bei verschiedenen Durchflußgeschwindigkeiten mit Hilfe von Meßzylinder und Stoppuhr bestimmt. Die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit U ergibt sich als Quotient aus Fluß F und Querschnittsfläche A des Rohres:

$$U [\text{cm s}^{-1}] = F [\text{cm}^3 \text{s}^{-1}] / A [\text{cm}^2] \quad (5)$$

Gleichzeitig werden die Spannungssignale der Sonde aufgezeichnet. Die graphische Darstellung von Strömungsgeschwindigkeit und Signalhöhe ergibt einen exponentiellen Zusammenhang. Dies bedeutet eine höhere Meßempfindlichkeit der Sonde bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten.

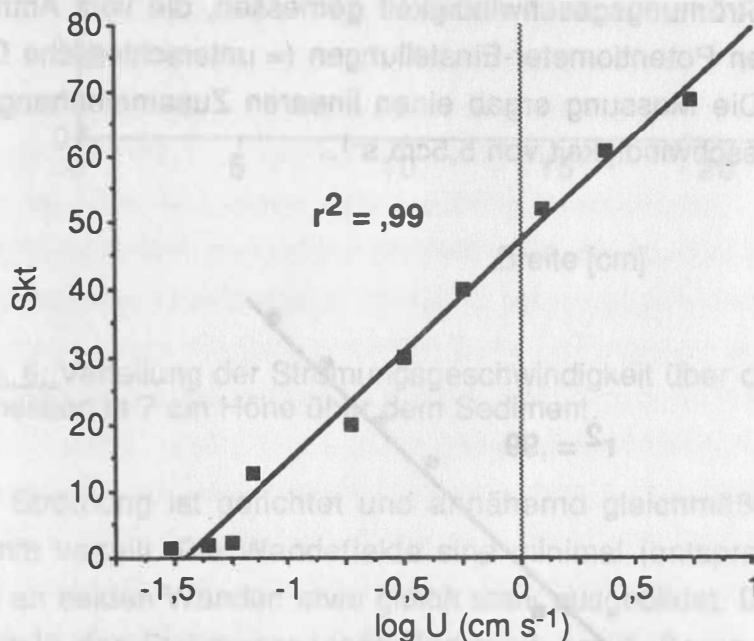


Abb. 4: Ermittelte Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit U (in cm s^{-1}) und Signalhöhe (in Skalenteilen des Schreiberpapiers) für die Kalibrierung der Thermistorsonde. Die Meßpunkte stellen die Mittelwerte aus 5 parallelen Messungen dar, die Standardabweichung betrug 5%. Die Ansprechzeit der Sonde beträgt weniger als 0.1 s und die Auflösung ca. 0.01mm s^{-1} .

Bei einer semi-logarithmischen Darstellung kann aus der Geradengleichung die Formel für die Umrechnung der Signalhöhen in Strömungsgeschwindigkeiten erstellt werden.

Für die verwendete Sonde ergab sich eine Umrechnung nach der Geradengleichung:

$$\text{Skt} = 32,2 \log U + 47,08, \quad (6)$$

daraus ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit U nach:

$$U = 10 (\text{Skt} - 47,08) / 32,2 \quad (7)$$

2.2.3. Strömungsmessungen im Kanal

Für die Strömungsmessungen wird eine verschiebbare Brücke quer über die Rinne gesetzt, auf der sich ein Mikromanipulator befindet. Die Sonde kann so in Schritten von 0,1 mm in vertikaler Richtung bewegt werden. Für die Messung wurde ein Sedimentkern in die Anlage gefügt, der Kanalboden mit Sediment der jeweiligen Station beschichtet und die Anlage mit Seewasser aufgefüllt. Die Wassertiefe betrug 10 cm.

Als erstes wurde die Strömungsgeschwindigkeit gemessen, die vom Antriebsmotor bei verschiedenen Potentiometer-Einstellungen (= unterschiedliche Drehzahlen) erzeugt wird. Die Messung ergab einen linearen Zusammenhang und eine mögliche Höchstgeschwindigkeit von $5,5 \text{ cm s}^{-1}$.

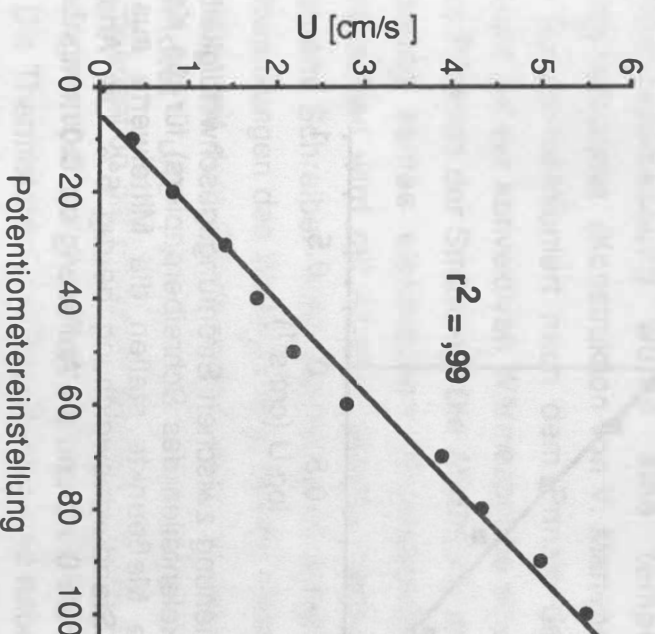


Abb. 5: Potentiometereinstellung (0 - 100) am Motor und damit erzeugte Strömungsgeschwindigkeit (in cm s^{-1}) im Strömungskanal.

Die Messung der Geschwindigkeitsverteilung über die Breite des Kanals bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 3.8 cm s^{-1} in 6 cm Höhe über dem Boden ergab folgendes Profil:

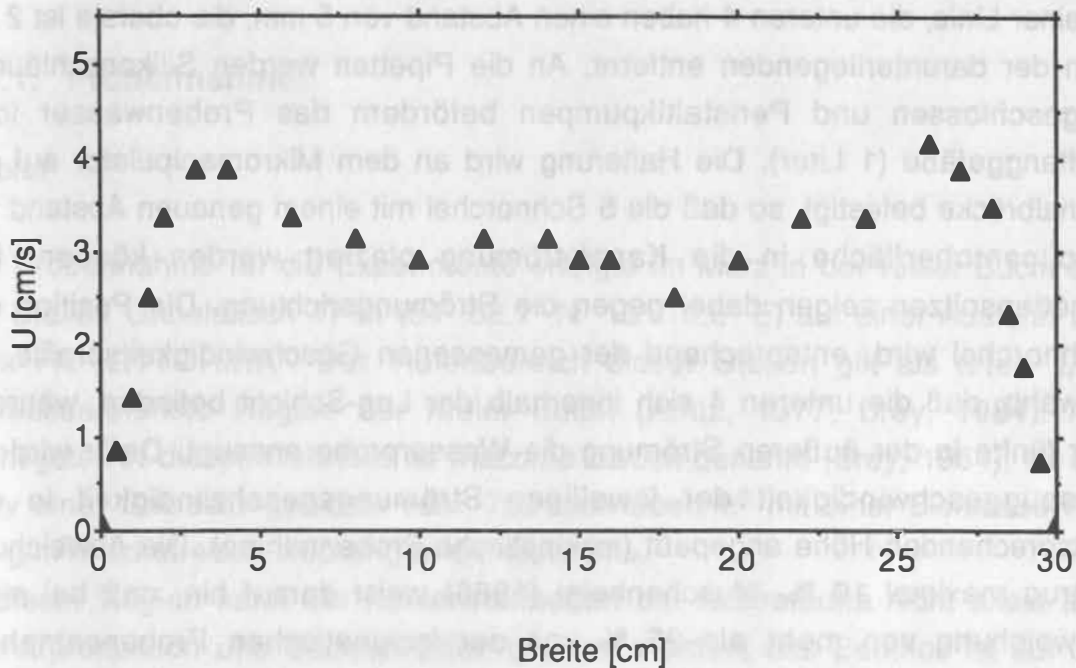


Abb. 6: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über die Breite des Kanals, gemessen in 7 cm Höhe über dem Sediment.

Die Strömung ist gerichtet und annähernd gleichmäßig über den Kanalquerschnitt verteilt. Die Wandeffekte sind minimal (entsprechend der Log-Schicht) und an beiden Wänden etwa gleich stark ausgebildet. Die leichte Erhöhung ($0,5 \text{ cm s}^{-1}$) der Strömungsgeschwindigkeit am äußeren Rand der Wandgrenzschichten ist wahrscheinlich auf erhöhte Turbulenzen aufgrund sich überlagernder Strömungsmuster zurückzuführen. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über der Testfläche (5 - 25 cm) betrug $3.3 \text{ cm s}^{-1} \pm 0,5 \text{ cm s}^{-1}$, so daß davon ausgegangen werden kann, daß über der Testfläche die Strömung gleichförmig und zweidimensional (Gradient nur in z-Richtung) ausgebildet ist.

2.3. Messung der Sestonkonzentration im Kanal

Für die Wasserprobenentnahme zur Bestimmung der Sestonkonzentration in verschiedenen Höhen über dem Boden wurde ein Probensammler konstruiert. Er besteht aus einer PVC-Halterung, in der 5 rechtwinklig abgebogene Pasteurpipetten befestigt sind. Die Pipettenspitzen befinden sich übereinander in einer Linie, die unteren 4 haben einen Abstand von 5 mm, die oberste ist 2 cm von der darunterliegenden entfernt. An die Pipetten werden Silikonschläuche angeschlossen und Peristaltikpumpen befördern das Probenwasser in 5 Auffanggefäße (1 Liter). Die Halterung wird an dem Mikromanipulator auf der Kanalbrücke befestigt, so daß die 5 Schnorchel mit einem genauen Abstand zur Sedimentoberfläche in die Kanalströmung plaziert werden können. Die Pipettenspitzen zeigen dabei gegen die Strömungsrichtung. Die Position der Schnorchel wird, entsprechend der gemessenen Geschwindigkeitsprofile, so gewählt, daß die unteren 4 sich innerhalb der Log-Schicht befinden, während der fünfte in der äußeren Strömung die Wasserprobe ansaugt. Dafür wird die Ansauggeschwindigkeit der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit in der entsprechenden Höhe angepaßt (isokinetische Probennahme). Die Abweichung betrug maximal 10 %. Muschenheim (1986) weist darauf hin, daß bei einer Abweichung von mehr als 25 % von der isokinetischen Probenentnahme Artefakte in Form von Über- oder Unterschätzung der gemessenen Partikelkonzentrationen entstehen. Bei der Einstellung muß die Pumpleistung für jeden Schnorchel reguliert und kalibriert werden; die Regulierung ist für jeden Geschwindigkeitsbereich neu vorzunehmen.

Bei zwei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten wurden pro Wassertiefe mindestens 0,5 Liter Probenwasser entnommen und auf Glasfaserfilter (Whatman GF/F) filtriert. Der Sestongehalt wurde in Gramm Trockengewicht pro Liter festgestellt. Die erste Probennahme erfolgte bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1.5 cm s^{-1} , die zweite erfolgte eine Stunde nach Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ erhöht wurde, ohne die sonstigen Bedingungen in dem Kanal zu verändern. Aus der Strömungsgeschwindigkeit und der Partikelkonzentration konnte der Partikelfluß in der jeweiligen Höhe errechnet werden:

$$F [\text{mg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}] = U [\text{cm s}^{-1}] C [\text{mg cm}^{-3}] \quad (8)$$

Abb. 5: Pointentnommungsanordnung (0 = 100% am Meßort) und deren Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (in cm s^{-1}) im Strömungskanal.

Der Vergleich der mittleren Sestonkonzentrationen der beiden Messungen liefert eine quantitative Angabe der Steigerung der Partikelresuspension bei erhöhter Strömungsgeschwindigkeit.

2.4. Experimente zur Partikeldeposition

2.4.1. Probennahme

Gebiet

Die Probennahme für die Experimente erfolgte im März in der Kieler Bucht auf der Station Gabelsflach 17 m ($54^{\circ} 32.7' N$ $10^{\circ} 16.6' E$) auf einer Ausfahrt mit dem FK "LITTORINA". Der Tiefenbereich dieser Station gilt als arten- und biomassereichste Region der Kieler Bucht (Arntz, 1977; Brey, 1984). Als wichtigste Art dieses Gebietes ist *Macoma baltica* genannt (Brey, 1984), für die Brey eine Besiedlungsdichte von 1780 Individuen/m² mit einer Biomasse von 6,8 g/m² Aschefreiem Trockengewicht feststellte.

In dieser Region kann der Kohlenstoffbedarf der Makrofauna nicht allein aus Primärproduktion und Sedimentation gedeckt werden, das Benthos ist auf die Resuspension und laterale Advektion organischen Materials angewiesen (Eversberg, 1990). Das Sediment besteht aus Feinsand (150 - 250 μm). Für eine vergleichbare Station (Gabelsflach 19 m, $54^{\circ} 33.30' N$ $10^{\circ} 05.70' E$) wurde von Ritzrau (1990) eine bodennahe Trübezone mit einer Ausdehnung von 20 bis maximal 40 cm über Grund festgestellt mit erhöhter Sestonkonzentration im bodennahen Wasser, die je nach den hydrographischen Bedingungen schwankte und einmal nach einem Sturmereignis mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten sehr viel höher war.

Geräte

Für die Experimente wurden Sedimentkerne mit einem Durchmesser von 20 cm verwendet, die sich aufgrund der großen Oberfläche besonders gut für die Untersuchungen im Strömungskanal eignen. Die Kerne wurden mit einem modifizierten Großkastengreifer (50 cm x 50 cm) (Forster, 1991) gewonnen. Ein Einsatz in dem Kasten dient als Halterung für 4 Stechrohre aus Plexiglas

(Innendurchmesser: 20 cm). Die Sedimentproben werden so bereits am Meeresboden ausgestochen, haben deshalb eine relativ ungestörte Oberfläche und können an Bord vorsichtig mit dem überstehenden Wasser aus dem Kasten entnommen werden.

Das Sediment für die Beschichtung des Kanalbodens wurde mit einem Großkasten ohne Einsatz gewonnen. Die oberste Sedimentschicht (10 cm) wurde gesiebt (Maschenweite: 500 μm), um die Makrofauna zu entfernen, in Plastikwannen gefüllt und mit Seewasser beschichtet. Seewasser für die Füllung des Kanals wurde bodennah gepumpt und in Kunststoffässern transportiert. Für die Bestimmung der Partikelkonzentration und des Größenspektrums wurden möglichst bodennah Wasserproben mit einem 5 l Niskin-Wasserschöpfer genommen.

Die Sedimentkerne und das gesiebte Sediment wurden im Labor in einer Hälterungsanlage (Forster 1991) belüftet und bei in-situ Temperatur im Dunkeln verwahrt.

2.4.2. Experimente

Es wurden zwei Experimente durchgeführt, die im folgenden Exp.1 und Exp. 2 genannt werden. Exp. 1 erfolgte bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5.5 cm s^{-1} und Exp. 2 bei Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 cm s^{-1} . Auf der Basis einer Gemeinschaftsanalyse sollte quantitativ festgestellt werden, welchen Beitrag Makrofaunaorganismen zur Deposition von suspendierten Partikeln leisten und welchen Einfluß die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit auf die Deposition von Partikeln aus der Wassersäule auf das Sediment hat. Die beiden Experimente wurden mit Sedimentkernen aus einer Kastengreiferprobe durchgeführt, so daß die Ergebnisse, aufgrund der gleichen Sedimentstruktur und sehr ähnlicher Zusammensetzung des Benthos, gut vergleichbar sind. Die Intention war, die Kernoberfläche als Ganzes und als 'Mikrokosmos' zu betrachten und die Aktionen und Interaktionen der Tiere zu untersuchen, ohne sie aus ihrem natürlichen Verband zu lösen. Den Unterschied zwischen physikalisch bedingter Deposition und Biodeposition sollte der Vergleich zwischen der gesiebten Sedimentfläche auf dem Kanalboden und der Kernoberfläche liefern.

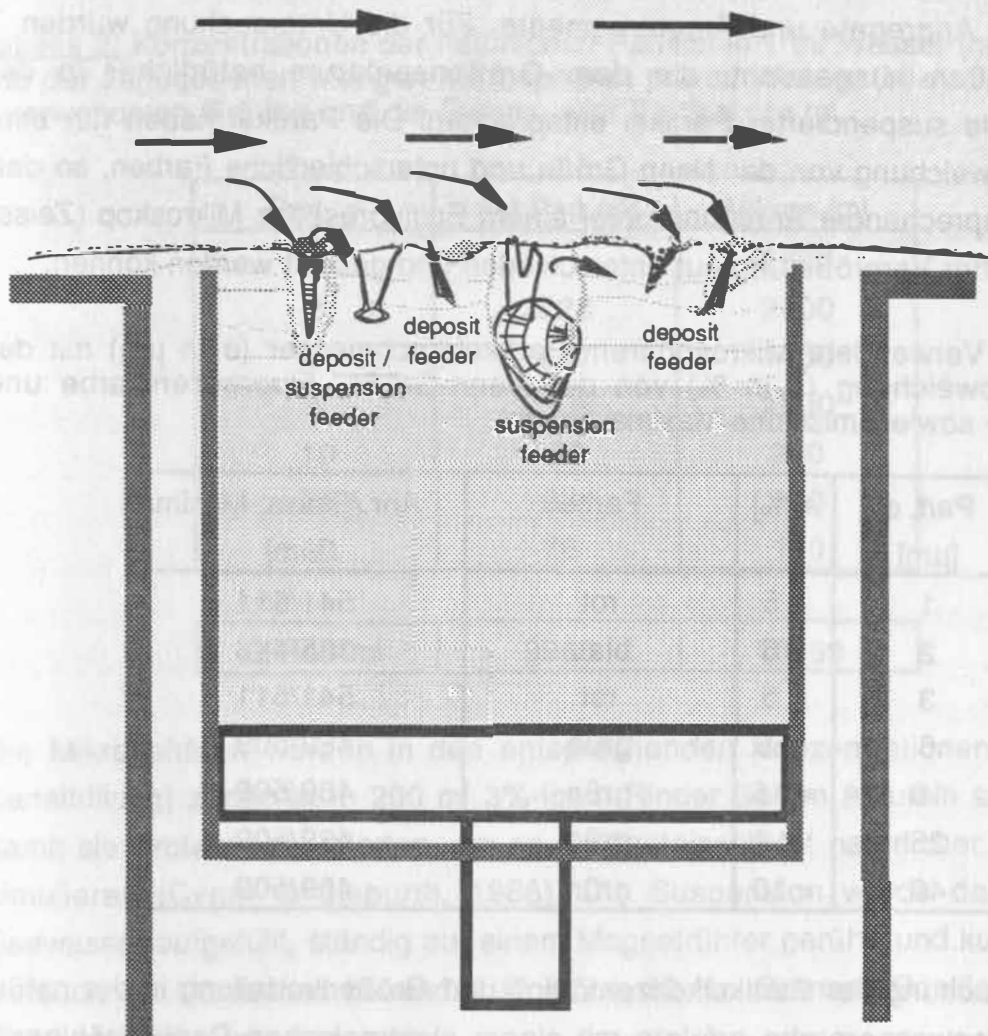


Abb. 7: Betrachtung eines 'Mikrokosmos', bestehend aus Suspensions- und Depositionsfressern unter dem Einfluß einer Bodenströmung.

2.4.2.1. Vorbereitung

Suspension aus Mikrosphären

Um den Partikelfluß aus der Wassersäule ins Sediment verfolgen zu können wurden künstliche Partikel, sogenannte Mikrosphären (Microspheres, Duke Scientific Corporation®) verwendet. Es sind fluoreszierende, sphärische Partikel aus Polystyren Latex mit einer Dichte von 1.05 g cm^{-3} , was der Dichte

von organischen Partikeln ungefähr entspricht. Chase (1979) gibt für suspendierte, organische Partikel im marinen Bereich eine mittlere Dichte von $1,055 \pm 0,012 \text{ g cm}^{-3}$ an. Self & Jumars (1988) bestätigen eine Dichte von 1.05 g cm^{-3} für organische Aggregate und Algenfragmente. Für die Untersuchung wurden 7 Partikelgrößen ausgesucht, die dem Größenspektrum natürlicher in der Wassersäule suspendierter Partikel entsprechen. Die Partikel haben nur eine geringe Abweichung von der Nenn-Größe und unterschiedliche Farben, so daß sie bei entsprechender Anregung unter einem Epifluoreszenz Mikroskop (Zeiss) bei 250-facher Vergrößerung gut unterschieden und gezählt werden können.

Tabelle 1: Verwendete Mikrosphären: Partikeldurchmesser (\varnothing in μm) mit der Standardabweichung (s in %) von der Nenn-Größe, Fluoreszenzfarbe und Anregungs- sowie Emissions-Maxima (in nm).

Part. \varnothing [μm]	s [%]	Farbe	Anr./Emiss. Maxima [nm]
1	< 5	rot	541/611
2	< 5	blau	365/446
3	< 5	rot	541/611
6	< 16	grün	469/509
10	< 15	grün	469/509
25	< 14	grün	469/509
40	< 10	grün	469/509

Die Untersuchung der Partikelkonzentration und Größenverteilung in der natürlichen Bodenwasserprobe erfolgte mit einem elektronischen Partikelzählgerät (Multisizer, CASY), das mir von der planktologischen Abteilung (Prof. Dr. Lenz, IfM Kiel) zur Verfügung gestellt wurde. Die Analyse ergab eine mittlere ($n = 5$) Partikelkonzentration von $9,96 \times 10^3$ Partikel / ml. Das Spektrum der Partikelgrößen reichte von $2 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$ und wies ein Maximum bei $6 \mu\text{m}$ auf. Die Auflösung des Gerätes beginnt bei einer Partikelgröße von $2 \mu\text{m}$, kleinere Partikel werden nicht erfaßt. Da sie jedoch in einer natürlichen Wasserprobe eine wichtige Größenfraktion darstellen, wurden sie in das Spektrum der künstlichen Partikel mit aufgenommen. Die Partikelkonzentration und Größenverteilung in der natürlichen Wasserprobe dienten als Grundlage für die Bereitung der Suspension aus Mikrosphären. Die Mikrosphären wurden in etwa der gleichen Konzentration und Größenverteilung, wie natürliche Partikel im

Kanalwasser vorhanden waren, zugegeben (s. Tabelle 2), so daß im Kanal ein Verhältnis von natürlichen zu künstlichen Partikeln von ungefähr 1:1 gegeben war und die Gesamtpartikelzahl sich damit verdoppelte.

Tabelle 2: Konzentrationen der natürlichen Partikel in 1 ml Wasser (nat.Part./ml) und der zugegebenen Mengen Mikrosphären pro ml Wasser (Mikros./ml) für die 7 verwendeten Größen und die Summe aller Partikel pro ml.

Part. ø	nat.Part./ml	Mikros./ml
1	-	2800
2	2228	2800
3	1607	1400
6	2505	2800
10	160	280
25	98	140
40	76	140
Σ Part/ml	9960	10360

Die Mikrosphären wurden in den entsprechenden Konzentrationen (für 100 l Kanalfüllung) zunächst in 200 ml 3%-igem Rinder Serum Albumin suspendiert, damit sie Protein adsorbieren, um so die Proteinschicht natürlicher Partikel zu simulieren (Cynar & Sieburth, 1986). Die Suspension wurde dann mit 2 l Seewasser aufgefüllt, ständig auf einem Magnetrührer gerührt und kurz vor dem Versuch mit Ultraschall behandelt (3 x 5 s, 40 Hz, Branson Sonifier 250), um Verklumpungen zu vermeiden.

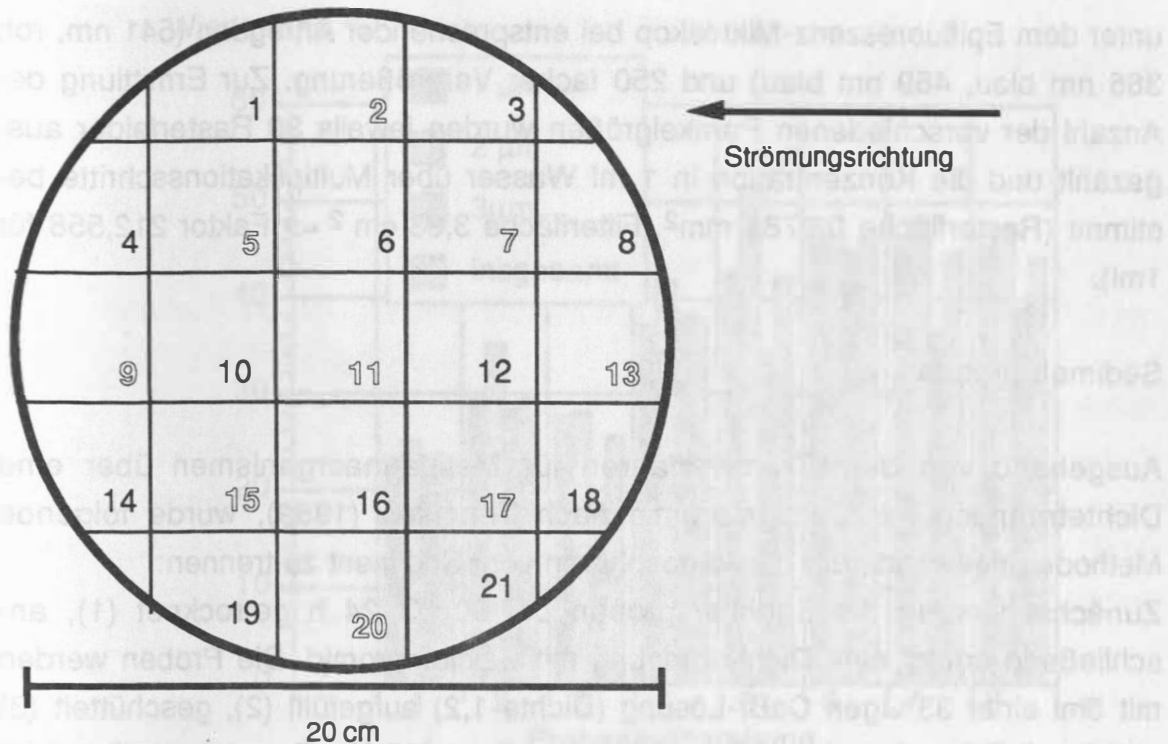
Strömungskanal

Kurz nach der Probenentnahme im Feld (am selben Tag Exp. 1, nach 5 Tagen Exp. 2) wurde der Kern in die Anlage gefügt, der Kanalboden mit dem gesiebten Sediment 1 cm hoch aufgefüllt und geglättet und der Kanal mit Seewasser aufgefüllt. Zwei Tage vor dem Experiment wurde in der Anlage die *in-situ* Temperatur eingestellt (2 °C). Abgedunkelt und bei angeschalteter Strömung konnte sich das System 2 Tage akklimatisieren.

2.4.2.2. Experimentdurchführung

Die Mikrosphärensuspension wurde mittels einer Peristaltikpumpe (Merodos, 50 Hz) unter ständigem Rühren, am Ende der Rinne direkt über der Schnecke, in den Kanal eingeleitet. Auf diese Weise war eine völlige Durchmischung gewährleistet. Die Einleitung dauerte 45 min. Beginnend mit dem Einleitungsstop wurden alle 30 min. 50 ml Wasser aus der durchmischten Wassersäule zwischen den beiden Gleichrichtern mit einer Eppendorfpipette entnommen. 5 ml der Wasserprobe wurden sofort auf schwarzgefärbte Filter ($0,2 \mu\text{m}$) abfiltriert und die Mikrosphären noch während des Experimentes unter dem Epifluoreszenz-Mikroskop ausgezählt, um eine direkte Kontrolle der Partikelkonzentration in der Wassersäule zu haben. Bei Exp. 1 ($5,5 \text{ cm s}^{-1}$) zeigte sich nach 4,5 Stunden eine Abnahme der Partikelkonzentration um ca. 40 %, und der Versuch wurde nach 5,5 Std. gestoppt. Bei Experiment 2 ($1,5 \text{ cm s}^{-1}$) konnte über 5 Std. keine Abnahme festgestellt werden, der Versuch wurde dennoch nach 6 Std. beendet. Unter gradueller Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit wurde das Wasser langsam aus dem Kanal abgelassen, bis die Sedimentoberfläche nur noch von einer dünnen Wasserschicht (einige mm) bedeckt war.

Ein Raster, bestehend aus einem 3 cm hohen Plexiglasring mit 20 cm Innendurchmesser und einer Unterteilung in 4 cm x 4 cm große Felder wurde für die genaue Positionierung der Sedimentprobenentnahme zunächst auf die Kernoberfläche gelegt. Es wurden in 9 Feldern (2,5,7,9,11,13,15,17,20) mit abgesägten Kunststoffspritzen jeweils $1,3 \text{ cm}^3$ Sediment (Fläche: $1,3 \text{ cm}^2$, 1 cm tief ausgestochen) aus möglichst ebenen Flächen entnommen. Eine zusätzliche Beprobung ausgewählter biogener Strukturen (Hügel, Trichter, Vertiefungen) folgte. Das Raster diente außerdem als Orientierungshilfe für die Skizzierung der Kernoberfläche und zur Notierung der Makrofauna-Positionen.



Ebenfalls mit Hilfe des Rasters wurden auf der Kanalbodenfläche 5cm stromaufwärts Sedimentproben aus denselben 9 Feldern entnommen.

Anschließend wurde der Kern etwas angehoben und die oberste Sedimentschicht (ca. 2 cm) felderweise abgetragen. Die Schichtstücke wurden in Petrischalen mit entsprechender Feldnummerierung gefüllt. Der Kern wurde so bis in 5 cm Tiefe präpariert. In der 3 cm tiefen Schicht wurden nochmals 9 Sedimentproben in den der Oberflächenprobennahme entsprechenden Feldern genommen und zusätzlich einzelne Makrofaunagänge beprobt.

Die Sedimentschichtproben wurden gesiebt ($500\ \mu\text{m}$) und die Makrofaunaorganismen einzeln in Schnappdeckelgläser mit entsprechender Feldnummerierung überführt, in 6 %-igem Magnesiumchlorid narkotisiert und schließlich in 4 %-igem mit borax-gepuffertem Formalin fixiert. Das Magnesiumchlorid entspannt die Muskulatur der Organismen, so daß sie später besser zu präparieren sind.

2.4.2.3. Probenbearbeitung

Wasserproben

Jeweils 20 ml Wasserprobe für jeden Zeitpunkt wurden auf schwarzgefärbte Nuclepore® Filter ($0,2\ \mu\text{m}$) abfiltriert. Das Auszählen der Mikrosphären erfolgte

unter dem Epifluoreszenz-Mikroskop bei entsprechender Anregung (541 nm, rot; 365 nm blau, 469 nm blau) und 250 facher Vergrößerung. Zur Ermittlung der Anzahl der verschiedenen Partikelgrößen wurden jeweils 30 Rasterfelder ausgezählt und die Konzentration in 1 ml Wasser über Multiplikationsschritte bestimmt (Rasterfläche 0,0784 mm², Filterfläche 3,33 cm² => Faktor 212,558 für 1ml).

Sedimentproben

Ausgehend von dem Trennverfahren für Meiofaunaorganismen über eine Dichtentrennung mit Calciumbromid nach Thomsen (1989), wurde folgende Methode angewandt, um die Mikrosphären vom Sediment zu trennen:

Zunächst werden die Sedimentproben bei 60 °C 24 h getrocknet (1), anschließend erfolgt eine Dichtentrennung mit Calciumbromid. Die Proben werden mit 5ml einer 33%igen CaBr-Lösung (Dichte 1,2) aufgefüllt (2), geschüttelt (3) und 3 x 5 Sekunden einer Ultraschallbehandlung (40 Hz, Branson sonifier 250) ausgesetzt (4). Die Suspension wird 10 min stehen gelassen (5), damit sich die schweren Sedimentkörner absetzen, und der Überstand wird dekantiert (6). Die Schritte 2 bis 6 werden für jede Probe sechsmal wiederholt um möglichst viele Mikrosphären aus dem Sediment zu extrahieren. Die Bestimmung der Wiederfundrate für verschiedene Bearbeitungsschritte hat ergeben, daß so eine maximale Partikelanzahl erreicht wird. Der Überstand wird wie die Wasserproben filtriert und die Mikrosphären werden unter dem Epifluoreszenz-Mikroskop ausgezählt. Da die Gesamtanzahl geringer ist als in den Wasserproben, werden pro Filter 6 Streifen ausgezählt und die Zahl der Mikrosphären der ausgezählten Fläche (34,608 mm²) dann auf das Sedimentvolumen (1 cm³) hochgerechnet.

Für die Bestimmung der Wiederfundrate wurde in 8 Ansätzen mit jeweils 5 Parallelen jeweils 1 cm³ Sediment mit 1 ml einer Suspension aus Mikrosphären versetzt. Die Suspension bestand aus Mikrosphären der 3 kleinsten Partikelgrößen 1, 2 und 3 µm. Jeweils 5 parallele Proben wurden einer ansteigenden Zahl von Aufbereitungsschritten unterzogen, d.h. bei dem 1. Ansatz wurden die Proben einmal aufbereitet, und der Überstand dekantiert, bei dem 2. zweimal u.s.w.. Für die Bestimmung des Ausgangswertes wurden 5 x 1ml Partikelsuspension in jeweils 5 ml CaBr verrührt, anschließend wurden die Lösungen filtriert und die Partikel ausgezählt.

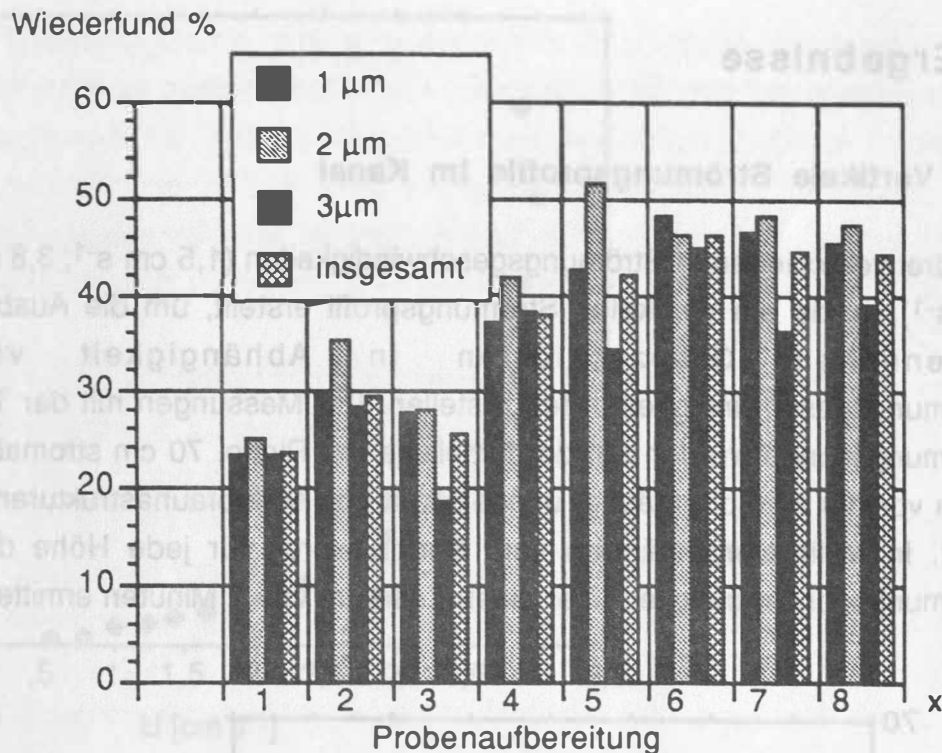


Abb. 8: Wiederfund der Mikrosphären in % der zugegebenen Konzentrationen in Abhängigkeit von der Zahl der Probenaufbereitungen

Bei sechsmaliger Probenaufbereitung war die Wiederfundrate für alle Partikelgrößen am höchsten. Weiteres Aufbereiten erhöhte die Zahl der gezählten Partikel in der Probe nicht. Eine Ursache dafür liegt darin, daß auch immer mehr andere Partikel aus der Sedimentprobe gelöst werden und die Mikrosphären auf dem Filter zum Teil verdecken.

Mageninhalte der Makrofauna

Die fixierten Tiere wurden abgespült und unter einem Binokular sezirt. Mit einer Pasteurpipette wurde möglichst der gesamte Magen- und Darminhalt abgesaugt und in Reagenzgläser überführt. Die Proben wurden zur Bestimmung des Trockengewichtes und für die Aufbereitung der Proben bei 60 °C getrocknet, wie die Sedimentproben wurden die Mageninhalte in Calciumbromid suspendiert, jedoch konnte hier der gesamte gelöste Mageninhalt filtriert werden, um anschließend die Partikel auszuzählen.

Zur Bestimmung des Trockengewichtes wurden alle Tiere eines Sedimentkernes bei 60 °C getrocknet und anschließend bei 550 °C 24 h verascht zur Ermittlung des aschefreien Trockengewichtes.

3. Ergebnisse

3.1. Vertikale Strömungsprofile im Kanal

Bei drei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten ($1,5 \text{ cm s}^{-1}$; $3,8 \text{ cm s}^{-1}$; $5,5 \text{ cm s}^{-1}$) wurde ein vertikales Strömungsprofil erstellt, um die Ausbildung der bodennahen Grenzschichten in Abhängigkeit von den Strömungsgeschwindigkeiten festzustellen. Die Messungen mit der Thermistor-Strömungssonde wurden auf der Mittellinie der Rinne, 70 cm stromabwärts und 5 cm vor der Kernoberfläche, unbeeinflusst von Makrofaunastrukturen, durchgeführt. In Millimeterabständen vom Boden wurde für jede Höhe die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 2 Minuten ermittelt.

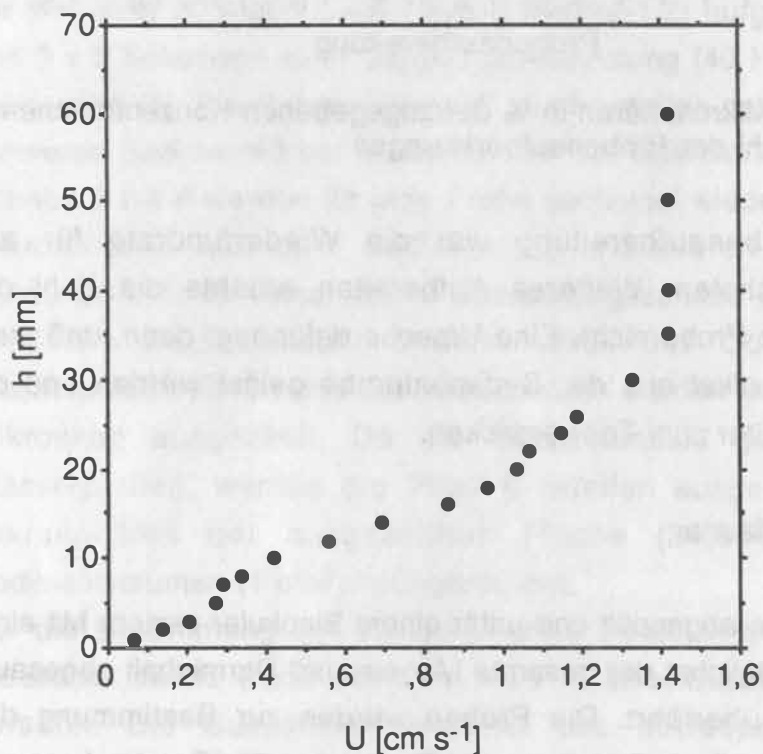


Abb. 1: Strömungsprofil bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$, die Höhe der Log-Schicht bzw. Dicke der Bodengrenzschicht $\delta \approx 3,5 \text{ cm}$

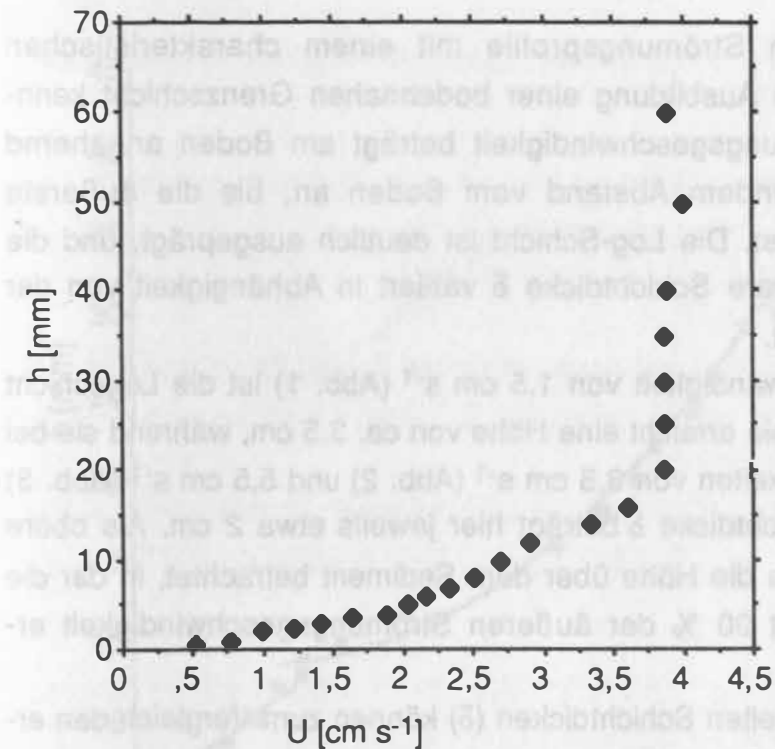


Abb. 2: Strömungsprofil bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $3,8 \text{ cm s}^{-1}$, die Höhe der Log-Schicht bzw. Dicke der Bodengrenzschicht $\delta \approx 2 \text{ cm}$

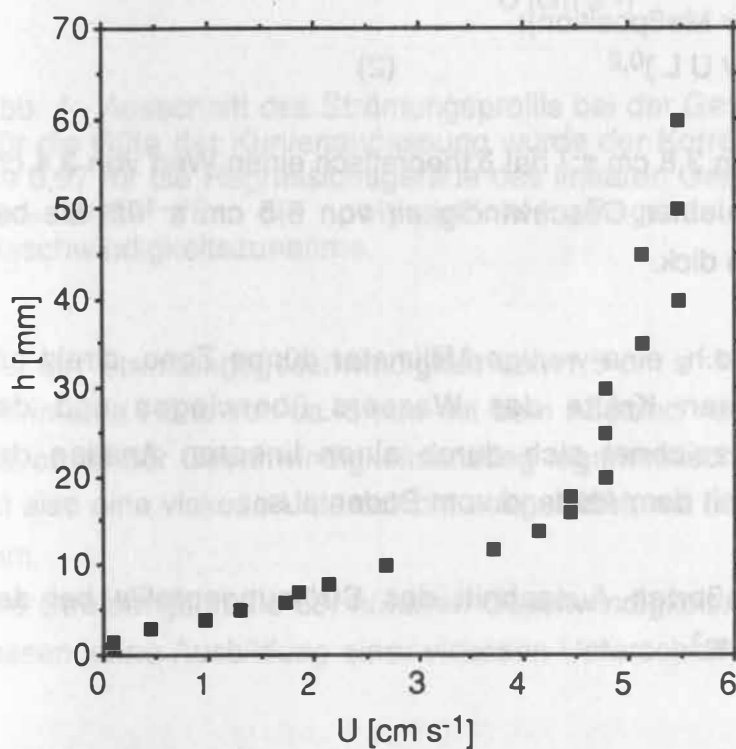


Abb. 3: Strömungsprofil bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $5,5 \text{ cm s}^{-1}$, die Höhe der Log-Schicht bzw. Dicke der Bodengrenzschicht $\delta \approx 2 \text{ cm}$

Die Messungen ergaben Strömungsprofile mit einem charakteristischen Kurvenverlauf, der für die Ausbildung einer bodennahen Grenzschicht kennzeichnend ist. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt am Boden annähernd Null, steigt mit zunehmendem Abstand vom Boden an, bis die äußerste Geschwindigkeit erreicht ist. Die Log-Schicht ist deutlich ausgeprägt, und die aus den Profilen erkennbare Schichtdicke δ variiert in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit.

Bei der langsamen Geschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Abb. 1) ist die Logschicht am stärksten ausgeprägt, sie erreicht eine Höhe von ca. 3,5 cm, während sie bei den höheren Geschwindigkeiten von $3,8 \text{ cm s}^{-1}$ (Abb. 2) und $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Abb. 3) weniger dick ist. Die Schichtdicke δ beträgt hier jeweils etwa 2 cm. Als obere Grenze der Schicht wurde die Höhe über dem Sediment betrachtet, in der die Strömungsgeschwindigkeit 90 % der äußeren Strömungsgeschwindigkeit erreichte.

Die aus den Profilen ermittelten Schichtdicken (δ) können zum Vergleich den errechneten (Schlichting 1960) gegenübergestellt werden.

Die berechnete Schichtdicke nach Schlichting (1960) wäre für eine Geschwindigkeit U von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ und über eine Strecke L stromabwärts von 70 cm (vom Gleichrichter bis zur Meßposition):

$$\delta = 0,38 L (v / U L)^{0,2} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \delta = 4,2 \text{ cm},$$

Für eine Geschwindigkeit von $3,8 \text{ cm s}^{-1}$ hat δ theoretisch einen Wert von 3,4 cm und für eine Strömung mit einer Geschwindigkeit von $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ ist die berechnete Log-Schicht 3,2 cm dick.

Eine viskose Unterschicht, d.h. eine wenige Millimeter dünne Zone, direkt am Boden, in der die viskosen Kräfte des Wassers überwiegen und der Fließvorgang laminar ist, zeichnet sich durch einen linearen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Boden aus.

Abb. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Strömungsprofils bei der Geschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$.

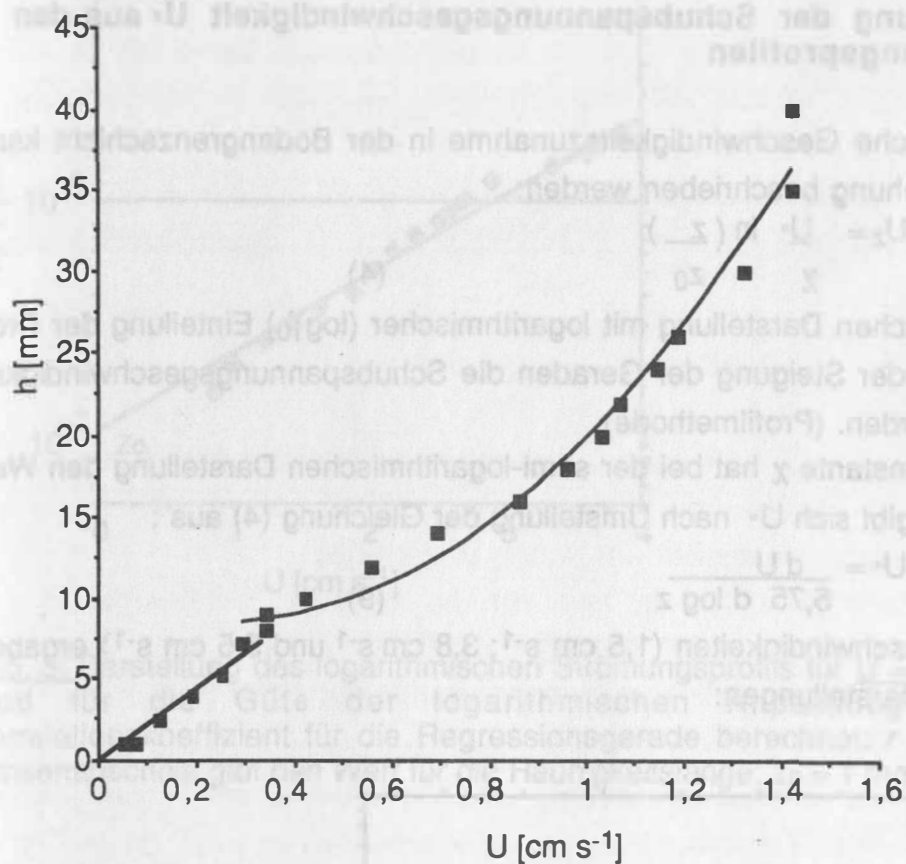


Abb. 4: Ausschnitt des Strömungsprofils bei der Geschwindigkeit von 1.5 cm s^{-1} . Für die Güte der Kurvenanpassung wurde der Korrelationskoeffizient berechnet: $r = 0,97$ für die Regressionsgerade des linearen Geschwindigkeitsanstiegs und $r = 0,99$ für die polynomiale Regression der logarithmischen Geschwindigkeitszunahme.

Bei der Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ nimmt die Geschwindigkeit bis in eine Höhe von ca. 5 mm mit dem Abstand vom Boden linear zu, oberhalb davon ist der Geschwindigkeitsanstieg logarithmisch. Unterhalb der Log-Schicht ist also eine viskose Unterschicht ausgebildet, mit der Schichtdicke δ_{vis} von ca. 5 mm.

Die Strömungsprofile der höheren Geschwindigkeiten (Abb. 2, Abb. 3) hingegen lassen keine Ausbildung einer viskosen Unterschicht erkennen.

3.1.2. Ermittlung der Schubspannungsgeschwindigkeit U^* aus den Strömungsprofilen

Die logarithmische Geschwindigkeitszunahme in der Bodengrenzschicht kann durch die Beziehung beschrieben werden:

$$U_z = \frac{U^*}{\chi} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

Bei der graphischen Darstellung mit logarithmischer (\log_{10}) Einteilung der Ordinate kann aus der Steigung der Geraden die Schubspannungsgeschwindigkeit U^* ermittelt werden. (Profilmethode)

Die Karman Konstante χ hat bei der semi-logarithmischen Darstellung den Wert 5,75, und so ergibt sich U^* nach Umstellung der Gleichung (4) aus :

$$U^* = \frac{dU}{5,75 \, d \log z} \quad (9)$$

Für die drei Geschwindigkeiten ($1,5 \text{ cm s}^{-1}$; $3,8 \text{ cm s}^{-1}$ und $5,5 \text{ cm s}^{-1}$) ergaben sich folgende Darstellungen:

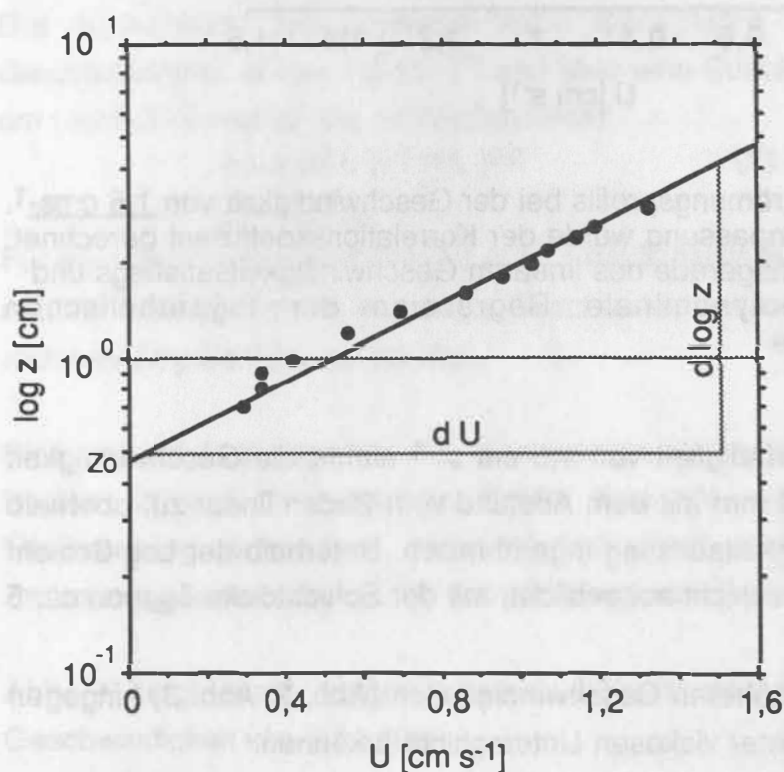


Abb. 4: Darstellung des logarithmischen Strömungsprofils für $U = 1,5 \text{ cm s}^{-1}$, als Maß für die Güte der logarithmischen Anpassung wurde der Korrelationskoeffizient für die Regressionsgerade berechnet: $r = 0,99$, Der Y-Achsenabschnitt gibt den Wert für die Rauigkeitslänge: $z_0 = 4,6 \text{ mm}$

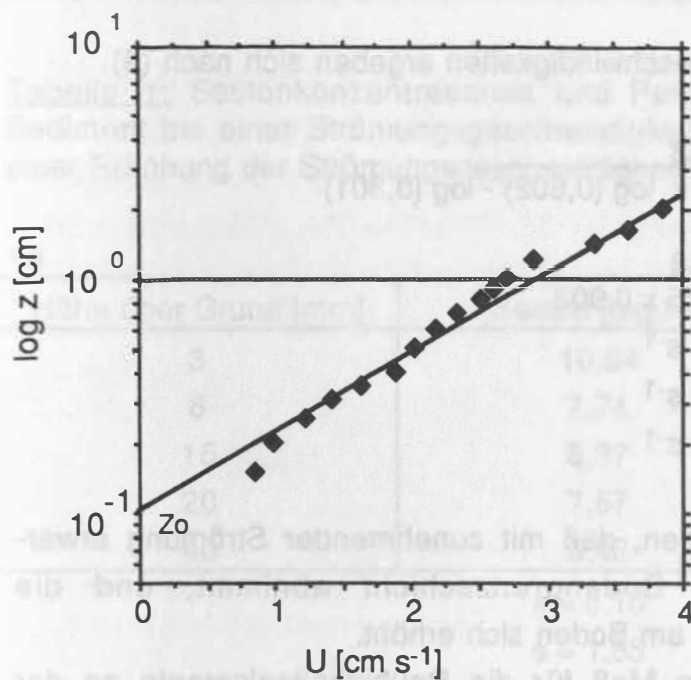


Abb. 5: Darstellung des logarithmischen Strömungsprofils für $U = 3.8 \text{ cm s}^{-1}$, als Maß für die Güte der logarithmischen Anpassung wurde der Korrelationskoeffizient für die Regressionsgerade berechnet: $r = 0,98$ Der Y-Achsenabschnitt gibt den Wert für die Rauigkeitslänge: $z_0 = 1 \text{ mm}$

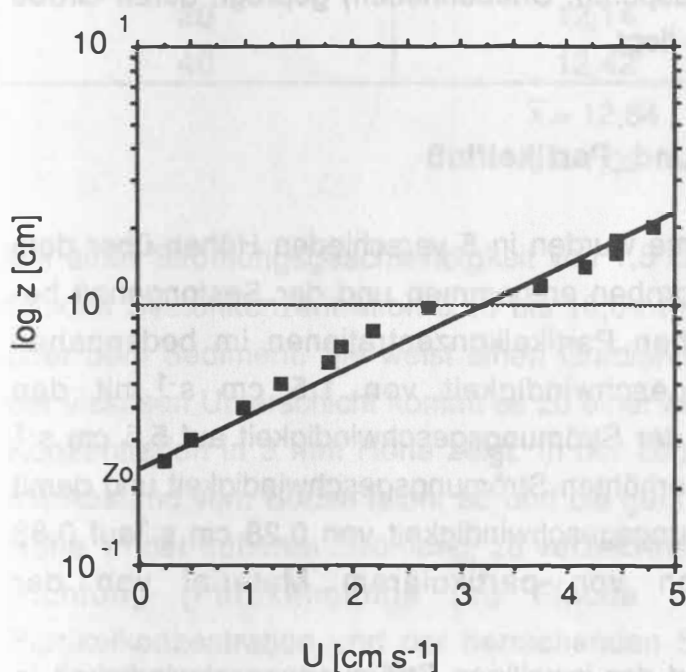


Abb. 6: Darstellung des logarithmischen Strömungsprofils für $U = 5.5 \text{ cm s}^{-1}$, als Maß für die Güte der logarithmischen Anpassung wurde der Korrelationskoeffizient für die Regressionsgerade angegeben: $r = 0,98$, Der Y-Achsenabschnitt gibt den Wert für die Rauigkeitslänge $z_0 = 4,6 \text{ mm}$.

Die jeweiligen Schubspannungsgeschwindigkeiten ergeben sich nach (9)

Für $U = 1,5 \text{ cm s}^{-1}$:

$$U_* = \frac{1,48}{5,75 \times \log(0,602) - \log(0,301)}$$

$$U_* = \frac{1,48}{5,75 \times 0,903}$$

$$U_* = 0,28 \text{ cm s}^{-1}$$

Für $U = 3,8 \text{ cm s}^{-1}$: $U_* = 0,51 \text{ cm s}^{-1}$

Für $U = 5,5 \text{ cm s}^{-1}$: $U_* = 0,88 \text{ cm s}^{-1}$

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß mit zunehmender Strömung erwartungsgemäß die Dicke der Bodengrenzschicht abnimmt, und die Schubspannungsgeschwindigkeit am Boden sich erhöht.

Die Rauigkeitslänge z_0 ist ein Maß für die Rauigkeitselemente an der Sedimentoberfläche, sie steht im Zusammenhang mit der Korngröße des Sedimentes, aber auch mit anderen Unebenheiten. Sie variiert bei den Messungen zwischen 1 und 4,6 mm. Die Sedimentschicht auf dem Kanalboden hat eine natürliche Zusammensetzung, und die Oberfläche ist von kleinen Rauigkeitselementen (Meiofaunaspuren, Unebenheiten) geprägt, deren Größe etwa in dem Bereich der z_0 -Werte liegt.

3.2. Sestonkonzentrationen und Partikelfluß

Mittels isokinetischer Probennahme wurden in 5 verschiedenen Höhen über dem Sediment (s. Tabelle 1) Wasserproben entnommen und der Sestongehalt bestimmt. Es wurden die natürlichen Partikelkonzentrationen im bodennahen Wasser bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ mit den Konzentrationen nach Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ verglichen, um den Einfluß einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit und damit einer Erhöhung der Schubspannungsgeschwindigkeit von $0,28 \text{ cm s}^{-1}$ auf $0,88 \text{ cm s}^{-1}$ auf die Resuspension von partikulärem Material von der Sedimentoberfläche festzustellen.

Aus der Partikelkonzentration und der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe konnte der entsprechende Partikelfluß nach der Gleichung (8) errechnet werden.

Tabelle 1: Sestonkonzentrationen und Partikelfluß in 5 Höhen über dem Sediment bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ (1a) und nach einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ (1b).

1a

Höhe über Grund [mm]	Seston [mg l^{-1}]	Fluß [$\text{mg } 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
3	10,64	2,915
8	7,74	2,632
15	8,37	5,817
20	7,57	7,797
40	6,46	9,186

$$\bar{x} = 8,16$$

$$s = 1,55$$

1b

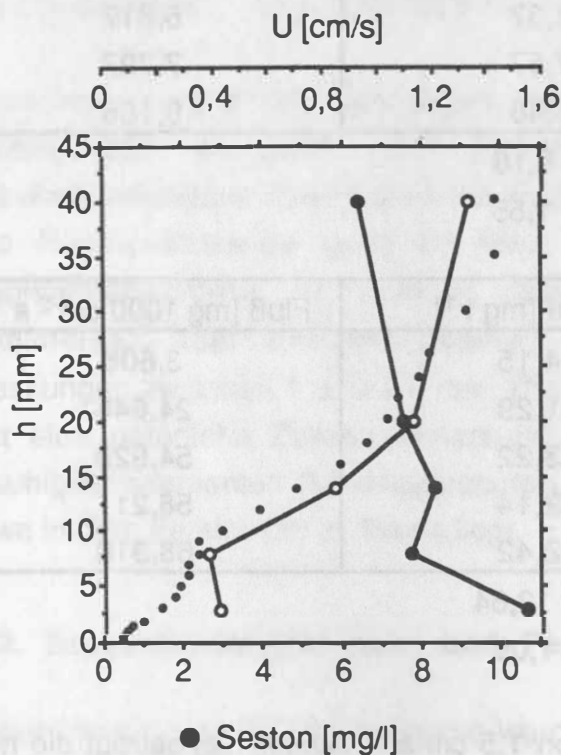
Höhe über Grund [mm]	Seston [mg l^{-1}]	Fluß [$\text{mg } 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
3	14,15	3,608
8	11,29	24,646
15	13,22	54,929
20	12,14	58,211
40	12,42	68,310

$$\bar{x} = 12,64$$

$$s = 1,09$$

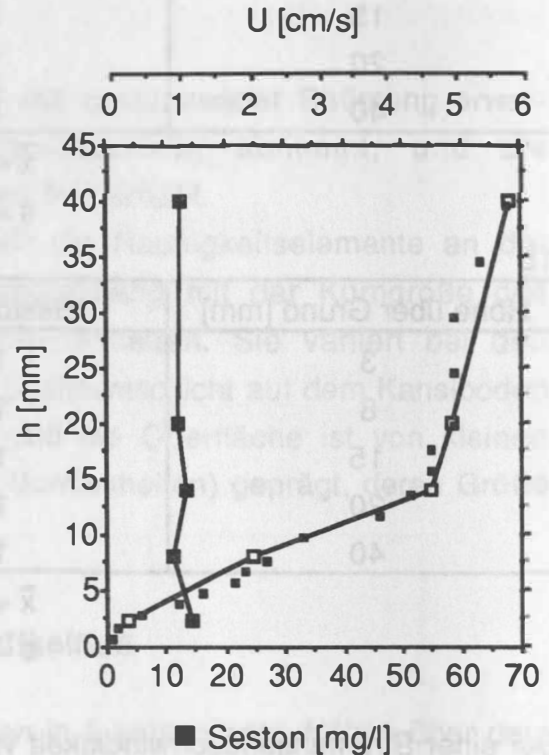
Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Tabelle 1a) beträgt die natürliche Sestonkonzentration $6,46$ bis $10,64 \text{ mg l}^{-1}$ in Abhängigkeit von der Höhe über dem Sediment. Sie weist einen Gradienten zum Boden hin auf. Innerhalb der viskosen Unterschicht kommt es zu einer Anreicherung von Partikeln, wie die Konzentration in 3 mm Höhe zeigt. In der Log-Schicht nimmt der Sestongehalt mit Abstand vom Boden leicht ab und die geringste Sestonmenge ist in 40 mm Höhe, in der äußeren Strömung, zu verzeichnen. Der Partikelfluß in horizontaler Richtung (Partikelmenge pro Fläche und Zeit), das Produkt aus Partikelkonzentration und der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit in der entsprechenden Höhe, ist bodennah am geringsten und steigt entsprechend dem vertikalen Strömungsprofil mit Abstand vom Boden an (s. Abb. 7 a). Innerhalb der viskosen Unterschicht ist der Partikelfluß aufgrund der hohen Partikelkonzentration etwas erhöht gegenüber der Sestonfracht in 8 mm Höhe.

Nach einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Tabelle 1 b) erhöht sich die Sestonkonzentration auf Werte zwischen $12,42 \text{ mg l}^{-1}$ und $14,15 \text{ mg l}^{-1}$. Ein Konzentrationsgradient, mit einer erhöhten Sestonmenge in Bodennähe, ist nur schwach ausgebildet. Der Partikelfluß ist ebenfalls erhöht, und die Werte sind entsprechend der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit am Boden am geringsten und steigen mit Abstand vom Boden exponentiell an (Abb. 7 b).



● Seston [mg/l]
○ Fluß [mg 1000 cm⁻² s⁻¹]
■ Strömungsgeschw. U [cm s⁻¹]

Abb. 7a



■ Seston [mg/l]
□ Fluß [mg 1000 cm⁻² s⁻¹]
● Strömungsgeschw. U [cm s⁻¹]

Abb. 7b

Abb. 7a und 7b: Sestonkonzentrationen und horizontaler Partikelfluß innerhalb der Bodengrenzschicht in 5 Höhen über dem Sediment in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. **7a** zeigt die Sestonkonzentrationen und den Partikelfluß bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ und **7b** nach Erhöhung der Geschwindigkeit auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$. Man beachte die unterschiedlichen Größenskalen.

Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ und damit die Zunahme der am Boden wirkenden Schubspannungsgeschwindigkeit von $0,28 \text{ cm s}^{-1}$ auf $0,88 \text{ cm s}^{-1}$ bewirkte die Resuspension von Partikeln vom

Sediment in die Wassersäule und ihren Transport in der Bodenströmung. Die Differenz der Sestonkonzentrationen gibt eine Angabe über die Zunahme der Partikelkonzentration in der Wassersäule (Tabelle 2, Abb. 8). Der horizontale Partikelfluß ergibt sich aus der Partikelkonzentration und der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit. Die Differenz der Werte für den Partikelfluß beschreibt die Erhöhung der Partikelmenge, die pro Zeit und Fläche horizontal transportiert wird.

Tabelle 2: Erhöhung der Sestonkonzentrationen und des horizontalen Partikelflusses bei einer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$. Dargestellt sind die Differenzen der Sestonkonzentrationen und des Partikelflusses in den jeweiligen Höhen über dem Sediment. Verglichen werden die Absolutwerte, sowie die relativen Zunahmen in Prozent [%].

Höhe über Grund [mm]	Zunahme Seston		Erhöhung Partikelfl.	
	[mg l ⁻¹]	[%]	[mg 1000 cm ⁻² s ⁻¹]	[%]
3	3,51	33,0	0,693	23,8
8	3,55	45,9	22,014	836,4
15	4,85	57,9	49,112	844,3
20	4,57	60,4	50,414	646,6
40	5,96	92,3	59,124	643,6

$$x = 4,49$$

$$s = 1,02$$

Der Anstieg des Sestongehaltes absolut gesehen ist für jede Höhe etwa gleich und liegt im Mittel bei $4,49 \text{ mg l}^{-1}$. Die relative Konzentrationszunahme ist mit $92,3 \%$ in 40 mm Höhe am größten, während sie in Bodennähe (3 mm) 33% beträgt. Der Partikelfluß wird in Bodennähe um $0,7 \text{ mg } 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gesteigert und erhöht sich mit zunehmenden Abstand entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit exponentiell. In 40 mm Höhe über dem Sediment beträgt die Zunahme der horizontal transportierten Partikelmenge $59,1 \text{ mg } 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die relative Erhöhung des Partikelflusses ist in 8 und 15 mm über dem Sediment mit 840% am höchsten.

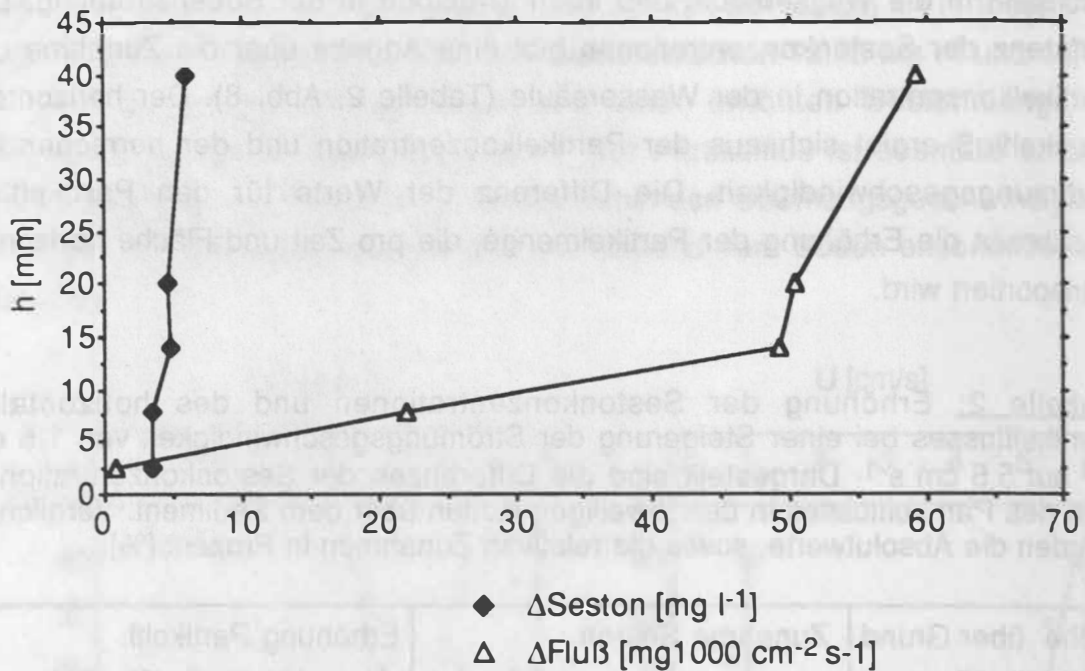


Abb.8: Zunahme des Sestongehaltes und des Partikelflusses, es sind jeweils die Differenzen der Absolutwerte für die 5 Höhen über dem Sediment dargestellt.

Während sich die Partikelkonzentration innerhalb der Wassersäule mit Abstand vom Boden um etwa den gleichen Betrag erhöht, steigt die pro Zeit und Fläche horizontal transportierte Partikelmenge innerhalb der Bodengrenzschicht entsprechend der zunehmenden Geschwindigkeit exponentiell mit dem Abstand vom Sediment.

3.3. Experimente zur Deposition

3.3.1. Die Makrofauna in den Depositionsversuchen

Die wichtigsten Vertreter der Makrofauna in beiden Experimenten sind *Macoma baltica* (Tellinidae) und *Pectinaria koreni* (Terebellidae) ← Amphitretini, Drei. In dem Sedimentkern des Exp.1 ($5,5 \text{ cm s}^{-1}$) sind auf einer Fläche von $314,15 \text{ cm}^2$ 15 Individuen von *Macoma baltica* mit einer Biomasse von $395,6 \text{ mg AFTG}$ und 12 *Pectinaria* mit einer Biomasse von $312,3 \text{ mg AFTG}$ vertreten. Das entspricht einer Abundanz von $477 \text{ Individuen/m}^2$ mit einer Biomasse von $12,6 \text{ g AFTG/m}^2$ für *Macoma baltica* und 381 Ind./m^2 mit einer Biomasse von $9,9 \text{ g AFTG/m}^2$ für *Pectinaria koreni*. Außer diesen Organismen sind *Ensis ensis* und *Nephtys spec.* jeweils nur einmal vorhanden mit einer Biomasse von $6,2$ bzw. $6,3 \text{ mg AFTG}$.

Die Gemeinschaft von Exp. 2 ($1,5 \text{ cm s}^{-1}$) besteht aus 11 *M. baltica* ($= 350 \text{ Ind./m}^2$) mit einer Biomasse von $449,1 \text{ mg AFTG}$ ($= 14,3 \text{ g/m}^2$) und 11 Individuen *P. koreni* mit einer Biomasse von $375,1 \text{ mg AFTG}$ ($= 11,9 \text{ g/m}^2$). Das übrige Makrobenθος des Sedimentkernes besteht aus je einem Exemplar der Arten *Phaxas pellucidas* ($70,7 \text{ mg AFTG}$), *Nephtys spec.* ($8,7 \text{ mg}$), *Scoloplos armiger* ($5,9 \text{ mg}$) und *Astarte borealis* ($535,2 \text{ mg}$).

Macoma baltica siedelt in 2-6 cm Sedimenttiefe. Allgemein wird *M. baltica* als 'Oberflächen-Depositionstresser' ('surface deposit feeder') bezeichnet (Hyllenberg & Gallucci, 1975; Risk & Moffat, 1977; Reise, 1981; Aller & Yingst, 1985; Self & Jumars, 1988). In einem Aktionsradius von ca. 1 cm pipettiert sie die Sedimentoberfläche in kreisförmigen Bewegungen mit ihrem langen Ingestions SIPHO ab, wobei typische sternförmige Fraßspuren entstehen. Jedoch ist bekannt, daß die Gattung *Macoma* sich ebenso als Suspensionstresser ernähren kann (Reid & Reid, 1969; Taghon et. al., 1980). Im Strömungskanal konnte beobachtet werden, wie *M. baltica* ihren SIPHO etwa 1 cm über die Sedimentoberfläche hält und Nahrungspartikel direkt aus dem Wasserstrom ansaugt. Die Partikelaufnahme durch den SIPHO ist unselektiv, die aufgenommene Nahrung wird im Mantelraum sortiert (Self & Jumars, 1988). Nicht in den Darm aufgenommene Material wird als Pseudofaeces durch den Ingestions SIPHO wieder ausgestoßen und auf der Oberfläche deponiert. (Aller & Yingst, 1985)

Der Egestionssipho befindet sich ca. 1 cm unter der Sedimentoberfläche, *Macoma* scheidet zylindrisch geformte, ca. 1 mm lange Pellets aus, die einen hohen Anteil sehr kleiner Partikel (1-3 μm) beinhalten und reicher an organischer Substanz sind als umgebende Sedimentpartikel der gleichen Größenfraktion (Hylleberg & Gallucci, 1975). Es konnte beobachtet werden, daß für das Abgeben der Pellets im obersten Sedimenthorizont mit dem Egestionssipho Sediment verdrängt werden muß, so daß auf der Oberfläche ein Hügel mit einem kleinen Loch in der Mitte entsteht.

Der Polychaet *Pectinaria koreni* lebt in einer aus verklebten, flachen Sedimentpartikeln bestehenden konischen Röhre, die sich am Hinterende verjüngt. Meistens steckt er kopfüber 1-2 cm unter der Sedimentoberfläche, und nur das spitze Hinterende ist sichtbar. Mit seinen zu Grabschaufeln umfunktionierten Borsten, sogenannten Paleen, lockert er das Sediment auf und entnimmt mit Hilfe seiner Tentakel die Nahrungspartikel. Er selektiert sie vor der Aufnahme, und nicht verwertbares, meistens grobes Material wird unter Umgehung des Darmtraktes innerhalb der Röhre an die Sedimentoberfläche gepumpt (Dold, 1980). So entsteht an der Sedimentoberfläche ein aufgeworfener Hügel. Durch die Grab- und Fraßaktivität bildet sich unter der Sedimentoberfläche eine Höhle, die nach einiger Zeit einstürzt, so daß neues Material von oben nachrutscht und an der Oberfläche ein Trichter entsteht, der auch als Sedimentfalle dient. Diese Ernährungsweise wird auch 'conveyor belt feeding' ('Fließbandfressen') oder 'funnel feeding' ('Trichterfressen') genannt (Rhoads, 1974). Die Tentakel des Wurmes sind sehr lang und können seine Körperlänge übertreffen. Er ist in der Lage, sie aus dem Sediment an die Oberfläche zu strecken und von dort ebenfalls Nahrung aufzunehmen. Dies konnte im Strömungskanal beobachtet werden. Außerdem kann *P. koreni* sich durch das Sediment graben oder auf der Sedimentoberfläche umherwandern, um Nahrung zu suchen (Dold 1980).

3.3.2. Exp. 1 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5,5 cm s⁻¹

3.3.2.1. Wasserproben

Die Wasserproben wurden in der durchmischten Wassersäule entnommen. In Abb. 9 sind die Konzentrationen der Mikrosphären in Abhängigkeit von der

Versuchsdauer für die 7 verschiedenen Größen und die Gesamtanzahl dargestellt, ausgehend von der Konzentration der Mikrosphären zum Zeitpunkt 0, d.h. bei der Zugabe.

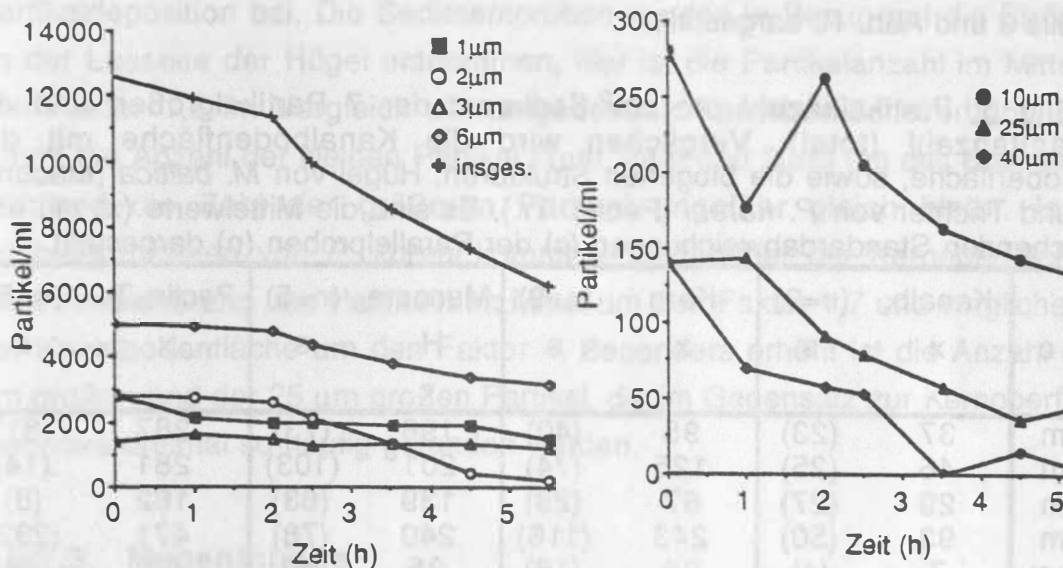


Abb. 9a und 9b: Partikelkonzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Die Anzahl der Mikrosphären pro ml Wasserprobe der Größen 1 µm, 2 µm, 3 µm und 6 µm sowie die Gesamtpartikelanzahl sind in 9a dargestellt. Die geringeren Konzentrationen der 10 µm, 25 µm und 40 µm großen sind in 9b dargestellt.

Die Partikelkonzentration in der Wassersäule nimmt über den Zeitraum von 6 Stunden um ca. 50 % ab. Auffällig ist die Abnahme der 2 µm und 6 µm großen Partikel, während die Partikelzahl der Größe 1 µm und 3 µm annähernd konstant bleibt. Die Anzahl der großen Mikrosphären mit einem Durchmesser von 10 µm, 25 µm und 40 µm nimmt konstant ab, und die 40 µm großen Partikel verschwinden fast vollständig.

3.3.2.2. Sedimentproben

Es wurden auf der besiedelten Kernoberfläche 9 Parallelproben an möglichst ebenen Stellen entnommen, und die gleiche Anzahl wurde in entsprechenden Positionen (mit Hilfe des Rasters) auf der gesiebten Sedimentfläche des Kanalbodens gewonnen. Die Untersuchung der Partikelanzahl in den 9 Parallelproben der jeweiligen Fläche ergab keine Unterschiede in Abhängigkeit

von der Position der Probennahme, so daß für den Vergleich der beiden Flächen die jeweiligen Mittelwerte betrachtet werden können. Bei der Probennahme an biogenen Strukturen der Kernoberfläche konnten die Hügel von *M. baltica* und die Trichter von *P. koreni* voneinander unterschieden werden. Es werden auch hier die Mittelwerte von jeweils 5 parallelen Proben betrachtet. Die Werte sind in Tabelle 3 und Abb. 10 dargestellt.

Tabelle 3: Partikelanzahl pro cm² Sediment der 7 Partikelgrößen und die Gesamtanzahl (total). Verglichen wird die Kanalbodenfläche mit der Kernoberfläche, sowie die biogenen Strukturen: Hügel von *M. baltica* (Macoma H.) und Trichter von *P. koreni* (Pectin. Tr.). Es sind die Mittelwerte (x) mit entsprechenden Standardabweichungen (s) der Parallelproben (n) dargestellt.

Part. ø	Kanalb. (n=9)		Kern (n=9)		Macoma (n=5)		Pectin. Tr. (n=5)	
	x	s	x	s	H. x	s	x	s
1 µm	37	(23)	95	(40)	196	(73)	287	(81)
2 µm	46	(25)	125	(74)	201	(103)	281	(14)
3 µm	29	(27)	67	(28)	139	(63)	162	(8)
6 µm	93	(50)	243	(116)	240	(78)	471	(292)
10 µm	7	(4)	36	(18)	25	(6)	68	(44)
25 µm	55	(42)	100	(33)	129	(60)	341	(22)
40 µm	195	(125)	377	(155)	385	(174)	467	(60)
total	461	(217)	1056	(435)	1317	(322)	1803	(610)

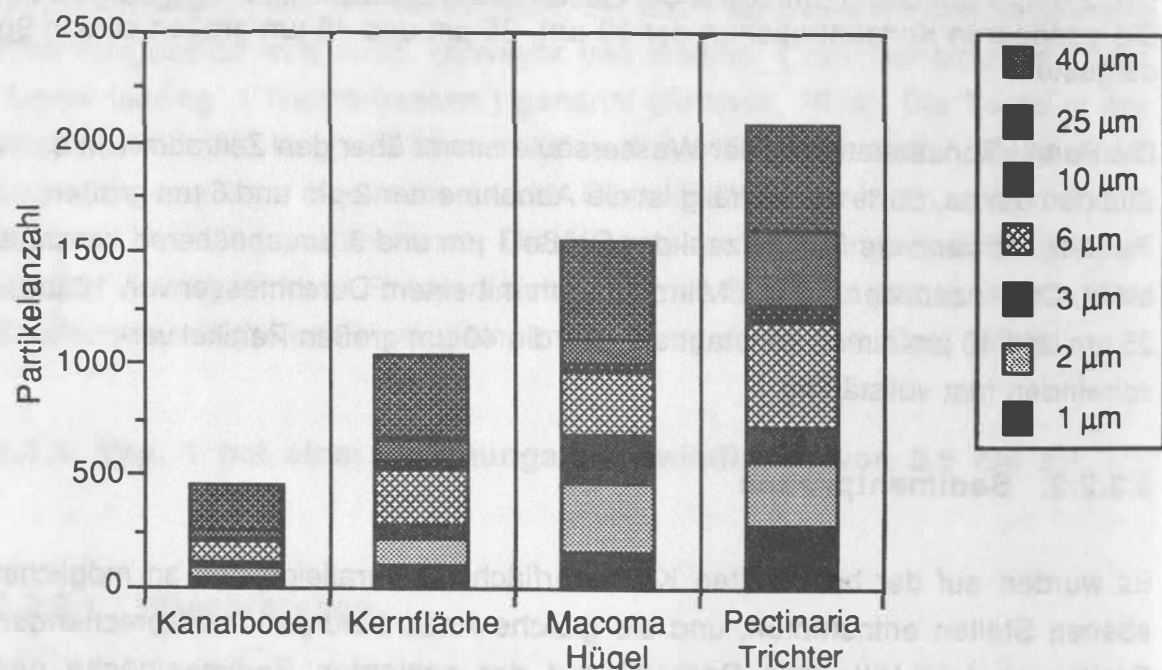


Abb. 10: Vergleich der Partikelanzahl pro cm² auf den Sedimentflächen des Kanalbodens und der Kernoberfläche, sowie an den biogenen Strukturen *Macoma* Hügel und *Pectinaria* Trichter.

Die Gesamtanzahl der deponierten Partikel pro cm² Sedimentfläche ist auf der ebenen Kernoberfläche im Vergleich zur gesiebten Kanalbodenfläche im Mittel um den Faktor 2,3 erhöht. Die verschiedenen Partikelgrößen tragen etwa im gleichen Maß zu dieser Erhöhung bei. Die Sedimenthügel, die *Macoma* an der Sedimentoberfläche produziert, tragen zusätzlich zu einer erhöhten Partikeldeposition bei. Die Sedimentproben wurden in Bezug auf die Strömung an der Leeseite der Hügel entnommen, hier ist die Partikelanzahl im Mittel um den Faktor 1,2 im Vergleich zur umgebenden Kernoberfläche erhöht. Dabei nimmt die Anzahl der kleinen Partikel (1µm, 2µm und 3µm) um das doppelte zu, während die Zahl der größeren Partikel ungefähr gleich bleibt. In den Trichterstrukturen von *P. koreni* kommt es gegenüber der Kernoberfläche zu einer Anreicherung von Partikeln im Mittel um den Faktor 1,7 und verglichen mit der Kanalbodenfläche um den Faktor 4. Besonders erhöht ist die Anzahl der 1 µm großen und der 25 µm großen Partikel, die im Gegensatz zur Kernoberfläche hier etwa dreimal so häufig gefunden werden.

3.3.2.3. Mageninhalte

Für die Untersuchung des Beitrags der Makrofaunaorganismen zur Partikeldeposition wurden die Mageninhalte von jeweils 5 oder 6 Individuen der in den Sedimentkernen dominierenden Arten *M. baltica* und *P. koreni* analysiert.

Macoma baltica

Bei der Sezierung der Muschel konnten im Darm befindliche Pellets, die *Macoma* unter der Sedimentfläche abgibt, von dem Mageninhalt unterschieden werden. Für die Betrachtung der Partikeldeposition wurden diese getrennt analysiert. Die Tiere werden nach Körpergröße (Schalenlänge) und Biomasse (Trockengewicht, AFTG) unterschieden. Die Anzahl der aufgenommenen Partikel wird für jedes einzelne Tier betrachtet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Partikelanzahl der 7 verschiedenen Partikelgrößen und der Gesamtanzahl (total) pro Individuum der Art *Macoma baltica*. Es werden 5 Tiere betrachtet, die nach Länge in [mm], Trockengewicht (Tg. Tier [mg]) und aschefreiem Trockengewicht (AFTG [mg]) unterschieden werden. Verglichen wird die Partikelanzahl im Mageninhalt (TG Ma [mg]) der einzelnen Tiere insgesamt, und der Anteil in den Pellets (Tg. Pell. [mg]) gefundener Partikel. Der Gewichtsanteil der Pellets (Tg.Pell.[mg]) und die hierin enthaltene Partikelanzahl sind in Klammern dargestellt.

	<u>Macoma 1</u>	<u>Macoma 2</u>	<u>Macoma 3</u>	<u>Macoma 4</u>	<u>Macoma 5</u>
Länge [mm]:	12	9,5	11,5	10	11,5
Tg. Tier[mg]:	100,9	50,3	85,1	83,7	72,9
AFTG [mg]:	38,9	11,3	20,6	35,2	15,3
Tg. Ma.[mg]:	11,2	12,6	12,4	7,9	8,4
Tg.Pell.[mg]	(8,0)	(1,6)	(4,3)	(3,7)	(3,1)
Part. ø					
1 µm	1257 (87)	1944 (924)	1406 (1079)	857 (539)	3158 (1252)
2 µm	2716 (58)	1945 (963)	1858 (741)	934 (193)	3043 (501)
3 µm	1102 (19)	934 (453)	837 (298)	250 (67)	1309 (125)
6 µm	4661 (38)	3091 (1377)	2687 (1079)	1974 (202)	3976 (625)
10 µm	241 (10)	279 (125)	202 (58)	77 (10)	972 (48)
25 µm	198 (10)	394 (221)	202 (19)	10 (0)	625 (163)
40 µm	116 (0)	355 (163)	125 (19)	0 (0)	818 (298)
total	10291 (222)	8942 (4226)	7317 (3293)	4101 (1011)	13901 (3012)

Weder Mageninhalt der Tiere (in mg Trockengewicht) noch die Anzahl der aufgenommenen Partikel korrelieren mit der Tiergröße (Länge in mm) oder der Biomasse (Trockengewicht bzw. AFTG). Eine große *M. baltica* (Individuum 6: 22 mm; 203,4 mg AFTG) nimmt etwa genauso viele Partikel auf wie die kleinen Individuen mit einer Schalenlänge von 9,5 bis 12 mm und einer wesentlich geringeren Biomasse (11,3 bis 38,9 mg AFTG). Die Gesamtanzahl der aufgenommenen Partikel pro Individuum beträgt 4101 bis maximal 13901. Im Mittel werden 9216 Partikel pro Tier deponiert. Der Anteil der kleinen Größenfraktion (1µm, 2µm und 3µm) beträgt dabei etwa 50%, die 6 µm Partikel tragen ca. 45 % bei, während die größeren Partikel (10 µm, 25 µm und 40 µm) nur einen Anteil von etwa 5% ausmachen.

In Abb. 11 ist ein Vergleich zwischen der Depositionsrates einer Muschel der Art *M. baltica* und der Anzahl der deponierten Partikel auf einer Fläche von 3 cm² des umgebenden Sedimentes dargestellt. Diese Fläche entspricht einem Aktionsradius, den *Macoma* auf der Sedimentoberfläche mit ihrem Ingestionssiphon beeinflusst.

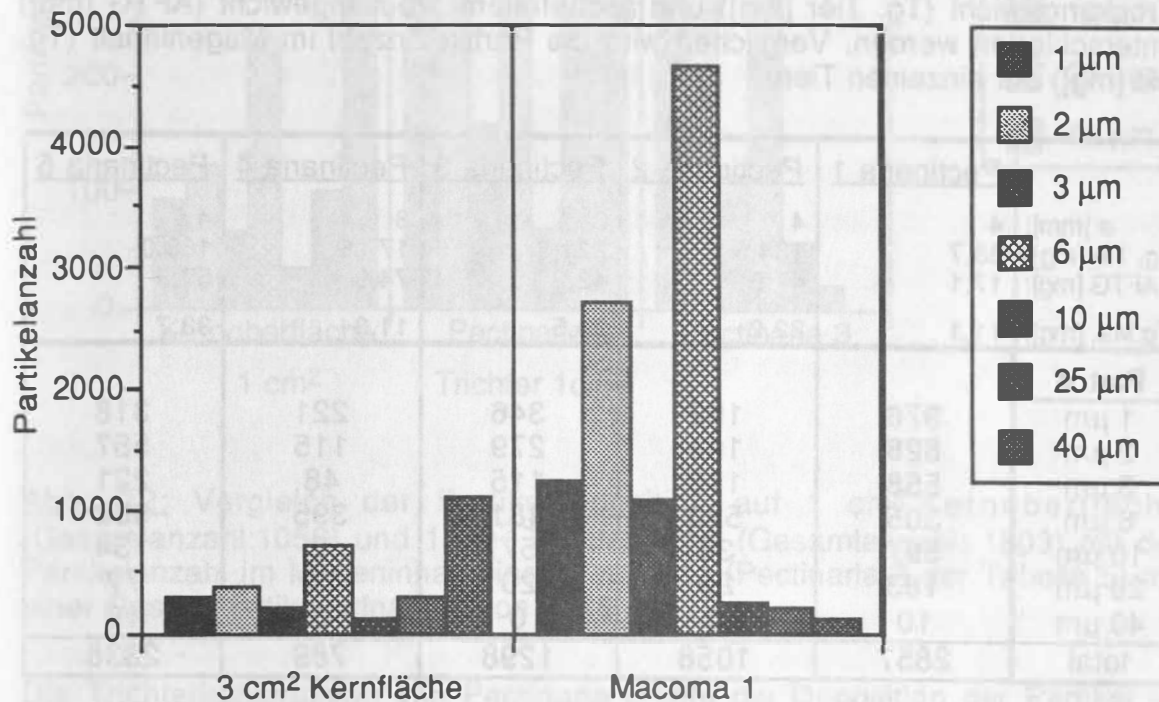


Abb. 11: Vergleich des Mageninhaltes eines Individuums der Art *M. baltica* (Macoma 1 der Tabelle 4) mit der Partikeldeposition auf 3 cm² Kernoberfläche, die dem Aktionsradius des Ingestionssiphon auf der Sedimentfläche entspricht.

Die Partikeldeposition durch ein Individuum *M. baltica* ist um den Faktor 7,4 im Vergleich zur umgebenden Kernoberfläche höher. Der Anteil der kleinen Partikel (1 µm, 2 µm, 3 µm und 6 µm) nimmt dabei um jeweils etwa das 4 bis 7-fache zu, während die Anzahl der 10 µm großen Partikel sich nur etwa verdoppelt, die Anzahl 25 µm großen Partikel nimmt etwas ab, und die Anzahl der größten Partikel ist um den Faktor 9,7 geringer.

Pectinaria koreni

Die Tiere wurden nach Körpergröße und Biomasse (Trockengewicht, Aschefreies Trockengewicht) voneinander unterschieden. Ein Maß für die Körpergröße dieser Polychaeten ist der Durchmesser der vorderen

Röhrenöffnung. Die Anzahl der aufgenommenen Partikel wird für jedes einzelne Tier betrachtet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Partikelanzahl der 7 verschiedenen Partikelgrößen und die Gesamtanzahl (total) pro Individuum der Art *Pectinaria koreni*. Es werden 5 Tiere betrachtet, die nach Körpergröße (\varnothing der vorderen Röhrenöffnung in [mm]) Trockengewicht (Tg. Tier [mg]) und aschefreiem Trockengewicht (AFTG [mg]) unterschieden werden. Verglichen wird die Partikelanzahl im Mageninhalt (Tg. Ma [mg]) der einzelnen Tiere.

	<u>Pectinaria 1</u>	<u>Pectinaria 2</u>	<u>Pectinaria 3</u>	<u>Pectinaria 4</u>	<u>Pectinaria 5</u>
\varnothing [mm]:	4	4	3	3	4,5
Tg. Tier[mg]:	88,7	134,6	221,3	177,5	163,0
AFTG [mg]:	17,1	47,9	42,2	74,9	57,3
Tg.Ma. [mg]:	11,1	22,2	24,5	11,3	33,7
Part. \varnothing					
1 μ m	376	192	346	221	318
2 μ m	828	164	279	115	587
3 μ m	558	115	115	48	221
6 μ m	305	520	481	395	982
10 μ m	597	38	57	0	134
25 μ m	183	29	20	10	77
40 μ m	10	0	0	0	19
total	2857	1058	1298	789	2338

Auch bei *P. koreni* bestand kein Zusammenhang zwischen dem Mageninhalt und der Körpergröße oder der Biomasse des Tieres. Die aufgenommene Gesamtpartikelzahl pro Tier variiert zwischen 789 und 2857 und beträgt im Mittel 1668 Partikel pro Polychaet. Die kleinen Partikel (1-3 μ m) machen mit 45 -70 % den größten Anteil aus. Ein Maximum tritt bei der Partikelgröße 6 μ m auf, zum Teil stellt diese Größenfraktion 50 % der Gesamtpartikelanzahl dar. 10 μ m und 25 μ m große Partikel werden allgemein sehr wenig aufgenommen und 40 μ m große Partikel kaum (< 1%).

Ein Vergleich der Partikelanzahl im Mageninhalt eines Polychaeten mit den Depositionsraten auf der umgebenden Sedimentfläche und in den Trichterstrukturen ist in Abb. 12 dargestellt.

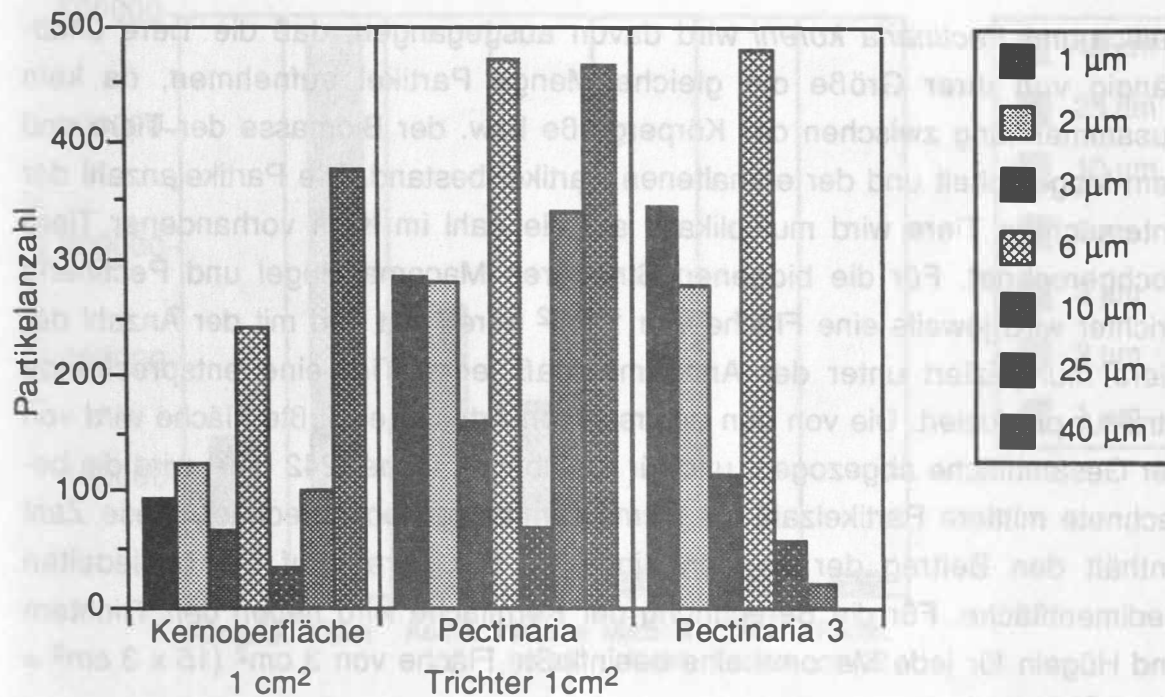


Abb. 12: Vergleich der Partikeldeposition auf 1 cm² Kernoberfläche (Gesamtanzahl: 1056) und 1 cm² Trichterfläche (Gesamtanzahl: 1803) mit der Partikelanzahl im Mageninhalt eines Pectinaria (Pectinaria 3 der Tabelle 5) mit einer Gesamtpartikelaufnahme von 1298.

Die Trichterkonstruktion von Pectinaria erhöht die Deposition der Partikel im Mittel um den Faktor 1,7 im Vergleich zur Kernoberfläche. Die Partikelanzahl im Mageninhalt des Polychaeten ist gegenüber der Sedimentfläche gering erhöht (Faktor 1,2). Im Vergleich mit dem Partikelangebot im Trichter sind 1 µm, 2 µm, 3 µm, 6 µm und 10 µm große Partikel etwa im gleichen Maß aufgenommen, wie sie deponiert worden sind, während die großen Partikel (25 µm und 40 µm) sehr wenig oder gar nicht im Mageninhalt vorhanden sind.

3.3.2.4. Vergleich der Partikeldeposition auf den untersuchten Sedimentflächen

Für einen Vergleich der Partikeldeposition auf der Sedimentfläche ohne Makrofauna des Kanalbodens mit der besiedelten Oberfläche des Sedimentkernes wird die Partikelanzahl jeweils für die beprobte Fläche von 314 cm² hochgerechnet. Für den Sedimentkern ergibt sich die Gesamtanzahl aus der Addition der Depositionsbeiträge der verschiedenen untersuchten Kompartimente. Für den Beitrag der untersuchten Makrofaunaarten *Macoma*

baltica und *Pectinaria koreni* wird davon ausgegangen, daß die Tiere unabhängig von ihrer Größe die gleiche Menge Partikel aufnehmen, da kein Zusammenhang zwischen der Körpergröße bzw. der Biomasse der Tiere und dem Mageninhalt und der enthaltenen Partikel bestand. Die Partikelanzahl der untersuchten Tiere wird multiplikativ auf die Zahl im Kern vorhandener Tiere hochgerechnet. Für die biogenen Strukturen Macoma Hügel und Pectinaria Trichter wird jeweils eine Fläche von 1 cm² berechnet und mit der Anzahl der Tiere multipliziert unter der Annahme, daß jedes Tier eine entsprechende Struktur produziert. Die von den untersuchten Arten beeinflusste Fläche wird von der Gesamtfläche abgezogen, und für die übrige Fläche (242 cm²) wird die berechnete mittlere Partikelzahl für 1 cm² Kernfläche hochgerechnet, diese Zahl enthält den Beitrag der übrigen biogenen Strukturen auf der besiedelten Sedimentfläche. Für die Berechnung der Kernfläche wird neben den Trichtern und Hügeln für jede Macoma eine beeinflusste Fläche von 3 cm² (15 x 3 cm² = 45 cm²) abgezogen.

Die Partikelanzahl auf 314 cm² Kanalboden ergibt sich aus der berechneten mittleren Partikelzahl pro cm² Sediment. Der Vergleich der beiden Sedimentflächen ist in Tabelle 6 und Abb. 13 dargestellt.

Tabelle 6: Vergleich zwischen der Partikeldeposition auf der Kanalbodenfläche (Kanalb.) und der Kernoberfläche (Kern), die sich aus der Addition der verschiedenen Kompartimente ergibt: Sedimentoberfläche des Kernes (Kernfläche), biogene Strukturen (Macoma Hügel und Pectinaria Trichter) und Makrofaunaorganismen (*M. baltica* und *P. koreni*) Es sind die berechneten Flächen in cm² angegeben und die Anzahl (n) der im Kern enthaltenen Tiere aufgeführt.

Part. ø	Kanalb. 314 cm ²	Kern 314 cm ²	Kern- Fläche 242 cm ²	Macoma Hügel 15 cm ²	Macoma n=15	Pect. Trichter 12 cm ²	Pectin. n=12
1 µm	11618	62021	22990	2940	29160	3444	3487
2 µm	14444	76734	30250	3015	35362	3372	4735
3 µm	9106	42142	16214	2085	19362	1944	2537
6 µm	29202	138745	58806	3600	64248	5652	6439
10 µm	2198	19970	8712	375	8085	816	1982
25 µm	7850	35799	24200	1935	4806	4092	766
40 µm	61230	106925	91234	5775	4242	5604	70
total	135648	482336	252406	19725	165265	24924	20016

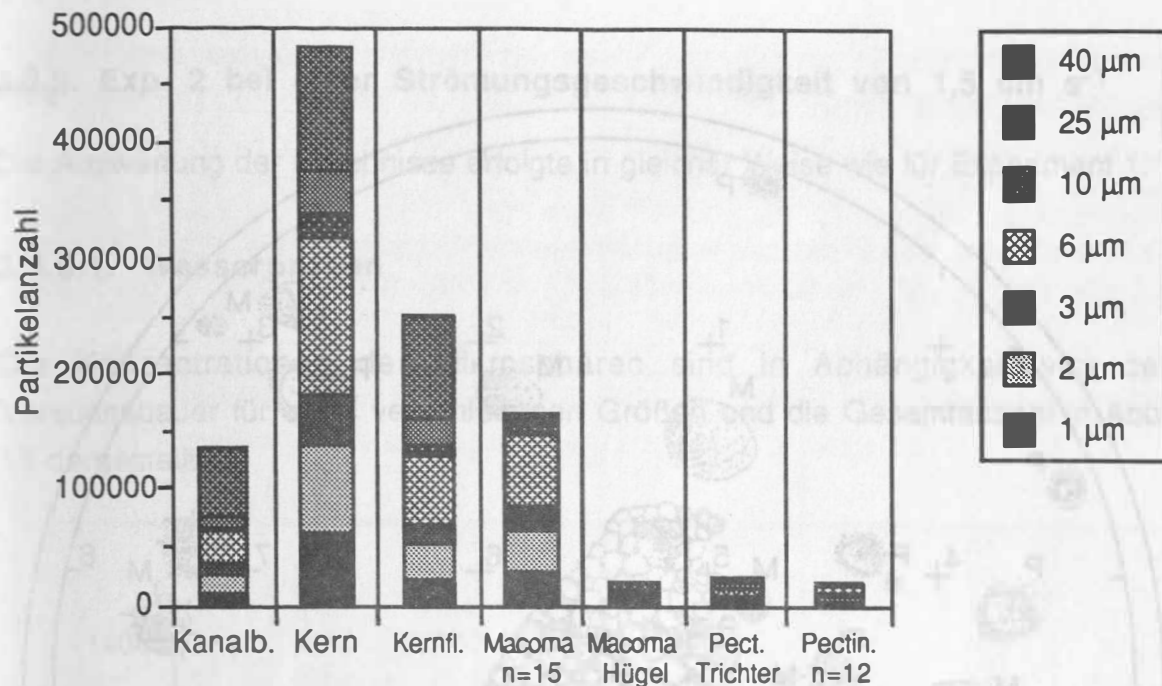


Abb.13: Partikelanzahl pro 314 cm² Kanalbodenfläche (Kanalb.) im Vergleich mit der Gesamtpartikelanzahl auf dem Sedimentkern (Kern) mit einer Oberfläche von ebenfalls 314 cm². Die Gesamtpartikelanzahl ergibt sich aus der Addition der untersuchten Kompartimente: Kernfläche, biogene Strukturen (Macoma Hügel und Pectinaria Trichter) und untersuchte Makrofaunaorganismen (*M.baltica* und *P.koreni*), die Anzahl der im Kern enthaltenen Tiere ist angegeben (n).

Betrachtet man die Gesamtdeposition, so ist die Partikelanzahl auf der Kernoberfläche im Vergleich zur gesiebten Sedimentfläche des Kanalbodens um den Faktor 3,5 erhöht. Dabei ist die Anzahl der 1 und 2 µm großen Partikel jeweils um das 5,3 fache erhöht, die Anzahl der 3 und 6 µm Partikel ist um den Faktor 4,6 bzw. 4,7 angestiegen, die Zahl der 10 µm um den Faktor 9 und die Zahl der 25 µm Partikel um den Faktor 4,5 erhöht, während die Anzahl der 40 µm Partikel nur um den Faktor 1,7 gesteigert ist. Die Partikelanzahl auf der Kernfläche macht 52,3 % der Gesamtpartikel des Kernes aus, *Macoma baltica* trägt einen Anteil von 34,3 % mit der Aufnahme von Partikeln und 4,1 % mit der Hügelkonstruktion bei, während *Pectinaria koreni* selbst nur mit 4,1 % beteiligt ist und durch die Trichter nochmal mit 5,2 %.

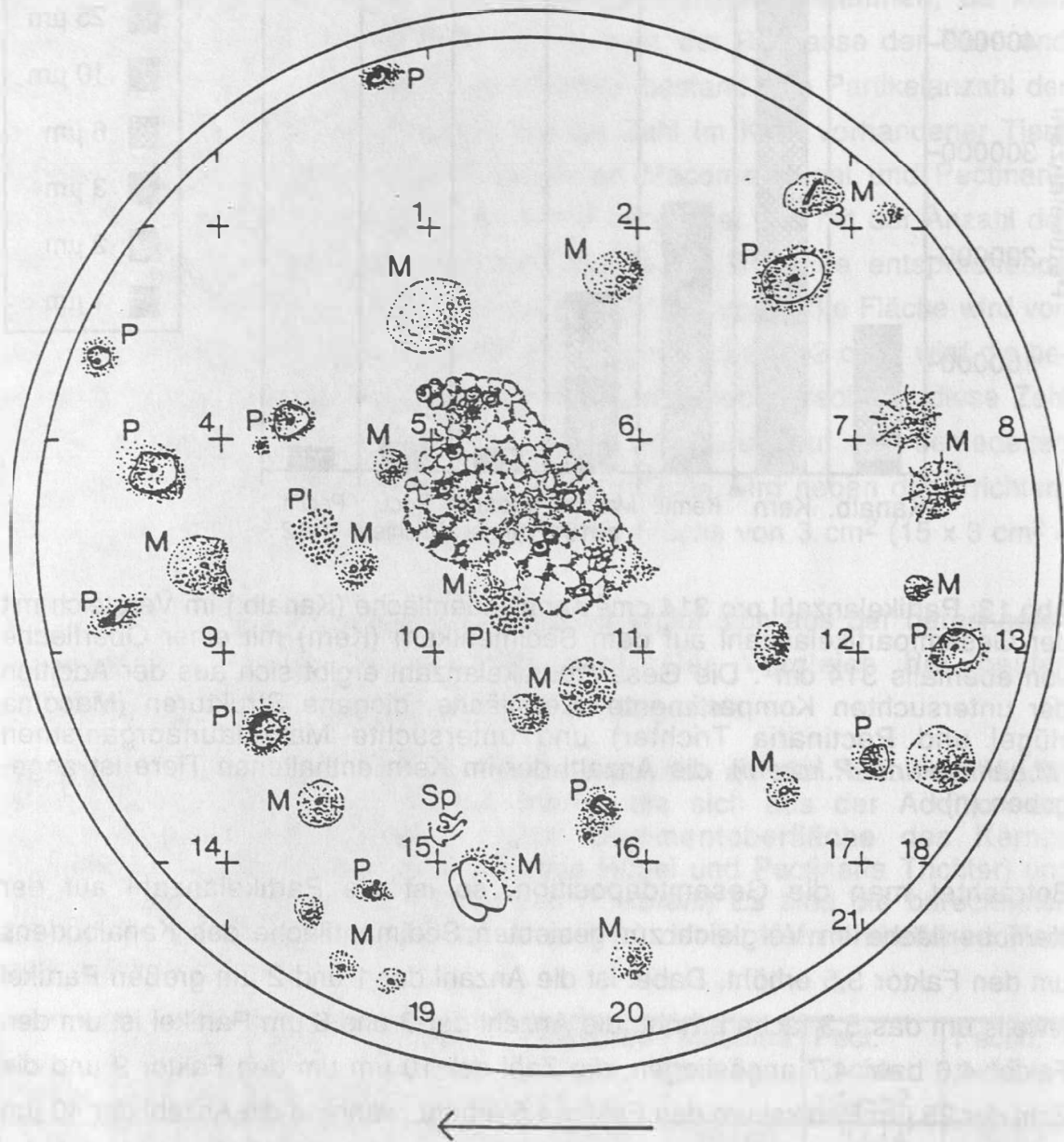


Abb. 14: Oberflächenstruktur des Sedimentkernes aus Experiment 1. Mit M sind die Hügel von *Macoma baltica* bezeichnet und mit P die Trichterstrukturen von *Pectinaria koreni*. Die Skizzierung der Oberfläche und die Zuordnung der Makrofaunaorganismen erfolgte mit Hilfe des Rasters (angedeutet durch Kreuze und die Feldnumerierung). Weitere Bezeichnungen sind PI für Pelletansammlungen auf der Oberfläche und SP für Schneckenspuren. Der Pfeil kennzeichnet die Strömungsrichtung.

3.3.3. Exp. 2 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in gleicher Weise wie für Experiment 1.

3.3.3.1. Wasserproben

Die Konzentrationen der Mikrosphären sind in Abhängigkeit von der Versuchsdauer für die 7 verschiedenen Größen und die Gesamtanzahl in Abb. 15 dargestellt.

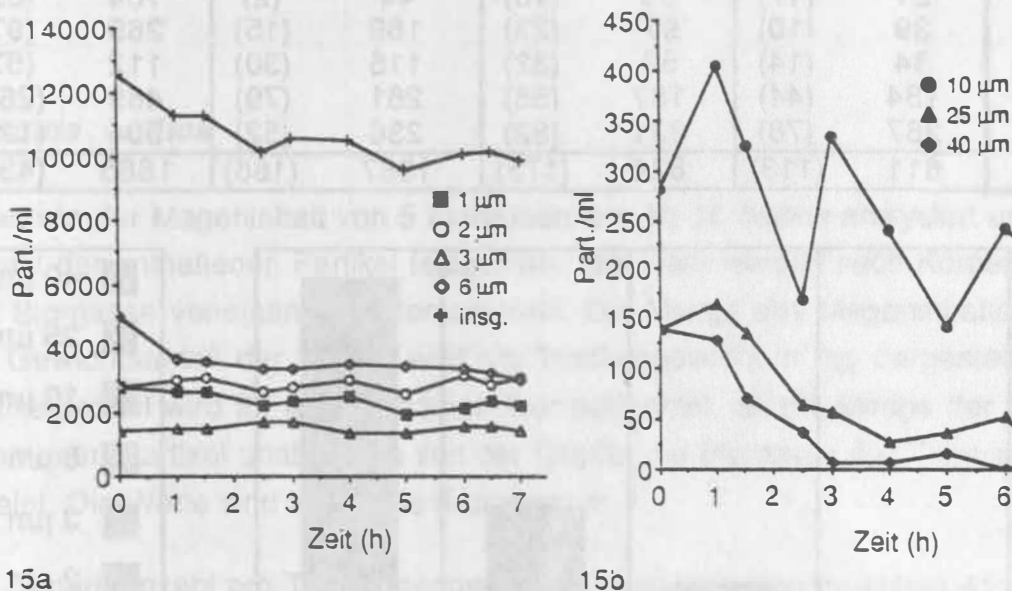


Abb. 15a und 15b: Partikelkonzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Die Anzahl der Mikrosphären pro ml der Größen $1 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$ sowie die Gesamtpartikelanzahl sind in 15a dargestellt. Die Konzentrationen der $10 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$ und $40 \mu\text{m}$ großen sind in 15b dargestellt.

3.3.3.2. Sedimentproben

Es werden die Mittelwerte der Partikelanzahl von 9 parallelen Sedimentproben von der Kanalbodenfläche mit den Mittelwerten entsprechender Proben von der Kernoberfläche verglichen. Außerdem wurden auf der Kernoberfläche die biogenen Strukturen Hügel von *M. baltica* und Trichter von *P. koreni* beprobt. Hier

wurden von jeweils 5 Parallelen die Werte gemittelt und mit den anderen verglichen. (Tabelle 7 und Abb. 16)

Tabelle 7: Partikelanzahl pro cm² Sediment der 7 Partikelgrößen und die Gesamtzahl (total). Verglichen wird die Kanalbodenfläche mit der Kernoberfläche, sowie die biogenen Strukturen: Hügel von *M. baltica* (Macoma H.) und Trichter von *P. koreni* (Pectin. Tr.). Es sind die Mittelwerte (x) mit entsprechenden Standardabweichungen (s) der Parallelproben (n) dargestellt.

Part. ø	Kanalb. (n=9)		Kernfl. (n=9)		Macoma (n=5)		Pectin. (n=5)	
	x	s	x	s	H.	s	Tr.	s
					x		x	
1 µm	34	(15)	75	(21)	151	(13)	179	(52)
2 µm	42	(40)	47	(10)	113	(27)	225	(109)
3 µm	21	(17)	33	(13)	44	(2)	104	(65)
6 µm	39	(10)	97	(23)	169	(15)	269	(97)
10 µm	34	(14)	50	(32)	115	(30)	112	(57)
25 µm	184	(44)	187	(58)	261	(79)	489	(261)
40 µm	267	(78)	331	(82)	236	(52)	504	(123)
total	611	(113)	824	(175)	1087	(166)	1885	(430)

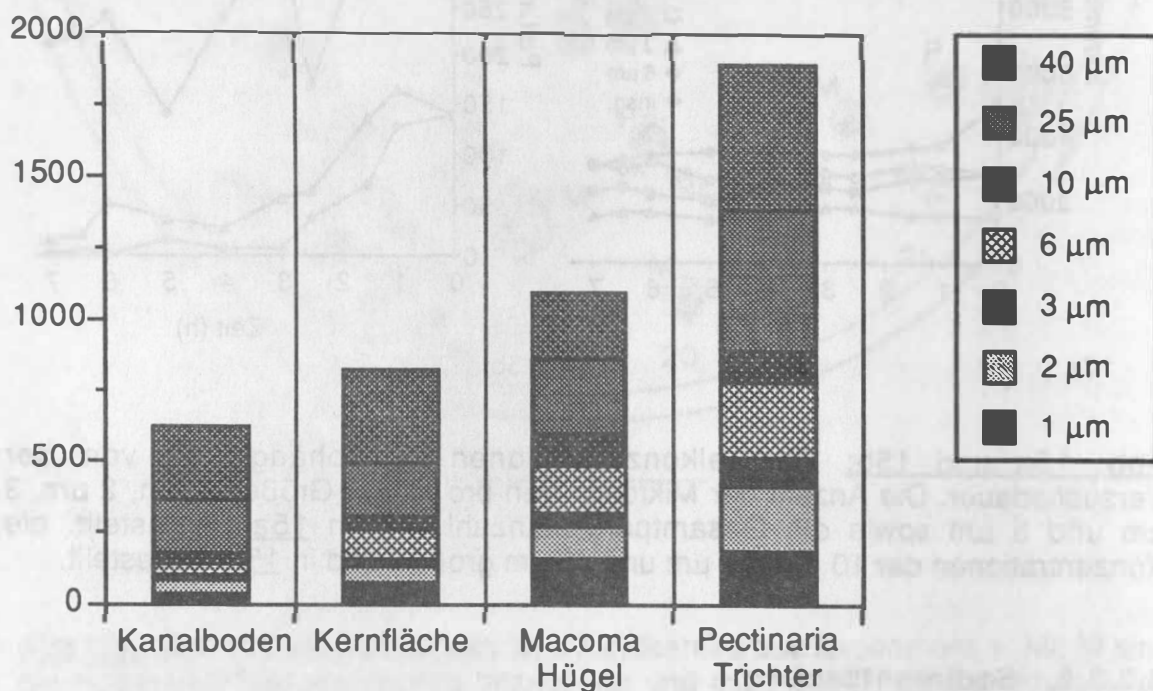


Abb. 16: Vergleich der Partikelanzahl pro cm² auf den Sedimentflächen des Kanalbodens und der Kernoberfläche, sowie an den biogenen Strukturen *Macoma* Hügel und *Pectinaria* Trichter.

Die Partikelanzahl auf der Kernfläche ist im Vergleich zur Kanalbodenfläche um den Faktor 1,3 erhöht. An den Hügeln von *M. baltica* ist die Partikeldeposition nochmal um den Faktor 1,3 erhöht, und in den Trichtern von *P. koreni* kommt es zu einer Partikelanreicherung um den Faktor 2,2 verglichen mit der Kernoberfläche und um den Faktor 3,1 im Gegensatz zur Kanalbodenfläche. Auf der Sedimentfläche des Kernes und an den Hügeln von *M. baltica* ist die Anzahl der 1 µm bis 10 µm großen Partikel erhöht, während die 25 µm und 40 µm großen Partikel nur gering in der Zahl zunehmen. In den Trichtern von *P. koreni* nimmt die Anzahl aller Partikelgrößen um das 2 bzw. 3-fache zu.

3.3.3.3. Mageninhalte

Macoma baltica

Es wurde der Mageninhalt von 5 Individuen der Art *M. baltica* analysiert und die Anzahl der enthaltenen Partikel festgestellt. Die Tiere werden nach Körpergröße und Biomasse voneinander unterschieden. Die Menge des Mageninhaltes und der Gewichtsanteil der Pellets wird als Trockengewicht in mg dargestellt. Die Partikelanzahl wird für jedes einzelne Tier betrachtet, da die Menge der aufgenommenen Partikel unabhängig von der Größe und Biomasse der Tiere zu sein scheint. Die Werte sind in Tabelle 8 dargestellt.

Die Gesamtanzahl pro Tier aufgenommener Partikel variiert zwischen 4117 und einem Maximum von 82510. Der mittlere Wert aufgenommener Partikel beträgt 35172. Betrachtet man die Größenverteilung der Partikel in den Mageninhalten, so beträgt der Anteil der 1 µm, 2 µm und 3 µm großen Partikel ca. 50 %, die 6 µm-Partikel tragen ca. 30 % zur Gesamtpartikelzahl bei, während die größeren (10 µm, 25 µm und 40 µm) Partikel die restlichen 20 % ausmachen. Auch in den Pellets ist die Zahl der größeren Partikel (10 µm, 25 µm und 40 µm) besonders gering.

Tabelle 8: Anzahl der 7 verschiedenen Partikelgrößen und Gesamtanzahl (total) pro Individuum der Art *Macoma baltica*. Es werden 5 Tiere betrachtet, die nach Länge in [mm], Trockengewicht (Tg. Tier [mg]) und aschefreiem Trockengewicht (AFTG [mg]) unterschieden werden. Verglichen wird die Partikelanzahl im Mageninhalt (TG Ma [mg]) der einzelnen Tiere insgesamt, und der Anteil in den Pellets (Tg. Pell. [mg]) gefundener Partikel. Der Gewichtsanteil der Pellets (Tg.Pell.[mg]) und die hierin enthaltene Partikelanzahl sind in Klammern dargestellt.

	<u>Macoma 1</u>	<u>Macoma 2</u>	<u>Macoma 3</u>	<u>Macoma 4</u>	<u>Macoma 5</u>
Länge [mm]:	15	13	13	9	15
Tg. Tier[mg]:	353,6	274,7	136,7	166,0	295,8
AFTG [mg]:	100,3	66,2	60,5	31,4	51,8
<u>Tg. Ma [mg]:</u>	<u>41.2</u>	<u>25.7</u>	<u>35.9</u>	<u>13.0</u>	<u>30.4</u>
Tg.Pell.[mg]	(3,6)	(4,0)	(2,0)	(1,2)	(16,4)
Part. ø					
1 µm	9842 (308)	5431 (3900)	867 (539)	712 (318)	1735 (1002)
2 µm	12789 (1059)	30132 (9620)	7497 (2716)	577 (202)	5822 (2545)
3 µm	4796 (520)	12971 (1964)	3555 (1242)	259 (57)	4433 (1195)
6 µm	13588 (2956)	27301 (1155)	11248 (607)	2397 (1858)	8308 (1060)
10 µm	500 (96)	3640 (231)	2159 (19)	115 (96)	693 (19)
25 µm	77 (19)	1762 (0)	1175 (38)	0 (38)	661 (25)
40 µm	0 (19)	1273 (0)	741 (28)	19 (0)	347 (0)
total	41611 (4977)	82510 (16870)	27242 (5189)	4117 (2569)	20380 (5846)

Abb. 17 stellt den Vergleich zwischen der Depositionsrates einer Muschel und der Anzahl der Partikel auf einer von ihr beeinflussten Fläche von 3 cm² dar.

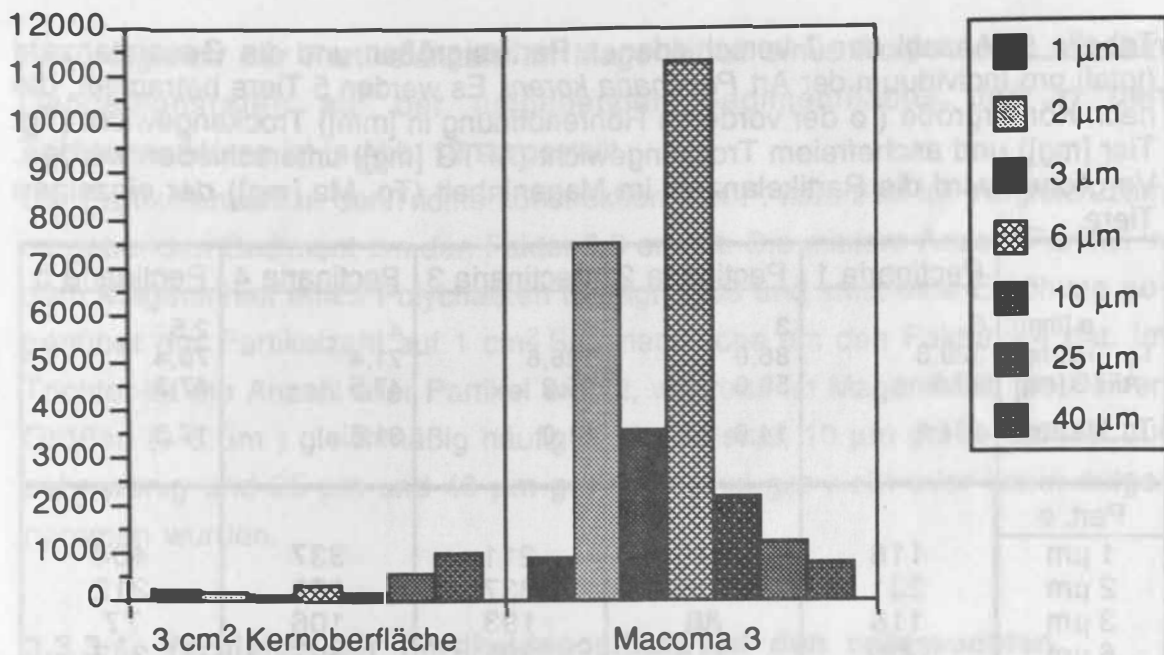


Abb.17: Vergleich des Mageninhaltes eines Individuums der Art *M. baltica* (Macoma 3 der Tabelle 8) mit der Partikeldeposition auf 3 cm² Kernoberfläche, die dem Aktionsradius des Ingestionssipho auf der Sedimentfläche entspricht.

Vergleicht man die Depositionsrate einer *M. baltica* mit der Anzahl der deponierten Partikel auf 3 cm² Sedimentfläche, so ist die Partikelanzahl um den Faktor 11 gegenüber der Kernoberfläche höher. Der Anteil der Partikel der Größe 1 µm nimmt dabei um den Faktor 3,8 zu, während die anderen kleinen Partikel (2 µm, 3 µm und 6 µm) sich um den Faktor 53, 36 und 39 erhöhen. Die Anzahl 10 µm großer Partikel erhöht sich um den Faktor 14,3, die Zahl der 25 µm-Partikel verdoppelt sich, und die 40 µm-Partikel nehmen in ihrer Anzahl um den Faktor 1,3 ab.

Pectinaria koreni

Es werden 5 Tiere dieser Art betrachtet und nach Körpergröße und Biomasse (Trockengewicht, AFTG) voneinander unterschieden. Die Anzahl der aufgenommenen Partikel wird für jedes einzelne Tier betrachtet, da auch hier keine Korrelation zwischen Mageninhalt und der Körpergröße oder der Biomasse der Tiere bestand.

Tabelle 9: Anzahl der 7 verschiedenen Partikelgrößen und die Gesamtanzahl (total) pro Individuum der Art *Pectinaria koreni*. Es werden 5 Tiere betrachtet, die nach Körpergröße (\varnothing der vorderen Röhrenöffnung in [mm]) Trockengewicht (Tg. Tier [mg]) und aschefreiem Trockengewicht (AFTG [mg]) unterschieden werden. Verglichen wird die Partikelanzahl im Mageninhalt (Tg. Ma [mg]) der einzelnen Tiere.

	<u>Pectinaria 1</u>	<u>Pectinaria 2</u>	<u>Pectinaria 3</u>	<u>Pectinaria 4</u>	<u>Pectinaria 5</u>
\varnothing [mm]:	6	3	4	4	2,5
Tg. Tier[mg]:	320,3	86,0	126,6	71,4	70,4
AFTG [mg]:	93,8	58,0	95,2	47,5	47,3
Tg. Ma.[mg]:	104,6	14,6	31,0	31,3	17,3
Part. \varnothing					
1 μm	116	240	211	337	404
2 μm	231	115	337	279	212
3 μm	116	86	193	106	77
6 μm	1427	115	365	597	347
10 μm	173	9	10	19	67
25 μm	39	0	0	19	10
40 μm	58	0	0	10	10
total	2160	565	1298	789	1127

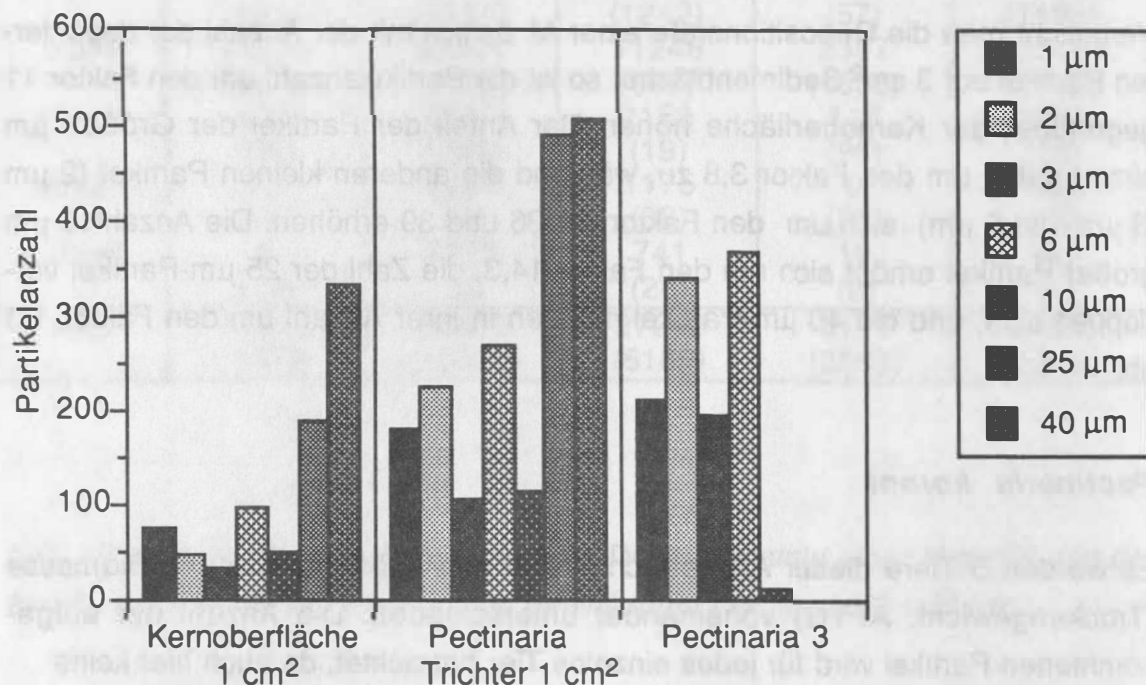


Abb. 18: Vergleich der Partikeldeposition auf 1 cm² Kernoberfläche (Gesamtanzahl: 824) und 1 cm² Trichterfläche (Gesamtanzahl: 1885) mit der Partikelanzahl im Mageninhalt eines *Pectinaria* (*Pectinaria 3* der Tabelle 9) mit einer Gesamtpartikelaufnahme von 1298.

Ein Vergleich der Partikelanzahl im Mageninhalt eines Polychaeten mit den Depositionsraten auf der umgebenden Sedimentfläche und in den Trichterstrukturen ist in Abb. 18 dargestellt.

Die Partikelanzahl in der Trichterkonstruktion von *P. koreni* ist im Vergleich zum umgebenden Sediment um den Faktor 2,3 erhöht. Die mittlere Anzahl Partikel in dem Mageninhalt eines Polychaeten beträgt 1188 und stellt eine Erhöhung gegenüber der Partikelzahl auf 1 cm² Sedimentfläche um den Faktor 1,4 dar. Im Trichter ist die Anzahl aller Partikel erhöht, während im Mageninhalt die kleinen Größen (1-6 µm) gleichmäßig häufig zu finden sind, 10 µm große Partikel nur sehr wenig und 25 µm und 40 µm große Partikel gar nicht oder kaum aufgenommen wurden.

3.3.3.4. Vergleich der Partikeldeposition auf den untersuchten Sedimentflächen

Für den Vergleich der Partikeldeposition auf den beiden unterschiedlichen Flächen wurde die Partikelanzahl jeweils für eine Fläche von 314 cm² (Kernoberfläche) hochgerechnet. Die Partikelanzahl auf der Kernoberfläche setzt sich aus den Beiträgen der untersuchten Kompartimente zusammen. Der Vergleich ist in Tabelle 10 und Abb. 19 dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich zwischen der Partikeldeposition auf der Kanalbodenfläche (Kanalb.) und der Kernoberfläche (Kern), die sich aus der Addition der verschiedenen Kompartimente ergibt: Sedimentoberfläche des Kernes (Kernfläche), biogene Strukturen (Macoma Hügel und Pectinaria Trichter) und den Makrofaunaorganismen (*M. baltica* und *P. koreni*). Es sind die berechneten Flächen in cm² angegeben und die Anzahl (n) der im Kern enthaltenen Makrofaunaorganismen der untersuchten Arten aufgeführt.

Part. ø	Kanalb. 314 cm ²	Kern 314 cm ²	Kern- Fläche 259 cm ²	Macoma Hügel 11 cm ²	Macoma n=11 (33 cm ²)	Pect. Trichter 11 cm ²	Pectin. n=11
1 µm	10676	68288	19425	1661	40891	1969	2878
2 µm	13188	146524	12173	1243	124997	2475	2583
3 µm	6594	60791	8547	484	47727	1144	1271
6 µm	12246	179241	25123	1859	138252	2959	6272
10 µm	10676	32213	12950	1265	15635	1232	611
25 µm	57776	62589	48433	2871	5757	5379	149
40 µm	71289	99277	85729	2596	5236	5544	172
total	182445	648923	212381	11979	378495	20702	13936

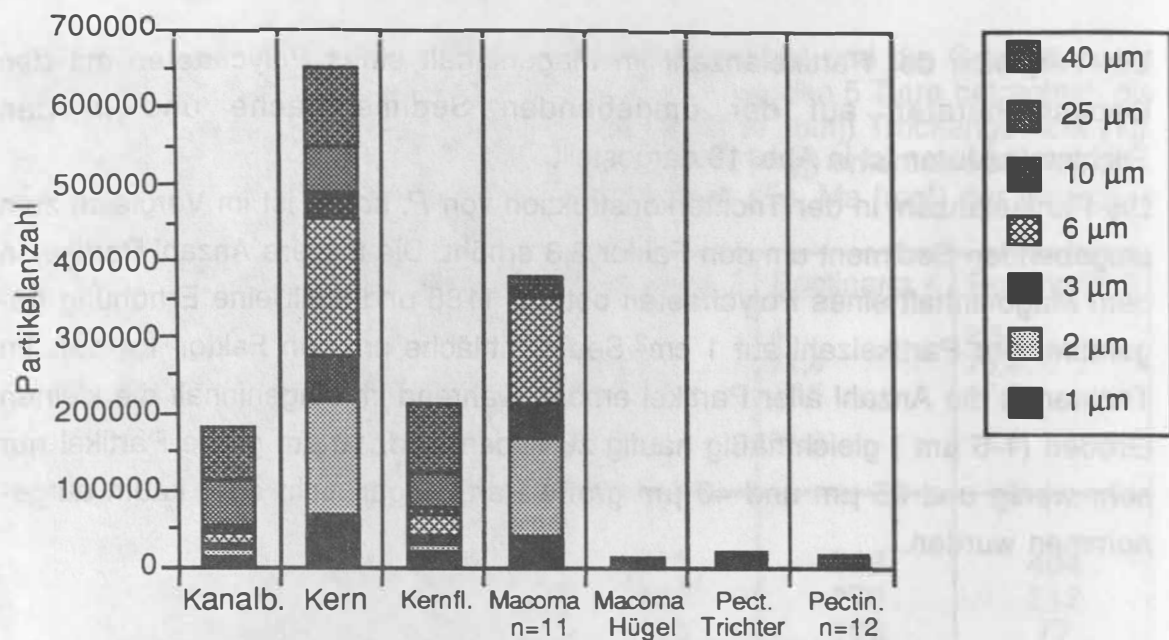


Abb. 19: Partikelanzahl pro 314 cm² Kanalbodenfläche (Kanalb.) im Vergleich mit der Gesamtpartikelanzahl auf dem Sedimentkern (Kern) mit einer Oberfläche von ebenfalls 314 cm². Die Gesamtpartikelanzahl ergibt sich aus der Addition der untersuchten Kompartimente: Kernfläche, biogene Strukturen (Macoma Hügel und Pectinaria Trichter) und untersuchte Makrofaunaorganismen (*M. baltica* und *P. koreni*), die Anzahl der im Kern enthaltenen Tiere ist angegeben (n).

Bei der Betrachtung der Gesamtpartikelzahl ist die Deposition auf der Fläche des Sedimentkernes im Vergleich zum Kanalboden um den Faktor 3,5 erhöht. Dabei tragen vor allem die kleinen Partikel zu dieser Erhöhung bei. Die Anzahl der 1 µm großen Partikel steigt um den Faktor 6,4; die Anzahl der 2 µm großen Partikel um den Faktor 11, die Zahl der 3 µm Partikel um den Faktor 9,2 und die Zahl der 6 µm Partikel erhöht sich um den Faktor 14,6, während die Anzahl der 10 µm großen Partikel sich um den Faktor 3 erhöht und die Zahl der 25 µm und 40 µm Partikel sich nur um den Faktor 1,1 bzw. 1,3 steigert. Mit 58 % tragen die 11 Individuen von *M. baltica* durch die Nahrungsaufnahme am stärksten zur Partikeldeposition auf der Kernfläche bei, während die Hügelstrukturen zusätzlich einen Anteil von 1,8 % haben. Die Partikelzahl auf der Sedimentfläche des Kernes macht einen Anteil von 32,7 % aus. Die Individuen von *P. koreni* tragen nur 2,1 % durch aufgenommene Partikel und 3,2 % durch die erhöhte Deposition in ihren Trichterstrukturen bei.

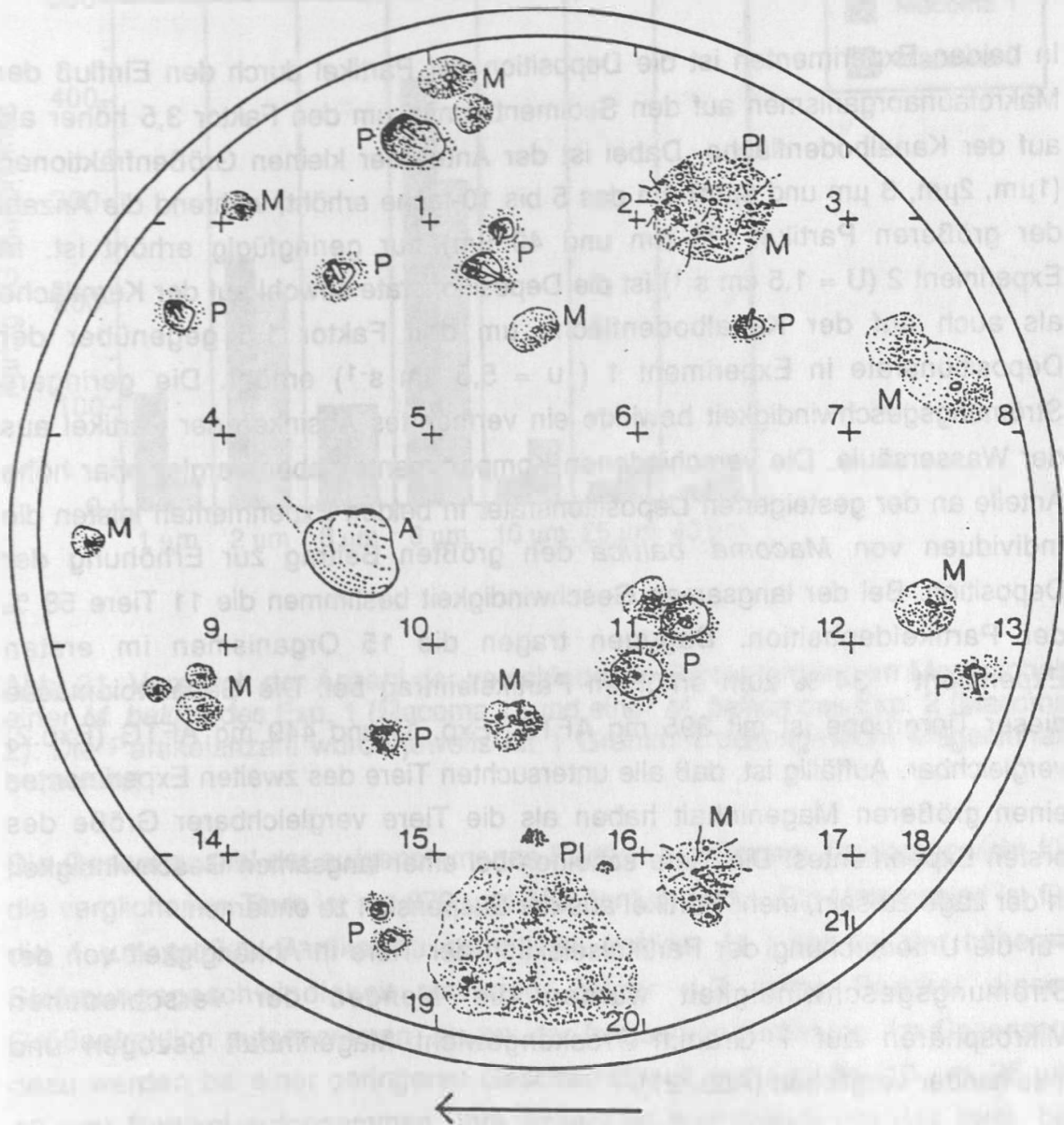


Abb. 20: Oberflächenstruktur des Sedimentkernes aus Experiment 2. Mit M sind die Hügel von *Macoma baltica* bezeichnet und mit P die Trichterstrukturen von *Pectinaria koreni*. Die Skizzierung der Oberfläche und die Zuordnung der Makrofaunaorganismen erfolgte mit Hilfe des Rasters (angedeutet durch Kreuze und die Feldnumerierung). Weitere Bezeichnungen sind A für *Astarte borealis* und PI für Pelletansammlungen auf der Oberfläche. Der Pfeil kennzeichnet die Strömungsrichtung.

3.3.4. Vergleich der beiden Experimente

In beiden Experimenten ist die Deposition der Partikel durch den Einfluß der Makrofaunaorganismen auf den Sedimentkernen um den Faktor 3,5 höher als auf der Kanalbodenfläche. Dabei ist der Anteil der kleinen Größenfraktionen ($1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ und $6\mu\text{m}$) um das 5 bis 10-fache erhöht, während die Anzahl der größeren Partikel ($25\mu\text{m}$ und $40\mu\text{m}$) nur geringfügig erhöht ist. In Experiment 2 ($U = 1,5\text{ cm s}^{-1}$) ist die Depositionsrate sowohl auf der Kernfläche als auch auf der Kanalbodenfläche um den Faktor 1,5 gegenüber der Depositionsrate in Experiment 1 ($u = 5,5\text{ cm s}^{-1}$) erhöht. Die geringere Strömungsgeschwindigkeit bewirkte ein vermehrtes Absinken der Partikel aus der Wassersäule. Die verschiedenen Kompartimente haben vergleichbar hohe Anteile an der gesteigerten Depositionsrate. In beiden Experimenten leisten die Individuen von *Macoma baltica* den größten Beitrag zur Erhöhung der Deposition. Bei der langsamen Geschwindigkeit bestimmen die 11 Tiere 58 % der Partikeldeposition. Dagegen tragen die 15 Organismen im ersten Experiment 34 % zum erhöhten Partikeleintrag bei. Die Gesamtbiomasse dieser Tiergruppe ist mit 395 mg AFTG (Exp. 1) und 449 mg AFTG (Exp.2) vergleichbar. Auffällig ist, daß alle untersuchten Tiere des zweiten Experimentes einen größeren Mageninhalt haben als die Tiere vergleichbarer Größe des ersten Experimentes. Die Tiere scheinen bei einer langsamen Geschwindigkeit in der Lage zu sein, mehr Partikel aus der Suspension zu entfernen.

Für die Untersuchung der Partikelselektion der Tiere in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit wurden die Mengen der verschiedenen Mikrosphären auf 1 Gramm Trockengewicht Mageninhalt bezogen und miteinander verglichen (Abb. 21).

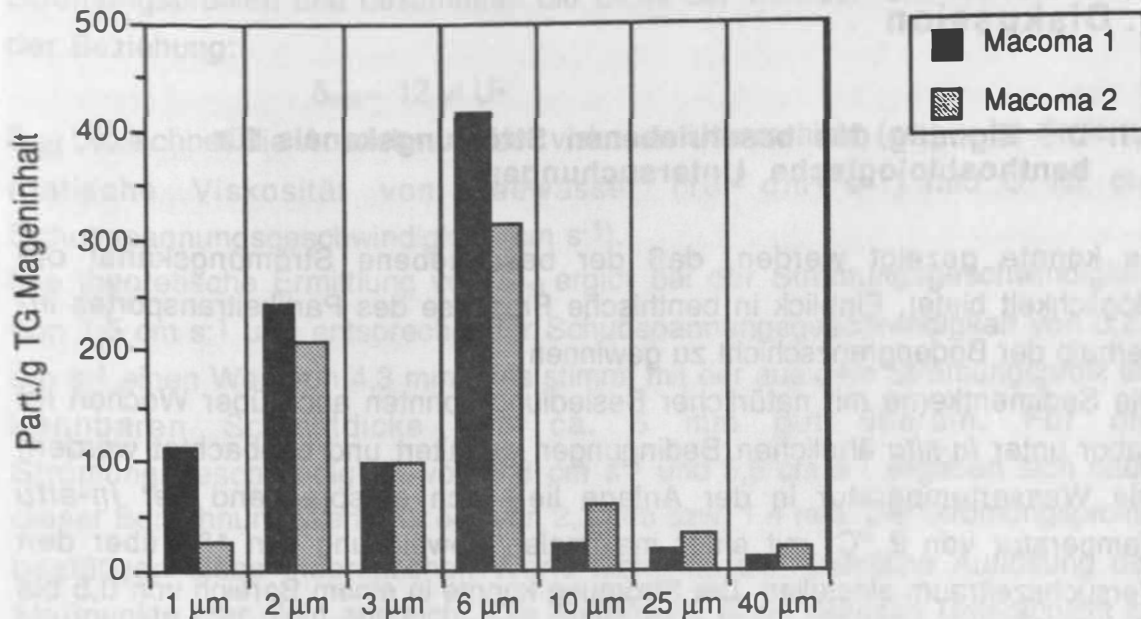


Abb. 21: Vergleich der Anzahl der verschiedenen Partikelgrößen im Mageninhalt einer *M. baltica* des Exp. 1 (Macoma 1) und einer *M. baltica* des Exp. 2 (Macoma 2). Die Partikelanzahl wurde jeweils für 1 Gramm Trockengewicht Mageninhalt berechnet.

Die Gesamtanzahl der aufgenommenen Partikel pro Gramm Trockengewicht für die verglichenen Tiere ist mit 879 und 785 ähnlich hoch. Ein Unterschied ist für die 1 µm großen Partikel zu sehen. *M. baltica* (1) hat bei der höheren Strömungsgeschwindigkeit um den Faktor 4,7 mehr Partikel dieser Größenfraktion aufgenommen, als bei der langsamen Strömung. Im Gegensatz dazu werden bei einer geringeren Geschwindigkeit mehr große (10 µm, 25 µm, 40 µm) Partikel aufgenommen. Ihre Anzahl ist hier jeweils um das zwei- bis dreifache erhöht.

4. Diskussion

4.1. Die Eignung des beschriebenen Strömungskanals für benthosbiologische Untersuchungen

Es konnte gezeigt werden, daß der beschriebene Strömungskanal die Möglichkeit bietet, Einblick in benthische Prozesse des Partikeltransportes innerhalb der Bodengrenzschicht zu gewinnen.

Die Sedimentkerne mit natürlicher Besiedlung konnten auch über Wochen im Labor unter *in-situ* ähnlichen Bedingungen gehalten und beobachtet werden. Die Wassertemperatur in der Anlage ließ sich entsprechend der *in-situ* Temperatur von 2 °C, mit einer maximalen Abweichung von 1°C über den Versuchszeitraum einstellen. Die Strömung konnte in einem Bereich von 0,5 bis 5,5 cm s⁻¹ variiert, und auch über mehrere Tage oder Wochen konstant gehalten werden. Die relativ große Kernoberfläche von 314 cm² erlaubte die Untersuchung einer Tiergemeinschaft und ihrer Interaktionen mit dem bodennahen Partikelfluß.

Durch die Messungen der hydrodynamischen Parameter konnte gezeigt werden, daß die Bedingungen für die Ausbildung einer Bodengrenzschicht erfüllt sind. Die Strömung in der Rinne ist gerichtet und über der Testfläche gleichmäßig und unbeeinflusst von den Wandeffekten verteilt.

Zur Messung derjenigen Parameter, deren Kenntnis notwendig ist, um die Hydrodynamik in einem Kanal beschreiben und damit natürliche Strömungsbedingungen angemessen simulieren zu können, benötigt man Strömungsmesser, die kleinräumige Messungen ermöglichen und hohe Empfindlichkeit bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten besitzen. Die Thermistorströmungssonde hat sich hierfür sehr gut bewährt. Es konnten vertikale Strömungsprofile mit einer räumlichen Auflösung von 1 mm erstellt werden. Die Strömungsprofile bei drei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (1,5 cm s⁻¹, 3,8 cm s⁻¹ und 5,5 cm s⁻¹) zeigten jeweils einen für die Bodengrenzschicht charakteristischen Verlauf, mit entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit unterschiedlicher Ausprägung der Log-Schicht. Der Einsatz der Sonde in Millimeterabständen vom Boden ermöglichte die experimentelle Ermittlung einer viskosen Unterschicht bei der geringen Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 cm s⁻¹. Muschenheim (1986) und Nowell & Jumars (1987) extrapolierten einen linearen Kurvenverlauf in ihren

Strömungsprofilen und bestimmten die Dicke der viskosen Unterschicht nach der Beziehung:

$$\delta_{vsl} = 12 \nu / U^*$$

δ_{vsl} bezeichnet die Ausdehnung der viskosen Unterschicht (cm), ν ist die kinematische Viskosität von Seewasser ($10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) und U^* ist die Schubspannungsgeschwindigkeit (cm s^{-1}).

Die theoretische Ermittlung von δ_{vsl} ergibt bei der Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ und entsprechender Schubspannungsgeschwindigkeit von $0,28 \text{ cm s}^{-1}$ einen Wert von 4,3 mm, dies stimmt mit der aus dem Strömungsprofil erkennbaren Schichtdicke von ca. 5 mm gut überein. Für die Strömungsgeschwindigkeit von $3,8 \text{ cm s}^{-1}$ und $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ ergeben sich nach dieser Berechnung Werte für δ_{vsl} von 2,3 mm bzw. 1,4 mm. Die Strömungsprofile bestätigen diese theoretischen Werte nicht, da die räumliche Auflösung der Meßpunkte hier nicht ausreicht. Die Ausbildung einer viskosen Unterschicht ist wichtig für die Betrachtung von Stoffflüssen ins und aus dem Sediment. Aufgrund der langsamen und laminaren Strömung in dieser Zone wird eine turbulente Durchmischung verhindert, und es herrscht ein quasi stagnierender Zustand. Es kommt zu einer Anreicherung von partikulärem Material, die erhöhte Sestonkonzentration in der viskosen Unterschicht bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ bestätigt dies (s. Ergebnisse S.36, Abb. 7a). Der Austausch gelöster Substanzen erfolgt langsamer und hauptsächlich durch molekulare Diffusion im Gegensatz zur turbulenten Vermischung in der darüberliegenden Schicht (Gundersen & Jørgensen, 1990).

Nowell & Jumars (1987) halten einen Strömungskanal in der Art und Größe nach dem Modell von Vogel (1983) für ungeeignet, um Untersuchungen von Bodengrenzschichtprozessen durchzuführen, da er zu klein sei und dreidimensionale Strömungsmuster die Ausbildung einer Bodengrenzschicht verhindern. Dagegen hat die Messung der hydrodynamischen Parameter in dem beschriebenen Kanal, der sich in der Art des Antriebs, der Gleichrichtung der Strömung und der Gestaltung der Kanalbodenfläche von der Konstruktion nach Vogel (1983) unterscheidet, gezeigt, daß sich bei Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ eine Bodengrenzschicht ausbildet und damit die Bedingungen für die Untersuchung bodennaher Prozesse unter dem Einfluß von Strömung gegeben sind.

4.2. Das Resuspensionsexperiment

Um die Auswirkung der Strömung auf die Resuspension partikulären Materials vom Sediment in die Wassersäule ermessen zu können, ist es wichtig, die Schubspannungsgeschwindigkeit zu ermitteln, die die Resuspension verursacht. Die hohe Anzahl der Meßpunkte (13 - 16) ermöglichte eine genaue Ermittlung der Schubspannungsgeschwindigkeit U_* aus der Steigung des logarithmischen Strömungsprofils (Profilmethode). Es sind mindestens 6 (Schauer 1982) oder sogar 10 (Nowell et. al, 1980) Meßpunkte notwendig, um über diesen Parameter eine exakte Aussage machen zu können. Zum Vergleich: die Strömungsprofile von Muschenheim (1987) enthalten 5 Meßpunkte mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm. Die Schubspannungsgeschwindigkeit variierte erwartungsgemäß mit der Strömungsgeschwindigkeit; sie hatte bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ einen Wert von $0,28 \text{ cm s}^{-1}$ und erhöhte sich bei einer Geschwindigkeit von $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ auf $0,88 \text{ cm s}^{-1}$. Zum Vergleich: die kritische Erosionsschubspannungsgeschwindigkeit U_*^{crit} beträgt für Feinsand ($125 \mu\text{m}$ bis $250 \mu\text{m}$) nach der Shieldskurve ca. 1 cm s^{-1} (Yalin, 1972).

Der Kanalboden war mit Sediment natürlicher Korngrößenzusammensetzung bedeckt und bildete mit dem eingefügten Sedimentkern eine ebene und dem Meeresboden vergleichbare Fläche, so daß die Wirkung einer erhöhten Bodenströmung auf die Resuspension von Partikeln untersucht werden konnte.

Die Menge jeder resuspendierten Substanz hängt stark von mindestens 3 Faktoren ab, nämlich der Konzentration der Substanz im Sediment, der Erodierbarkeit des Sedimentes und der Schubspannungsgeschwindigkeit. Hier setzt die Interaktion von biologischen und physikalischen Faktoren ein.

Zum Verständnis der Bedeutung lateraler Advektion für die Nahrungszufuhr benthischer Organismen (Wildish & Kristmanson 1984; Grant, 1985; Graf, 1989) sind Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, Quantität und Qualität des resuspendierten Materials, sowie der horizontalen Transportraten organischer partikulärer Substanz notwendig.

Durch die isokinetische Probennahme für die Bestimmung der Sestonkonzentration konnten eindeutige Konzentrationsunterschiede in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden.

Muschenheim (1986) sowie Nowell & Jumars (1987) halten diese Art der Probenahme innerhalb der Bodengrenzschicht mit einem starken Geschwindigkeitsgradienten für die einzig akkurate, um Konzentrationen partikulärer Substanz zu messen. Auch Sternberg (1985) sieht eine Über- oder Unterschätzung der Partikelmenge als Folge einer Abweichung der Ansauggeschwindigkeit von der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit als Fehlerquelle für Konzentrationsangaben an, die möglichst minimiert werden sollte. In einer Untersuchung stellte der Autor für die Partikelgrößen 150 μm und 62 μm eine Unterschätzung der Partikelmenge bei geringerer Ansauggeschwindigkeit und eine Überschätzung bei höherer Ansauggeschwindigkeit, bezogen auf das bodennahe Geschwindigkeitsprofil, fest.

Die geringe Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Kanal von 1,5 cm s^{-1} auf 5,5 cm s^{-1} , und damit eine Erhöhung der Schubspannungsgeschwindigkeit von 0,28 cm s^{-1} auf 0,88 cm s^{-1} führte zu einer Zunahme der Sestonkonzentration im bodennahen Wasser im Mittel um 4,5 mg l^{-1} (von 8,2 auf 12,6 mg l^{-1}), das entspricht einer Erhöhung der Partikelkonzentration um 58 %. Der horizontale Partikelfluß, das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und Partikelkonzentration, erhöhte sich in einem Abstand von 8 mm und 15 mm vom Boden damit um 800 %, dies bedeutet für einen Benthosorganismus eine enorme Zunahme der verfügbaren Partikelmenge, die während einer bestimmten Zeitspanne an ihm vorbeitransportiert wird.

Bei einer mittleren Konzentrationserhöhung von 4,5 mg l^{-1} kann der Partikelfluß aus der Sedimentfläche in die Wassersäule (Efflux, F) für einen Zeitraum von einer Stunde nach Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden nach:

$$F = \Delta C V t^{-1} A^{-1}, \quad (\text{Wainright, 1990})$$

$$F = 0,15 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Dabei bedeutet ΔC die Differenz der Sestonkonzentrationen bei den beiden Strömungsgeschwindigkeiten (4,5 mg l^{-1}), V ist das Wasservolumen im Kanal (100 l) und A ist die Sedimentfläche (3000 cm^2). Bei einer Erhöhung der Schubspannungsgeschwindigkeit auf 0,88 cm s^{-1} wurden nach dieser Berechnung 0,15 $\text{mg Material cm}^{-2}$ oder entsprechend 1,5 g m^{-2} von der

Sedimentfläche resuspendiert. Bei dieser Untersuchung konnte die physikalische Erosion der Sedimentoberfläche nicht von biologischen Effekten (Bioentrainment, z. B. die Ejektion von Pseudofaeces in die Wassersäule) unterschieden werden.

Wiberg & Smith (1983) stellten bei Sturmereignissen auf einer 18 m tiefen Station Schubspannungsgeschwindigkeiten von 4,5 bis 5,2 cm s⁻¹ fest. Bei diesen Geschwindigkeiten ist noch mit einer wesentlich höheren Freisetzung partikulären Materials aus dem Sediment in die Wassersäule zu rechnen. Ritzrau (1991) stellte nach einem Sturmereignis auf der Station Gabelsflach (17 m Wassertiefe) in der Kieler Bucht eine Zunahme des Sestongehaltes um den Faktor 2,8 von 1,82 mg l⁻¹ auf 5,24 mg l⁻¹ fest. Stürme können ein enormes Potential für die Umverteilung partikulären Materials darstellen. Das resuspendierte Material bedeutet nicht unbedingt einen Verlust für das Benthos, die horizontal transportierte Partikelfracht steht andernorts Benthosorganismen als Nahrung zur Verfügung (Rhoads 1974, Rhoads et. al., 1984).

Die Sestonproben wurden nicht nach Qualität untersucht, jedoch kann davon ausgegangen werden, daß sie auch organische Anteile enthielten. Wainright (1990) stellte nach Resuspensionsversuchen bei Schubspannungsgeschwindigkeiten von 0,95 und 1,35 cm s⁻¹ eine Erhöhung des Sestongehaltes, sowie einen Anstieg des partikulären organischen Kohlenstoffs (POC), partikulären Stickstoffs (PON), sowie der Bakterienbiomasse im bodennahen Wasser fest. 80 % der Bakterien hafteten an Partikeln. Wainright (1987) fand außerdem, daß das Wachstum planktischer Mikroorganismen durch resuspendiertes Material stimuliert wurde.

Resuspensionsereignisse scheinen also wesentlich zu der Partikelkonzentration innerhalb der Bodengrenzschicht beizutragen, und der organische Anteil des transportierten Materials kann einen erheblichen Beitrag zur energetischen Versorgung des Benthos in anderen Gebieten leisten, wo die Deckung des Bedarfs der Organismen an organischem Kohlenstoff nicht durch den vertikalen Eintrag zu erklären ist (Graf, 1989; Eversberg, 1990). Diese Ereignisse sind jedoch abhängig von episodischen hydrographischen Bedingungen und damit nicht leicht zugänglich für Berechnungen und Bilanzierungen.

4.3. Mikrosphären als Tracer für den Partikelfluß

Die Verwendung von künstlichen Partikeln (Mikrosphären) für die Verfolgung von suspendiertem partikulärem Material zwischen den Kompartimenten Wassersäule, Sediment und Makrofauna hat sich allgemein bewährt. Allerdings ist der Zeitaufwand für das Auszählen der Proben unter dem Epifluoreszenz-Mikroskop erheblich, so daß alternative Methoden (z.B. Durchflußzytometrie) für die Bearbeitung größerer Probenumfänge in Betracht gezogen werden müssen. Außerdem bedeutet die große Menge an Mikrosphären, die notwendig ist, um für 100 Liter Kanalvolumen eine ausreichende Konzentration herzustellen, einen erheblichen Kostenfaktor. Eine Alternative wäre die Verwendung von markiertem Algen- oder Bakterienmaterial.

In der Wassersäule des Experiment 1 ($U = 5,5 \text{ cm s}^{-1}$) nimmt die Gesamtpartikelanzahl über einen Zeitraum von 6 Stunden kontinuierlich auf 50 % der Anfangskonzentration ab. In Experiment 2 hingegen ($U = 1,5 \text{ cm s}^{-1}$) bleibt die Gesamtkonzentration über den gesamten Versuchszeitraum scheinbar konstant. Die hohe Abnahme in Exp. 1 ist weder strömungsmechanisch, noch durch eine erhöhte Depositionsrate zu erklären. Bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit bleiben die Partikel theoretisch länger in Suspension und sedimentierte Partikel werden durch die erhöhte Schubspannungsgeschwindigkeit wieder resuspendiert. Es konnte auch keine höhere Partikelaufnahme durch Makrofaunaorganismen festgestellt werden. Im Gegenteil: In Experiment 2, bei geringerer Strömungsgeschwindigkeit, sind auf der Kernfläche und auf der Kanalbodenfläche um den Faktor 1,3 mehr Partikel vorhanden, als in Experiment 1. Berechnet man für die Konzentrationsabnahme in der Wassersäule die entsprechende Depositionsrate auf dem Sediment, so hat die Gesamtpartikelkonzentration in der Wassersäule um $38 \text{ Partikel ml}^{-1}$ durch die Deposition abgenommen. Selbst wenn einige Partikel von den Organismen tiefer ins Sediment eingebracht wurden, und von der Probennahme nicht erfaßt worden sind, bedeutet dies, verglichen mit der Anfangskonzentration von $12560 \text{ Partikel ml}^{-1}$, eine zu geringe Abnahme, als daß die verringerte Konzentration in der Wassersäule erklärt werden könnte. Dieser geringe Wert dürfte bei einer Standardabweichung von 20 % für die Wasserproben kaum einen Unterschied sichtbar machen. Selbst von den

größten Partikeln ($40\ \mu\text{m}$) wurden nur 16 Partikel ml^{-1} deponiert, dies bedeutet im Vergleich zur Anfangskonzentration eine Abnahme von 11 %.

Die Mikrosphären müssen also an anderen Stellen im System deponiert worden sein, und zwar im ersten Experiment noch wesentlich mehr als im zweiten. Die gemessene geringe Konzentrationsabnahme in Experiment 2 ist aufgrund dieser Betrachtung realistischer. Auch die kontinuierliche Abnahme im ersten Experiment weist auf einen physikalischen Effekt hin, bedingt durch die Kanalkonstruktion.

Die Messung der Partikelkonzentration in der Wassersäule allein läßt keine Aussage über die Depositionsrate zu.

Die Methode, die Mikrosphären durch eine wiederholte Dichtentrennung vom Sediment zu trennen, hat sich, wie die hohen Wiederfundraten zeigen, bewährt. Es konnten für beide Experimente Unterschiede in der Depositionsrate festgestellt werden.

4.4. Die Bedeutung der Makrofauna für die Biodeposition

Die Deposition auf der von Makrofaunaorganismen beeinflussten Sedimentfläche ist in beiden Experimenten um den Faktor 3,5 höher als die vorwiegend durch Gravitation bedingte Deposition auf der Vergleichsfläche. Dabei ist vor allem der Anteil der kleinen Partikel ($1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$ und $6\ \mu\text{m}$) um ein vielfaches (Faktor 6 bis 10) größer. Das bedeutet, daß feinste Partikel, die sonst nicht absinken, auf besiedelten Sedimenten eingefangen und vermehrt deponiert werden. Dies ist von großer Bedeutung für die Betrachtung der Akkumulation von Schadstoffen (Bioakkumulation), da diese besonders an feinen Partikeln ($< 20\ \mu\text{m}$) adsorbiert werden (Kersten & Krönke, 1990).

Die Mikrosphären können als interner Standard benutzt werden, um die Biodepositionsraten festzustellen. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $5,5\ \text{cm s}^{-1}$ im ersten Experiment wurden auf der Kernoberfläche 3413 Mikrosphären pro cm^2 in einem Zeitraum von 6 Stunden deponiert. Aus dem Volumen dieser Partikelmenge ($0,027\ \text{cm}^3$) und ihrer Dichte ($0,05\ \text{mg cm}^{-3}$) ergibt sich eine Depositionsrate des künstlichen partikulären Materials von $116\ \text{mg m}^{-2}\ \text{d}^{-1}$. In der Suspension betrug das Verhältnis von Mikrosphären zu natürlichen Partikeln 1 : 1. Unter der Annahme, daß die natürlichen Partikel in gleicher Weise deponiert worden sind wie die Mikrosphären, ergibt sich eine Depositionsrate von $232\ \text{mg m}^{-2}\ \text{d}^{-1}$. Die entsprechende Berechnung für das Experiment 2, bei einer

Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$, ergibt einen sehr ähnlichen Wert von $230 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. In dieser Betrachtung ist nur die Anzahl der 7 untersuchten Partikelgrößen enthalten, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Werte ein Minimum darstellen. Im Gegensatz dazu ergibt sich für die unbesiedelten Sedimentflächen ein Eintrag von $66 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Die mittleren Sedimentationsraten in der Kieler Bucht betragen $40 - 60 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (Smetacek, 1980), das bedeutet einen vertikalen Eintrag Organischen Materials (OM) von ca. $270 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Neben dem Einfluß der lateralen Advektion auf die Nahrungszufuhr haben Benthosorganismen also eine große Bedeutung für die Depositionsraten partikulärer Substanz. Die Deposition von Partikeln aus dem überströmenden Wasser auf das Sediment kann durch direkte oder indirekte Interaktionen zwischen Makrofaunaorganismen und Partikelfluß beeinflusst und erhöht werden. Direkt in den Partikelfluß greifen Suspensionsfresser ein. Sie nehmen Partikel direkt aus der Wassersäule auf und deponieren sie anschließend als Pellets oder Pseudofaeces im oder auf dem Sediment. Hier werden sie von Depositionsfressern mit dem Sediment vermischt oder als Nahrung aufgenommen.

Die Besiedlung von Sedimentflächen mit Makrofaunaorganismen verändert die Beschaffenheit (Rhoads 1971), sowie die Oberflächenstruktur des Sedimentes (Mikrotopographie). Biogene Strukturen beeinflussen das Strömungsregime über der Sedimentfläche, die Organismen können damit indirekt eine erhöhte Depositionsrate bewirken. Auch Depositionsfresser profitieren so von der horizontalen Nahrungszufuhr (Miller et. al. 1984).

Mikrotopographie

Die Veränderung des kleinskaligen Strömungsregimes an der Sedimentoberfläche und an biogenen Strukturen entstehende turbulente Zirkulationsmuster bewirken entweder eine lokal erhöhte Konzentration von Partikeln und ihre Deposition oder führen zu einer erhöhten Resuspension. Ein einzeln stehendes Objekt (z.B. eine Polychaetenröhre), das deutlich aus der viskosen Unterschicht herausragt, erhöht die Schubspannung auf das direkt umgebende Sediment. Es kommt zu einer lokal erhöhten Resuspension (Carey, 1983; Nowell & Jumars, 1984; Eckman 1985). Über zahlreiche, sehr dicht stehende Strukturen geht die Strömung dagegen hinweg ('skimming flow'), ohne an den einzelnen Objekten

angreifen zu können. Dichtstehende Polychaetenröhren bewirken daher eher eine erhöhte Deposition. Vertiefungen in der Sedimentoberfläche haben den gegenteiligen Effekt von hervorstehenden Objekten. Die Strömungsgeschwindigkeit verlangsamt sich bei dem Fluß über und durch eine Vertiefung, die Schubspannung wird verringert und die Depositionsrate erhöht. An der Strömungsleeseite flacher Hügel kommt es zu Zirkulationsmustern, in denen sich die Partikel anreichern, außerdem ist die Strömungsgeschwindigkeit verringert, was zur Deposition führt. Eine besiedelte Sedimentfläche stellt eine Kombination der verschiedenen Effekte dar, wobei Anzahl und Art der Strukturen den Gesamteffekt ausmachen. Es gibt wenige Untersuchungen der entstehenden Strömungsmuster an einzelnen biogenen Strukturen (Carey, 1983; Vogel, 1983; Nowell & Jumars, 1984; Eckman, 1985). Untersuchungen über Art und Intensität der Auswirkung kleinskaliger Turbulenzen auf Prozesse in den obersten Sedimenthorizonten und innerhalb der Bodengrenzschicht befinden sich erst in den Anfängen.

Die Sedimentoberflächen der Versuchskerne mit natürlicher Makrofaunabesetzung waren hauptsächlich von zwei Strukturen geprägt: Sedimenthügel von *Macoma baltica* und Trichterstrukturen von *Pectinaria koreni*.

Beide Strukturen bewirkten eine erhöhte Depositionsrate im Vergleich zum umgebenden Sediment. An den Hügeln wurde die Deposition um das zwei- bis dreifache erhöht, in den Trichterstrukturen, die wie Sedimentfallen wirken, war die Partikelzahl um den Faktor 3 bis 4 höher. Dabei bewirken die Hügel hauptsächlich eine Zunahme der kleinen Partikel, während in den Trichtern die Anzahl der Partikel aller Größen stieg. Neben den gesteigerten Partikelkonzentrationen an den ausgesuchten biogenen Strukturen ist die Partikelanzahl auf der übrigen Sedimentfläche im Vergleich zur unbesiedelten Vergleichsfläche in beiden Experimenten um den Faktor 1,3 erhöht. Dies ist auf die Wirkung kleinerer Strukturen (z. B. Kriech- und Fraßspuren) und der Veränderung der Sedimentbeschaffenheit (Verschleimung, Korngrößenveränderung z.B. durch Pelletbildung) zurückzuführen. Allein die Veränderung der Sedimentoberfläche durch die Aktivität der Makrofaunaorganismen bewirkt demnach eine Erhöhung der Depositionsrate.

Die tellinide Muschel *Macoma baltica* leistete zur Erhöhung der Depositionsrate den größten Beitrag, mit 34 % im ersten und 58 % im zweiten Experiment. Die Partikelanzahl im Mageninhalt einer *M. baltica* ist im Vergleich zu der vom

Ingestionssipho beeinflussten Sedimentoberfläche um den Faktor 11 erhöht, die Fraktion der kleinen Partikel (1 μm , 2 μm , 3 μm und 6 μm) ist dabei jeweils um ein Vielfaches höher, während die großen Partikel (10 μm , 25 μm und 40 μm) verhältnismäßig wenig aufgenommen wurden. Dies läßt eine selektive Aufnahme von kleinen Partikeln vermuten. Hylleberg & Gallucci (1975) stellten für *Macoma nasuta* eine bevorzugte Aufnahme von 1-3 μm großen Partikeln fest. Self & Jumars (1988) konnten keine selektive Aufnahme bestimmter Partikelgrößen für *M. baltica* feststellen. Die Autoren betrachteten die Gattung jedoch als Depositionsfresser. Auch Aller (1985) klassifizierte *M. baltica* als Oberflächen-Depositionsfresser, während Reid & Reid (1969) und Taghon et. al. (1980) fanden, daß die Gattung *Macoma* sich auch als Suspensionsfresser ernähren kann. Die Partikelanzahl und Größenverteilung im Mageninhalt der untersuchten Muscheln ist eher durch eine suspensionsfressende Ernährungsweise zu erklären, auch die Verhaltensbeobachtung während der Experimente bestätigen diese Annahme. Es konnte beobachtet werden, daß *M. baltica* ihren Ingestionssipho über die Sedimentoberfläche in die Strömung hält und Partikel direkt aus der Wassersäule aufnimmt. Eine klare Trennung der beiden Ernährungsweisen ist wahrscheinlich unrealistisch. Taghon et. al. (1980) stellten fest, daß sich die Ernährungsweise von einigen Makrofaunaarten als Reaktion auf den horizontalen Partikelfluß ändert. Bei einem hohen Partikelfluß ernährten sich die Organismen direkt aus der Wassersäule, während sie bei reduzierter Strömung zum Depositionsfressen wechselten. Eine Abhängigkeit der Ernährungsweise von den Strömungsverhältnissen und damit dem horizontalen Partikelfluß ist auch für *M. baltica* anzunehmen. Wenn sich die Muschel hauptsächlich aus der Wassersäule ernährt hat, ist auch die erhöhte Anzahl kleiner Partikel und geringe Anzahl großer Partikel im Mageninhalt im Gegensatz zum umgebenden Sediment verständlich. Auch in der Suspension war die Anzahl der großen Partikel relativ gering. Die Analyse des Mageninhaltes läßt daher eher eine Aussage über die Ernährungsweise von *M. baltica* zu, als den Schluß auf eine Partikelselektion. Die Muschel leistet durch die Nahrungsaufnahme aus der Wassersäule jedoch einen hohen Beitrag zur Deposition von kleinen Partikeln. Diese werden in Form von Pellets unter der Sedimentoberfläche deponiert und erhöhen das Nahrungsangebot für Depositionsfresser. Die untersuchten Pellets von *M. baltica* enthielten auffällig wenig große Partikel.

Der substratfressende Polychaet *Pectinaria koreni* ernährt sich hauptsächlich durch die Aufnahme von Sedimentpartikeln unterhalb der Sedimentoberfläche. Whitlatch & Weinberg (1974) stellten für eine verwandte Art, *Pectinaria gouldii* fest, daß sie größere Partikel ($> 100 \mu\text{m}$) bevorzugt aufnimmt. Dies steht im Widerspruch zu der Ernährungstheorie (' foraging theory ') von Taghon et. al. (1978), wonach die selektive Aufnahme von kleinen Partikeln einen energetischen Vorteil bedeutet. Die meisten Depositionsfresser ernähren sich von dem organischen Belag der Partikel. Der Nährwert von Partikeln ist also proportional zu ihrer Oberfläche. Aufgrund des größeren Oberflächen:Volumen Verhältnisses hat ein bestimmtes Volumen kleiner Partikel einen höheren organischen Gehalt als das gleiche Volumen großer Partikel.

In beiden Experimenten waren im Mageninhalt der Polychaeten eine hohe Anzahl kleiner Partikel ($1-6 \mu\text{m}$) zu finden, während große ($25 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$) sehr wenig oder gar nicht aufgenommen wurden. Dies steht im Gegensatz zu dem Partikelangebot in den Trichtern, die gleiche Mengen kleiner und großer Partikel enthielten. Es könnte also der Eindruck entstehen, daß *P. koreni* kleine Partikel selektiv bevorzugt. Bei der Analyse des Mageninhaltes unter dem Binokular fiel jedoch auf, daß hauptsächlich größere Sedimentpartikel ($> 100 \mu\text{m}$) enthalten waren, unter anderem auch ein großer Anteil Pellets von *M. baltica*. Der Polychaet ist vermutlich in der Lage, nach anderen Kriterien außer der Partikelgröße die Nahrung zu selektieren. Das Ergebnis bestätigt die Bedeutung von Biodepositen z. B. in Form von Pellets für die Ernährung von Depositionsfressern. Hylleberg & Gallucci (1975) erklärten, daß die Pellets von *M. nasuta* wesentlich reicher an organischer Substanz seien als umgebende Sedimentpartikel der gleichen Größenfraktion. Durch die selektive Aufnahme von Pellets, die der von *P. koreni* bevorzugt aufgenommenen Größenklasse entsprechen, profitiert der Polychaet von der Deposition kleiner Partikel durch die Muschel *M. baltica*.

Diese Ergebnisse machen deutlich, daß es für eine Aussage über die Partikelaufnahme durch Makrofaunaorganismen sehr wichtig ist, die Tiere unter möglichst natürlichen Bedingungen zu untersuchen. Erstens ist der Einfluß der Strömung auf die Ernährungsweise zu berücksichtigen, und zweitens müssen die Interaktionen zwischen den vergesellschafteten Arten beachtet werden.

Suspensionsfresser- Depositionsfresser Modell

Die Ergebnisse der Untersuchung der Pectinaria-Macoma Gesellschaft sind vergleichbar mit denen einer Studie von Amouroux et. al. (1990), die die Transferkinetiken für Kohlenstoff und Schadstoffe in einem Mikrokosmos, bestehend aus einem Suspensionsfresser (*Venerupis decussata*, Bivalvia) und einem Depositionsfresser (*Eupolyornia nebulosa*, Annelida) beschreibt. Anhand von ^{14}C -markierten Bakterien und einzelligen Algen verfolgten die Autoren den Weg der Nahrungspartikel zwischen den Kompartimenten Suspension, Sediment und den beiden Makrofaunaorganismen. Der Suspensionsfresser bildet die Verbindung zwischen Wassersäule und Sediment und leistet den größten Beitrag zu Deposition von Partikeln, die in Form von Pellets von dem Depositionsfresser aufgenommen werden. Die Anneliden stimulieren sogar die Freßaktivität der Bivalvia durch Bioturbationsaktivitäten. Nach der Zugabe eines Schadstoffes, der an feinen Sedimentpartikel adsorbiert wurde, ergab die Untersuchung der Makrofauna, daß die Anneliden eine hohe Konzentration aufwiesen, während die Muscheln kaum belastet waren.

Die Untersuchung der Macoma-Pectinaria Gesellschaft ergibt ein sehr ähnliches Bild. Die Muschel leistet als Suspensionsfresser den größten Beitrag zur Deposition von Partikeln aus der Wassersäule ins Sediment. *P. koreni* profitiert von den Biodepositen, indem er sie als Nahrung aufnimmt. Für den Partikeltransport im Sediment bedeutet dies eine zum Teil nur kurze Verweildauer der deponierten Partikel unter der Sedimentoberfläche, sie erreichen nach der Darmpassage von Pectinaria wieder die Oberfläche.

Der Partikelfluß über einer Sedimentfläche wird von benthischer Besiedlung beeinflusst. Resuspendiertes und horizontal transportiertes, partikuläres Material stellt eine erhöhte Nahrungszufuhr für Suspensions- und Depositionsfresser dar. Durch direkte und indirekte Interaktionen mit der Bodenströmung erhöhen die Makrofaunaorganismen die Deposition von Partikeln aus der Wassersäule ins Sediment. Die Biodeposition und der interspezifische Nahrungstransfer zwischen Suspensions- und Depositionsfressern können die hohe Produktion von Benthosorganismen in einigen Gebieten erklären, die durch vertikalen Eintrag nicht geleistet werden könnte. Suspensionsfresser verändern die Sedimentzusammensetzung, indem sie den Eintrag von feinem Material um ein Vielfaches erhöhen.

Zusammenfassung

Der in dieser Arbeit vorgestellte Strömungskanal eignet sich für die Simulation von Feldbedingungen.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit der Thermistorsonde lieferte vertikale Strömungsprofile mit einem charakteristischen Kurvenverlauf, der für die Ausbildung einer bodennahen Grenzschicht kennzeichnend ist.

Erwartungsgemäß nimmt bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit die Dicke der Bodengrenzschicht ab und die Schubspannungsgeschwindigkeit zu.

Die hohe Meßempfindlichkeit und sehr gute räumliche Auflösung der Sonde ermöglichte außerdem die Feststellung einer viskosen Unterschicht, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ mit einer Schichtdicke von 5 mm.

In einem Resuspensionsversuch wurde die Auswirkung der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ auf $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ und damit einer Erhöhung der Schubspannungsgeschwindigkeit von $0,28 \text{ cm s}^{-1}$ auf $0,88 \text{ cm s}^{-1}$ auf die Partikelresuspension untersucht. Mittels isokinetischer Probennahme wurde der Sestongehalt innerhalb der Bodengrenzschicht ermittelt und ergab eine Konzentrationserhöhung um 58 %, von $8,2 \text{ mg l}^{-1}$ auf $12,6 \text{ mg l}^{-1}$. Das bedeutet eine Partikelresuspension (Efflux) aus dem Sediment in die Wassersäule von $1,5 \text{ g m}^{-2}$.

Aus der Partikelkonzentration und der Strömungsgeschwindigkeit in der entsprechenden Höhe über dem Sediment konnte der Partikelfluß errechnet werden. In einer Höhe von 8 und 15 mm über der Sedimentoberfläche stieg er bei diesem Experiment um 800 %.

Es wurde eine Methode entwickelt, um Mikrosphären (fluoreszierende Latexpartikel) vom Sediment zu trennen. Die hohe Wiederfundrate von 45 % ermöglichte die Verfolgung des Partikeltransportes von der Wassersäule ins Sediment, und damit eine Abschätzung der Depositionsraten.

Die Möglichkeit, einen intakten Sedimentkern mit natürlicher Besiedlung in die Anlage so einzufügen, daß er mit der Kanalbodenfläche, die mit gesiebtem Sediment der selben Station bedeckt ist, eine ebene Fläche bildet, ermöglicht den Vergleich zwischen Biodeposition und gravitativer Deposition.

Es konnte gezeigt werden, daß Makrofaunaorganismen wesentlich zur Deposition partikulären Materials beitragen. Die Biodeposition war auf der Sedimentkernfläche um den Faktor 3,5 gegenüber der Vergleichsfläche erhöht.

Die Mikrosphären können als interner Standard genutzt werden, um die Gesamtdeposition abzuschätzen. Der Eintrag partikulären Materials aus der Wassersäule ins Sediment betrug demnach auf der Kernoberfläche $232 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im Vergleich zu $66 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ auf der unbesiedelten Fläche.

Es konnte gezeigt werden, dass besonders die Deposition feinen Materials, das sonst nicht absinken würde, durch den Einfluß der Makrofaunaorganismen um ein Vielfaches gesteigert wurde, die Anzahl kleiner Partikel ($1 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$) erhöhte sich um das 6 -10 fache.

Die Betrachtung eines `Mikrokosmos' ermöglichte die genaue Untersuchung der Interaktionen der Makrofauna mit dem horizontalen Partikelfluß und ihrer Bedeutung für die Biodeposition. Allein durch die Veränderung der Oberfläche (Mikrotopographie) und damit des kleinskaligen Strömungsregimes über der Sedimentoberfläche tragen die Organismen indirekt zu einer erhöhten Deposition bei. (Faktor 1,7).

Die untersuchte Tiergemeinschaft bestehend aus *Macoma baltica* und *Pectinaria koreni* kann mit einem Suspensionsfresser- Depositionsfresser Modell dargestellt werden, das einen interspezifischen Nahrungstransfer beschreibt und auf die Bedeutung von Biodepositen als Nahrungszufuhr für Depositionsfresser hinweist. Unter dem Einfluß einer Bodenströmung leistet *M. baltica* als Suspensionsfresser mit 38 bis 56 % den größten Beitrag zur Biodeposition. Das unter der Sedimentfläche in Form von Pellets deponierte Material steht hier dem Depositionsfresser *P.koreni* zur Verfügung.

ALLER, R.C., ALLER, J.Y.; 1986. Evidence for localized enhancement of biological activity associated with tube and burrow structures in deep-sea sediments at the HEBBLE site, western North Atlantic. *Deep Sea Research*, Vol. 33, No. 6: 755-790.

ALLER, R. C., YINGST, J. Y.; 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. *J. Mar. Res.*, 43: 615-645.

AMOUREUX, J-M., AMOUREUX, J., BASTIDE, J., CAHET, G., GREMARE, A.; 1990. Interrelation in a microcosm with a suspension-feeder and a deposit-feeder. II: Modelling. *Oceanol. Acta*, Vol. 13(1): 69-78.

AMOUREUX, J-M., AMOUREUX, J., BASTIDE, J., CAHET, G.; 1990. Interrelation in a microcosm with a suspension-feeder and a deposit-feeder. I: Experimental study. *Oceanol. Acta*, Vol. 13(1): 61-68.

ARMONIES, W.; 1988. Hydrodynamic factors affecting behavior of intertidal meiobenthos. *OPHELIA*, 28: 183-193.

BUTMAN, C. A., GRASSLE, J. P., WEBB, C. M.; 1988. Substrate choices made by marine larvae settling in still water and in a flume flow. *Nature*, Vol. 333: 771-773.

BUTMANN, C. A.; 1986. Sediment trap biases in turbulent flows: Results from a laboratory flume study. *J. Mar. Res.*, 44: 645-693.

CAREY, D. A., MAYER, L. M.; 1990. Nutrient uptake by a deposit-feeding enteropneust: nitrogenous sources. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 63: 79-84.

CAREY, D. A.; 1983. Particle resuspension in the benthic boundary layer induced by flow around polychaete tubes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 40: 301-308.

- DOLD, R.;1980. Zur Ökologie, Substratspezifität und Bioturbation von Makrobenthos auf Weichböden der Kieler Bucht. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität Kiel.
- ECKMAN, J. E., Nowell, A. R. M.; 1984. Boundary skin friction and sediment transport about an animal tube mimic. *Sedimentology*, 31: 851-862.
- ECKMAN, J. E.; 1983. Hydrodynamic processes affecting benthic recruitment. *Limnol. Oceanogr.*, 28 (2): 241-257.
- ECKMAN, J. E.;1985. Flow disruption by an animal tube mimic affects sediment bacterial colonization. *J. Mar. Res.*, 43 (2): 419-435.
- ECKMANN, J. E.; 1990. A model of passive settlement by plancton larvae onto bottoms of differing roughness. *Limnol. Oceanogr.*, 35(4): 887-901.
- ERTMAN, S. C., JUMARS, P. A.; 1988. Effects of bivalve siphonal currents on the settlement of inert particles and larvae. *J. of Mar. Res.*, 46: 797-813.
- EVERSBERG, U.; 1990. Abbau und Akkumulation von organischer Substanz in den Sedimenten der Kieler Bucht. *Ber. Inst. Meeresk.*, Nr. 193.
- FENCHEL, T.; 1972. Aspects of decomposed food chains in marine benthos. *Verh. dt. zool. Ges.*, 65: 14-23.
- FORSTER, S.;1991. Die Bedeutung biogener Strukturen für den Sauerstofffluß ins Sediment. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität Kiel.
- FRISCH, U., ORSZAG, S. A.;1990. Turbulence: Challenges for Theory and Experiment. *Physics Today*, 1: 24-32.
- GRAF, G.; 1989. Die Reaktion des Benthals auf den saisonalen Partikelfluß und die laterale Advektion, sowie deren Bedeutung für Sauerstoff- und Kohlenstoffbilanzen. Habilitationsschrift, Universität Kiel.

- GRANT, J.; 1983. The relative magnitude of biological and physical sediment reworking in an intertidal community. *J. Mar. Res.*, 41(4): 673-689.
- GUNDERSEN, J. K., BARKER JØRGENSEN, B.; 1990. Microstructure of diffusive boundary layers and the oxygen uptake of the sea floor. *Nature*, Vol. 345: 604-607.
- HUNTER, T.; 1989. Suspension Feeding in Oscillating Flow: The Effect of Colony Morphology and Flow Regime on Plancton Capture by the Hydroid *Obelia longissima*. *Biol.Bull.*, 176: 41-49.
- HÜTTEL, M.; 1988. Zur Bedeutung der Macrofauna für die Nährsalzprofile im Wattsediment. *Ber. Inst. Meeresk.*, Nr.182.
- HYLLEBERG, J., GALLUCI, V. F.; 1975. Selectivity in feeding by the deposit-feeding Bivalve *Macoma nasuta*. *Mar. Biol.*, 32: 167-178.
- JUMARS, P. A., NOWELL, A. R. M.; 1984. Effects of benthos on sediment transport: difficulties with functional grouping. *Cont. Shelf Res.*, Vol. 3: 115-130.
- JUMARS, P. A., SELF, R. F. L., NOWELL, A. R. M.; 1982. Mechanics of particle selection by tentaculate deposit-feeders. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 64: 47-70.
- JUMARS, P. A., SELF, R. L. F.; 1986. Gut-marker and gut-fullness methods for estimating field and laboratory effects of sediment transport on ingestion rates of deposit-feeders. *J. Exp. Mar. Ecol. Biol.*, 98: 293-310.
- JUMARS. P. A., NOWELL, A. R. M.; 1984. Fluid and sediment dynamic effects on marine benthic community structure. *Amer. Zool.*, 24: 45-55.
- KITLAR, J.; 1991. Der Einfluß der Bioturbation auf den Transport gelöster Stoffe im Porenwasser. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität Kiel.
- LaBARBERA, M.; 1984. Feeding Currents and Particle Capture Mechanisms in Suspension Feeding Animals. *Amer. Zool.*, 24: 71-84.

- LOPEZ, G., ELMGREN, R.; 1989. Feeding depths and organic absorption for the deposit-feeding benthic amphipods *Pontoporeia affinis* and *Pontoporeia femorata*. Limnol. Oceanogr., 34(6): 982-991.
- MCCAVE, I. N., LONSDALE, P. F., HOLLISTER, C. D., GARDNER, W. D.; 1980. Sediment transport over Hatton and Gardner contourite drifts. J. Sed. Petrol., 50: 1049-1062.
- MCCAVE, I. N.; 1986. Local and global aspects of the bottom nepheloid layers in the world ocean. Neth. J. Sea Res., 20(2/3): 167-181.
- MIDDLETON, G. V., SOUTHARD, J. B.; 1984. Mechanics of sediment movement. S.E.P.M. Short course Number 3, 2nd Edition, Providence.
- MILLER, D. C., JUMARS, P. A.; 1986. Pellet accumulation, sediment supply and crowding as determination of surface deposit-feeding rate in *Pseudopolydora Kempii Japonica* Imajima & Hartman (Polychaeta: Spionidae). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 99: 1-17.
- MILLER, D. C., STERNBERG, R. W.; 1988. Field measurements of the fluid and sediment-dynamic environment of a benthic deposit feeder. J. Mar. Res., 46: 771-796.
- MUSCHENHEIM, D. K., GRANT, J., MILLS, E. L.; 1986. Flumes for benthic ecologists: theory, construction and practice. Mae. Ecol. Prog. Ser., Vol. 28: 185-196.
- MUSCHENHEIM, D. K., KEPKAY, P. E., KRANCK, K.; 1989. Microbial growth in turbulent suspension and its relation to marine aggregate formation. Neth. Journ. of Sea Research, 23 (3): 283-292.
- MUSCHENHEIM, D. K.; 1987. The dynamics of near-bed seston flux and suspension-feeding benthos. J. Mar. Res., 40: 473-497.
- NOWELL, A. R. M., JUMARS, P. A., ECKMAN, J. E.; 1980. Effects of biological activity on the entrainment of marine sediments. Mar. Geol., 42: 133-153.

- NOWELL, A. R. M., JUMARS, P. A.; 1984. Flow environments of aquatic benthos. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 15: 303-328.
- NOWELL, A. R. M., JUMARS, P. A.; 1987. Flumes: Theoretical and Experimental Considerations for Simulation of Benthic Environments. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 25: 91-112.
- OKAMURA, B.; 1985. The effects of ambient flow velocity, colony size and upstream colonies on the feeding success of Bryozoa. II. *Conopeum reticulum* (L) an encrusting species. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 89: 69-80.
- OKAMURA, B.; 1987. Particle size and flow velocity induce an inferred switch in Bryozoans suspension-feeding behavior. *Biol. Bull.*, 173: 222-229.
- OKAMURA, B.; 1990. Particle size, flow velocity and suspension-feeding by erect bryozoans *Bugula neritina* and *B. stolonifera*. *Mar. Biol.*, 105: 33-38.
- PALMER, M. A., MOLLOY, R. M.; 1986. Water Flow and the Vertical Distribution of Meiofauna: A Flume Experiment. *Estuaries*, Vol. 9, No. 3: 225-228.
- REID, R. G. B., REID, A.; 1969. Feeding processes of members of the genus *Macoma* (Mollusca: Bivalvia). *Can. J. Zool.*, 47: 649-657.
- REISE, K.; 1981. High abundance of small zoobenthos around biogenic structures in tidal sediments of the Wadden Sea. *Helgoländer Meeresunters.* 34:413-425.
- RHOADS, D. C., BOYER, L. F., WELSH, B. L., HAMBSON, G. R.; 1984. Seasonal dynamics of detritus in the benthic turbidity zone (BTZ); Implications for bottom-rack molluscan mariculture. *Bull. Mar. Sci.*, 35(3): 536-549.
- RHOADS, D. C., BOYER, L. F.; 1980. The effects of marine benthos on physical properties of sediments. Chapter 1: 3-52.
- RITZRAU, W.; 1990. Methodische Ansätze zur Bearbeitung von bodennahen Trübungszonen. *Ber. SFB 131*, Nr. 27.

- SCHAUER, U.; 1982. Zur Bestimmung der Schubspannung am Meeresboden aus der mittleren Strömung. Ber. Inst. Meeresk., Nr. 105.
- SCHLICHTING, H.; 1965. Grenzschichttheorie, G. Braun, Karlsruhe, 736pp.
- SELF, R. F. L., JUMARS, P. A.; 1978. New resource axes for deposit-feeders. J. Mar. Res., 36(4): 627-641.
- SHUMWAY, S. E., CUCCI, T. L., NEWELL, R. C., YETSCH, C. M.; 1985. Particle Selection, Ingestion and Absorption in Filter-Feeding Bivalves. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 91: 77-92.
- STERNBERG, R. E., JOHNSON, R. V., CACCHIONE, D. A., DRAKE, D. E.; 1985. An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. Mar. Geol., 71: 187-199.
- STERNBERG, R. W.; 1968. Friction factors in tidal channels with differing bed roughness. Mar. Geol., 6: 243-260.
- STERNBERG, R. W.; 1976. Measurements of boundary layer flow and boundary roughness over Campeche Bay, Yucatan. Mar. Geol., 20: M25-M31.
- TAGHON, G. L., NOWELL, A. R. M., JUMARS, A. P.; 1980. Induction of suspension-feeding in Spionid Polychaetes by high particulate Fluxes. Science, Vol. 210: 562-564.
- TAGHON, G. L., SELF, R. F. L., JUMARS, P. A.; 1978. Predicting particle selection by deposit feeders: A model and its implications. Limnol. Oceanogr., 23(4): 752-759.
- TEUCHER, M. W.; 1991. Luminophoren und ein neues Bildauswertungssystem zur Darstellung des Bioturbaten Partikeltransports in marinen Sedimenten. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität Kiel.

THOMSEN, L.; 1989. Bakterien und Meiofauna in Gangsystemen der Makrofauna. In: PILNAY, C., THOMSEN, L., ALTENBACH, A. V. Methodische Ansätze zur Biomassebestimmung mittels biochemischer Parameter und der computergestützten Bildanalyse, Ber. aus dem SFB 313, "Sedimentation im europäischen Nordmeer", Nr. 19.

VOGEL, S.; 1981. Life in moving fluids. The physical biology of flow. Princeton University Press.

WAINRIGHT, S. C.; 1990. Sediment-to-water fluxes of particulate material and microbes by resuspension and their contribution to the planktonic food web. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 62: 271-281.

WHITLATCH, R. B., WEINBERG, J. R.; 1982. Factors influencing particle selection and feeding rate in the Polychaete *Cistendes (Pectinaria) gouldii*. Mar. Biol., 71: 33-40.

WHITLATCH, R. B.; 1981. Animal-sediment relationships in intertidal marine benthic habitats: Some determinants of deposit-feeding species diversity. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 13: 140-155.

WILDISH, D. J., KRISTMANSON, D. D.; 1984. Importance to Mussels of the Benthic Boundary Layer. Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol. 41: 1618-1625.

WITHLATCH, R. B.; 1980. Patterns of resource utilization and coexistence in marine intertidal deposit-feeding communities. J. Mar. Res., 38(4): 743-765.

WOLAVER, T., WHITING, G., KJERFVE, B., SPURRIER, J., McKELLAR, H., DAME, R., CHRZANOWSKI, T., ZINGMARK, R., WILLIAMS, T.; 1985. The flume design- a methodology for evaluating material fluxes between a vegetated salt marsh and the adjoined tidal creek. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 91: 281-291.

YALIN, W., SCHAUER, U., PETERSON, U., MITTELSTAEDT, R. U.; 1979. Bodenströmungen und Schichtungsverhältnisse in der nördlichen Kieler Bucht im März 1978. Ber. Inst. Meeresk., Nr. 69.

YOUNG, R. A.; 1977. Seaflume: A device for in-situ studies of threshold erosion velocity and erosion behavior of undisturbed marine muds. *Mar. Ecol.*, 23: M11-M18.