

Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

**Projekt: DYNAS -
Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation;
Vorhaben: Sedimentationsprozesse in der Mecklenburger Bucht**

Abschlußbericht (Meilenstein 6)

Förderkennzeichen: 03F0280A

Bearbeitende Institutionen: Institut für Ostseeforschung Warnemünde,
Fachbereich Biologie der Universität Rostock

Kooperationspartner: Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund,
Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz
Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall
und Geophysik Kiel,
GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

Laufzeit: 01.06.2000 – 31.05.2003

Berichtszeitraum: 01.06.2000 – 31.05.2003

Redaktion: J. Harff¹ (Koordinator)

Autoren: ¹R. Bahlo, ¹B. Bobertz, ¹B. Bohling, ¹W. Fennel,
¹S. Forster, ⁴M. Friedrichs, ⁴G. Graf, ³G. Gruß, ¹J. Harff,
³M. Heineke, ¹B. Heise, ¹S. Hölzel, ⁴J. Kleine, ⁵J. Kraft,
¹K. Kuhrts, ¹T. Leipe, ¹W. Lemke, ¹K. Lochte, ²R. Lühder,
⁴F. Peine, ⁴M. Powilleit, ⁴T. Rieling, ³R. Riethmüller,
³A. Seibt-Winckler, ¹T. Seifert, ¹H. Siegel, ¹F. Tauber,
⁴R. Turnewitsch, ²T. Wever, ¹K. Ziervogel

¹ IOW, ² FWG, ³ GKSS, ⁴ Uni. Rostock, ⁵ WSA

Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Teilprojekte	5
3	Arbeitsprogramm	6
4	Zusammenfassung von Ergebnissen	10
4.1	Ergebnisse: Parametrisierung der Modelle / Verifizierung	10
4.2	Ergebnisse: Modellierung	11
4.3	Ergebnisse: Anwendung des Sedimenttransportmodells	12
5	Experimentelle Bestimmung der Sedimenteigenschaften	13
5.1	Sedimentstabilität in Abhängigkeit von Fazies, Milieu und physikalischen Eigenschaften des Meeresbodens (TP 3.1)	13
5.1.1	Sedimentologie	13
5.1.1.1	Einleitung	13
5.1.1.2	Sedimentkartierung und –klassifizierung	15
5.1.1.3	Erosionsexperimente	22
5.1.1.4	Abschätzung von Erosionsmöglichkeiten	27
5.1.1.5	Zusammenfassung	33
5.1.2	Sedimentphysik	34
5.2	Biologische Prozesse am Meeresboden und im bodennahen Wasser	42
5.2.1	Biodeposition und Bioresuspension	42
5.2.1.1	Passive Effekte:	42
5.2.1.2	Aktive Effekte:	52
5.2.2	Bodennaher Partikeltransport und Scherfestigkeit von Sedimentoberflächen	61
5.2.2.1	Erosionsverhalten küstennaher Sedimente der Mecklenburger Bucht	62
5.2.2.2	Partikeldynamik in der bodennahen Wassersäule und an Grenzflächen sowie deren Charakterisierung	66
5.2.2.3	Ergebnisse des Eventsamplereinsatzes	74
6	Verklappungsexperiment	79
6.1	Übersicht	79
6.1.1	Zielstellung und Ablauf des Experiments	81
6.1.1.1	Zielstellung des Klappexperiments	81
6.1.1.2	Voraussetzungen für das Klappexperiment	81
6.1.1.3	Durchführung des Verklappungsexperiments	82
6.2	Beobachtungen in der Wassersäule	83
6.3	Boden / Sediment	84
6.3.1	Sidescan-Sonar-Aufnahmen des DYNAS-Testfeldes und kombinierte Visualisierung der Sidescan-Sonar-Daten mit den GKSS-Fächerlot- Daten	84
6.3.2	Vermessung der Klappstelle mit einem Flachwasserfächerecholot	85
6.3.2.1	Bathymetriedaten vom August 2001	85
6.3.2.2	Bathymetriedaten vom Oktober 2002	86
6.3.2.3	Vergleichende Betrachtung der Fächerlotpeilung von August 2001 und Oktober 2002	87
6.3.2.4	Absolute und relative Volumenberechnung	89

6.3.3	Erfassung der DYNAS Sedimentverklappung (Sand) vom 21.6.2001 mit Rundumsicht-Sonar (NEU!)	91
6.3.3.1	Messsystem	91
6.3.3.2	Messungen	91
6.3.3.3	Ergebnisse	91
6.3.3.4	Zusammenfassung	93
6.3.3.5	Ökologische Auswirkungen auf die Makrofauna	93
7	Modellierung	96
7.1	Übersicht	96
7.2	Sekundärdaten	97
7.3	Parametrisierung des IOW-Sedimenttransportmodells	98
7.3.1	mittlere Korngröße (md)	99
7.3.2	kritische Schubspannung (u^*)	100
7.3.3	Rauhigkeitslänge (z_0)	104
7.4	Numerische Simulation	106
7.4.1	Aufgabenbeschreibung	106
7.4.2	Modellkonzept	106
7.4.2.1	Wellenmodell	108
7.4.2.2	Bodengrenzschichtmodell	108
7.4.2.3	Sedimenttransportmodell	110
7.4.3	Modellergebnisse	111
7.4.4	Zusammenfassung	115
7.4.5	Weiterführende Arbeiten	116
7.5	Korrelation von sedimentologischen Daten und Simulationsergebnissen	122
8	Datenbank und GIS	124
8.1	Einleitung	124
8.2	Datenbankmanagementsystem (DBMS)	124
8.3	Implementation	125
8.4	Datenbankstruktur	125
8.5	Datenbankzugriff über die DYNAS-Homepage	127
8.6	Datenbankzugriff über ODBC	128
8.7	GIS	129
	Literatur	130
	Anlage 1	
	Anlage 2	

1 Zusammenfassung

Mit dem Verbundvorhaben wird ein Beitrag zum vertieften Verständnis der Sedimentationsprozesse in der Mecklenburger Bucht geleistet. Seit Juli 2000 bearbeitet ein Team von Sedimentologen, Benthos- und Mikrobiologen, Sedimentphysikern und physikalischen Ozeanographen des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde, des FB Biologie der Universität Rostock gemeinsam mit Kooperationspartnern Fragen des Transports, der Erosion und Akkumulation von sedimentärem Material. Die Beantwortung dieser Fragen spielt eine entscheidende Rolle bei der genetischen Interpretation von Sedimentverteilungsmustern aber auch bei praktischen Fragen der Entscheidung über die Verbringung von Baggergut bzw. ökologische Auswirkungen des Abbaus submariner Lagerstätten. Eine Schlüsselrolle spielt der Einsatz eines gekoppelten 3D-Strömungsmodells, in das Module zur Beschreibung von Sedimenttransportprozessen integriert wurden. Zur Parametrisierung der Modelle wurden auf der einen Seite die Stabilitätseigenschaften verschiedener Sedimenttypen in Abhängigkeit von Lithofazies, physikochemischem Milieu und mikro- bzw. benthosbiologischen Prozessen experimentell untersucht. Auf der anderen Seite galt das Interesse bei experimentellen Arbeiten der Partikeldynamik und ihrer Abhängigkeit von biologischen Prozessen. Besonderen Raum nahm ein Verklappungsexperiment von Baggergut vor der Mecklenburgischen Küste ein. Nach der Verbringung von ca. 2800 m³ Mergel und ca. 2500 m³ Sand auf ein Probeklappfeld erfolgte ein Monitoring zur Registrierung von natürlichen Verdriftungsprozessen und ökologischen Folgen der Verklappung.

Durch Einsatz geostatistischer und informationstechnologischer Verfahren konnten die an Proben aus Schlüsselgebieten gewonnenen Daten auf das gesamte Untersuchungsgebiet mittels Proxy-Variablen regionalisiert und entsprechend als Parameterfelder an das 3D-Transportmodell übergeben werden. Numerische Simulationen mit realen meteorologischen Daten des Jahres 1993 zeigen für die Mecklenburger Bucht und die Pommersche Bucht spezielle Transportmuster. Die Verteilung kritischer Bodenschubspannungen und ihre Variationsbreite im Untersuchungsgebiet kann für eine Kartierung erosionsgefährdeter Gebiete verwendet werden. Hierbei ergaben sich deutliche Unterschiede im Erosionsverhalten zwischen den natürlichen Sedimenttypen und der darüber lagernden Fluff-Auflage. Ein Vergleich mit einem erarbeiteten visuellen Verfahren zur Abschätzung von Erosionsereignissen ist möglich. In der ersten Projektphase, über die hier berichtet wird, liegt der Schwerpunkt auf der Modellentwicklung und experimentellen laborativen Untersuchungen zur Parametrisierung der Modelle. In einer zweiten Phase sollen zur Parametrisierung insbesondere die in-situ-Messungen fortgeführt werden. Hier geht es um das komplexe Zusammenspiel vor allem biologischer Komponenten der Lithotypen für die generalisierende Bewertung der biogenen Einflüsse auf die Sedimentstabilitäten. Im Rahmen der Modellierung soll in dieser zweiten Phase das Modellexperiment im Vordergrund stehen. Dabei werden unter Verwendung von konkreten Wetterdaten realistische Transportszenarien abgeleitet. Einen Schwerpunkt wird die Beantwortung der Frage nach der Rolle von Extremereignissen für den Sedimenttransport spielen. Es ist die Modellierung von Transportprozessen über mehrere Modelljahre vorgesehen.

Die besonders effektive gemeinsame Bearbeitung der Forschungsaufgabe der bearbeitenden Institutionen mit den Kooperationspartnern soll fortgeführt werden. Das betrifft besonders das Sedimentmonitoring auf der Probeklappstelle. In der zweiten Projektphase ist weiterhin insbesondere die Übergabe sowohl von Werkzeugen zur Simulation von Sedimenttransporten als auch der Untersuchungsergebnisse in der westlichen Ostsee an einen breiten Nutzerkreis der Grundlagen- und angewandten Forschung vorgesehen.

2 Teilprojekte

Die Aufgabe wurde im Rahmen folgender Teilprojekte bearbeitet:

Koordination

Teilprojekt 1: **Koordinierung und Datenmanagement**
Teilprojektleiter:
Prof. Dr. J. Harff, Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Modellierung

Teilprojekt 2: **Entwicklung und Anwendung des Sedimenttransportmodells**
Teilprojektleiter:
Prof. Dr. W. Fennel, Prof. Dr. J. Harff, IOW

Parametrisierung

Teilprojekt 3.1: **Sedimentstabilität in Abhängigkeit von Fazies, Milieu und physikalischen Eigenschaften des Meeresbodens – Schwebstoffdynamik in der Wassersäule**
Teilprojektleiter:
Dr. habil. W. Lemke, Dr. R. Endler,
Dr. H. Siegel, Dr. F. Tauber, IOW

Teilprojekt 3.2: **Biodeposition und Bioresuspension**
Teilprojektleiter:
Prof. Dr. G. Graf, FB Biologie, Universität Rostock

Teilprojekt 3.3: **Prozesse der bodennahen Aggregatbildung, mikrobielle Besiedlung und Einfluss auf die Scherfestigkeit von Sedimentoberflächen**
Teilprojektleiter:
Prof. Dr. G. Graf, FB Biologie, Universität Rostock
Dr. S. Forster, Dr. T. Leipe, IOW

Im Laufe der Projektarbeit wechselte Frau Prof. Dr. K. Lochte vom IOW an die Universität Kiel. Ihre Aufgabe im Rahmen des Teilprojekts 3.3 wurde von Herrn Dr. S. Forster vom IOW gemeinsam mit Herrn Prof. Dr. G. Graf von der Universität Rostock übernommen.

3 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm stellt eine Integration von Feld-, Labor und Modellierungsarbeiten dar. Von prinzipieller Bedeutung ist die Festlegung der Arbeitsgebiete für die Feldarbeiten. Diese nehmen die Rolle von Schlüsselregionen ein, die exemplarisch für die gesamte Untersuchungsregion stehen. Neben einem natürlichen, nicht anthropogen beeinflussten Gebiet sind zwei anthropogen gestörte Arbeitsgebiete ausgewählt worden (Abb.3-1).

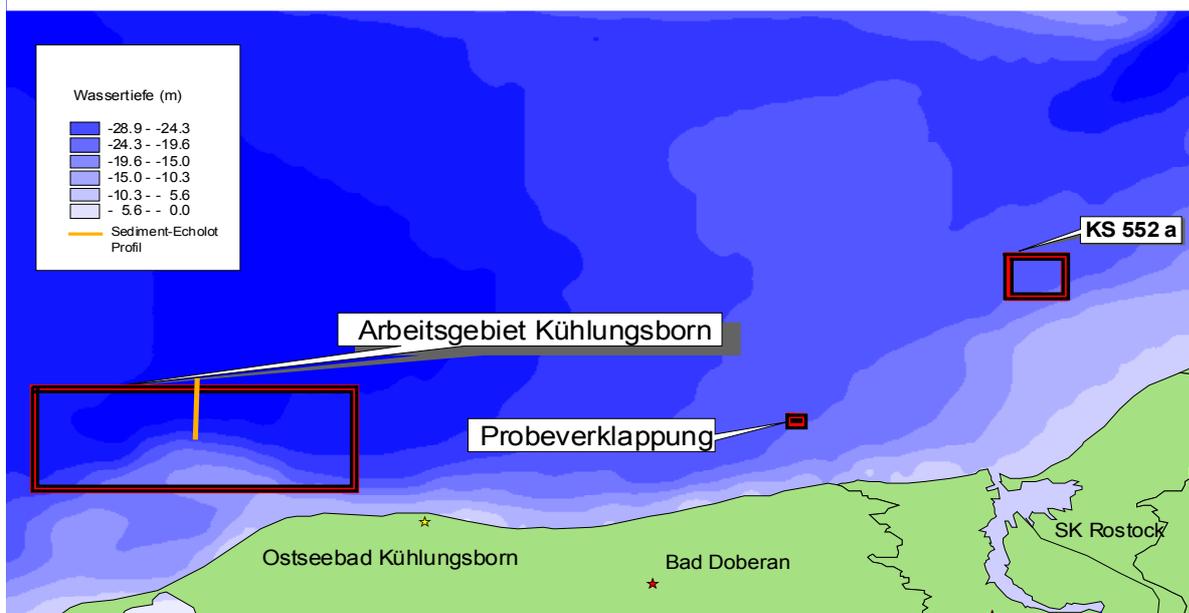


Abb.3-1 Schlüssel-Arbeitsgebiete für das Forschungsvorhaben DYNAS.

- Bei der Auswahl der „Schlüsselregion Kühlungsborn“ wurde berücksichtigt, dass hier alle wichtigen im Untersuchungsgebiet anstehenden Sedimenttypen auf relativ engem Raum nebeneinander anzutreffen sind. Ferner bietet dieses Gebiet wegen seiner relativ geringen Entfernung zum Hafen Rostock gute logistische Voraussetzungen.
- Die Baggerschüttstelle 552a ist bereits beim Monitoring durch das WSA und die BfG sowie bei Vorarbeiten zu diesem Projekt ersten Untersuchungen unterzogen worden (s.o.) und bildet eine Typuslokalität für anthropogen beeinflusste Sedimentation im Flachwasserbereich.
- Um die natürliche Verdriftung von Baggerboden mit definierten Eigenschaften studieren zu können, wurde eine Probeverklappung in einem speziell dafür ausgewählten Gebiet durchgeführt. Die Lokalität wurde wegen ihrer vermittelnden Stellung zwischen den beiden o. g. Gebieten ausgewählt. Es ist nicht damit zu rechnen, dass der Einfluss der nordöstlich gelegenen KS 552a hier noch eine Rolle spielt. Hinzu kommt, dass sich dieser Bereich in einer günstigen Entfernung von potentiellen Baggeraktivitäten befindet und somit keine Mehrkosten für eine Probeverklappung anfallen dürften.

Der Ablauf der Arbeiten der ersten Projektphase geht aus dem Netzplan in Abb.3-2 hervor. Horizontal erfolgt die Lösung der Forschungsaufgabe nach einer Sichtung der Archive („Data-Archaeology“) entlang der Schwerpunktklinien „Experimente“, „Modellentwicklung“ und „Regionalisierung/Szenarien/Synthese“. Gemeinsame Aktionen, die vertikal zwischen diesen Schwerpunktaufgaben integrieren, sind 12 Expeditionsphasen, in die Schiffe aller beteiligten Einrichtungen (IOW, WSA, FWG, GKSS) eingebunden waren. Eine Konzentration der Expeditionstätigkeit findet sich im Zeitraum April bis August 2001 zum Zeitpunkt der Probeverklappung am 20./21. Juni 2001. Dem permanenten „vertikalen“ Austausch zwischen den Arbeitsgruppen (Vernetzung) dient ein internes und externes Kommunikationssystem (s.u.). Zudem wurde die Planung durch die Setzung von Meilensteinen strukturiert (Tab. 3-1). Dem direkten Informationsaustausch dienen Workshops, die jeweils zu den Meilensteinterminen abgehalten werden und die der Justierung der Arbeitsprogramme an die aktuellen Entwicklungen bei der Projektbearbeitung dienen. Protokolle mit Festlegungen werden auf der Projekt-Homepage veröffentlicht.

Tab. 3-1: Meilensteinplanung per 25.09.2001

Meilenstein	Termin	Ergebnis	Form der Ergebnisdarstellung
1	31.8.2000	Sedimenttypisierung nach Recherche vorliegender Daten, Zuordnung von Parametern zu Sedimenttypen, Festlegung von repräsentativen Probenentnahmestationen	Daten in digitaler Form
2	31.3.2001	Ergebnisse von Expeditionen 1 und 2, Empfehlungen für Probeverklappung und Expedition 3, Modellierungswerkzeug als Softwaretool, Zwischenergebnisse von Experimenten der TP, Übersichtsregionalisierung von Sedimentparametern	Daten in digitaler Form, Zwischenbericht
3	31.9.2001	Ergebnisse der Probeverklappung Erste Szenarienrechnungen (Experimente) für Ausbreitung von Suspensionsfahnen und Verteilung resuspendierter Sedimente, Optimierung der Sedimentparameter, Empfehlungen für Expedition 5	Daten in digitaler Form
4	31.3.2002	Ergebnisse von Langzeit- und Kurzzeitsimulationen, Optimierung der Sedimentparameter, Beginn der Publikationstätigkeit, Empfehlungen für Expeditionen 6 und 7	Daten in digitaler Form Zwischenbericht
5	30.11.2002	Abschluss von Labor- und Feldarbeiten und Modellexperimenten, Beginn der Synthesephase	Daten in digitaler Form, Zwischenbericht
6	31.5.2003	Projektabschluss	Daten in digitaler Form, Abschlussbericht

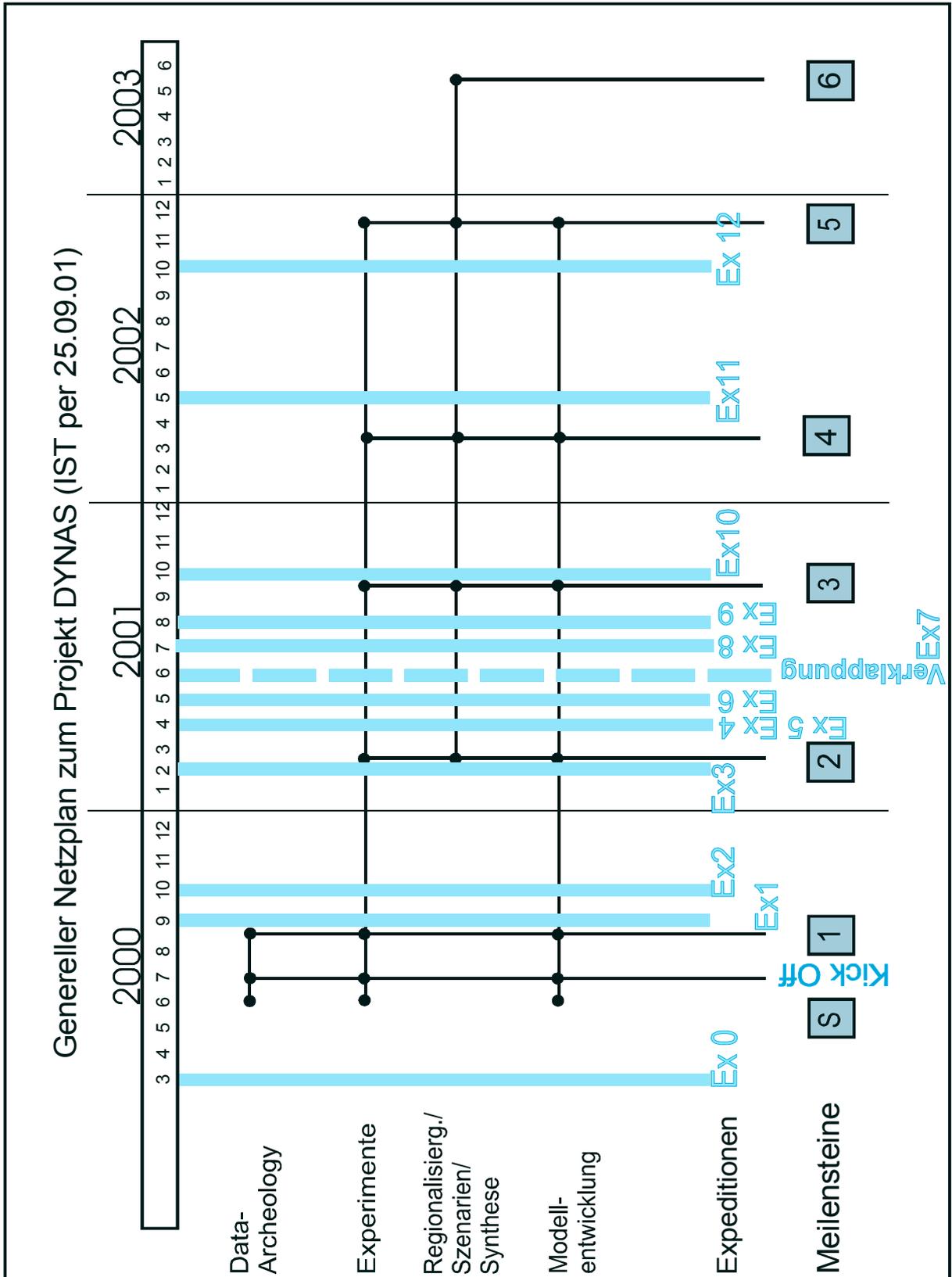


Abb.3-2: DYNAS Arbeitsplan.

4 Zusammenfassung von Ergebnissen

Das übergreifende Ziel des Projekts besteht in der Erarbeitung eines integrierten Modells der Sedimentdynamik und seiner Anwendung auf den Seebereich zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonabecken.

Um diesen Zielen näher zu kommen, sind umfangreiche experimentelle Prozessstudien, Feldarbeiten und Aufarbeitung existierender Daten notwendig. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurden Parameter und Prozessformulierungen bereitgestellt, die in einem Modellsystem zur Beschreibung sedimentologischer Prozesse sowie zur Berücksichtigung biologischer Einflüsse verwendet werden. Mit dem entstandenen Modellsystem werden die natürlichen Transportwege für unterschiedliches partikuläres Material unter wechselnden hydrographischen Bedingungen sowie die Verteilungsmuster suspendierter Partikel aus einem definierten Eintragsbereich untersucht, Bilanzierungen von Transporten natürlicher und anthropogener Sedimente vorgenommen und Szenarien für variierende Bedingungen berechnet. Dieses Modell integriert die Beschreibung von Strömungsprozessen, sedimentologischen Prozessen sowie biologische Aspekte der Materialtransformation.

Im Folgenden werden die im Projekt erreichten Ergebnisse in kurzen Zusammenfassungen dargestellt. Die Gliederung ergibt sich aus den Teilzielen des Forschungsprojektes, wie sie im Förderungsantrag formuliert worden waren.

4.1 Ergebnisse: Parametrisierung der Modelle / Verifizierung

Sedimentologie/Sedimentphysik (TP 3.1)

Es lassen sich granulometrisch 6 verschiedene Sedimenttypen aushalten. Ihre kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten wurden experimentell ermittelt. Ergebnisse des Strömungskanals und der Erosionskammer lassen sich numerisch kalibrieren. Änderungen sedimentphysikalischer Parameter mit der Tiefe sind in den oberen 40 cm Sediment nachweisbar. Dem Sediment auflagernde Fluff-Flocken zeigen ein spezielles Transportverhalten. Unterschiede zwischen ungestörten und gestörten Sedimenten sind aus methodischen Gründen nicht nachweisbar. Ein Gerät zur Entnahme ungestörter Proben befindet sich in der Entwicklung.

Biodeposition und –resuspension (TP 3.2)

Unterschieden nach aktiven und passiven Effekten lassen sich durch Experimente im Strömungskanal und im Ringkanal die Auswirkungen der Organismen auf die Biodeposition und Bioresuspension quantitativ nachweisen. Einzelobjekte haben starke passive Effekte auf die Strömung. Erhebungen wirken sich dabei deutlicher aus als Vertiefungen. Erosions- und Depositionseigenschaften des Sediments ändern sich mit der Besiedlungsdichte. Diese Beziehung ist quantifizierbar und kann somit bei vorliegenden kartographischen Informationen über die Besiedlungsdichte regionalisiert und damit zur Parametrisierung der Modelle verwendet werden. Aus Messdaten der aktiven Effekte der Bodenfauna lassen sich Annahmen über die

Änderung der Bodenrauigkeit bezogen auf einen anstehenden Sedimenttyp ableiten.

Bodennaher Partikeltransport und Scherfestigkeit von Sedimentoberflächen (TP 3.3)

Untersuchungen an saisonal entnommenen Sedimentproben zeigen, dass eine Korrelation, insbesondere beim Schlick (weniger deutlich beim Feinsand), zwischen Erosionsverhalten und Col S (Kohlehydratgehalt) besteht. Letzterer ist ein Ausdruck der Verklebung der Sedimentpartikel durch biogenen Schleim und variiert saisonal. Das Erosionsverhalten des Schlicks wird durch auflagernden Fluff beeinflusst, der saisonal unabhängig vorhanden war.

TPM reichert sich als Partikel und Aggregate an internen Grenzschichten an. Deutlich hängt die TPM-Konzentration vom unterlagernden Sediment ab. Insbesondere Fluff über Schlick bewirkt nach Starkwindereignissen eine erhöhte TPM-Konzentration in der Wassersäule. Mikrobielle Umsätze finden vorwiegend in der bodennahen Trübungszone statt. Am Boden ist der Sauerstoffgehalt durch mikrobielle Prozesse reduziert, biogene Partikel zeigen längere Verweilzeit im Pelagial (Aggregatbildung). Die Ergebnisse stammen aus Transektbeprobungen und Ergebnissen des Eventsamplers.

Verklappungsexperiment (TP 3.1, TP 3.2, TP 3.3)

Verklappte Sedimente erzeugen kraterähnliche Strukturen am Meeresboden, Geschiebemergel deutlicher strukturiert als Sand. Schwebstoffe wurden durch optische Methoden und ADCP-Messungen erfasst. Die Schwebstoffwolke sank schnell und war vom Flugzeug nach 40 Minuten, vom Schiff nach 60 Minuten, kaum noch optisch wahrnehmbar. Das Feinmaterial sammelte sich zunächst an der deutlich ausgebildeten Sprungschicht und war nur am Boden bis zwei Tage nach der Verklappung nachweisbar.

Vergleichsmessungen mit dem Fächerecholot von August 2001 zu Oktober 2002 lassen Bilanzierungen der Sedimentdrift im Laufe eines Jahres zu.

Erste Ergebnisse benthosbiologischer Untersuchungen belegen differenzierte Überlebenschancen von benthisch lebenden Arten in Abhängigkeit von den Überklappungshöhen.

4.2 Ergebnisse: Modellierung

Sekundärdaten (TP 1)

Aus den primären granulometrischen Daten lassen sich durch empirisch ermittelte Beziehungen Permeabilitätsdaten der Oberflächensedimente ableiten. Mit einem Faktor korrigiert ergeben diese auf die flächendeckend für die westlich Ostsee vorhandenen granulometrischen Daten bezogen eine entsprechende Permeabilitätskarte für sandige Sedimenttypen. Danach sind nicht alle sandigen Bereiche für advective Durchströmung hinreichend permeabel.

Parametrisierung des IOW-Sedimenttransportmodells (TP 1)

Mittels eines geostatistischen Ansatzes ist es möglich, nur „punktweise“ bestimmte Daten zur kritischen Schubspannung u^* und zur Rauigkeitslänge z_0 zu

regionalisieren und damit als flächendeckende Input-Parameter für das Ostseemodell zu verwenden. Dazu wird das Proxy-Target-Konzept angewendet, wobei als Proxy die flächendeckend vorliegende Information zur Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente als Target die Parameter u^* und z_0 fungieren. Das zur Interpolation der biologisch beeinflussten Rauigkeitslänge z_0^{bio} entwickelte Verfahren verarbeitet sowohl Einzelwerte als auch Wertebereiche, wie sie bei visuellen Schätzungen von Abundanzen bzw. Besiedlungsdichten zu erwarten sind. Die Regionalisierung der gewonnenen Parameter erfolgt im Rahmen eines GIS-Konzeptes.

Modellierung des Sedimenttransports (TP 2)

Ein implementiertes Modellkonzept beschreibt die grundlegenden physikalischen Prozesse des Sedimenttransports. In das am IOW genutzte hydrodynamische Modell MOM3 wurden Module zur Beschreibung der Auswirkung von Wellen auf den Sedimenttransport, ein Wellenmodell und ein Bodengrenzschichtmodell implementiert. Im Sedimenttransportmodell werden der Transport in Suspension und bodennaher rollender Transport berücksichtigt. Für die Arbeit mit dem Modell stehen eine Rechenanlage CRAY T3E, die eine räumliche Auflösung von 3 nm erlaubt und neuerdings der Hochleistungsrechner Nord zur Verfügung, mit dem eine Auflösung von 1 nm erreichbar ist.

4.3 Ergebnisse: Anwendung des Sedimenttransportmodells

Numerische Experimente (TP 2)

Erste numerische Experimente mit Wetterdaten des durch besondere Starkwindereignisse gekennzeichneten Jahres 1993 zeigen, dass es in der Mecklenburger Bucht und in der Pommerschen Bucht bevorzugte Transportwege für sedimentäres Material gibt. Diese Transportwege zeigen eine starke Abhängigkeit vom Typ des betrachteten sedimentären Materials. Während das SPM auch in die oberen Wasserschichten eingemischt werden kann, und somit aufgrund der vertikalen Stromscherung Ein- und Ausstrom am Transport mitwirken, wird der Sand vorwiegend durch den bodennahen Einstrom transportiert.

Die Bodenschubspannungen in der westlichen Ostsee zeigen eine starke räumliche Variabilität. Die auftretenden Maximalwerte der Bodenschubspannung im Modelljahr 1993 wurden kartiert.

Vergleich von Simulationsergebnissen und Sedimentdaten (TP 1)

Eine einfache grafische Methode erlaubt es, anhand von hydrographischen Simulationsergebnissen und Sedimentkarten Annahmen über das Erosionsrisiko am Meeresboden oberflächlich anstehender Sedimente bei meteorologisch initiierten „Strömungsereignissen“ abzuleiten.

5 Experimentelle Bestimmung der Sedimenteigenschaften

5.1 Sedimentstabilität in Abhängigkeit von Fazies, Milieu und physikalischen Eigenschaften des Meeresbodens (TP 3.1)

5.1.1 Sedimentologie

(B. Bohling, W. Lemke)

5.1.1.1 Einleitung

Im Rahmen des Dynas-Teilprojektes 3.1 wurden sedimentologische Arbeiten durchgeführt, die dem Ziel dienen, das Erosionsverhalten von Sedimenten in der Mecklenburger Bucht zu charakterisieren. Die Zielstellung war dabei zum einen die Klassifizierung von „dynamischen Sedimenttypen“ und zum zweiten die Bewertung des Verhaltens von anthropogenen, d.h. in ihrem natürlichen Verbund und Gefüge gestörten, Sedimenten im Gegensatz zu natürlichen Sedimenten. Das Untersuchungsgebiet war der südliche Teil der Mecklenburger Bucht zwischen Warnemünde und Kühlungsborn (Abb. 5-1). Aus älteren Kartierungen (Kolp 1966; SHD-DDR 1987; Harff et al. 1995) war bekannt, dass dort alle verschiedenen Sedimente der südlichen Ostsee auf engstem Raum auftreten und dieses Gebiet somit gut geeignet ist für eine Übertragung möglicher Ergebnisse auf ein größeres Areal, wie für die Modellierung erforderlich (vgl. Kapitel 7). Diese sedimentologischen Untersuchungen stellen dem Projekt Dynas somit „Hintergrundwerte“ der natürlichen Sedimentdynamik zur Verfügung.

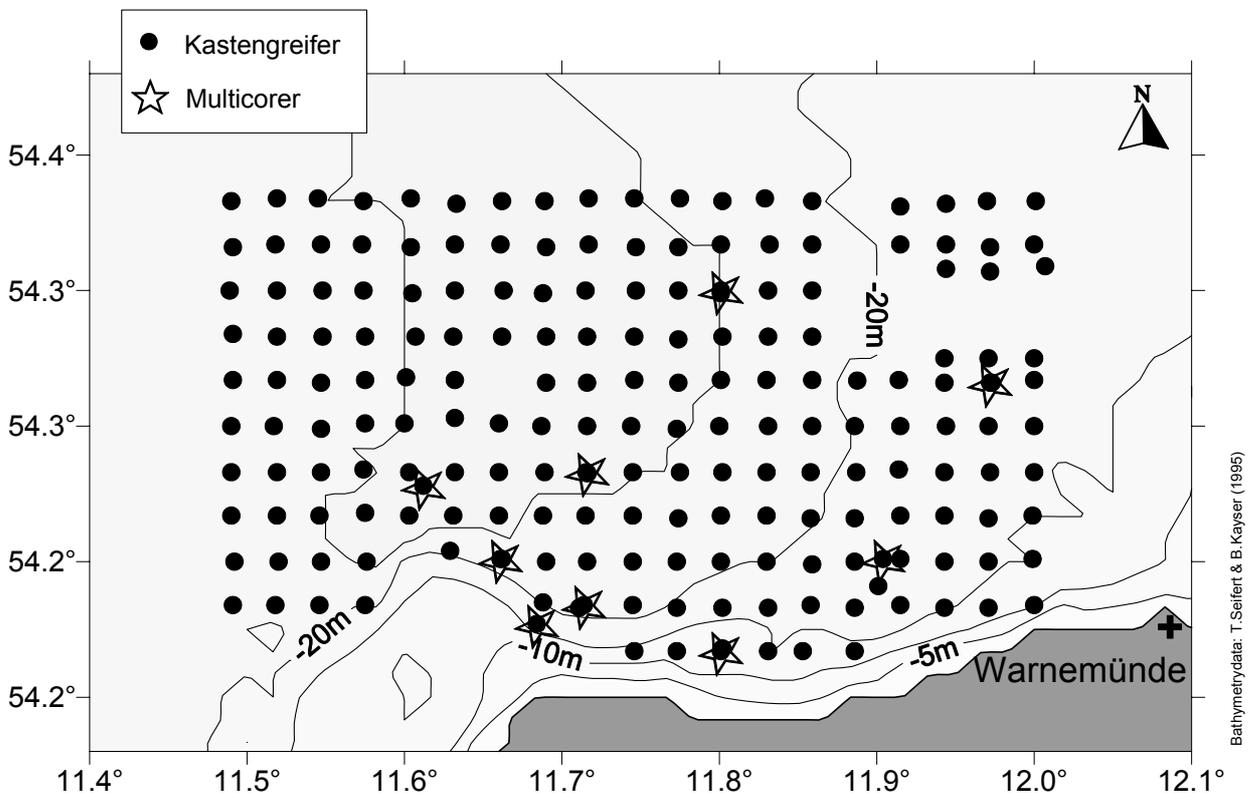


Abb. 5-1: Die Positionen der Proben für sedimentologische Untersuchungen in der Mecklenburger Bucht

Zur Charakterisierung des Erosionsverhalten von Sedimenten sind Kenntnisse über die sedimentologischen Parameter von entscheidender Bedeutung. Vor allem die Korngröße gilt als wichtige Größe für die Betrachtung von Transport- und Ablagerungsprozessen (z.B. Miller et al. 1977). Um auch weitere Sedimentparameter berücksichtigen zu können, wurde im Projekt Dynas das Konzept der „dynamischen Sedimenttypen“ entwickelt: Für die Sedimentdynamik relevante Parameter dienen dabei der Klassifikation von Sedimenttypen. Mit ausgewählten Proben dieser Typen wurden Erosionsexperimente durchgeführt, deren Ergebnisse den kartierten Typen zugeordnet wurden. Vor allem für kohäsive Sedimente sind Experimente weiterhin die einzige Möglichkeit, das Erosionsverhalten zu erfassen. Im Gegensatz zu nichtkohäsiven Sanden sind für diese Sedimenttypen bis heute keine allgemein gültigen Formeln bekannt (Lau und Droppo 2000) und es wird generell empfohlen, wo möglich, Erosionsexperimente durchzuführen (Whitehouse et al. 2000). Für die Bewertung eines Erosionsrisikos ist der Erosionsschwellenwert, der Zustand bei dem die Bewegung erster Partikel beginnt und der mit der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit (u^*_{cr}) angegeben wird, der experimentell zu bestimmende Parameter. In der Tab. 5-1 ist eine Auswahl wichtiger Arbeiten aufgelistet, sowohl klassischer Werke als auch jüngere Beiträge, die sich mit der Ermittlung einer Beziehung zwischen dem Schwellenwert des Erosionsbeginns unter Strömungseinfluss und Sedimentparametern beschäftigen.

Tab. 5-1: Auswahl an Literatur zur Ermittlung einer Beziehung zwischen dem Schwellenwert des Erosionsbeginns unter Strömungseinfluß und Sedimentparametern

Autor	Thema
Hjulström 1935	Kritische Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Korngröße (z.T. nur Ansprachen, keine Korngrößenmessung), Berücksichtigung der Kohäsivität, aber nur dünne Datengrundlage im feinen Korngrößenbereich
Shields 1936	Dimensionsloser „Shieldsparameter“ in Abhängigkeit von der Reynoldszahl, aber Methodik zur Ermittlung des Schwellenwertes „nicht völlig klar“ (Kennedy 1995), nur nicht-kohäsive Sedimente
White 1970	Ermittlung der kritischen Schubspannung für Oberflächensedimente mit geringer Dichte, Anpassung durch (Roberts et al. 1998)
Zanke 1977	Anpassung an Hjulström: tiefengemittelte, kritische Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße
Miller et al. 1977	Zusammenfassung von Schwellenwerten für nicht-kohäsive, gut sortierte Sedimente mit gerundeten Partikeln bei flachen Böden ohne Bodenformen und gleichgerichteter Strömung
Unsöld 1982	Erweiterung der Shields-Kurve im feinkörnigen Bereich
Komar und Clemens 1985	Shields-Parameter in Abhängigkeit von Sinkgeschwindigkeit und Korndichte
Mitchener und Torfs 1996	Ermittlung der kritischen Schubspannung für Schlick/Sand-Gemische
Krögel 1997	Kritische Schubspannungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit, ermittelt durch eine Anpassung an die Shields-Kurve
Soulsby und Whitehouse 1997	Ermittlung eines für den feinkörnigen Bereich korrigierten Shields-Parameters in Abhängigkeit von der dimensionslosen, sedimentologischen Korngröße
Le Roux 1998	Ermittlung des „Shields-Parameters“ mit einer dimensionslosen Sinkgeschwindigkeit, basierend auf Literaturdaten
Roberts et al. 1998	Ermittlung der kritischen Schubspannung in Abhängigkeit von Korngröße und Dichte (berechnet über Wassergehalt) für Quarzkörner, Schwellenwert definiert über eine bestimmte Erosionsrate

5.1.1.2 Sedimentkartierung und –klassifizierung

5.1.1.2.1 Erfassung der Sedimentparameter und Kartierung

Zur Kartierung und Klassifizierung von Sedimenttypen wurden im Untersuchungsgebiet rund 190 Kastengreiferproben gewonnen (Oberflächenproben, 0-3 cm, Abb. 5-1), an denen Sedimentparameter ermittelt wurden, die einen Bezug zum dynamischen Verhalten von Sedimenten haben können: Korngröße, Sortierung, Silt- und Tonanteil, Wassergehalt, Gehalt organischen Kohlenstoffs (TOC), Sinkgeschwindigkeit, Kornform. Zur regionalen Verteilung dieser Parameter wurden Karten angefertigt.

Aufgrund methodischer Voruntersuchungen wurden zur Korngrößenanalytik folgende Methoden angewendet: Zur Analyse von Sedimenten mit einem TOC von über 1,5 % (Schlicke) diente ein laseroptisches Partikelanalysegerät („Galai CIS-50“) (Aharonson et al. 1986; Scholle et al. 1996; Weiner et al. 1998). Für sandige Sedimente mit einem TOC von unter 0,25 % wurde eine klassische Trockensiebung (z.B. McManus 1988) gewählt (Siebanlage „Retsch AS 200 control“). Für die Übergangssedimente (TOC > 0,25 % und < 1,5 %) wurde eine Kombination aus Nass- und Trockensiebung angewendet, um eine vollständige Erfassung des Silt- und Tonanteils zu gewährleisten. Die Bestimmung des TOC erfolgte an einem C/S-Analysegerät „Eltra Metallic 100“. Der Wassergehalt wurde berechnet aus der Differenz zwischen Feuchtgewicht und Trockengewicht der gefriergetrockneten Probe. Die Messung der Sinkgeschwindigkeit ausgewählter Proben geschah in einer Sedimentationsröhre („Macrogranometer“) am Forschungsinstitut Senckenberg in Wilhelmshaven (Brezina 1979).

Mit Hilfe eines dem laseroptisches Partikelanalysegerät „Galai CIS-50“ angeschlossenen Bildbearbeitungsprogramms erfolgte eine Erfassung der Kornform. Allerdings zeigte sich, dass die Kornform mit einem Formfaktor von etwa 0,7 für alle Sedimenttypen identisch ist. Hierbei handelt es sich um einen typischen Wert für natürliche Gewässersedimente (Zanke 2002). Im Untersuchungsgebiet kann somit der Einfluss der Kornform auf Unterschiede im sedimentdynamischen Verhalten vernachlässigt werden.

Die Abb. 5-2 zeigt kartierte Sedimentparameter im Untersuchungsgebiet. Die Regionalisierung der Daten erfolgte nach dem Kriging-Verfahren (Journel und Huijbregts 1978). Die kartierte mittlere Korngröße reicht von 7 μm bis zu etwa 740 μm . Deutlich zu erkennen sind die feinkörnigen Schlicke in den Arealen mit größerer Wassertiefe und eine Vergröberung der Sedimente mit zunehmender Küstennähe und in östliche Richtung. Berechnet wurde die mittlere Körngröße nach der Momentmethode (z.B. McManus 1988). Die Sortierung, berechnet nach Folk und Ward (Folk und Ward 1957; Folk 1966), ergibt schlecht sortierte feinkörnige Sedimente und eine Verbesserung der Sortierung mit zunehmender Korngröße. Der Silt- und Tonanteil spiegelt das Muster der Verteilung von fein- und grobkörnigeren Sedimenten wider, mit hohen Gehalten über 50 Gew.-% in den Schlicken, 5 bis 15 Gew.-% in einem Übergangsbereich und unter 5 Gew.-% in den Sanden. Eine ähnliche Verteilung zeigt auch der Wassergehalt, der Werte zwischen 71 Gew.-% (Schlick) und 10 Gew.-% (Sand) annimmt. In Abb. 5-3 sind weitere Sedimentparameter dargestellt. Der TOC erreicht demnach im Schlick Werte bis zu etwa 6 Gew.-%, während die Sande teilweise TOC-frei sind. Die gemessene Sinkgeschwindigkeit des Anteils > 60 μm liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 0.8 und 7.6 cm/s. Aus den ermittelten Sedimentparametern können sekundäre Parameter abgeleitet werden: In Abb. 5-3 sind die Permeabilität für mindestens gut sortierte Sedimente dargestellt, berechnet nach Krumbein und Monk (1942) und angepasst an experimentelle Daten nach Forster et al. (subm.). Ebenfalls abgebildet ist die Sedimentdichte, abgeschätzt über den Wassergehalt (z.B. Roberts et al. 1998). Die Tab. 5-2 führt Korrelationen zwischen miteinander in Beziehung stehenden Parametern auf, die das Abschätzen von Parametern der Oberflächensedimente in der Mecklenburger Bucht ermöglichen.

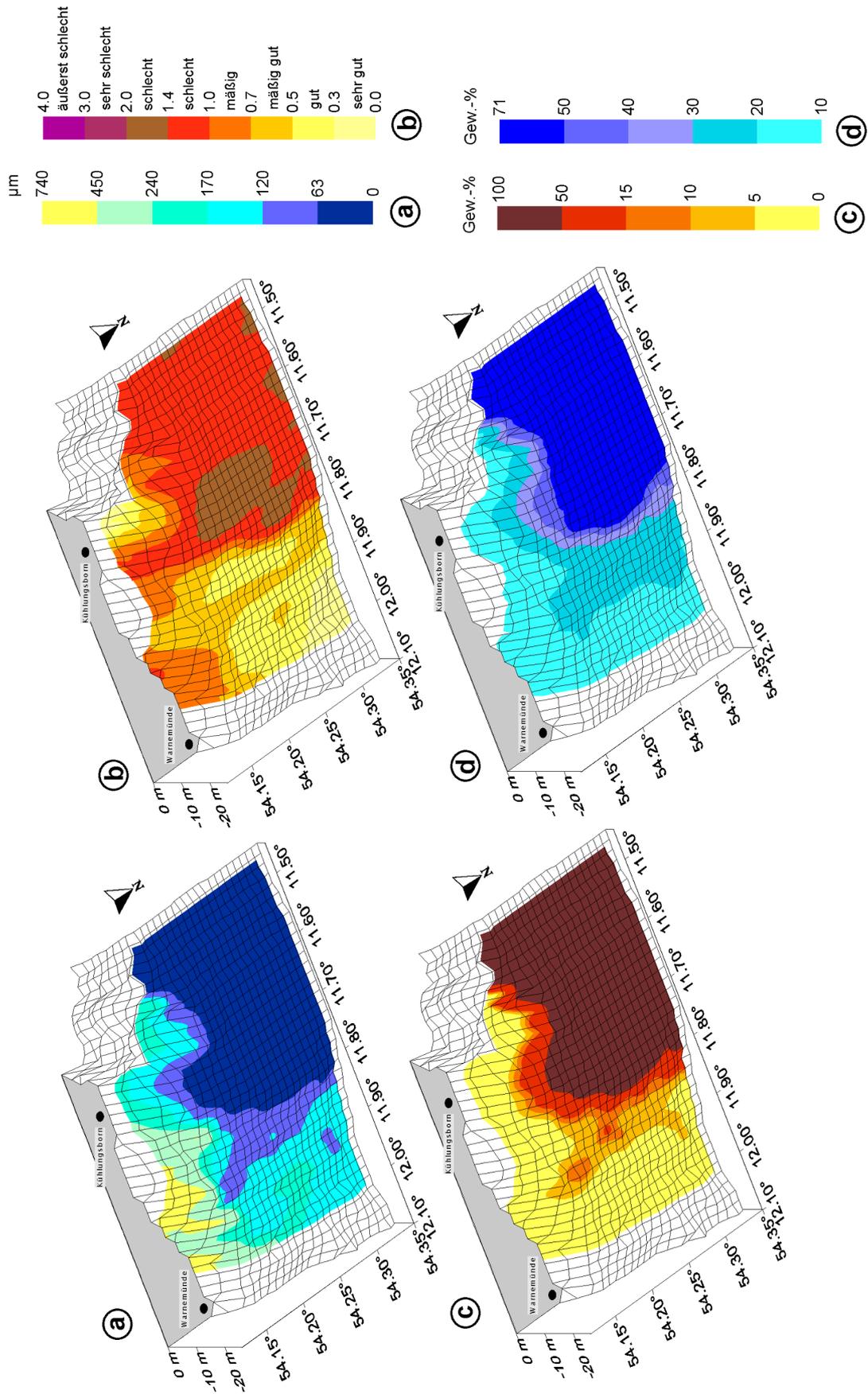


Abb. 5-2: Oberflächensedimente der Mecklenburger Bucht: a) mittlere Korngröße (µm), b) Sortierung (nach Folk und Ward 1957), c) Silt- und Tonanteil (Gew.-%), d) Wassergehalt (Gew.-%)

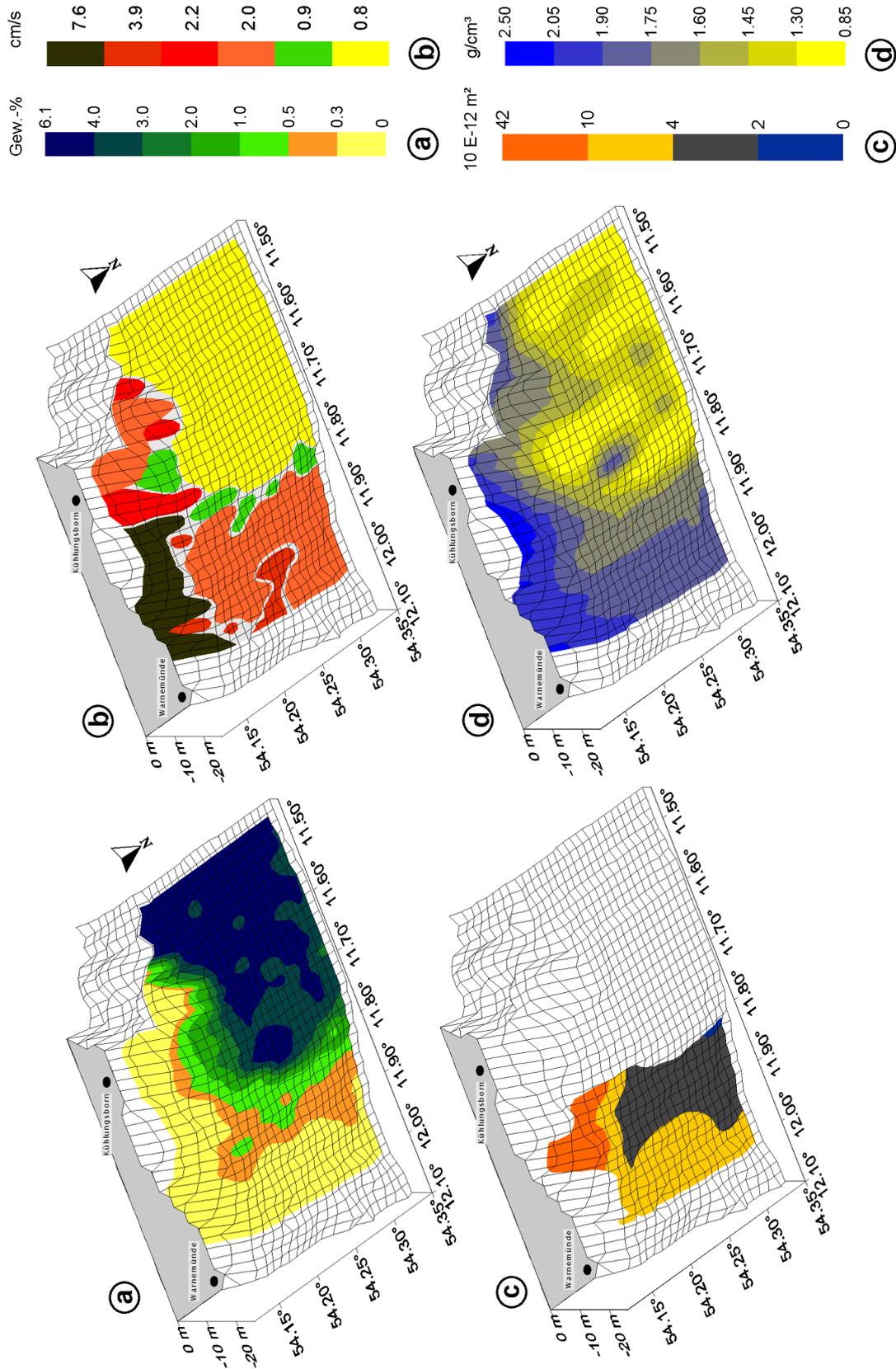


Abb. 5-3: Oberflächensedimente der Mecklenburger Bucht:
 a) TOC (Gew.-%), b) mittlere Sinkgeschwindigkeit (cm/s) der Fraktion > 60 μm ,
 c) Permeabilität nach Krumbein und Monk (1942) und Forster et al. (subm.)
 d) Sedimentdichte (g/cm^3), abgeschätzt über Wassergehalt (z.B. Roberts et al. 1998)

Tab. 5-2: Beziehungen zwischen Parametern von Oberflächensedimenten in der Mecklenburger Bucht

x	y	f(x)	R ²
mittlere Korngröße (µm)	Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	$y = 83,135e^{-0,019x}$	0.7468
mittlere Korngröße (µm)	Wassergehalt (Gew.-%, bezogen auf Feuchtgewicht)	$y = 163,48x^{-0,4082}$	0.9443
mittlere Korngröße (µm)	TOC (Gew.-%)	$y = 59,393x^{-1,0659}$	0.9093
Wassergehalt (Gew.-%, bezogen auf Feuchtgewicht)	TOC (Gew.-%)	$y = 0,0001x^{2,6083}$	0.9608
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	TOC (Gew.-%)	$y = 0,0421x + 0,0155$	0.9562
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	Wassergehalt (Gew.-%, bezogen auf Feuchtgewicht)	$y = 0,6405x + 6,1904$	0.9694

5.1.1.2 Sedimentklassifizierung

Mit Hilfe einer Cluster- und Diskriminanzanalyse (Programm „SPSS“) erfolgte eine Klassifizierung in 6 Sedimenttypen, die anschließend wie folgt korrigiert wurde: Entsprechend der methodischen Grenze wurden Sedimente mit einem TOC über 1,5 Gew.-% dem Typ 1 (Schlick) zugeordnet. Feinsande mit einem Silt- und Tonanteil von über 15 Gew.-% bilden den Typ 2 (schlickiger Feinsand). Aus der Literatur ist bekannt, dass bei entsprechenden Silt- und Tonanteilen mit kohäsivem Verhalten zu rechnen ist (Mitchener und Torfs 1996). Die Tab. 5-3 zeigt eine Aufstellung der Sedimenttypen und ihrer Parameter, ebenso Abb. 5-4. In Abb. 5-5 ist die Verteilung dieser Typen im Untersuchungsgebiet dargestellt. Ausgehend von dieser Klassifizierung wurden Stationen ausgewählt, an denen Proben (Multicorerproben) für Erosionsexperimente gewonnen wurden (Abb. 5-1). Die wiederholte Beprobung dieser Multicorerstationen zeigte, dass kleinräumige Variationen der ermittelten Sedimentparameter innerhalb eines Sedimenttyps an einer Station in der gleichen Größenordnung liegen, wie die großräumigen Variationen (Tab. 5-3) innerhalb des Verbreitungsgebietes eines Sedimenttyps.

Tab. 5-3: Die natürlichen Sedimenttypen der Mecklenburger Bucht und ihre Parameter, n = Anzahl der Proben im Untersuchungsgebiet, Stabw. = Standardabweichung.

Typ 1: Schllick (TOC > 1.5 %), n = 103				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	14.02	7.64	36.40	5.58
mittlere Korngröße (phi)	6.25	4.78	7.03	0.51
Sortierung (Folk&Ward)	1.34	1.04	1.81	0.18
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	95.27	54.46	100.00	9.09
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	57.77	43.49	66.50	4.35
TOC (Gew.-%)	4.03	1.63	5.69	0.67
Wassertiefe (m)	24.17	22.10	27.00	0.87
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	0.82			

Typ 2: schlickiger Feinsand (Silt- und Tonanteil > 15 %), n = 12				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	70.76	43.76	92.26	16.27
mittlere Korngröße (phi)	3.86	3.44	4.51	0.35
Sortierung (Folk&Ward)	0.46	0.32	0.64	0.10
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	25.34	19.29	37.57	5.53
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	32.90	27.98	38.39	3.17
TOC (Gew.-%)	0.98	0.49	1.29	0.22
Wassertiefe (m)	21.51	20.00	23.90	1.22
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	0.94			

Typ 3: gut sortierter Feinsand, n = 53				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	134.92	90.21	180.37	25.32
mittlere Korngröße (phi)	2.92	2.47	3.47	0.28
Sortierung (Folk&Ward)	0.40	0.26	0.75	0.09
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	4.89	0.15	14.04	4.42
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	21.77	16.46	33.63	3.56
TOC (Gew.-%)	0.33	0.07	0.93	0.20
Wassertiefe (m)	18.71	14.90	22.10	1.55
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	1.99			

Typ 4: schlecht sortierter Fein- bis Mittelsand, n = 7				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	170.27	96.41	229.63	51.98
mittlere Korngröße (phi)	2.62	2.12	3.37	0.48
Sortierung (Folk&Ward)	1.11	0.81	1.46	0.22
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	10.12	1.39	23.13	8.59
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	22.43	14.61	32.12	6.41
TOC (Gew.-%)	0.51	0.07	1.11	0.37
Wassertiefe (m)	17.37	12.60	21.70	4.09
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	2.18			

Typ 5: gut sortierter Mittelsand, n = 6				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	207.24	192.28	249.04	21.69
mittlere Korngröße (phi)	2.28	2.01	2.38	0.14
Sortierung (Folk&Ward)	0.57	0.49	0.65	0.05
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	0.24	0.07	0.45	0.13
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	17.02	16.19	18.18	0.74
TOC (Gew.-%)	0.12	0.10	0.15	0.02
Wassertiefe (m)	17.75	16.60	18.50	0.66
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	3.90			

Typ 6: gut bis mäßig sortierter Mittel- bis Grobsand, n = 7				
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
mittlere Korngröße (µm)	451.84	341.09	652.77	107.25
mittlere Korngröße (phi)	1.18	0.62	1.55	0.33
Sortierung (Folk&Ward)	0.76	0.49	0.94	0.18
Silt- und Tonanteil (Gew.-%)	0.40	0.02	0.87	0.30
Wassergehalt (Gew.-% bez. auf Feuchtgew.)	13.06	11.19	14.37	1.26
TOC (Gew.-%)	0.14	0.03	0.22	0.07
Wassertiefe (m)	12.63	10.60	15.40	1.69
Sinkgeschwindigkeit > 60 µm (cm/s)	7.58			

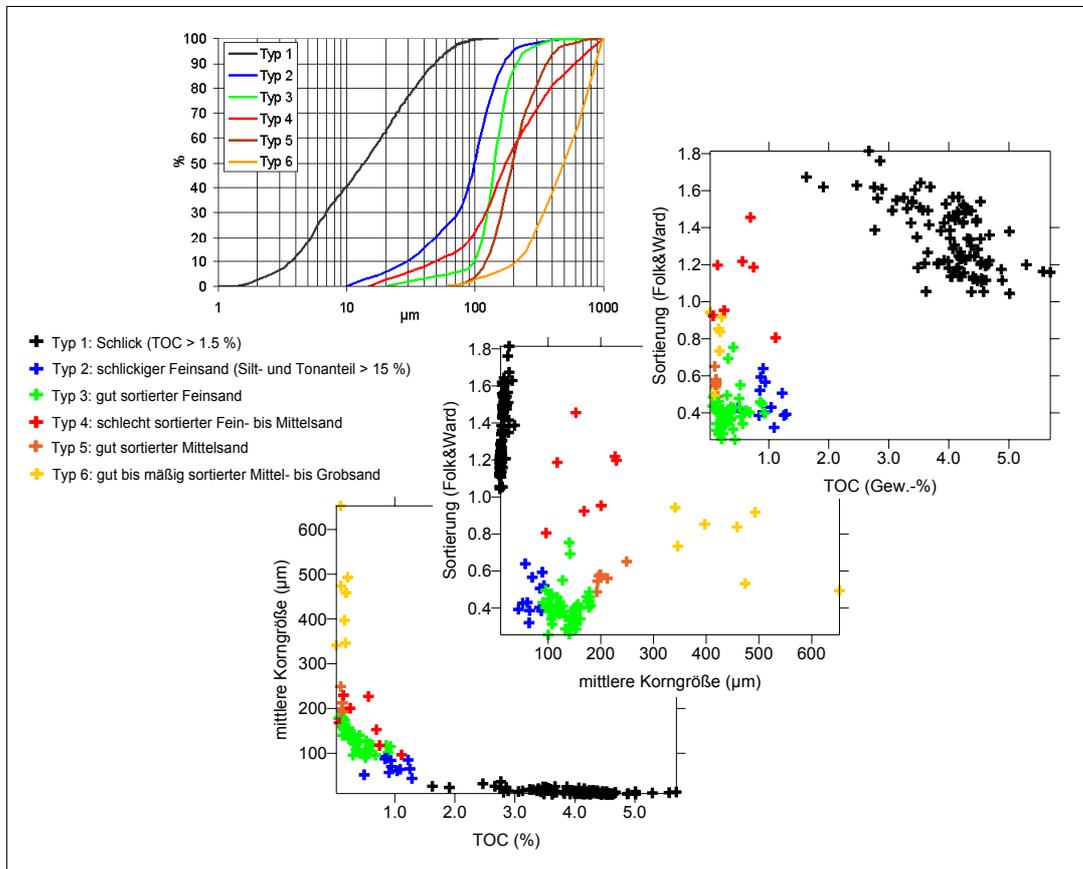


Abb. 5-4: Die natürlichen Sedimenttypen der Mecklenburger Bucht: kumulative Summenkurven (oben) und Scatterplots (unten)

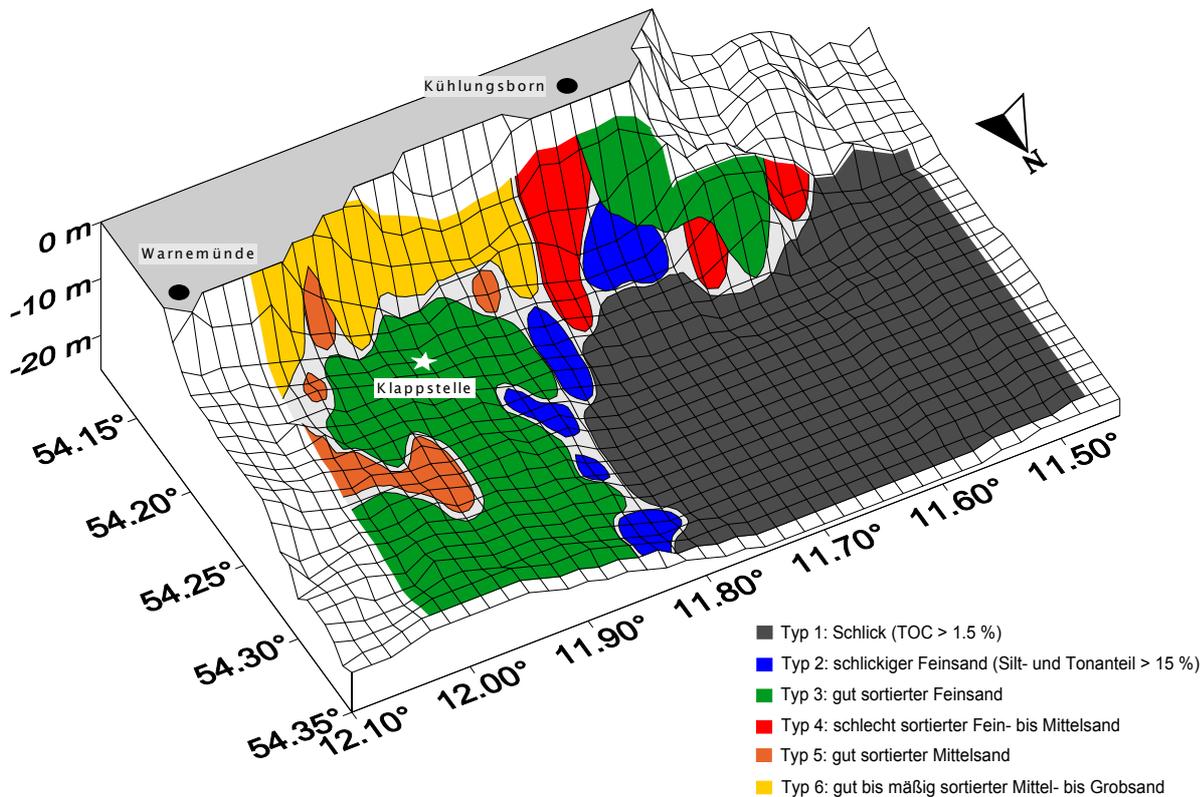


Abb. 5-5: Die Verteilung der natürlichen Sedimenttypen im Untersuchungsgebiet; eingetragen ist auch die Position des Dynas-Verklappungsexperiments („Klappstelle“)

5.1.1.3 Erosionsexperimente

5.1.1.3.1 Methodenvergleich

Für Erosionsexperimente standen zwei Erosionsgeräte zur Verfügung: Ein Strömungskanal (Springer et al. 1999) an der Universität Rostock (vgl. Kapitel 5.2) zur Aufnahme von Multicorer- und Kastengreiferproben und eine Erosionskammer, der sogenannte Mikrokosmos (Gust und Müller 1997; Tolhurst et al. 2000), für Vergleichsmessungen und gestörte Proben. Mit diesen Geräten konnte der kritische Erosionsschwellenwert für Geschiebetrieb („bedload transport“) ermittelt werden. Während mit dem Mikrokosmos direkt Schubspannungsgeschwindigkeiten (u_*) eingestellt werden können, wurde im Kanal die Strömungsgeschwindigkeit (u) in einer bestimmten Höhe ($z = 3 \text{ cm}$) gemessen. Bei den zur Erosion erforderlichen hohen Strömungsgeschwindigkeiten kommt es im Kanal nicht zur Herausbildung vollständig entwickelter logarithmischer Strömungsprofile (Friedrichs 2001). Diese wären jedoch zur Ermittlung der Schubspannungsgeschwindigkeit mit Hilfe der Karman-Prantl-Gleichung (z.B. Soulsby 1983; Wright 1989) erforderlich. Somit hat sich gezeigt, dass der Kanal für eine direkte Ermittlung von u_* nicht geeignet ist. Um Messungen beider Geräte dennoch miteinander vergleichen und Ergebnisse aus dem Kanal in Schubspannungswerten angeben zu können, wurde ein Methodenvergleich durchgeführt. Dafür wurden an beiden Erosionsgeräten die kritischen Zustände der beginnenden Sedimentbewegung (die kritischen

Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Schubspannungsgeschwindigkeiten) für die gleichen Sedimentproben (sowohl natürliche Typen als auch gesiebte, „künstliche“ Sedimentfraktionen) bestimmt und in Beziehung zueinander gesetzt (Abb. 5-6). Daraus konnte folgende Gleichung ($R^2 = 0,8464$) gewonnen werden, mit der die Ergebnisse aus beiden Geräten - unter der Voraussetzung einer ebenen Sedimentoberfläche und gleicher Versuchsbedingungen - umgerechnet werden können:

$$u^* = 0,0586u + 0,0020$$

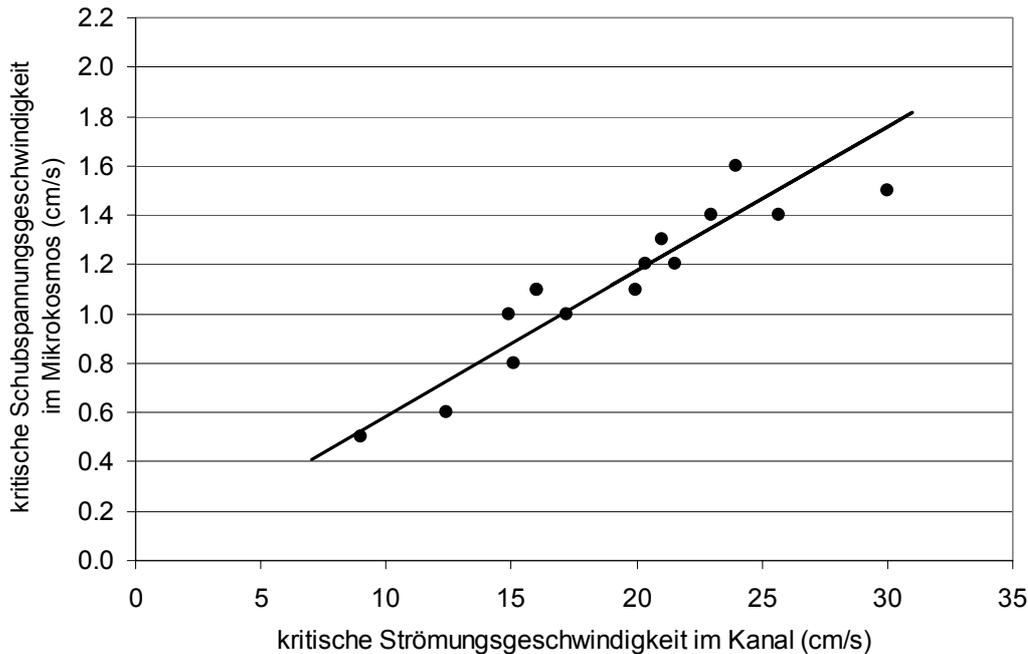


Abb. 5-6: Die Korrelation zwischen Messungen kritischer Erosionsschwellenwerte im Strömungskanal und im Mikrokosmos

Die Tatsache, dass für den gesamten Datensatz ein eindeutiger linearer Zusammenhang besteht, zeigt, dass es bei den verschiedenen Sedimenttypen offenbar keine Unterschiede im u^*/u -Verhältnis gibt, und also letztendlich auch nicht im „drag coefficient“ C_D . Es gibt auch keinen Unterschied im u^*/u -Verhältnis zwischen gesiebtten („künstlichen“) Sedimentfraktionen und den natürlichen Sedimenttypen. Nimmt man für diese Versuche eine Beeinflussung der Rauigkeit (z_0) allein durch die mittlere Korngröße an (z.B. Poulos 2001) so wäre gemäß Karman-Prantl-Gleichung eine Abhängigkeit des u^*/u -Verhältnisses von der Korngröße zu erwarten gewesen. Der Einfluss der Korngröße ist offenbar vernachlässigbar, möglicherweise geht ein entsprechender Einfluss in der „Robustheit“ der Methoden unter oder die Bedeutung der Rauigkeitsunterschiede ist in diesem Korngrößenbereich (20-500 μm) nur gering. Dieses wäre mit dem Vorherrschen überwiegend schwach („smooth“) turbulenter Strömungsbedingungen erklärbar (Dade et al. 2001).

5.1.1.3.2 Ergebnisse der Erosionsexperimente

Die Ergebnisse der durchgeführten Erosionsexperimente für natürliche Sedimenttypen sind in Abb. 5-7 wiedergegeben. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße, um so Vergleiche mit klassischen Literaturwerten (Hjulström 1935; Shields 1936 berechnet nach Soulsby und Whitehouse 1997; und Zanke 1982) zu ermöglichen. Die Ergebnisse für Sedimentkörner liegen in der Größenordnung der Literaturwerte. Die kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten der Sedimenttypen sind außerdem in der Tab. 5-4 aufgeführt. Die Werte für die Erosion des Schlicksediments (Typ 1, z.B. Mehta und Lee 1994) liegen über den erreichbaren Geschwindigkeiten in den Erosionsgeräten. Nach Hjulström (1935) ist ein Wert von 3,75 cm/s zu vermuten. Hervorzuheben ist allerdings die frühe Bewegung einer oberflächlich auflagernden Fluff/Flocken-Schicht bei u_{cr}^* -Werten von etwa 0,5 cm/s. Diese konnte bei Sedimenten mit einem Silt- und Tonanteil von über 10 Gew.-% festgestellt werden (vgl. Abb. 5-2c)

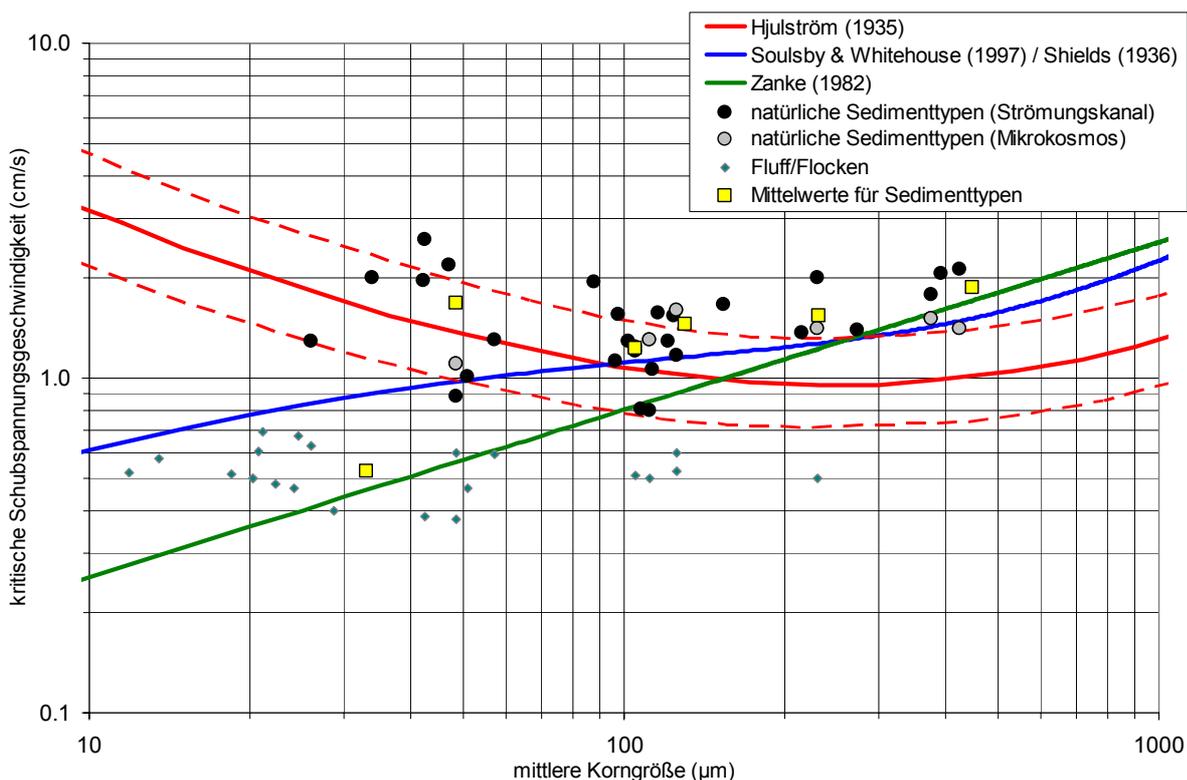


Abb. 5-7: Die Ergebnisse von Erosionsexperimenten für natürliche Sedimenttypen im Vergleich zu Literaturwerten.

Tab. 5-4: Die kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten (u_{cr}^* in cm/s) für die Sedimenttypen der Mecklenburger Bucht, n = Anzahl der Experimente.

	maximales u_{cr}^*	mittleres u_{cr}^*	minimales u_{cr}^*	n
Fluff/Flocken-Auflage	0.7	0.5	0.4	22
Typ 2: schlickiger Feinsand	2.6	1.7	0.9	7
Typ 3: gut sortierter Feinsand	1.6	1.2	0.8	11
Typ 4: schlecht sortierter Fein- bis Mittelsand	1.9	1.5	1.2	7
Typ 5: gut sortierter Mittelsand	2.0	1.5	1.4	4
Typ 6: gut bis mäßig sortierter Mittel- bis Grobsand	2.1	1.9	1.4	3
In Dynas verklappter Sand	1.8	1.6	1.5	2

Für die Experimente wurden Multicorerkerne und Kastengreiferproben verwendet. Dabei galt die Annahme, dass die Oberflächen von Multicorerkernen ungestörte Proben repräsentieren und die Kastengreiferproben als im Gefüge gestörte, „anthropogene“ Sedimente angesehen werden können. In Abb. 5-8 werden die Messungen an Multicorerkernen mit Messungen an Kastengreiferproben verglichen. Es zeigte sich jedoch während der Experimente, dass kein systematischer Unterschied im Erosionsverhalten zwischen diesen zwei Probentypen besteht. Dabei wurde die Erfahrung gemacht, dass es äußerst problematisch ist, tatsächlich ungestörte Proben ins Labor zu verbringen, wie es auch in jüngster Literatur wieder erwähnt wird (Smith und Buchan 2002; Stephens et al. 2002). Gerade bei der Betrachtung einzelner Partikel kann eine leichte Störung der Sedimentoberfläche von Bedeutung sein.

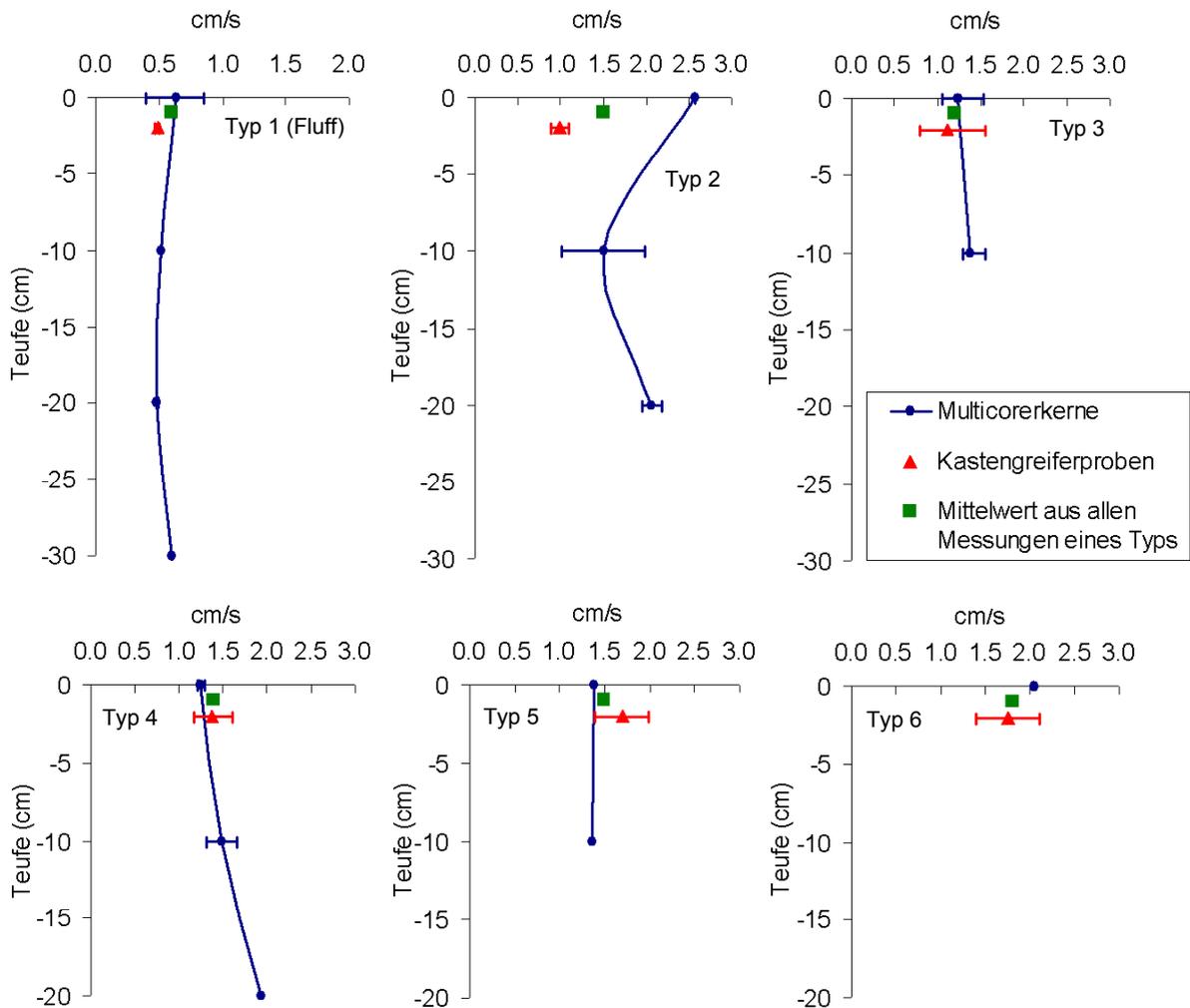


Abb. 5-8: Die Ergebnisse von Erosionsexperimenten (u^*_{cr}) für Multicorerkerne und Kastengreiferproben

Deutlich erkennbar ist in Abb. 5-7 die starke Streuung der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten innerhalb eines Sedimenttyps. Dieses unterstützt die vorhandene Kritik am Konzept eines Schwellenwertes der Erosion (Lavelle und Mofjeld 1987; Zanke 1990). Diese natürlich vorhandene Unschärfe muss bei der Bewertung des Erosionsbeginns bedacht werden. Eine Möglichkeit besteht in der Definition eines Übergangsbereiches durch mehrere Schwellenwerte (Ziervogel und Bohling 2003) oder in der Berechnung eines Erosionsrisikos (Lopez und Garcia 2001; Zanke 2002).

Bei Experimenten im Mikrokosmos wurden die Sedimente in Suspension gebracht und so eine gradierte Schichtung des Sediments erreicht, bei dem sich die Silt- und Tonfraktion ($<63\mu\text{m}$) als Flocken über den sandigen Bestandteilen ablagerte. Bei diesen Experimenten ergaben sich für die Mobilisierung von darunterliegenden Sedimentkörnern kritische Schubspannungswerte nahe an Literaturwerten für kohäsionslose Sedimente. Dieses kann als ein Hinweis darauf gewertet werden, dass eine starke Störung des Sedimentgefüges („Verklappung“) und die resultierende Trennung von Grob- und Feinfraktion oder die Auswaschung der feinen Anteile zu niedrigeren kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten führen kann, als

dieses bei völlig ungestörten Proben der Fall wäre. Dieses ist auch ein Hinweis darauf, dass die Kohäsivität, verursacht durch den Silt- und Tonanteil eines natürlichen Sedimentes, als Ursache für die Variabilität in den Messungen der kritischen Erosionsschwellenwerte eine Rolle spielt.

5.1.1.4 Abschätzung von Erosionsmöglichkeiten

5.1.1.4.1 Das „natürliche Erosionsrisiko“

Um abzuschätzen, ob es zu einer tatsächlichen Erosion der natürlich anstehenden Sedimente kommen kann, ist ein Vergleich der experimentell ermittelten kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten mit in-situ-Schubspannungsgeschwindigkeiten, also den im Feld auf die Sedimentoberflächen einwirkende Schubspannungen, erforderlich. Hierfür wurden drei Strömungs- und Wellenmodellierungen herangezogen: a) die mittlere kombinierte Strömungs- und Wellenenergie aus Werten in 6-Stunden-Schritten in einem Modelljahr 1996/97 nach Rietz et al. (2000), b) die maximale kombinierte Strömungs- und Wellenenergie aus dem gleichen Modell und c) ein Maximalereignis im Modelljahr 1993 der durch Wellen erzeugten Schubspannungsgeschwindigkeit aus Stundenmittelwerten des Dynas-Modelles (vgl. Kapitel 7.4) nach Kuhrts et al. (2002). Die Daten nach Rietz et al. (2000) lagen als Strömungsgeschwindigkeiten vor (Bobertz 2000) und wurden über die Karman-Prantl-Gleichung (z.B. Soulsby 1983; Wright 1989) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Höhen der Modellboxen über dem Boden in Schubspannungsgeschwindigkeiten umgerechnet. Die Rauigkeitslänge z_0 wurde dabei nach Dade et al. (2001) berechnet mit einer über den Median der Korngröße abgeschätzten Nikuradse-Rauigkeit nach Soulsby (1997). Die modellierten in-situ-Schubspannungsgeschwindigkeiten wurden auf das den Sedimenttypen entsprechende Gitter im Untersuchungsgebiet interpoliert, um diese dann mit den kritischen Werten vergleichen zu können.

Die Differenz zwischen kritischer und in-situ-Schubspannungsgeschwindigkeit wurde jeweils für die drei experimentellen Schwellenwerte „maximales u_{cr}^* “, „mittleres u_{cr}^* “ und „minimales u_{cr}^* “ berechnet. In Abb. 5-9 sind die Areale, in denen die entsprechenden Schwellenwerte überschritten werden, dargestellt. Es zeigt sich, dass bei mittleren Strömungs- und Wellenenergien in a) keine Überschreitung der kritischen Schwellenwerte auftritt. Mit dem Modell b) ist bei Annahme maximaler und mittlerer kritischer Schubspannungsgeschwindigkeiten nur in Küstennähe ein Transport von Sedimentpartikeln möglich. Bei Annahme der minimalen experimentellen kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten vergrößert sich die Fläche, die von Erosion natürlich anstehender Sedimente betroffen sein kann, auf die mit Feinsand bedeckten Areale. Bei dem auf Stundenmittel basierenden Maximalereignis in c) können bereits bei Annahme maximaler und mittlerer kritischer Schwellenwerte große Areale von Erosion betroffen sein, allerdings gilt dieses nur für Sedimente in einer Wassertiefe von weniger als 23 m. Die Tab. 5-5 listet die Flächenanteile der von möglicher Erosion betroffenen Gebiete auf. Wie diese Betrachtungen zeigen, besteht eine Erosionsmöglichkeit für die natürlichen Sedimenttypen im Untersuchungsgebiet nur bei maximalen Strömungs- und Wellenereignissen. Dabei ist nach Kuhrts et al. (2002) vor allem der Welleneinfluß der entscheidende Faktor (vgl. Kapitel 7.4).

Tab. 5-5: Anteile der Flächen am Untersuchungsgebiet, auf denen die kritischen Erosionsschwellenwerte überschritten werden.

	a) mittlere Strömungs- und Wellenenergie nach Rietz et al. (2000)	b) maximale Strömungs- und Wellenenergie nach Rietz et al. (2000)	c) Maximalereignis der welleninduzierten Schubspannung nach Kuhrts et al. (2002)
maximales u_{cr}^*	0 %	2,8 %	23,8 %
mittleres u_{cr}^*	0 %	7,6 %	35,9 %
minimales u_{cr}^*	0 %	37,7 %	46,6 %

Der Bewegungsbeginn von Sedimentpartikeln wird zunehmend als „Wahrscheinlichkeitsproblem“ verstanden (Zanke 1990; Lopez und Garcia 2001; Zanke 2002) und die natürliche Schwankungsbreite von kritischen Schwellenwerten findet so Berücksichtigung. Für Abb. 5-10 wurde das Erosionsrisiko nach Lopez und Garcia (2001) sowie nach Zanke (2002) auf Grundlage der hier experimentell ermittelten Erosionsschwellenwerte für die natürlichen Sedimenttypen berechnet. Abb. 5-11 zeigt entsprechende Ergebnisse bei einer theoretischen Bedeckung des Bodens mit dem im Projekt Dynas verklappten Sand bei Annahme einer ebenen Oberfläche. In beiden Abbildungen zeigt sich, dass ein Erosionsrisiko nur für den küstennahen und flachen Bereich (< 23 m) besteht. Die Berechnungen nach Zanke (2002) beziehen sich auf Maximalwerte der kritischen in-situ-Schubspannungsgeschwindigkeiten der Modelle b) und c), beschreiben also das Erosionsrisiko bei Maximalereignissen. Das Erosionsrisiko nach Lopez und Garcia (2001) berücksichtigt die mittleren Strömungs- und Wellenenergien und deren Varianz, hier bezogen auf das Modelljahr nach Rietz et al. (2000).

Die Abb. 5-9 und Abb. 5-10 beziehen sich, ebenso wie Abb. 5-11, auf die Mobilität von Sedimentkörnern. Die Fluff-/Flocken-Auflage in Gebieten mit einem Silt- und Tonanteil von über 10 Gew.-% (vgl. Abb. 5-2c) zeigt dagegen eine deutlich leichtere Mobilisierbarkeit. Dieses betrifft vor allem die Flächen, die in Abb. 5-9 und Abb. 5-10 als nicht von Erosion betroffen gekennzeichnet sind.

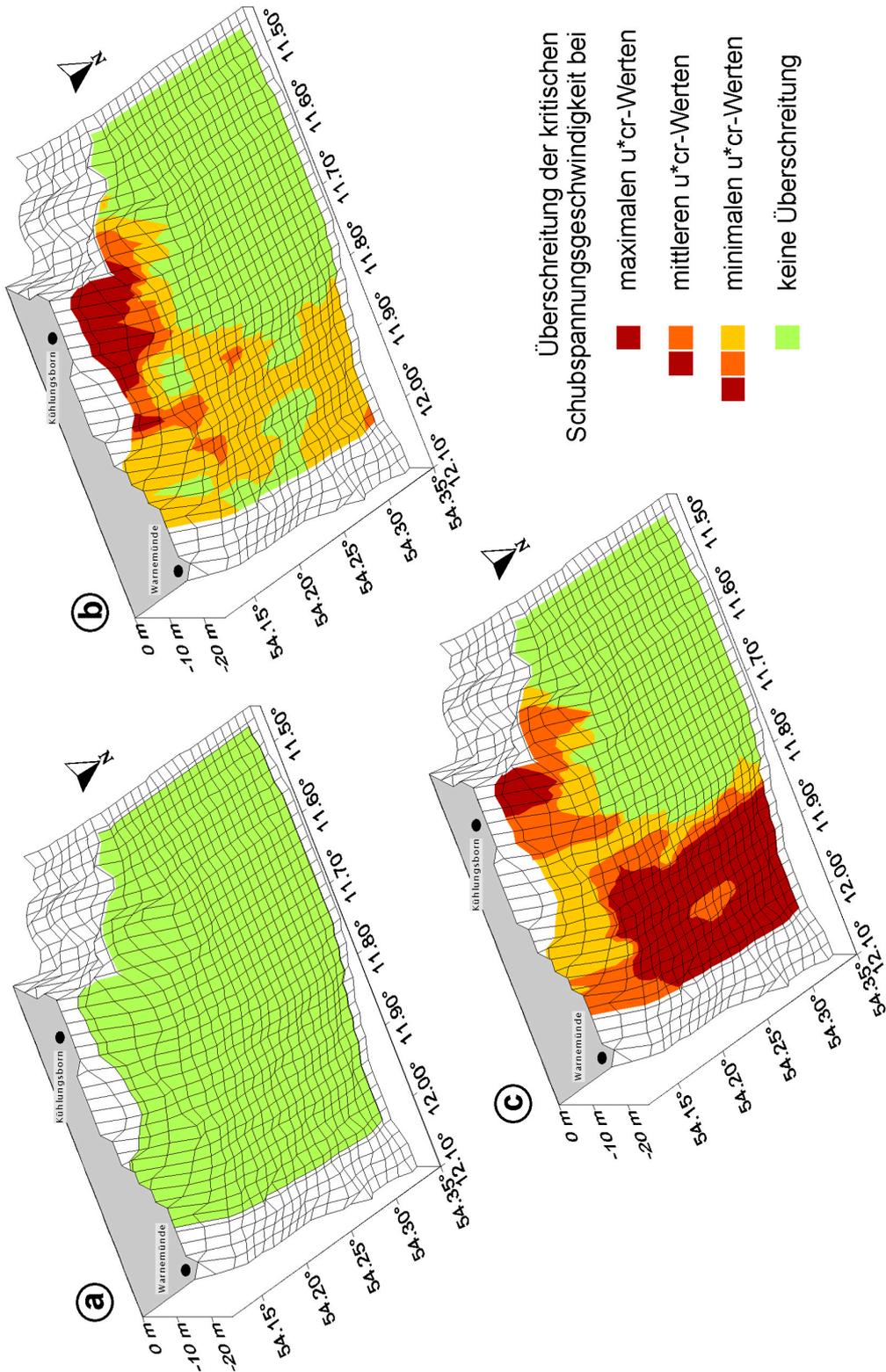


Abb. 5-9: Differenzen zwischen kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten der natürlich anstehenden Oberflächensedimente und modellierten in-situ-Schubspannungsgeschwindigkeiten: a) bei mittlere Strömungs- und Wellenenergien des Modelljahres 1996/97 (Rietz et al. 2000) b) bei maximale Strömungs- und Wellenenergien des Modelljahres 1996/97 (Rietz et al. 2000) c) bei einem Maximum stundengemittelter, wellenerzeugter Schubspannungen im Dynas-Modelljahr 1993 (Kuhrts et al. 2002)

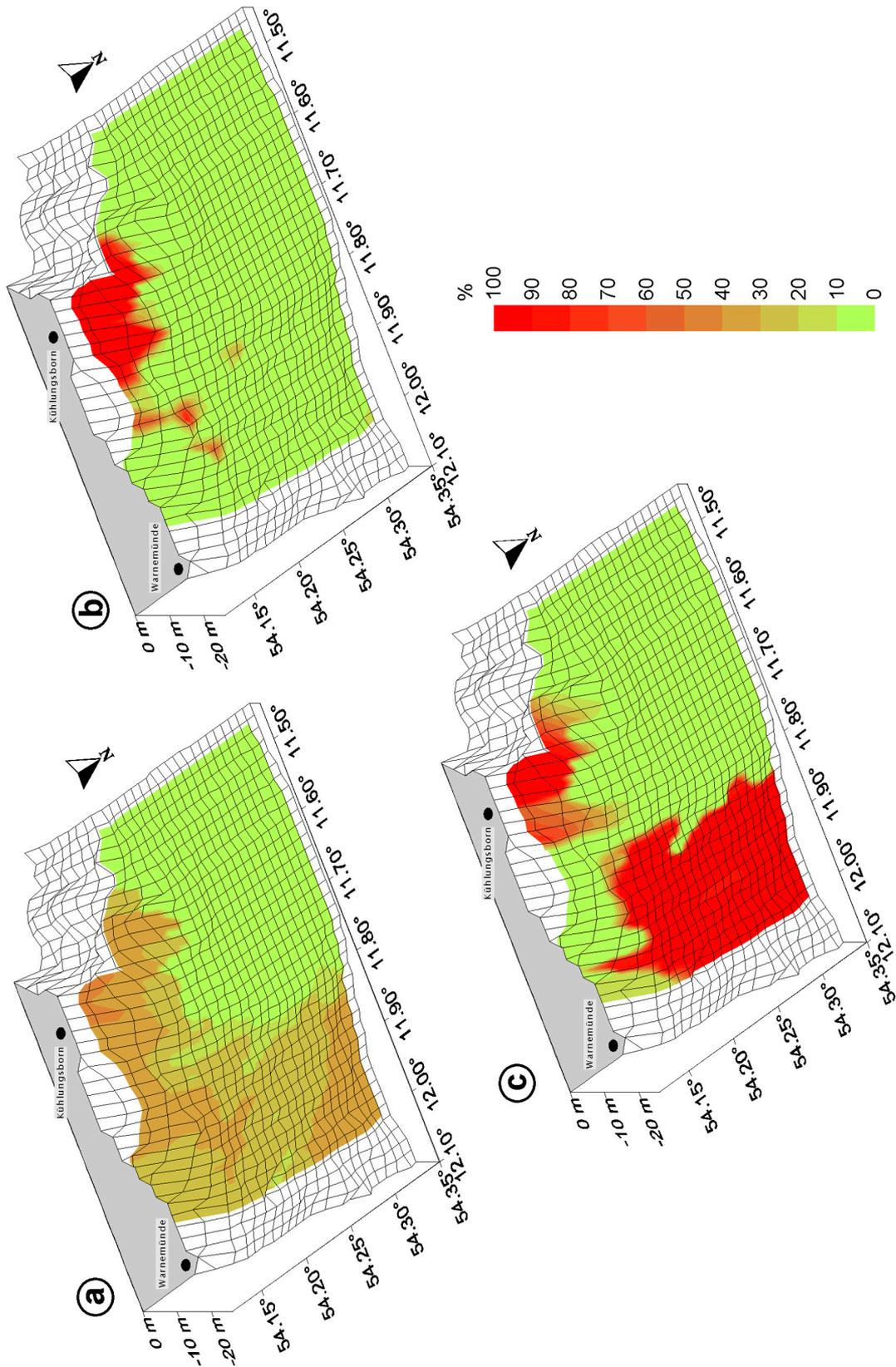


Abb. 5-10: Erosionsrisiko für natürlich anstehende Oberflächensedimente:

a) nach Lopez und Garcia (2001) im Modelljahr 1996/97 (Rietz et al. 2000)

b) nach Zanke (2002) bei maximalen Energien des Modelljahres 1996/97 (Rietz et al. 2000)

c) nach Zanke (2002) beim Maximalereigniss im Dynas-Modelljahr 1993 (Kuhrts et al. 2002)

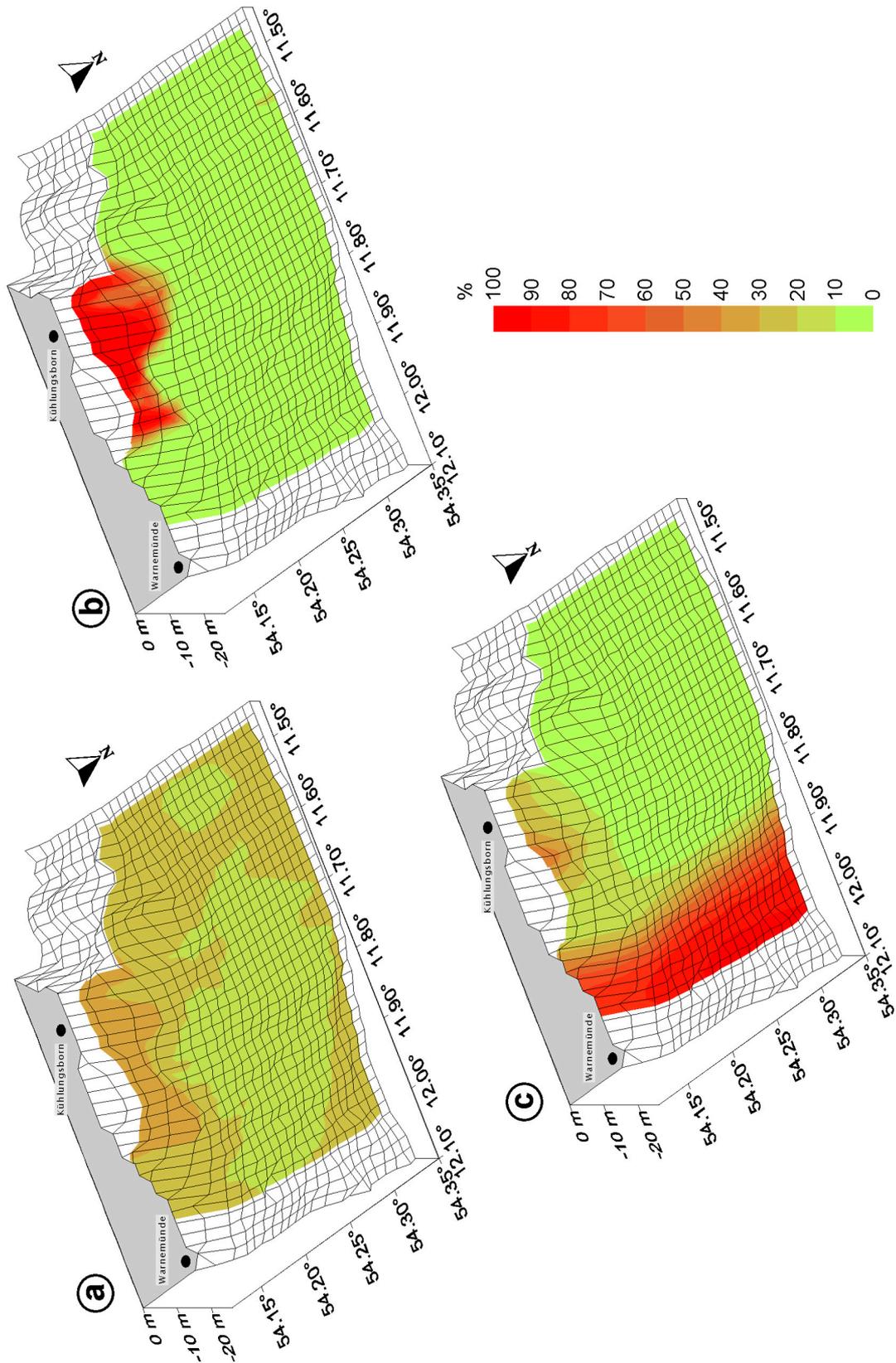


Abb. 5-11: Erosionsrisiko für Sand aus dem Dynas-Verklappungsexperiment
 a) nach Lopez und Garcia (2001) im Modelljahr 1996/97 (Rietz et al. 2000)
 b) nach Zanke (2002) bei maximalen Energien des Modelljahres 1996/97 (Rietz et al. 2000)
 c) nach Zanke (2002) beim Maximalereigniss im Dynas-Modelljahr 1993 (Kuhrts et al. 2002)

5.1.1.4.2 Sedimentmonitoring an der Dynas-Klappstelle

Zur Überprüfung der Sedimentverteilung im Feinsandbereich und von möglichen Folgen des Dynas-Verklappungsexperiments wurde das Gebiet im Bereich der Klappstelle mehrmals zwischen September 2000 und April 2003 mit dem Kastengeifer beprobt. Bei diesem Monitoring zeigte sich, dass es zu keinen großräumigen Veränderungen in der Korngrößenverteilung gekommen ist (Abb. 5-12). Allerdings ergab die Aufnahme vom April 2003 eine leichte Veränderung in der Verteilung der mittleren Korngröße, die bei einer Weiterführung des Monitorings überprüft werden muss. Die Verteilung der natürlichen Sedimenttypen kann im Untersuchungsgebiet dennoch als weitgehend stabil angesehen werden.

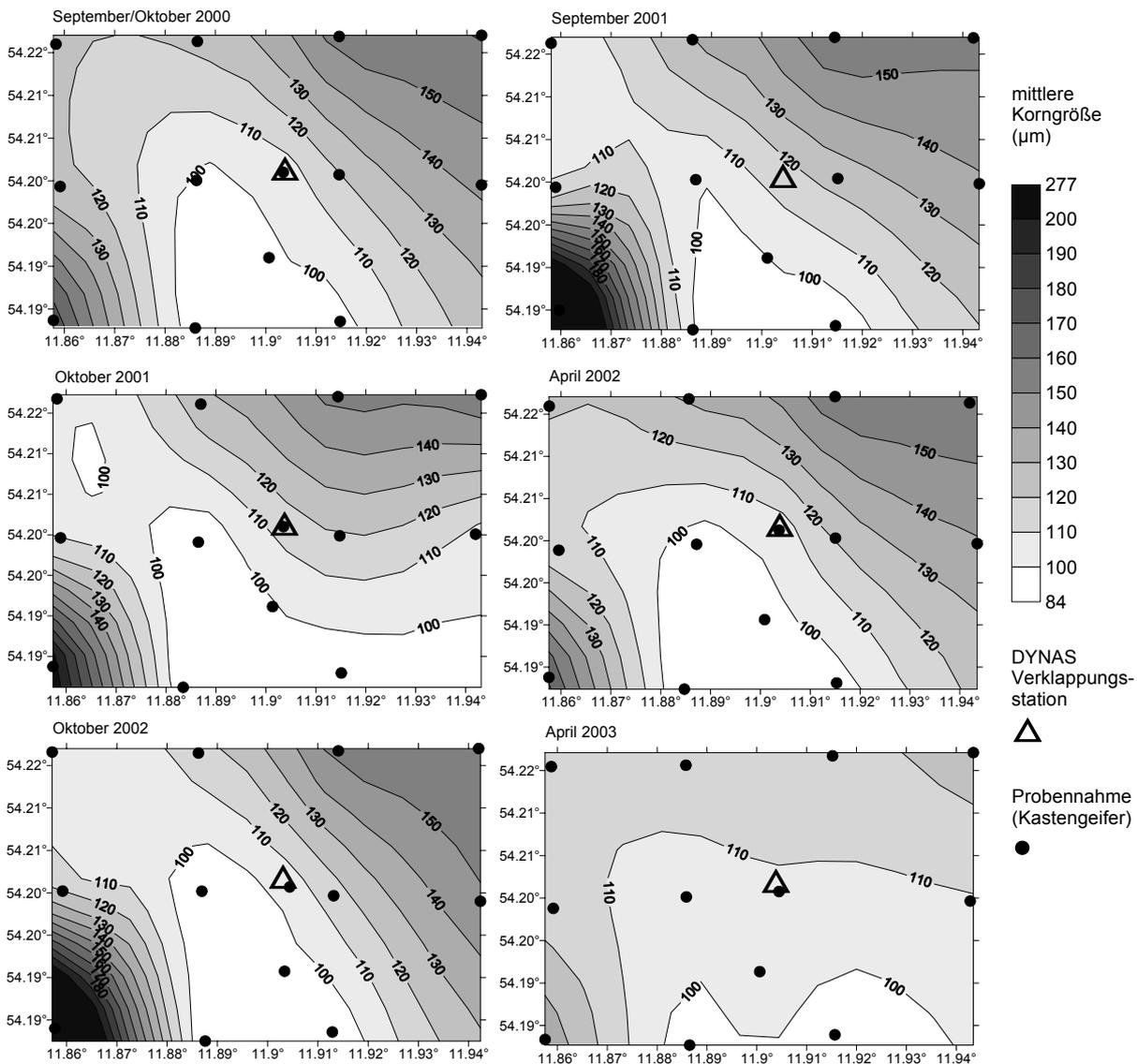


Abb. 5-12: Sedimentmonitoring: Die mittlere Korngröße im Bereich der Klappstelle nach mehrmaliger Beprobung

5.1.1.5 Zusammenfassung

- 6 verschiedene Sedimenttypen in der Mecklenburger Bucht konnten auskartiert und die kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten für diese Typen konnten experimentell bestimmt werden.
- Unterschiede zwischen den kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten von „gestörten“ Sedimenten und denen von „natürlichen“ Oberflächen konnten in den Experimenten nicht festgestellt werden, jedoch eine generelle starke Variation innerhalb eines Sedimenttyps.
- Die Größe der von Erosion betroffenen Flächen im Untersuchungsgebiet kann durch realistische Variationen in den kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten um den Faktor 10 variieren.
- Sedimente mit einem Silt- und Tongehalt > 10 % zeigen eine deutliche Fluff/Flocken-Dynamik.
- Ein Erosionsrisiko für natürliche Sedimenttypen besteht nur bei maximalen Strömungs- bzw. Wellenereignissen in Gebieten mit einer Wassertiefe geringer als etwa 23 m.
- Die Verteilung der natürlichen Sedimenttypen kann als im wesentlichen stabil angesehen werden.

Ausblick:

Für zukünftige Arbeiten ist eine Weiterführung des Monitorings zur Erfassung möglicher Korngrößenveränderungen und Umlagerungsprozesse erforderlich. Erosionsexperimente zu möglicherweise unterschiedlichen kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten der einzelnen Fraktionen von Mischungssedimenten könnten zu einem detaillierten Verständnis der Erosionsprozesse wesentlich beitragen. Hierbei sind vor allem grobe Restsedimente von Interesse, die in dieser Studie noch nicht berücksichtigt wurden.

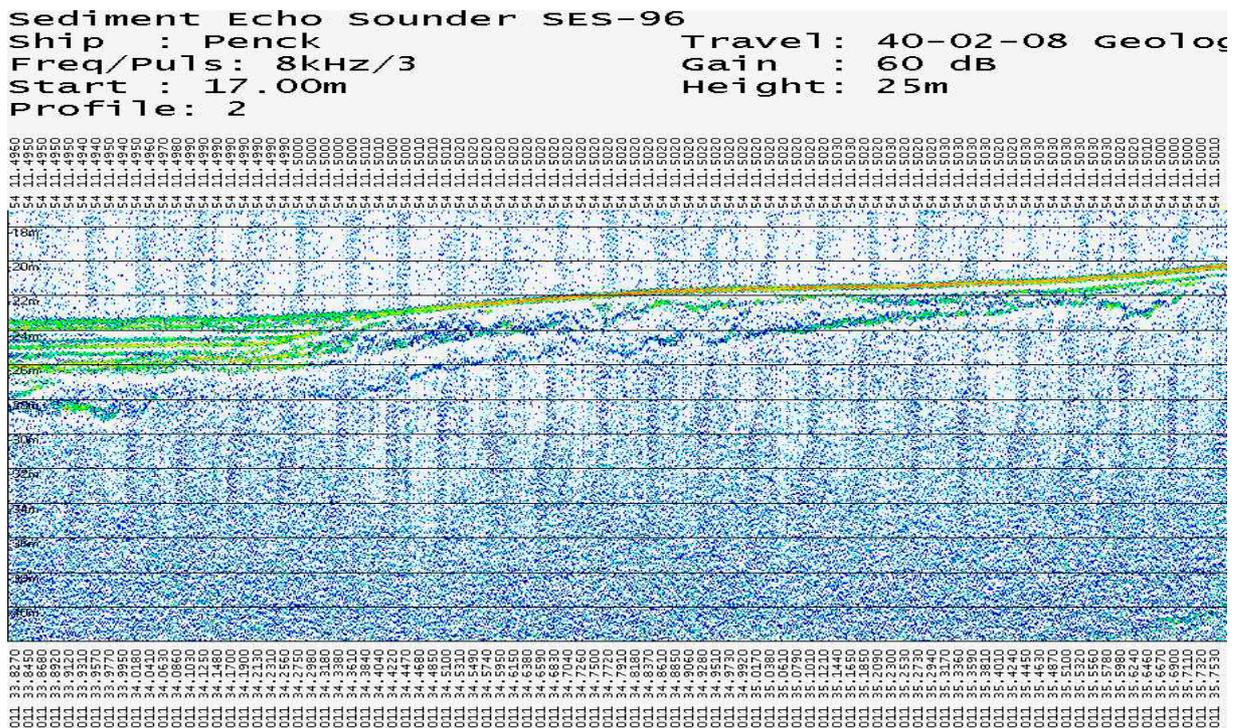


Abb. 5-14: Beispiel einer Sediment-Echolot Registrierung (Echogramm) aus der Mecklenburger Bucht

Mit Hilfe akustischer Profilierungsdaten wurden Positionen für die Gewinnung von Sedimentproben festgelegt. Zum Einsatz kamen vorwiegend der Multicorer, das Schwerelot und an wenigen Stationen das Vibrationskerngerät. Eine Übersicht der Stationsverteilung im Dynas – Arbeitsgebiet zeigt Abb. 5-13. Eine möglichst breite Palette von Sedimenttypen (Schlick bis Sand) wurde beprobt um das physikalische und dynamische Verhalten der Sedimente im gesamten Arbeitsgebiet zu erfassen. Das generelle Bearbeitungsschema beinhaltet Multi-Sensor Kernlogging (P-Wellen Geschwindigkeit, Gamma-Dichte, magnetische Suszeptibilität), bodenmechanische Untersuchungen (Bestimmung Porosität, Wassergehalt, Drucksetzungsversuch, direkter Scherversuch) und granulometrische Analysen.

Multi-Sensor Kernlogging erfolgt als erster Arbeitsschritt an nahezu allen gewonnenen Kernproben. Dabei können auch Aussagen über die kleinräumige, laterale Variabilität der Parameter gewonnen werden. Abb. 5-16 zeigt Dichte und Schallgeschwindigkeitsprofile von 3 Schlick - Kernen, die von der Multicorer – Station 233260 stammen. Alle drei Kerne zeigen ein gleiches generelles Verhalten, eine leichte Zunahme der Dichte in den obersten 10 cm und darunter Schwankungen um 1.3 g/cm^3 . Die entsprechende Abnahme der Schallgeschwindigkeit lässt auf einen annähernd konstanten dynamischen Kompressionsmodul des Gerüsts schließen. Die lokale laterale Variation der Dichte- und Schallgeschwindigkeitswerte ist im Schlick vergleichsweise gering. Dies wird durch Ergebnisse der in Abb. 5-19 dargestellten zugehörigen Scherversuche bestätigt. Die Scherfestigkeit ändert sich innerhalb der obersten 20 cm nicht wesentlich.

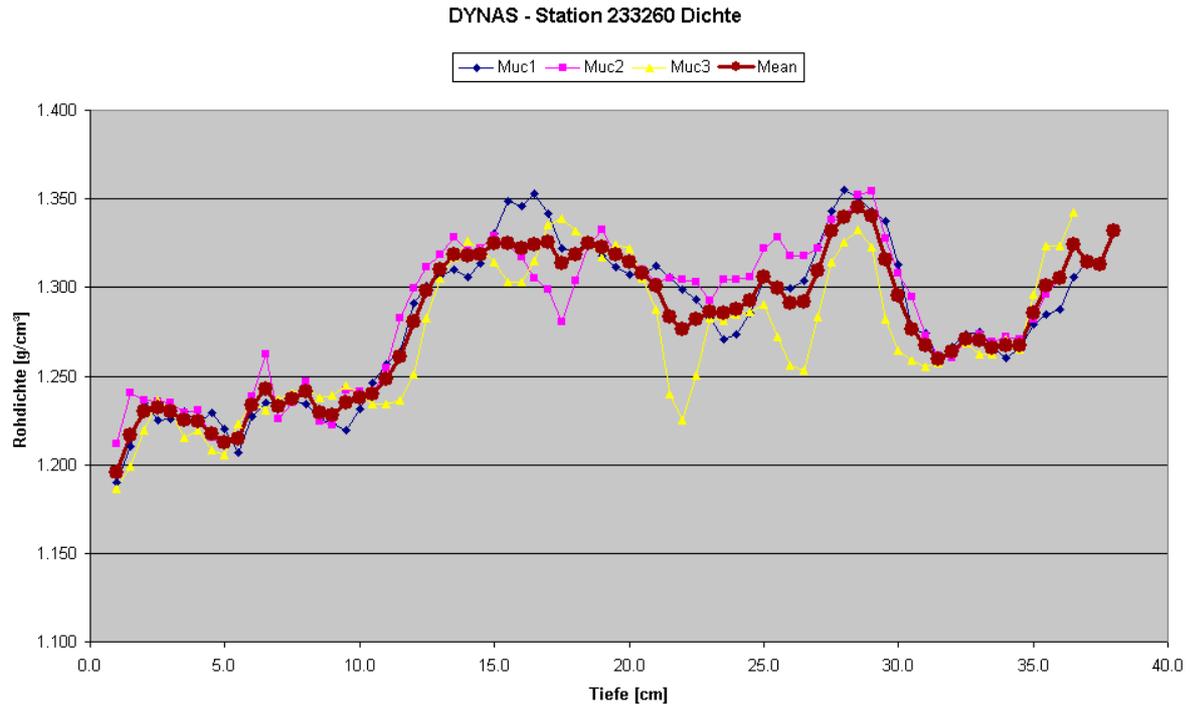


Abb. 5-15: Dichteprofile von 3 Multicorer Kernen (Schlick), die an der Station 233260 gewonnen wurden

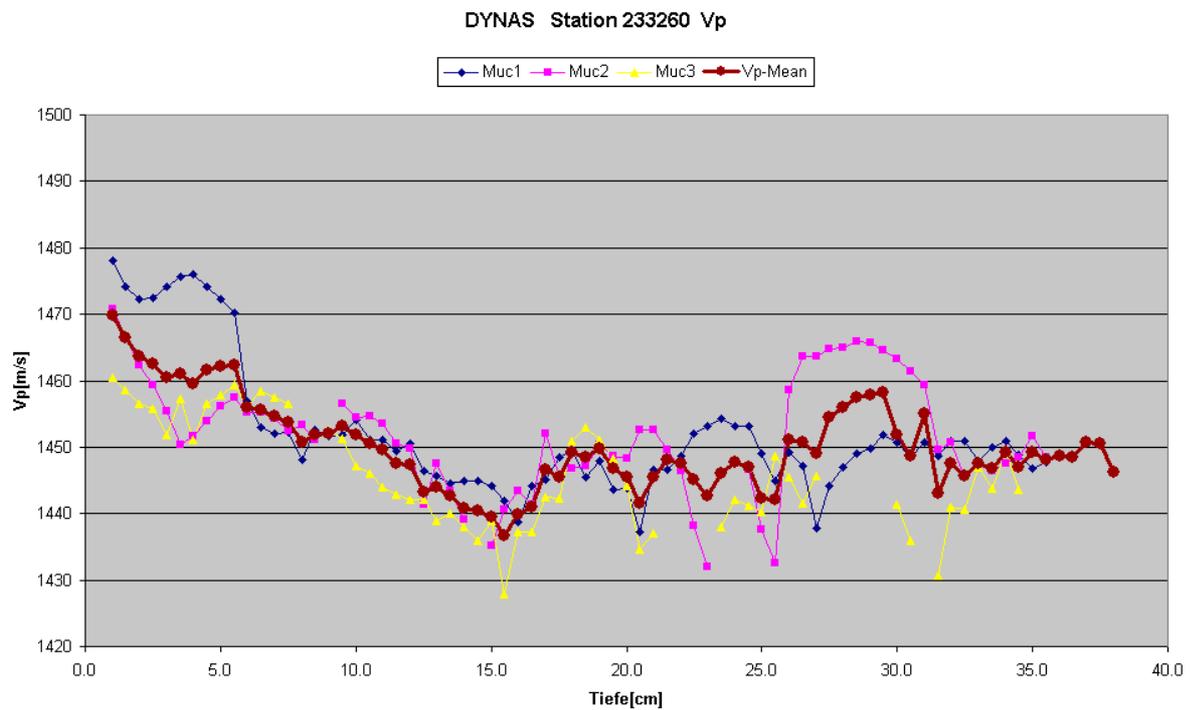


Abb. 5-16: Schallgeschwindigkeits-Profile von 3 Multicorer Kernen (Schlick), die an der Station 233260 gewonnen wurden.

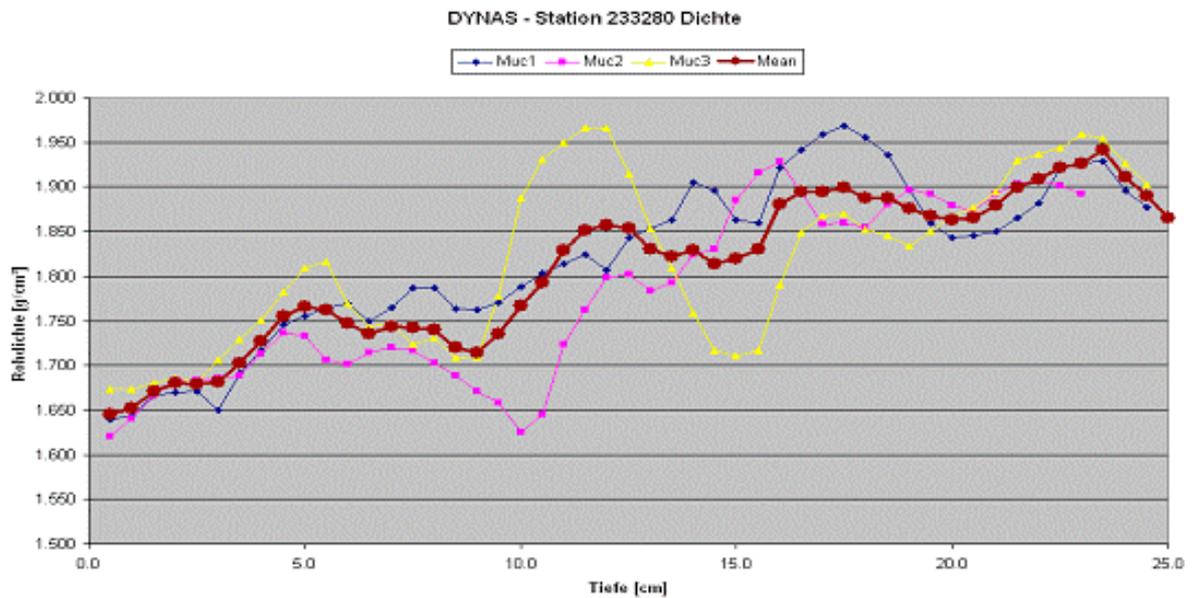


Abb. 5-17: Dichteprofile von 3 Multicorer Kernen (Sand), die an der Station 233280 gewonnen wurden

Größere Abweichungen in den Tiefenprofilen sind an den Stationen mit sandigen Sedimenten zu beobachten (siehe Abb. 5-17). Hier ist die Gefahr der Störung der ursprünglichen Lagerungsdichte bei der Probenahme mittels Multicorer deutlich größer als bei hochporösen bindigen Schlickproben.

Der Veränderung der Rohdichte mit der Tiefe lässt Rückschlüsse auf das Kompaktionsverhalten zu. In Abb. 5-18 sind mittlere Dichtekurven dargestellt, die an den einzelnen Stationen im Arbeitsgebiet gewonnen wurden. Sie überdecken den Bereich der anstehenden Sedimenttypen vom Sand (obere Kurven) bis zum Schlick (untere Kurven). Die Konzentration der Kurven in den beiden Bereichen ergibt sich einerseits aus dem hohen flächenmäßigen Anteil der Sand- bzw. Schlickbedeckung im Arbeitsgebiet. Andererseits spiegelt er die Anlage der Probenahmestationen wieder. Bei der vergleichenden Betrachtung aller Kurvenverläufe lassen sich grob zwei Tiefenbereiche aushalten, eine obere Schicht von 0 cm bis ca. 10 – 15 cm mit einem relativ steilen Gradienten und die darunterliegende Schicht, mit einem flachen Gradienten der teilweise sogar negative Werte aufweist. Für drei Sedimenttypen (vorgegebene Anfangsporenzahl und Kompressionswert) wurden Dichtekurven mit normaler, ungestörter Kompaktion (glatter Kurvenverlauf) berechnet. Der Modellansatz beruht auf dem Ansatz von *Terzaghi*. Der Vergleich des Verlaufs der berechneten Kurven mit den gemessenen Profilen zeigt, dass nahezu an allen Stationen (Sedimenttypen) deutliche Abweichungen auftreten. Offensichtlich wird die normale Kompaktion durch andere Prozesse (Bioturbation, geochemische Prozesse, ...) überlagert. Um eine realistische Modellierung der Dichteprofile zu erreichen müssen diese Prozesse im Modellansatz berücksichtigt werden.

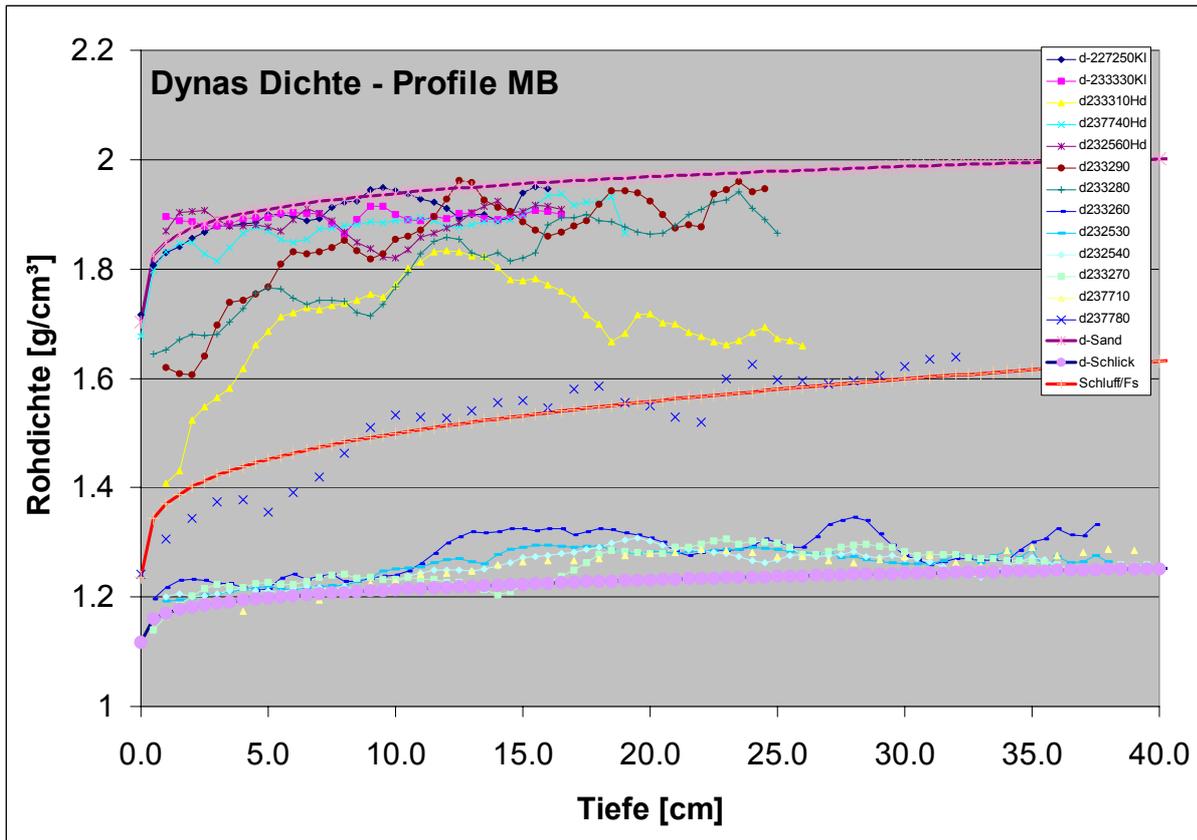


Abb. 5-18: Gemittelte Rohdichte – Tiefenprofile der Dynas - Stationen im Arbeitsgebiet, oben küstennahe Stationen mit sandigen Sedimenten, küstenfernere Stationen mit Schllick.. Die dickeren, glatten Kurven stellen Dichtekurven dar, die aus Anfangsporenzahl und Kompressionswert berechnet wurden.

Drucksetzungsmessungen (Oedometer) und direkte Scherversuche erfolgten in der Regel an Proben aus drei Tiefenintervallen: 0-10 cm, 10 –20 cm und 20 –30 cm an jeweils drei Multicorer Kernen pro Station. Da diese Messungen sehr zeitaufwendig sind, können vergleichsweise wenige Stationen bearbeitet werden. Im Gegensatz zu den Dichtemessungen (Genauigkeit ca. 0.02 g/cm^3) sind die Messdaten der Drucksetzungs- und Scherversuche mit vergleichsweise großen Fehlern behaftet. Beide Versuchsarten sind sehr empfindlich gegen gröbere Einlagerungen (z.B. Muscheln, Kieskörner etc.) die zu beträchtlichen Verfälschungen der Messwerte führen können. Der Einbau der Proben in die Messzellen führt zu weiteren Störungen der ursprünglichen Lagerungsstruktur. Die vorhandene bodenmechanische Messtechnik ist nur bedingt für die Untersuchung sehr weicher, teilweise flüssigplastischer Proben und niedrigen Normal- bzw. Scherspannungen geeignet.

Trotzdem geben die Versuchsergebnisse einen ersten groben Überblick zur Festigkeit der Sedimente. Scher- und Konsolidierungsdaten von Proben aus unterschiedlichen Tiefen der Station 23326 sind in Abb. 5-19 und Abb. 5-20 dargestellt. Die Schergeraden (Abb. 5-19) der einzelnen Proben aus unterschiedlichen Tiefen ($T:100 = 10 \text{ cm}$, $T200 = 20 \text{ cm}$, $T270 = 27 \text{ cm}$) zeigen in etwa den gleichen Anstieg (Scherwinkel ca. 21°) und eine Kohäsion von ca. 1 kPa.

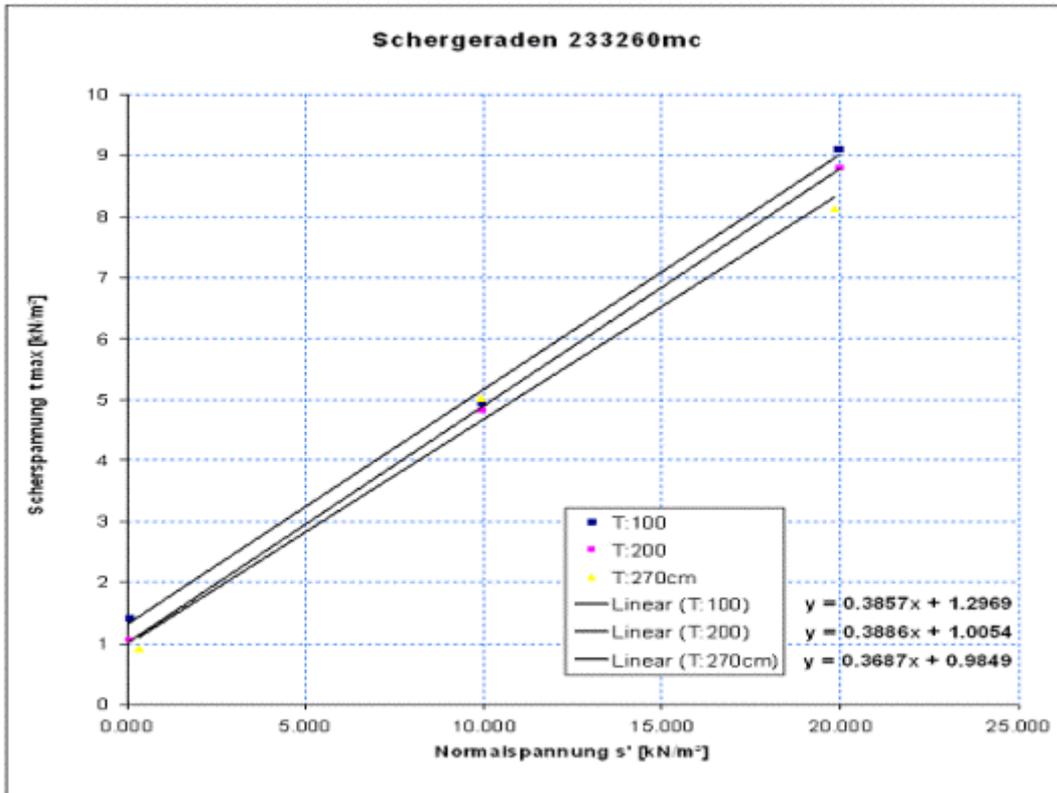


Abb. 5-19: Ergebnisse der direkten Scherversuche an Schlickproben aus den Tiefenintervallen 0-10cm (T100), 10 –20cm (T200) und 20 –30 cm (T300) der Station 233260 Die Gleichungen der Schergeraden sind rechts unten angegeben.

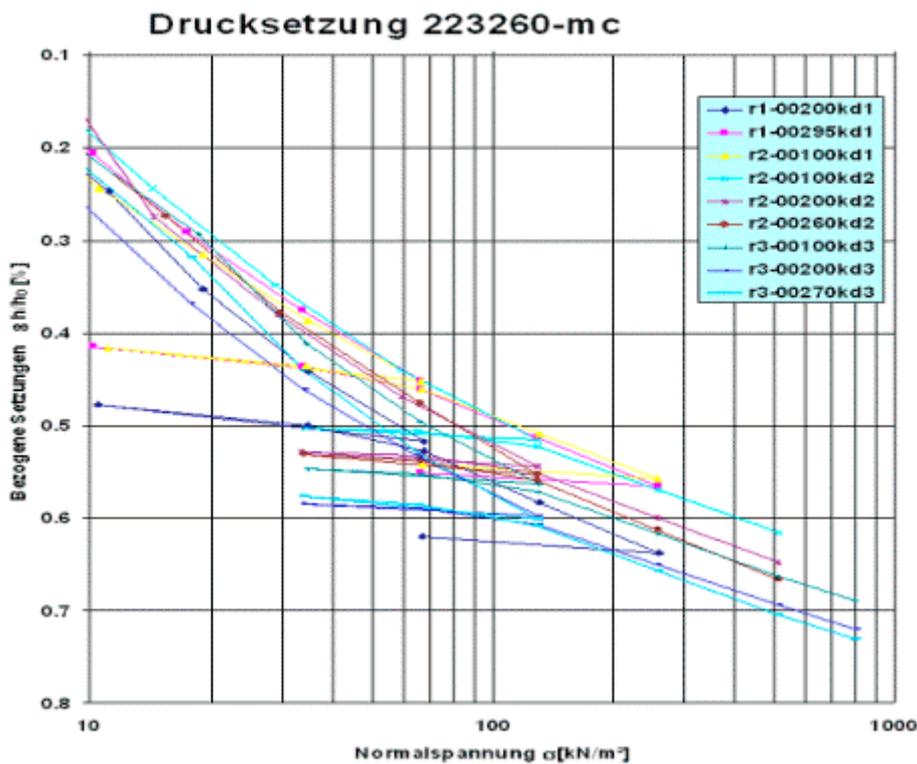


Abb. 5-20: Drucksetzungskurven von Schlickproben aus verschiedenen Tiefen (10 cm, 20 cm, 26cm, 27cm, 29.5 cm) und unterschiedlichen Rohren (Rohr 1 – 3) der Station 233260

Für ein normal kompaktiertes Sediment sollten die Kurven im Idealfall identisch sein. Die Abweichungen sind einerseits durch die o.g. Fehler und Störungen zu erklären. Andererseits deuten sie ebenso wie die Dichtekurven auf eine gestörte Kompaktion hin. Die Drucksetzungskurven der Station 233260 (Abb. 5-20) zeigen ein ähnliches Verhalten. Die Kompressionswerte liegen bei -0.4 bis -0.6 mit Anfangsporenzahlen um 4.

Das gewonnene Datenmaterial erlaubt eine erste grobe sedimentphysikalische Charakterisierung der Ablagerungen im Untersuchungsgebiet. Vorgenommen wurden erste Modellrechnungen von Rohdichteprofilen für normalkonsolidierte Sedimente. Die Abweichungen zu den Messdaten zeigen, dass die Kompaktion der Ablagerungen durch weitere Prozesse überlagert wird.

Eine tiefgründigere Auswertung der Labordaten insbesondere unter Einbeziehung sedimentologischer Kenngrößen und Daten aus Erosionsversuchen ist für einer zweite Phase von DYNAS vorgesehen. Ausgehend von der Analyse der Beziehungen zwischen den einzelnen Parametern werden Ansätze zur Berechnung von Erosionseigenschaften aus sedimentologischen und sedimentphysikalischen Parametern entwickelt.

Ein weiterer Schwerpunkt beinhaltet die Prüfung der Eignung akustischer Echoparameter als Proxy für sedimentologische / sedimentphysikalische Kenngrößen und Erosionseigenschaften. Bei Erfolg sollen die vorhandenen digitalen seismoakustischen Daten für eine laterale Extrapolation von Sedimentparametern, insbesondere Erosionseigenschaften genutzt werden.

Die experimentellen Arbeiten zeigten, dass die gängigen Verfahren und Geräte

- für die Gewinnung minimal gestörter Kernproben (insbesondere sandige Sedimente)
- und für die Bestimmung physikalischer, insbesondere bodenmechanischer Eigenschaften gering konsolidierter bzw. rolliger Sedimente

nur bedingt geeignet sind. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein neues, längerfristiges Methodik – Konzept entwickelt. Es beinhaltet u.a. folgende Dynas – relevante Schwerpunkte:

- A) Entwicklung eines Kurzkern – Bohrgerätes zur Gewinnung minimal gestörter Kerne (1m Kernlänge) im Liner
- B) In Situ Messung ausgewählter Parameter unter Nutzung des Kurzkern – Bohrgerätes
- C) Entwicklung einer neuen Belastungs-Zelle mit minimierter Störung der Probe beim Einbau, einem breiterem Sensorspektrum (Akustik, Elektrik, Temperatur, Drücke, Durchflüsse...) und angepasstem Belastungsregime für un-/ gering konsolidierte Sedimente.

Wesentliche Teile des ersten Schwerpunktes konnten mit der Erprobung des Funktionsmusters eines Kurzkern – Bohrgerätes (Abb. 5-21) während einer Schiffsexpedition mit FS Prof. A.Penck im November 2002 realisiert werden. Dabei handelt es sich um eine Apparatur, die ähnlich wie bei einem konventionellen Bohrgerät einen Kernliner langsam in das Sediment führt. Das umgebende Material wird mit Hilfe eines Mantelrohrs mit Bohrkronen und Spirale herausgeschält und nach oben transportiert. Sowohl im Schlick als auch im Grobsand konnte das Grundprinzip des Gerätes bestätigt werden. Gegenwärtige Schwachpunkte sind neben der noch

etwas komplizierten Handhabung die Fixierung des Kerns im Rohr (Kernfänger) beim Herausziehen des Kerns aus dem Sediment. Entsprechende Lösungswege liegen vor und sind für 2003 zur Realisierung geplant.

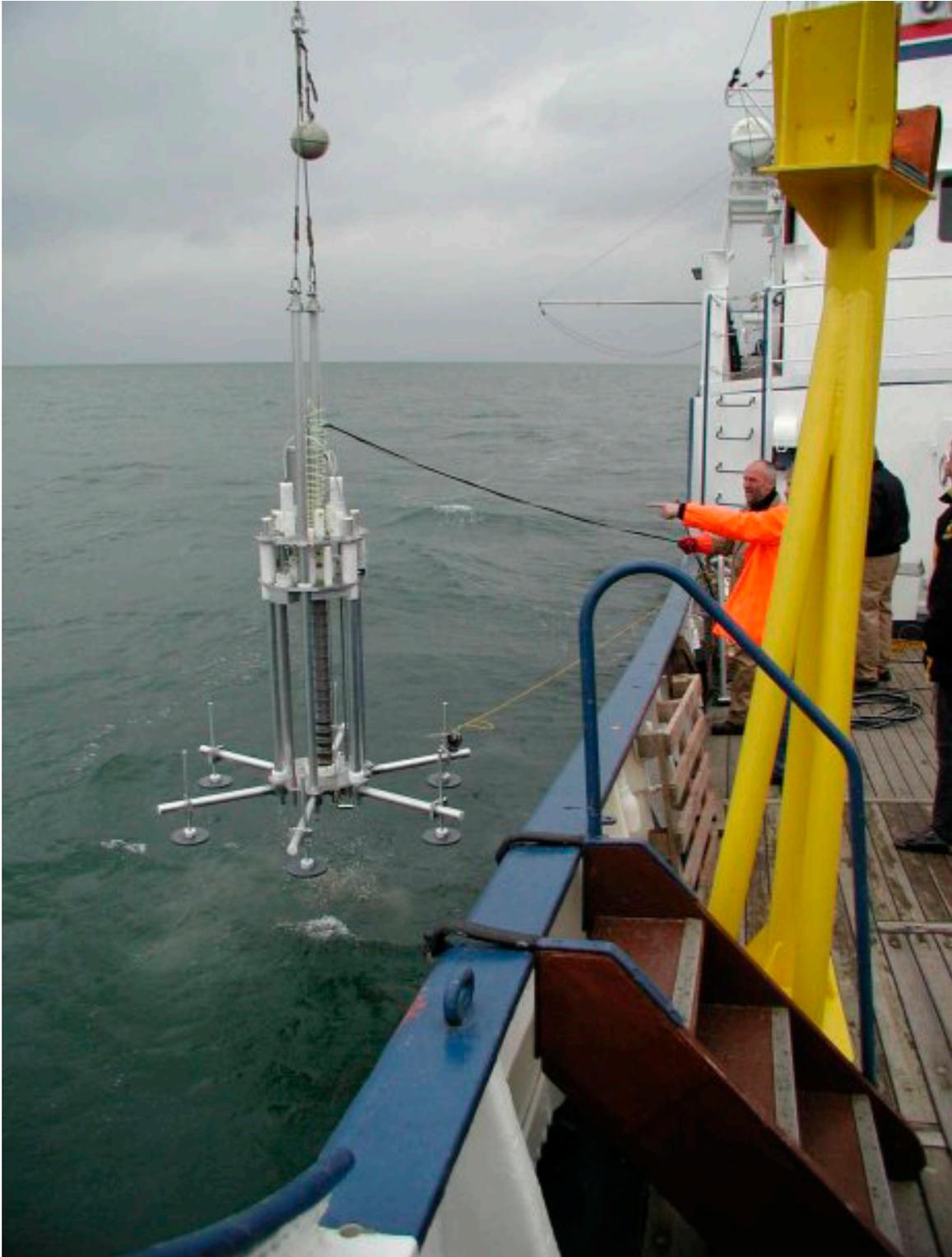


Abb. 5-21: Einsatz des Kurz kern-Bohrgeräts während der Schiffsexpedition mit FS Prof. A. Penck November 2002

5.2 Biologische Prozesse am Meeresboden und im bodennahen Wasser

5.2.1 Biodeposition und Bioresuspension

(Graf G., Friedrichs M., Peine F.)

Der Einfluss der Makrofauna auf Resuspension und Deposition kann aktiv durch direkten Partikeltransport erfolgen, z.B. Filtration mit anschließender Deposition von Kotballen, oder auch passiv, indem der Organismus selbst bzw. von ihm erzeugte biogene Strukturen hydrodynamische Effekte und somit Wechselwirkungen zwischen Strömung und Sedimentoberfläche auslösen.

5.2.1.1 Passive Effekte:

Michael Friedrichs verfasst derzeit eine Dissertation zum Thema der passiven Biodeposition und Bioresuspension, die diesem Bericht nach ihrer Fertigstellung hinzugefügt wird.

Für die Erforschung der passiven Effekte wurden zuerst einige Grundtypen biogener Strukturen einzeln untersucht: Wurmröhre, Muschel, Schnecke, Sandhügel, Trichter und Kriechspur, jeweils im Vergleich zu einem glatten Kontrollsediment. Der dafür verwendete Labor-Strömungskanal der Abteilung Meeresbiologie, Univ. Rostock (Abb. 5-22; Springer et al., 1999) ist neben einem hoch auflösenden Strömungssensor zusätzlich mit einer Laserabtastung zur genauen Vermessung der Sedimentoberfläche sowie deren Veränderungen ausgestattet (Friedrichs & Graf, 2003).

So wurde in den Experimenten die langsame Umströmung der Strukturen bei 2 cm s^{-1} sowie die zeitliche Abfolge und Menge von Erosion (Sand, $220 \mu\text{m}$ bei 20 cm s^{-1}) und Deposition (jeweils 300 g Mergelsuspension, $10 \mu\text{m}^{\S}$ bei 5 cm s^{-1}) für jeden Ansatz mit Einzelstrukturen getrennt gemessen. Zusätzlich wurde die kritische Erosionsschubspannung ermittelt. Im Anschluss an diese Einzelversuche wurden die Messungen mit künstlichen Wurmröhren zunehmender Besiedlungsdichte wiederholt, um Schwellwerte und flächenbezogene Raten für die Modellierung zu erhalten. Zuletzt wurde eine natürliche, benthische Lebensgemeinschaft aus dem Untersuchungsgebiet für einen Vergleich der erhaltenen Ergebnisse mit feldnahen Bedingungen im Strömungskanal nachgebaut.

[§] Bohling B., pers. Mitteilung

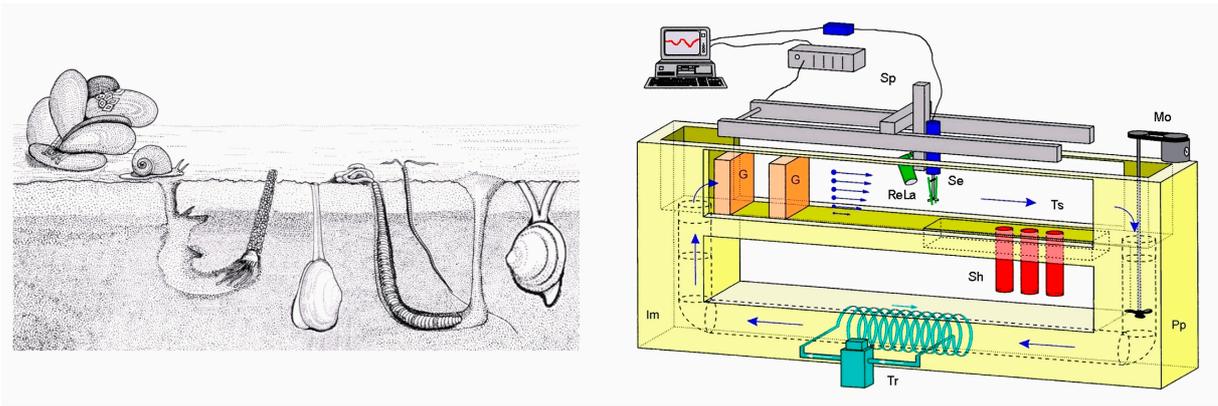


Abb. 5-22: Linkes Bild: Beispielorganismen für die eingesetzten Grundtypen biogener Strukturen. Von links nach rechts Miesmuschel *Mytilus edulis*, Strandschnecke *Littorina littorea*, Köcherwurm *Pectinaria koreni*, Sandklaffmuschel *Mya arenaria*, Wattwurm *Arenicola marina*, röhrenbauender Wurm *Pygospio elegans* und Islandmuschel *Arctica islandica* (nach Tardent, 1993). Rechtes Bild: Schematische Darstellung des verwendeten Strömungskanal. Sp = Schienensystem zur Sensorpositionierung, Se = Akustik-Doppler Strömungssensor, ReLa = Laser zur Reliefabtastung, Ts = Testsektion, Sh = Stechrohrhalterung für Proben, Mo = regelbarer elektrischer Motor, Pp = Antriebspropeller, Tr = Temperatur-Regulierung im Rücklauf, Im = Isoliermaterial, G = Gleichrichterwaben.

Bei den Strömungsmessungen um Einzelstrukturen waren starke Veränderungen im Vergleich mit der Kontrolle zu erkennen. Das Wasser wurde überwiegend horizontal um die Struktur herumgeleitet, aber es erfolgte auch eine vertikale Ablenkung. Dabei traten Zonen mit abgebremster Strömung bzw. ausgeprägter Turbulenzbildung auf. Letztere sind u.a. anhand von Bereichen mit Wasserbewegung entgegen der Hauptströmungsrichtung erkennbar. Diese Verwirbelungen lagen vor der Struktur meist an der Sedimentoberfläche und erstreckten sich dahinter über den gesamten Strömungsschatten. Besonders ausgeprägt waren die Wirbel hinter den Erhebungen (Wurmhöhle, Muschel, Schnecke, Hügel), wogegen die Vertiefungen im Sediment (Trichter und Kriechspur) deutlich schwächere Effekte zeigten (Abb. 5-23). Hier war meist nur innerhalb der Vertiefung eine reduzierte Strömung erkennbar. Die Strömungsmessungen wurden anhand von einer Versuchsreihe mit Farbstoff (KMnO_4) überprüft und bestätigt.

Auch die Erosionsversuche folgten dem Prinzip, nachdem sich Erhebungen deutlicher auswirken als Vertiefungen. So zeigten das Schneckenhaus und der Sandhügel die größten Veränderungen, wogegen am Trichter selbst nach Stunden kaum Unterschiede erkennbar waren. Grundsätzlich erfolgte die Sedimentbewegung nach Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit solange, bis sich ein neues Kräftegleichgewicht einstellt. Die Orte der stärksten Erosion entsprachen den Stellen, an denen auch die Strömungsmessungen Turbulenzmaxima aufwiesen. Es entstand ein charakteristisches Muster, in dem am Boden vor dem Objekt und an dessen Seiten Sediment abgetragen wurde, das sich teilweise im Strömungsschatten wieder abgesetzt hat (Abb. 5-24). Der kritische Erosionsschwellwert war dabei im Mittel aller Versuche mit Einzelstrukturen auf 59,4% gegenüber der Kontrollfläche aus glattem Sand herabgesetzt (Tab. 5-6).

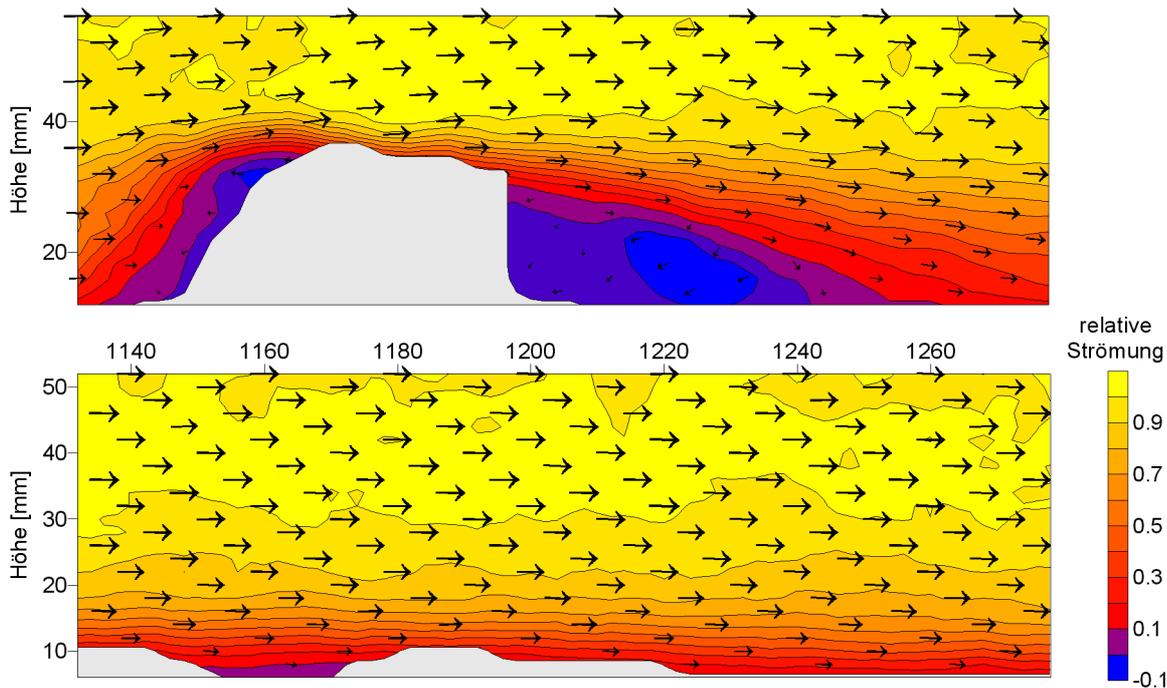


Abb. 5-23: Langsame Strömung (2 cm s^{-1}) entlang einer vertikal stehenden Schnittebene, oben: Schneckenhaus, unten: Kriechspur. Um das Schneckenhaus wurde die Schichtung stark komprimiert und über das Objekt hinweg geleitet. Es bildeten sich stabile Wirbel mit Zonen der Strömungsumkehr (blaue Bereiche). Die Kriechspur hatte dagegen keinen erkennbaren Einfluss auf die Strömung.

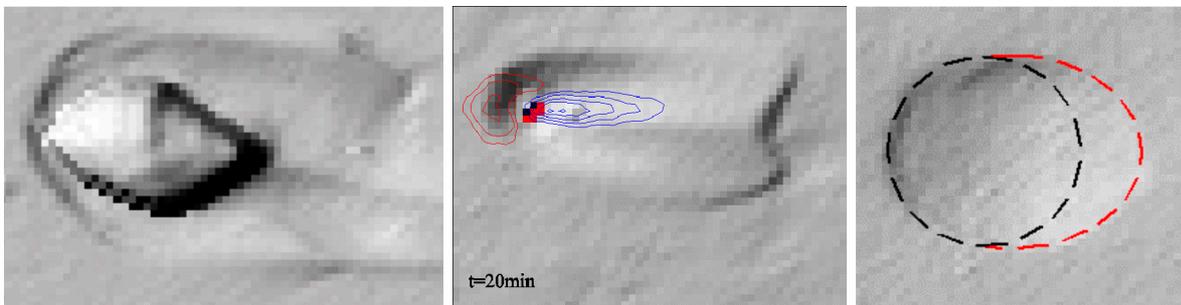


Abb. 5-24: Erosionsversuche auf Sand bei 20 cm s^{-1} Strömung (von links kommend). Gezeigt sind in Aufsicht die Ergebnisse der Reliefabtastung nach Versuche: links Schnecke, Mitte Wurmhöhle, rechts Trichter. Bei Schneckenhaus und Wurmhöhle bildete sich eine tiefe Auskolkung auf der strömungszugewandten Seite, im Strömungsschatten hat sich dieses Material teilweise wieder abgesetzt. In das Bild der Wurmhöhle sind zum Vergleich Daten der vertikalen Strömungskomponente eingeblendet (rot = abwärts, blau = aufwärts). Der Trichter hat sich dagegen kaum verändert. Die schwarze Linie zeigt die Kontur vor dem Versuch, die rote Linie den Trichterrand nach 5 Stunden Versuchsdauer.

Es konnten zwei verschiedene Arten der Sedimentbewegung aufgezeichnet und bilanziert werden: lokale Umlagerungen von der Objektbasis zu deren Strömungsschatten und Export aus der Versuchsfläche hinaus. Dabei waren die Änderungen zu Beginn der Erosionsversuche besonders ausgeprägt, danach nahmen sie asymptotisch ab. Je nach Versuchsansatz war nach 60-300 Minuten keine weitere Bewegung mehr messbar. Es ist anzunehmen, dass sich dabei ein

neues Gleichgewicht zwischen der veränderten Strömung und dem Sedimentrelief eingestellt hat.

Aus den Depositionsversuchen mit Mergelsuspension ergab sich, dass sämtliche Strukturen eine Erhöhung der Deposition im Vergleich zur Kontrolle bewirken (Tab. 5-6). Der Hauptanteil wurde jedoch erneut im unmittelbaren Strömungsschatten abgesetzt, den beruhigte Bedingungen an der Objektbasis auszeichnen. Anders als bei der Erosion wurde das Material dahinter, im verlängerten Strömungsschatten und an der strömungszugewandten Seite der Objekte, kaum deponiert. Es wurde vielmehr vermehrt auf den Flächen abgesetzt, die außerhalb der turbulenten Strömungsbereiche liegen, d.h. ein Stückweit vor dem Objekt und seitlich dahinter (Abb. 5-25).

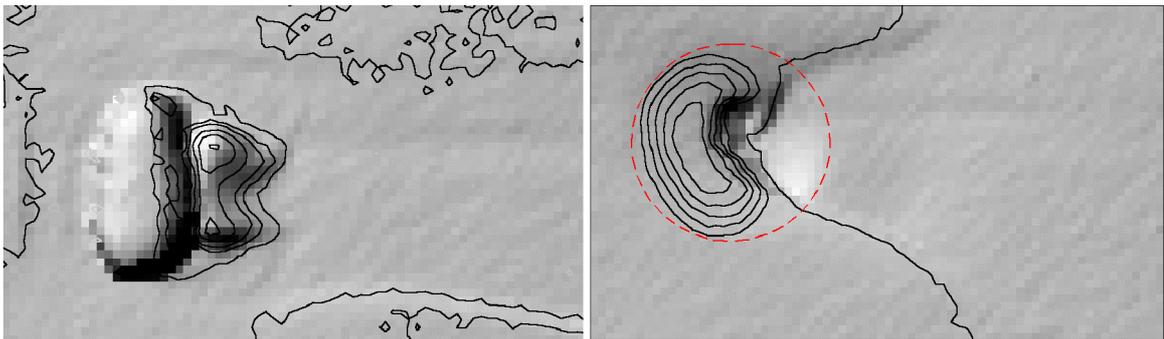


Abb. 5-25: Ergebnisse der Reliefabtastung (Aufsicht) nach Ende der Depositionsversuche. Die eingeblendeten Isolinien (schwarz) zeigen, wo die Reliefzunahme stattfand: links Muschel, rechts Trichter. Bei der Muschel hat sich vermehrt Material hinter dem Objekt abgelagert, der Trichter war in der vorderen Hälfte stark zugeschüttet (roter Kreis = ursprünglicher Trichterrand).

Tab. 5-6: Zusammenfassung der Sedimenttransport-Ergebnisse an Einzelstrukturen. Gezeigt sind die Werte des Exportverlustes und der lokalen Umlagerung bei der Erosion (links), die Schubspannungsgeschwindigkeit und prozentuale Werte der Erosionsschwellen (Mitte) und die absoluten Zahlen bzw. Differenz zur Kontrolle der Depositionsversuche (rechts). Das Messareal betrug in meisten Versuchen 135 cm^2 , die Werte wurden jedoch auf Standardgrößen umgerechnet, um den Vergleich zu vereinfachen.

Erosion	Export kg/m ²	lokal kg/m ²	Schwellwert	U*krit cm/s	Relativ %	Deposition	Absolut kg/m ²	Relativ kg/m ²
Kontrolle			Kontrolle	1.04		Kontrolle	1.12	
Muschel	-0.31	0.11	Muschel	0.58	51.74	Muschel	1.23	0.10
Schnecke	-0.54	1.00	Schnecke	0.64	57.47	Schnecke	1.31	0.18
Wurm	-2.01	0.87	Wurm	0.56	49.62	Wurm	1.58	0.46
Hügel	-5.29	0.79	Hügel	0.74	65.97	Hügel	1.30	0.18
Trichter	-0.44	0.53	Trichter	0.66	59.09	Trichter	1.22	0.09
Spur	-0.11	1.69	Spur	0.52	46.69	Spur	2.79	1.66

Vogel (1994) beschreibt 3 Arten der Strömung über unregelmäßige Oberflächen. Er unterscheidet unabhängige, interagierende und gleitende Bedingungen (independent, interactive, skimming flow). Je nach Abstand zwischen den Strukturen wirken diese auf die Strömung wie Einzelobjekte, im Übergangszustand treten Wechselwirkungen zwischen den erzeugten Wirbeln auf und bei dicht stehenden Strukturen gleitet die Strömung über das Areal wie über eine geschlossene Decke

hinweg. Anstelle des Objektabstandes kann auch die relative Besiedlungsdichte (Anteil der Oberflächenbedeckung) herangezogen werden (Nowell & Church, 1979; Friedrichs et al., 2000).

Dies Phänomen ist bei den Versuchen mit zunehmender Besiedlungsdichte von künstlichen Wurmrohren sowohl bei den Strömungsmessungen als auch bei den Experimenten zum Sedimenttransport aufgetreten. Bei einer Besiedlungsdichte von 0,6% (Flächenanteil der Strukturen in Bezug auf die Grundfläche) waren kaum Änderungen der Strömung erkennbar, wogegen bei 1,7% starke Turbulenzzellen auftraten. Bei 3,9% war die Strömung schließlich zwischen den Strukturen nahezu völlig abgebremst (Abb. 5-26a). Ebenso verhielt es sich bei der Erosion. Der kritische Schwellwert für Erosionsbeginn lag im gering besiedelten Versuch bei 61,4%, also kaum höher als bei den Einzelobjekten. Bei 1,7% und 3,9% Bedeckung lag der Schwellwert wieder auf gleicher Höhe mit der Kontrolle (92,9% bzw. 103,5%). Bei einer Besiedlung von 9%, stieg die Erosionsschwelle weiter auf 135,9% des Kontrollwertes an (Abb. 5-26b).

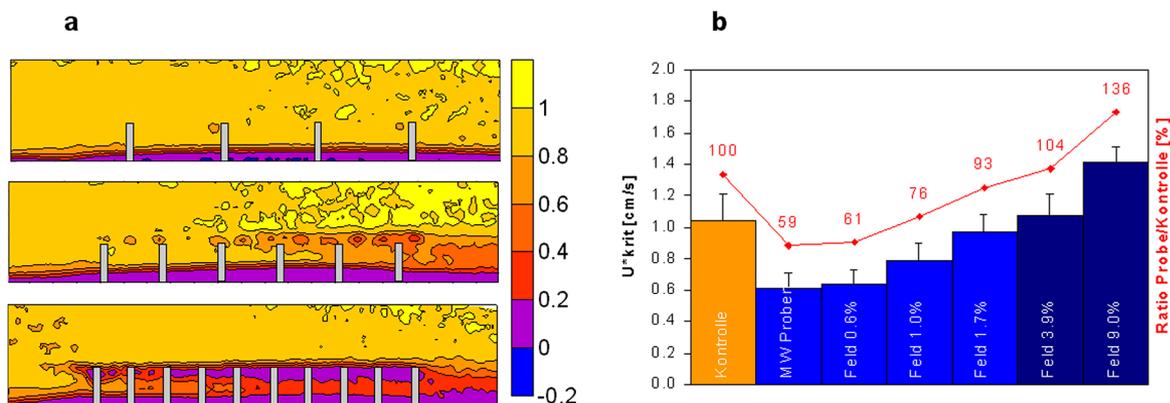


Abb. 5-26: (a) horizontale Strömung (von links) in vertikal stehenden Schnittebenen durch das Röhrenfeld mit zunehmender Besiedlungsdichte (von oben nach unten 0.6%, 1.7%, 3.9%). Die Strömung ist bei der geringen Besiedlung nahezu unverändert. Bei der mittleren Dichte treten starke Turbulenzen auf, und bei der dichtesten Besiedlung gleitet die Hauptströmung über das Feld hinweg (skimming flow). Bild (b): Zusammenhang zwischen der Besiedlungsdichte und dem kritischen Erosions-Schwellwert, der ab 3.9% Bedeckung über dem Wert der Kontrolle (glattes Sediment) liegt.

Die zunehmende Strömungsberuhigung bei ansteigender Besiedlungsdichte schlug sich auch in den Erosionsmessungen nieder. Im gering besiedelten Areal (0.6%) fand die Erosion unabhängig um jede der einzelnen Strukturen statt. Mit zunehmender Besiedlungsdichte verschob sich jedoch der angegriffene Bereich immer weiter in Richtung Anströmseite, hinter der sich ein ausgeprägter Depositionsbereich bildete. Die Menge an lokal umgelagertem Sediment lag dabei zunächst deutlich über dem durchschnittlichen Wert der Einzelstrukturen (0.83 kg m^{-2}), nahm aber linear von 8.7 über 6.0 auf 1.7 kg m^{-2} ab. Im restlichen Areal blieb das Sediment dagegen unbewegt liegen (Abb. 5-27). Der Exportverlust lag innerhalb der Werte der Einzelstrukturen.

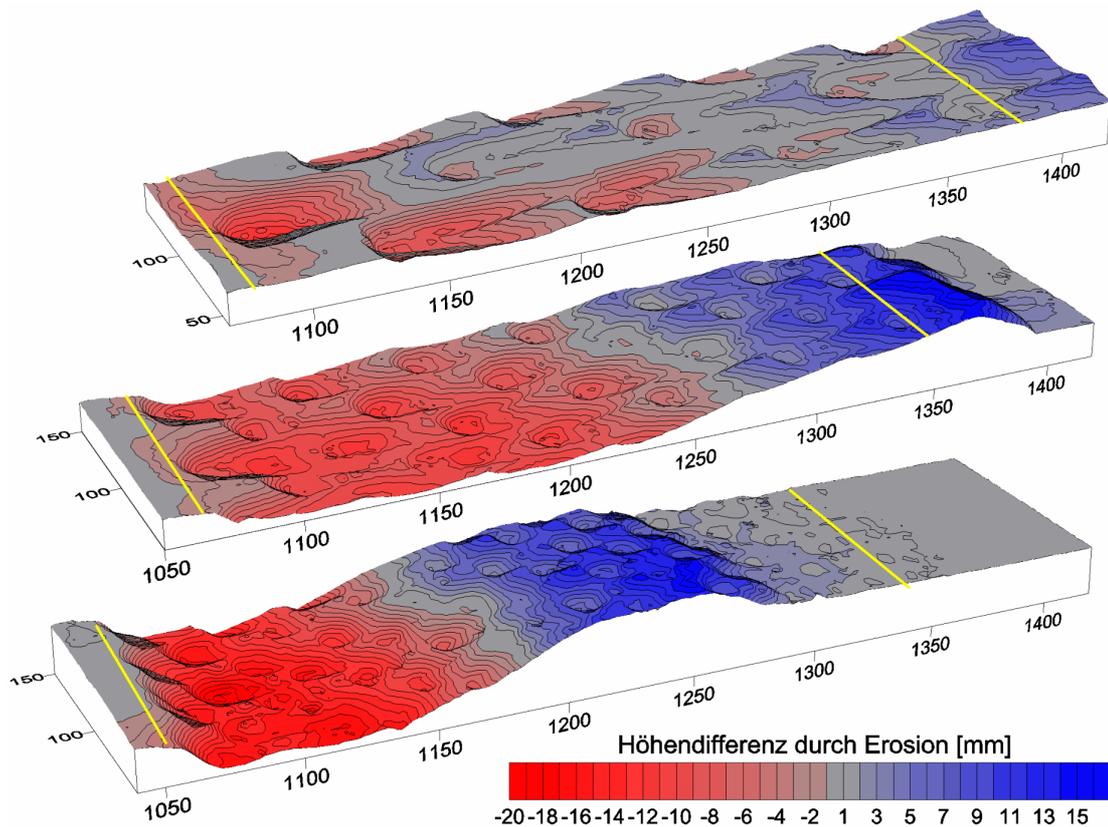


Abb. 5-27: Reliefabtastung nach den Erosionsversuchen im Röhrenfeld mit zunehmender Besiedlungsdichte (von oben nach unten 0.6%, 1.7% und 3.9%; gelbe Linien markieren die Ränder des Röhrenfeldes). Rote Zonen zeigen einen Sedimentabtrag, blaue Zonen stehen für Ablagerung. Mit zunehmender Besiedlung verlagerte sich der betroffene Bereich zur Anströmkante des Feldes. Dahinter fand keine Bewegung statt.

Die Depositionsversuche zeigten ähnliche Zusammenhänge, wobei die deponierte Menge stetig abnahm, je weiter die Besiedlungsdichte stieg (Abb. 5-28). Schon bei 0,6% Bedeckungsgrad setzte sich weniger Material ab, als bei der einzelnen Wurmröhre. Ab 1,7% Besiedlung lag der Wert außerdem unterhalb der Kontrolle. Es scheint, als würde die Partikelfracht des von den Organismen eingeschlossenen Wassers absinken und nicht durch Austausch erneuert werden. Dies würde bedeuten, dass die in der Literatur angeführten beachtlichen Sedimentakkumulationen in Arealen mit dichter Besiedlung durch Polychaeten (z.B. Daro & Polk, 1973) allein durch den aktiven Partikelfang der Organismen bedingt sind. Allerdings sollte diese Beobachtung durch weitere Untersuchungen eingehend überprüft werden.

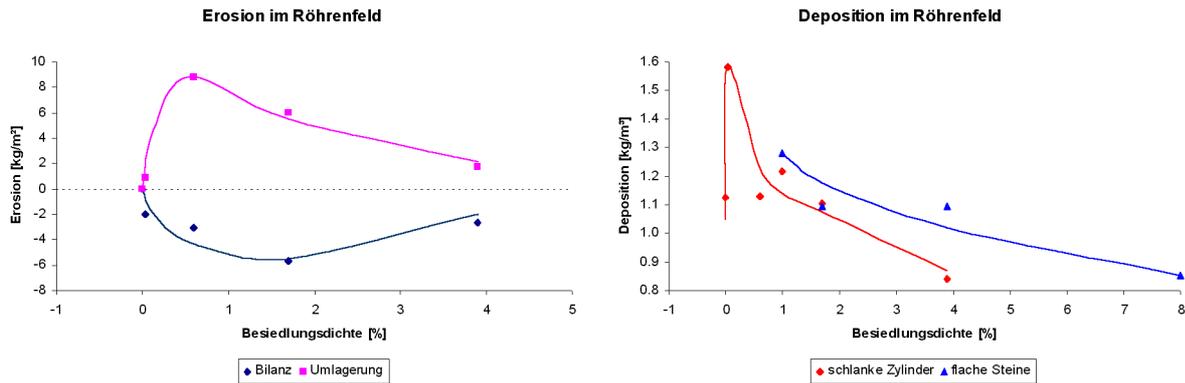


Abb. 5-28: Sedimenttransport-Bilanzen, links Erosion (Export = blau & lokale Umlagerung = violett), rechts Deposition (Zylinder = rot, flache Steine = blau). Sowohl Erosion als auch Deposition nahmen, nach einem jähren Anstieg von der unbesiedelten Fläche zu niedrigen Dichten, mit ansteigender Besiedlungsdichte ab.

Zum Vergleich der erlangten Ergebnisse mit natürlichen Besiedlungsbedingungen wurde eine Makrozoobenthos-Gemeinschaft aus dem Untersuchungsgebiet im Strömungskanal nachgebaut. Die verwendeten Besiedlungsdaten (Powilleit M., pers. Mitteilung) stammen aus dem "WISTMAK" Projekt des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (Abb. 5-29). Umgerechnet auf die verwendete Grundfläche im Strömungskanal war der Bedeckungsgrad 9.6%.

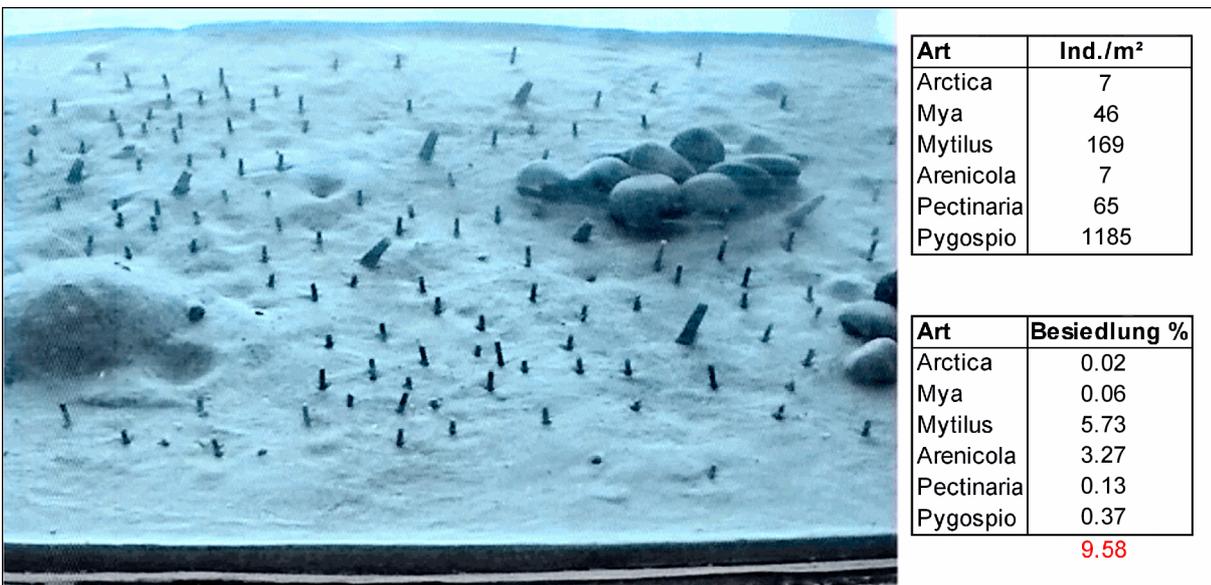


Abb. 5-29: Foto des Versuchsaufbaus (Ausschnitt) mit dem Nachbau einer natürlichen Gemeinschaft aus dem Untersuchungsgebiet. Im Bild sind erkennbar: ein Sandhügel (Arenicola), zwei Miesmuschelbällen (Mytilus), Wurmrohren (Pectinaria & Pygospio), sowie mehrere Trichter (Arenicola, Arctica, Mya). Die eingeblendeten Tabellen zeigen die zugrundeliegenden Abundanzen sowie die Bedeckungsgrade der Arten in Bezug auf die Versuchsfläche (rot = alle Arten zusammen).

Die Strömungsmessungen dieser Gemeinschaft zeigten zwischen den Strukturen eine Verlangsamung der eintreffenden Strömung um 20-40%. In höheren Wasserschichten war eine leichte Beschleunigung der horizontalen Hauptströmung

erkennbar. Es traten außerdem ausgeprägte laterale und vertikale Umlenkungen an den größeren Strukturen wie dem Sandhügel oder den Muschelbällen auf, die lokal mehr als 10% der horizontalen Hauptströmung erreichten. Die Grenzschichtdicke hat sich aufgrund der Wechselwirkungen mit den Strukturen von ca. 2 cm auf über 4 cm verdoppelt (Abb. 5-30). Auch die Rauigkeitslänge (z_0) wurde stark beeinflusst. Sie wuchs durchschnittlich von 1.1 mm an der Anströmkannte auf 5.2 mm am stromabwärts gelegenen Ende des Areal an. Dade et al. (2001) bieten eine einfache Formel zum Schätzen der Rauigkeitslänge im natürlichen Milieu mit unregelmäßigem Bodenrelief an: " $z_0 = \text{Faktor} \times \text{Bedeckungsgrad} \times \text{Objekthöhe}$ ", wobei der Bedeckungsgrad nicht in Prozent sondern als Dezimalzahl einzusetzen ist. Der Faktor liegt zwischen 0.5 und 1. Bei einer mittleren Objekthöhe von 3 cm ergibt sich ein Schätzwert für z_0 von 1.5-2.9 mm, d.h. eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Zwischen Anströmkannte und Ende des besiedelten Areal hat sich die Turbulenz (Reynolds stress) in 1.5 cm über dem Boden bei 10 cm s^{-1} Strömung nahezu verzehnfacht.

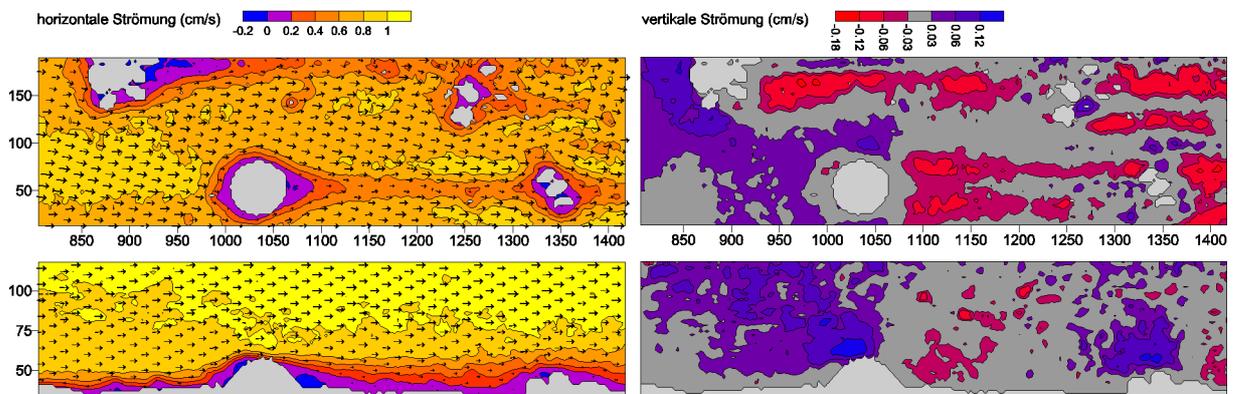


Abb. 5-30: Ergebnisse der horizontalen (oben) und vertikalen (unten) Strömungsmessungen an der Gemeinschaft. Links ist die horizontale Hauptströmungsrichtung dargestellt, negative Werte zeigen eine Strömungsumkehr an. Rechts ist die vertikale Komponente abgebildet, wobei positive Werte aufwärts gerichtete Bewegungen zeigen. Diese Effekte traten an den größeren Strukturen besonders ausgeprägt auf.

Im Erosionsversuch zeigte sich, ähnlich wie bei den vorangegangenen Versuchen am Röhrenfeld, eine überwiegend stabilisierende Wirkung der eingesetzten Strukturen. So fiel der lokale Sedimenttransport mit 0.43 kg m^{-2} extrem gering aus, ebenso wie der Exportverlust mit insgesamt 0.95 kg m^{-2} vergleichsweise niedrig lag. Diese Werte liegen deutlich unter denen vom Röhrenfeld. Allerdings traten um die größeren Strukturen herum einzelne Bereiche mit ausgeprägtem Transport auf (Abb. 5-31). Dies waren die Anströmkannten der Muschelbälle sowie die strömungszugewandten Hänge von Sandhügel und Trichter. An diesen Stellen wurde bis zu 3 mm Sedimenthöhe abgetragen, im Trichter sogar bis zu 7 mm. Gleichzeitig trat lokale Deposition in dicht besiedelten Röhrenfeldern und im Strömungsschatten hinter dem Hügel, den Muschelbällen sowie hinter einigen großen Wurmröhren auf. Der Depositionsversuch mit 300 g Mergelsuspension ergab einen Wert von 1.28 kg m^{-2} , d.h. es hat sich im Vergleich zur Kontrolle ein Materialüberschuss von 0.15 kg m^{-2} im Testfeld abgelagert. Das Material hat sich dabei nahezu gleichmäßig auf der gesamten Fläche verteilt. Nur an den exponierten Stellen um die Muschelbälle und den Hügel war die Schichtdicke leicht erhöht, gefolgt von einer deutlich erkennbaren Strömungs-Abrisskanten (Abb. 5-31).

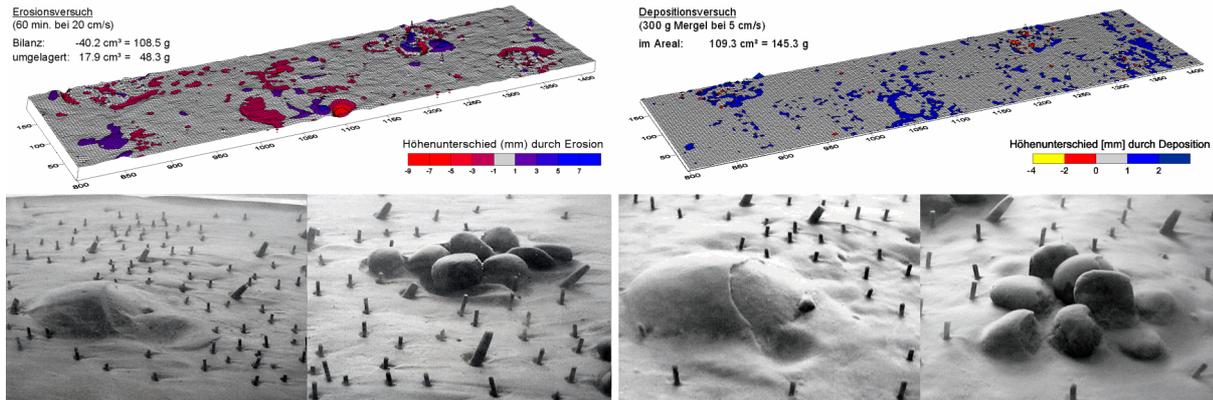


Abb. 5-31: Erosion (links) und Deposition (rechts) in der gemischten Gemeinschaft. Die obere Graphik zeigt jeweils die Differenz der Reliefmessungen vor und nach dem Versuch. Rote Areale zeigen eine Abnahme der Sedimenthöhe (Erosion), blaue Bereiche zeigen eine Sedimentakkumulation. Die Fotos im unteren Bildbereich zeigen Details aus den beiden Versuchen.

Mit den vorliegenden Ergebnissen der verschiedenen Experimente lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen. So bewirken insbesondere Erhebungen aus der Sedimentoberfläche eine ausgeprägte Veränderung der lokalen Strömungsbedingungen. Daraus ergeben sich sowohl örtlich begrenzte destabilisierende Effekte für das Sediment, als auch stabilisierende Auswirkungen bzw. Deposition von suspendiertem Material. Mit zunehmender Besiedlungsdichte lassen Erosion und Deposition nach. Begleitet wird dies durch einen Anstieg der Rauigkeitslänge z_0 sowie des Erosionsschwellwertes u_{*krit} . Letzterer ergab einen Umschwung von destabilisierenden Effekten zu einer erhöhten Stabilisierung der Oberfläche bei einem Bedeckungsgrad von 2-4%.

Der Vergleich mit einer gemischten Gemeinschaft zeigte trotz großflächiger Effekte der großer Strukturen auf das Strömungsmuster eine ausgeprägte lokale Begrenzung des resultierenden Sedimenttransportes. Die Rauigkeitslänge z_0 hängt von Objekthöhe, Objektbreite und Objektabstand ab, liegt aber in einer gemischten Gemeinschaft selbst bei relativ hohen Besiedlungsdichten deutlich niedriger als die mittlere Objekthöhe. So tritt "skimming flow" auf, die betroffene Schicht ist jedoch dünn und wird durch Wirbelbildungen leicht durchbrochen. Ein Erosionsschwellwert lässt sich in einer solchen Gemeinschaft nur schwer festlegen, denn sowohl lokale Erosion wie auch stabile Flächen und lokale Deposition kommen über eine breite Spanne von Strömungsgeschwindigkeiten nebeneinander vor. Dennoch deuten die Messergebnisse auf eine insgesamt stabilisierende Wirkung hin. Beim Erosionsversuch wurden nur moderate Transportmengen gemessen, wogegen im Depositionsversuch mehr Material in dem Areal liegen blieb als in Vergleichsmessungen (Abb. 5-32).

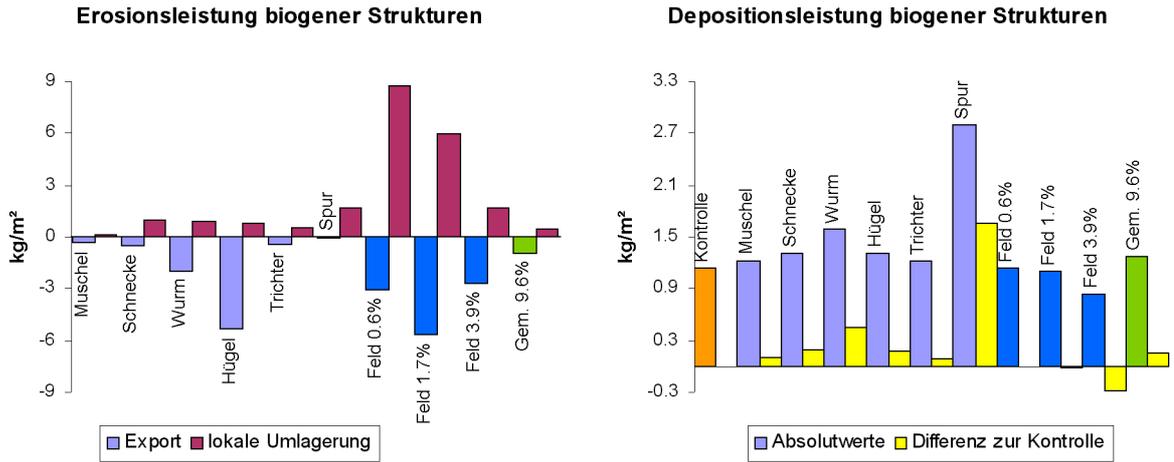


Abb. 5-32: Sedimenttransport-Bilanzen, links Erosion (Export = blau & lokale Umlagerung = violett), rechts Deposition (blau) und Vergleich mit der Kontrolle (gelb). Die Erosion wird durch die Röhrenfelder mit niedriger Besiedlung stark erhöht, bei hohen Dichten nimmt sie wieder ab. Die Deposition im Röhrenfeld liegt ebenfalls zunehmend unterhalb der Kontrolle. Die gemischte Gemeinschaft zeigte eine geringere Erosion, aber eine erhöhte Deposition und kann so als stabilisierend eingestuft werden.

5.2.1.2 Aktive Effekte:

Für die Untersuchung der aktiven Effekte wurden aus bekannten Makrofauna-Biozönosen die 35 Arten herausgesucht, welche auf Grund ihrer Ökologie und Biologie (Hartmann Schröder 1996) für biogene Strukturen verantwortlich sein können, bzw. die oberen Sedimentschichten in Hinsicht auf Deposition und Resuspension beeinflussen. Die hierfür nötigen Daten über Vorkommen und Verbreitung der Organismen wurden vom Institut für Angewandte Ökologie Neu Broderstorf GmbH zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um einen Datensatz bestehend aus 1839 Stationen und circa 8000 Daten, die überwiegend aus dem Küstenmonitoring stammen.

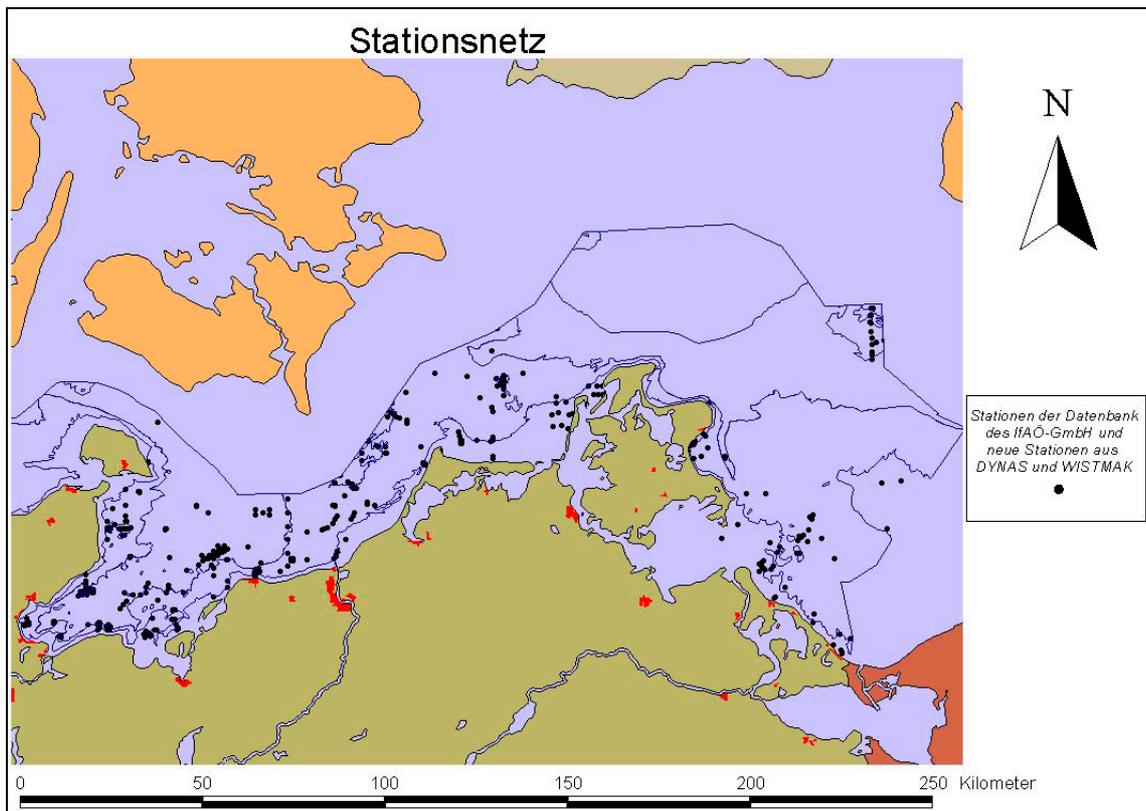


Abb. 5-33: Stationsnetz des Institutes für Angewandte Ökologie Neu-Broderstorf GmbH, sowie hinzugekommene Stationen der Projekte DYNAS und WISTMAK.

Anhand dieser Daten wurden Verteilungskarten der relevanten Fauna im GIS-Format erstellt. Hierfür wurden die Daten nach Arten sortiert, wobei das Hauptinteresse auf Abundanz und Feuchtgewicht lag. Die Daten wurden mit dem Programm ARC-View[®] 3.2a (ESRI, 1999) in Punktform in Karten der Mecklenburger-Bucht eingefügt (Abb. 5-33). Mit der Programmerweiterung Arc-View Spatial Analyst[®] 2.0a (ESRI, 2000) wurden die Punktdaten in ein Raster konvertiert. Die hierbei angewendete Nachbarschaftsstatistik berechnet ein Raster, basierend auf einem Mittelwert aus einer spezifizierten "Nachbarschaft" um jeden Punkt (Wackernagel, 1995). Die Nachbarschaft kann als Kreis oder auch als Rechteck definiert werden (Abb. 5-34). In diesem Fall wurde sie als Rechteck definiert. Die einzelnen Datenpunkte der jeweiligen Arten wurden auf 1 sm, 2 sm und 3 sm interpoliert, um eine Flächendarstellung zu erreichen und gleichzeitig die Boxgrößen für das

Sedimentmodell des IOW zu erfüllen (Abb. 5-36 und Abb. 5-37). Mit einer Programm-Routine des Programms ARC-View[®] wurde dann eine Karten-Abfrage durchgeführt. Es wurden verschiedene Arten miteinander kombiniert, und über die Karten-Abfrage wurde aufgezeigt, wo diese Arten gemeinsam vorkommen können (Abb. 5-38). Bei der Wahl der Arten wurden vor allem Größe und Ausdehnung der durch die Organismen hervorgerufenen biogenen Strukturen gewichtet. Die Arten *Arenicola marina*, *Arctica islandica*, *Mya arenaria*, *Mytilus edulis*, *Pectinaria koreni* und *Pygospio elegans* stellen die herausragendsten biogenen Strukturen dar oder her. Der Hügel des Wattwurmes *Arenicola marina* kann bis 12 cm hoch werden und einen Durchmesser von 10 cm erlangen.

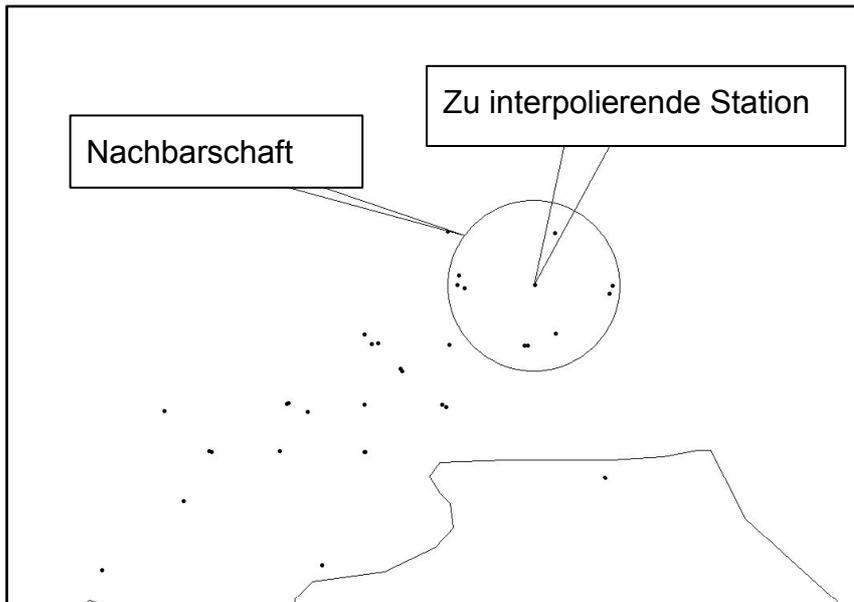


Abb. 5-34: Schematische Darstellung der Nachbarschaftsstatistik

Arctica islandica saugt durch ihre beiden Siphon-Öffnungen Wasser. Hierdurch kommt es zu einer Art Trichter im umlagerten Sediment der Siphone, der als Depositions-Falle dienen kann. Das Gleiche wurde bei *Mya arenaria* beobachtet, wobei neueste Beobachtungen auch eine kleine Hügelbildung nachweisen konnten, die sich in Strömungsrichtung fortsetzt. Bei *Mytilus edulis* hingegen ist die Muschel die biogene Struktur selbst. Die Muschel liegt in Konglomeraten von bis zu 100 Tieren wie Klumpen auf dem Sediment (Abb. 5-35).



Abb. 5-35: *Mytilus*-Klumpen auf einer Kastengreifer-Probe. (Mecklenburger Bucht; 16 m; 11/2002)
Aufsicht: Kantenlänge des Sedimentblocks: 30 cm

Die Röhre des Köcherröhrenwurmes *Pectinaria koreni* ragt 2-10 mm aus dem Sediment und stellt, je nach Individuendichte, eine herausragende Struktur dar. Da die Röhren nur einen geringen Durchmesser (1-5 mm) haben spielt der Bedeckungsgrad hier eine entscheidende Rolle. Ebenso verhält es sich bei *Pygospio elegans*. Dieser filigrane Wurm kommt in Dichten bis zu 15000 Individuen/m² in der Mecklenburger Bucht vor. Bei einer so hohen Besiedlung spricht man von einem Rasen, der einen erheblichen Einfluss auf die Strömung hat (Friedrichs, *et al.* 2000). Abb. 5-38 zeigt, dass die hier untersuchte Gemeinschaft große Flächen vor unserer Küste besiedelt, und es somit nicht nötig ist, 5 Gemeinschaften für eine flächendeckende Darstellung heranzuziehen. Um die Aussagekraft der Karten zu überprüfen, wurden im Rahmen eines vom LUNG (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie) geförderten Projektes („WISTMAK“) 5 Stationen in der Mecklenburger Bucht beprobt und auf ihre Makrofauna-Zusammensetzung untersucht. Die gewonnenen Daten bestätigten die GIS-Karten und wurden außerdem in die bestehenden Karten eingefügt, um eine höhere Punktdichte bei dem Stationsnetz zu erlangen. Hiernach konnte eine Station festgelegt werden, auf der die Probenahme der zu untersuchenden Artengemeinschaft stattfinden konnte.

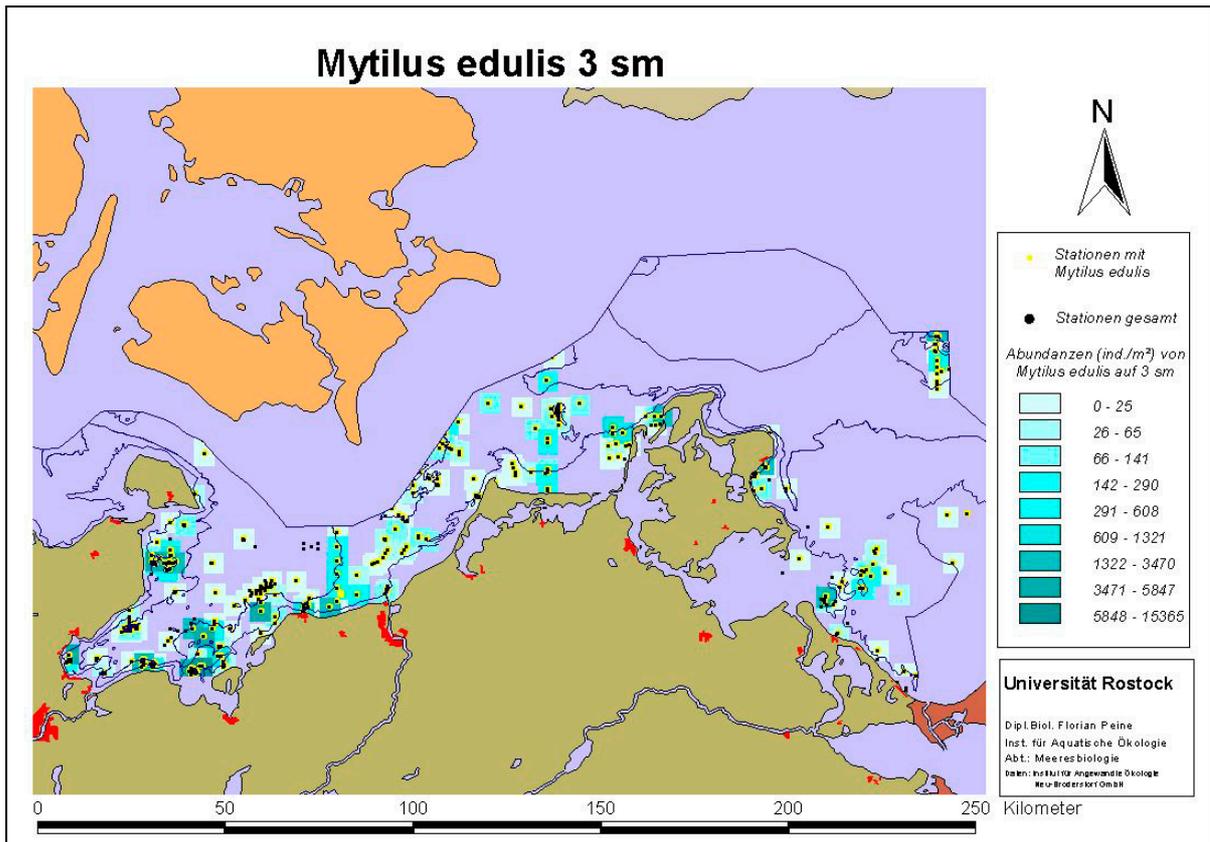


Abb. 5-36: Beispiel einer Verteilungskarte der Art *Mytilus edulis* auf 3 sm berechnet. Dargestellt sind alle beprobten Stationen (schwarze Punkte), sowie die Stationen wo *Mytilus edulis* gefunden wurde.

Die vorgefundene Makrofaunagemeinschaft wurde komplett mit dem Sediment in die Hälterung überführt, um ein möglichst ungestörtes Einsetzen in den Strömungskanal zu gewährleisten. Die Sedimentstücke wurden dann im Labor in den Ringkanal (Widdows, *et al.* 1998a, b) eingesetzt. Der Ringkanal hat außen einen Durchmesser von 64 cm und innen von 40 cm. Hieraus ergibt sich eine Fläche von $\sim 0,2 \text{ m}^2$. Bei einer Sedimenthöhe von 10-12 cm fasst der Ringkanal $\sim 66 \text{ l}$ Wasser. Es können Strömungsgeschwindigkeiten von 1 – 100 cm/s eingestellt werden. Für die Messungen von Biodeposition und -resuspension wurden zwei Algenkulturen in den Kanal gegeben. Eine Kultur mit pelagischen Algen der Gattung *Skeletonema* und eine Kultur mit benthischen Algen der Gattung *Nitzschia*.

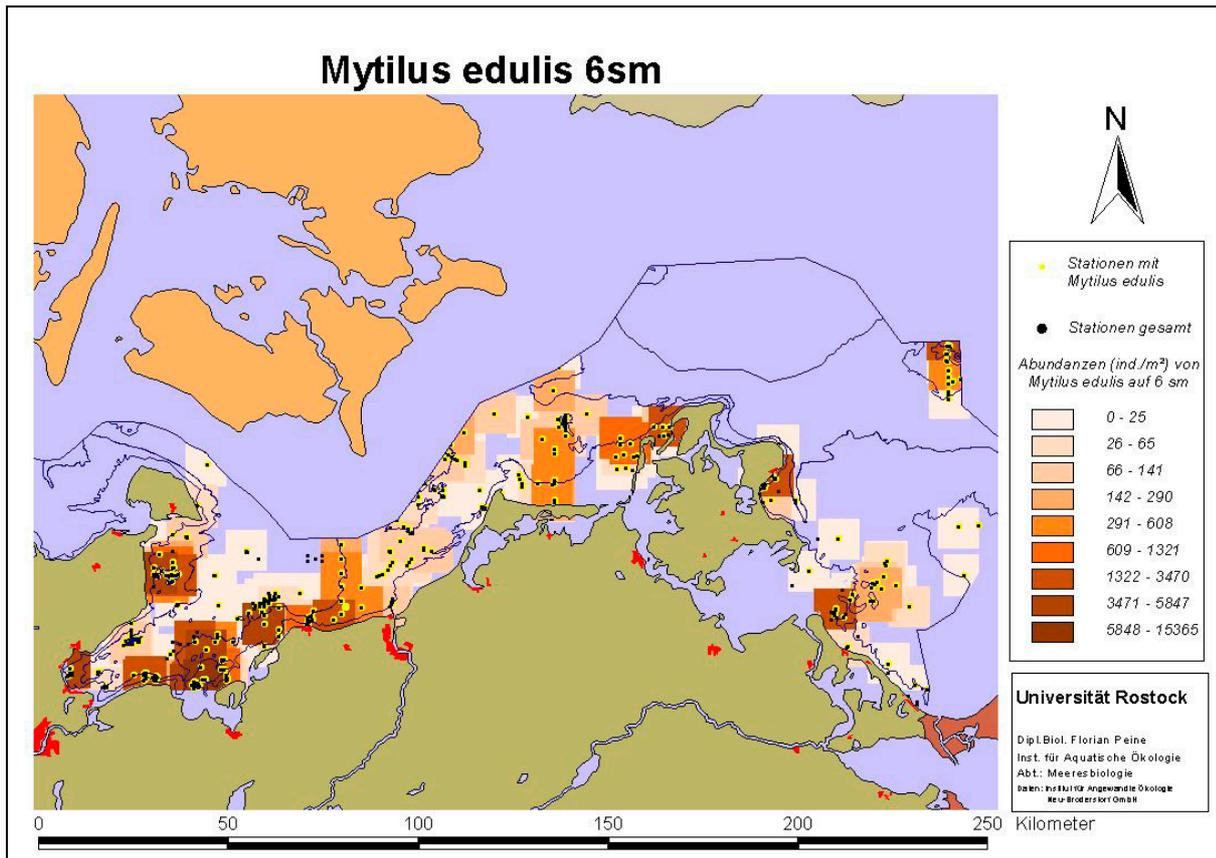


Abb. 5-37: Beispiel einer Verteilungskarte der Art *Mytilus edulis* auf 6 sm berechnet. Dargestellt sind alle beprobten Stationen (schwarze Punkte), sowie die Stationen wo *Mytilus edulis* gefunden wurde

Außerdem wurde eine Suspension aus Mergel und künstlichen, fluoreszierenden Partikeln hinzu gegeben. Die Partikel bestehen aus Silicat und haben eine Dichte von $1,8\text{g/cm}^3$. Dies entspricht annähernd der Dichte von Mergel. Die Partikel sind mit einem fluoreszenten Farbstoff markiert der bei Anregung grün fluoresziert. Bei einer Größe von $20\mu\text{m}$ besteht so die Möglichkeit, die Partikel im Epifluoreszenzmikroskop zu zählen. $20\mu\text{m}$ entspricht der größten Fraktion von Mergel, der ein Größenspektrum von $2\text{-}20\mu\text{m}$ aufweist. Es wurden bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten je 1 Probe aus 5 unterschiedlichen Höhen über Grund genommen, um das Resuspensions- bzw. Depositionspotential der betreffenden Gemeinschaft zu quantifizieren. Es folgen nun noch Experimente, in denen die 6 oben erwähnten Arten einzeln auf ihr Depositions- bzw. Resuspensionspotential untersucht werden. In den zweiten Kanal wurde künstliches Sediment eingefüllt, d.h. Sediment welches gesiebt und getrocknet wurde, um jegliche Fauna und Flora aus ihm zu entfernen. Der Kanal wurde dann zwei Wochen lang mit Wasser gefüllt stehen gelassen, um ein Kompaktieren des Sediments zu gewährleisten. Dieser Kanal stellt die Referenzprobe zu den Makrofaunaversuchen dar. Die Beimpfung mit Algen und Partikeln erfolgte gleich der des oben beschriebenen Kanals. Die Unterschiede zwischen besiedeltem und nicht besiedeltem Sediment sind deutlich. Schon bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten werden bei unbesiedelten Sedimenten mehr Partikel resuspendiert (bis zu 10-fach erhöht Abb. 5-39). Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ($>35\text{ cm/s}$) ist das Rückhaltevermögen von besiedelten Sedimenten ebenfalls gut zu erkennen. Die Mittelwerte der Abb. 5-39 ergeben sich aus den 5 verschiedenen Höhen über Grund, aus denen Proben genommen wurden.

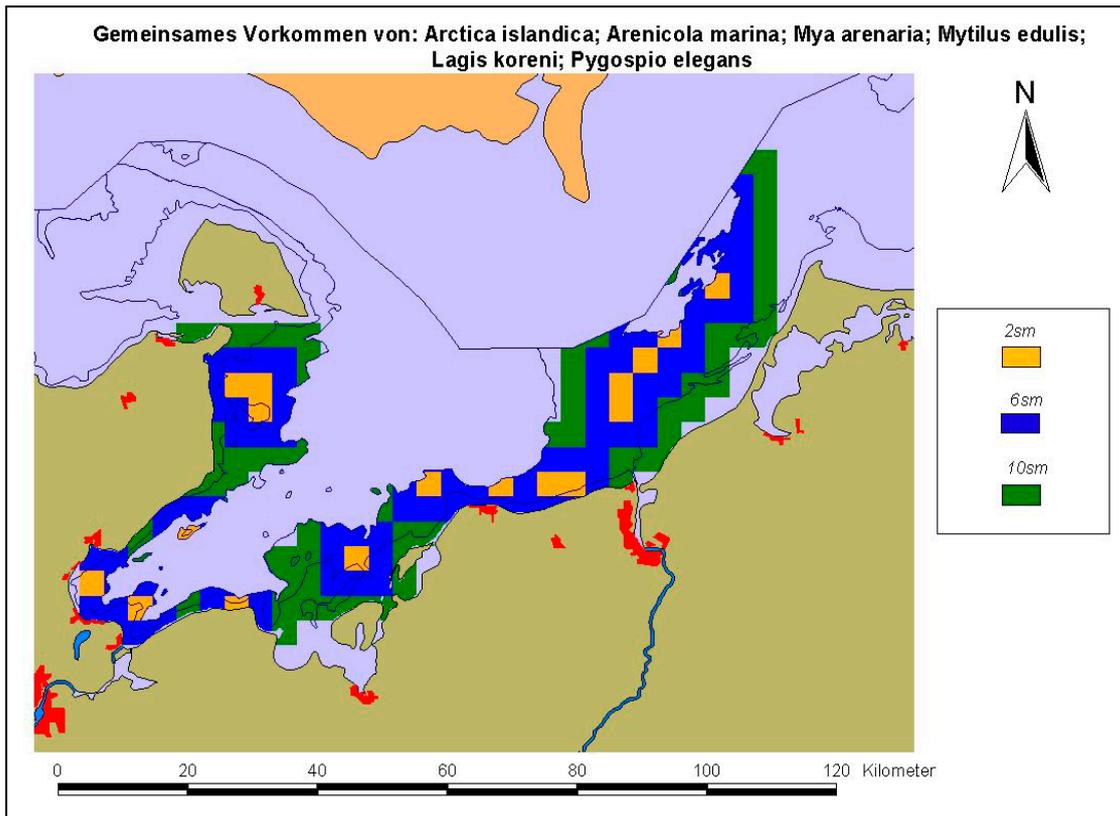


Abb. 5-38: Verteilungskarte der 6 Arten, die herausragende Biogene Strukturen hervorrufen oder darstellen. Gelb stellt die Verteilung auf 2x2 sm dar, blau auf 6x6 sm, und grün 10x10 sm. Die Darstellung wird begrenzt durch die Küstenlinie sowie die 20 m Tiefenlinie.

Die Deposition von partikulärem Material läuft erwartungsgemäß auf besiedelten Sedimenten schneller ab. Abb. 5-40 zeigt die unterschiedliche Deposition der beiden Kanäle. Es ist zu sehen, dass innerhalb der ersten 2 Stunden auf besiedelten Sedimenten die Partikelkonzentration fast auf Null reduziert wird. Deutlicher zu erkennen ist dieser Trend wenn die maximalen Partikelkonzentrationen der beiden Kanäle gleich 100 % gesetzt werden (Abb. 5-40). Innerhalb der ersten 15 min. nimmt die Partikelkonzentration über den besiedelten Sedimenten um 60% ab, über den unbesiedelten Sedimenten hingegen nur um 29%. Während der nächsten 15 min. nimmt die Partikelkonzentration über den besiedelten Sedimenten nochmals um die Hälfte ab, und sinkt innerhalb der ersten Stunde nahezu unter 10% der Anfangskonzentration.

Hierdurch wird deutlich, wie hoch der Einfluss des Makrozoobenthos auf die Partikel- und Sedimentdynamik der bodennahen Wasserkörper ist.

Nachdem die Depositions- bzw. Resuspensionspotentiale der Gemeinschaft bestimmt wurden, könnten die gewonnenen Daten in GIS-Karten interpoliert werden. Bei den Berechnungen wurde von einer homogenen Verteilung der bekannten Makrofauna-Gemeinschaft im Untersuchungsgebiet ausgegangen. Dies ist somit eine idealisierte Darstellung der gewonnenen Ergebnisse. Interpoliert man die gewonnenen Ergebnisse auf eine Fläche von 100 sm² so werden bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten bis 20 cm/s über besiedelten Sedimenten zwischen 5 und 11 t partikuläres Material resuspendiert. Über unbesiedelten Sedimenten werden hingegen zwischen 30 und 86 t resuspendiert. Bei Strömungsgeschwindigkeiten größer 30 cm/s werden hier bis zu 249 t an Material resuspendiert, wohin gegen über besiedelten Sedimenten „nur“ bis zu 111 t resuspendiert werden (Abb. 5-41).

Ähnliches zeigt sich bei den Depositionsraten. Hier scheint es zwar bei unbesiedelten Sedimenten höhere Raten zu geben. Das liegt jedoch an den größeren Mengen die

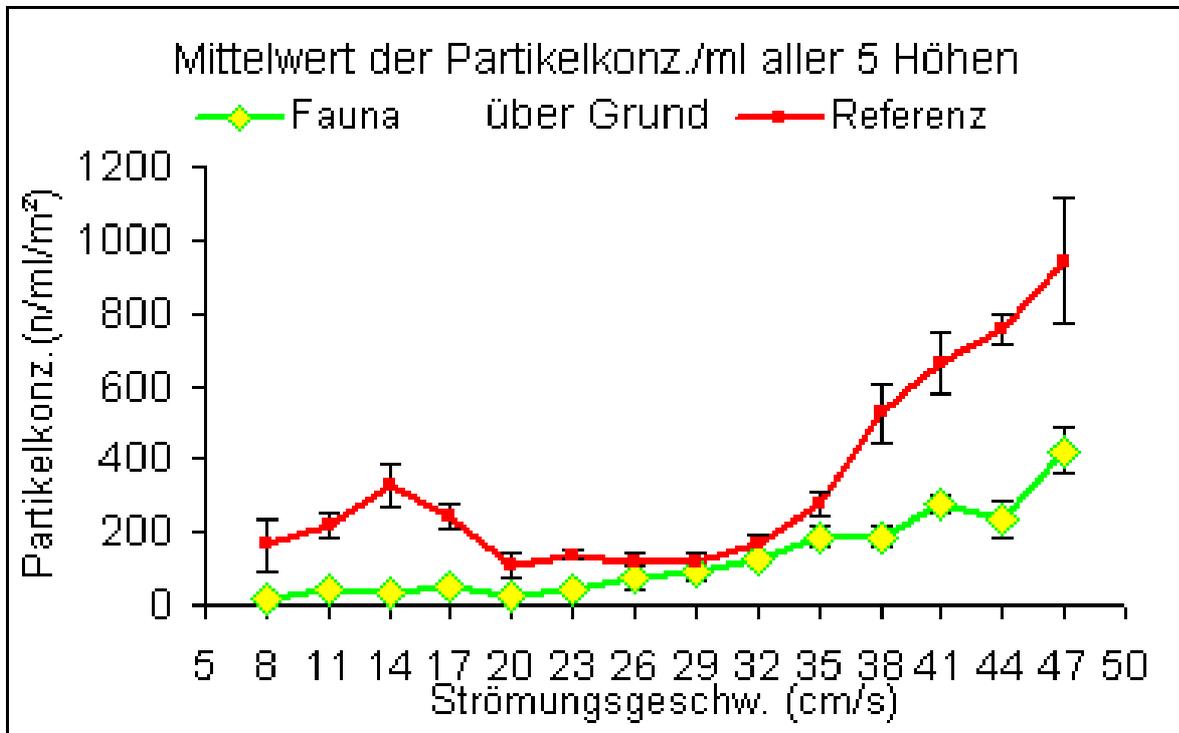


Abb. 5-39: Resuspension künstlicher Partikel im Kanal mit Besiedlung (Fauna) und ohne Besiedlung (Referenz)

sich nach einem Resuspensionsereignis im Wasser befinden. Über besiedelten Sedimenten ist aber das Material nach etwa 1,5 h aus der Wassersäule filtriert. Bei unbesiedelten Sedimenten ist sogar nach 24 h noch nicht alles aus der Wassersäule verschwunden (Abb. 5-42). Hierbei wird deutlich wie stark der Einfluss der benthischen Makrofauna auf den Partikeltransport ist. Auch wenn das eine Interpolation von Daten einer spezifischen Gemeinschaft auf eine sehr große Fläche ist, so muss doch davon ausgegangen werden, dass auch andere Organismen hohe Filtrationspotentiale besitzen.

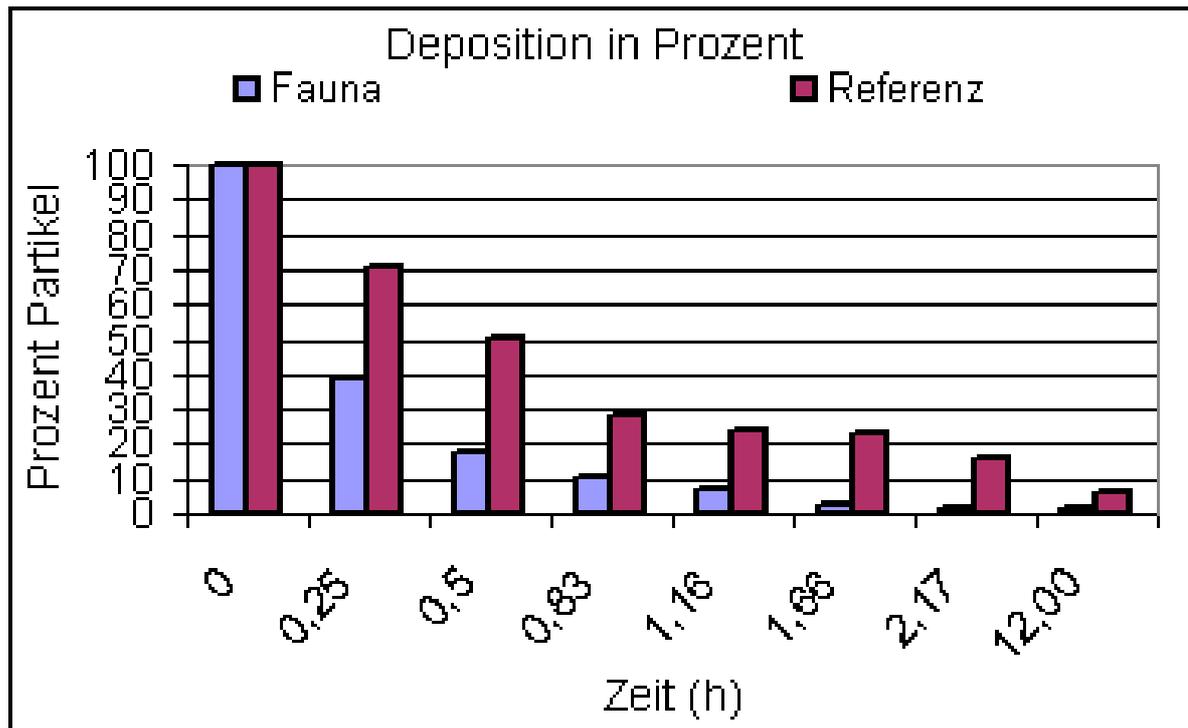


Abb. 5-40: Deposition der Partikel in Prozent. Für einen besseren Vergleich wurden die Anfangskonzentrationen beider Kanäle gleich 100% gesetzt.

Ein weiterer Aspekt, der die benthische Makrofauna für die Modellierung von Sedimenttransportprozessen so wichtig macht, ist die Beeinflussung der Mikro- und Makrobodentopographie. Gerade die Organismen, die biogene Strukturen dar- oder herstellen, verändern diese ganz erheblich, und somit einen Schlüsselparameter in der Modellierung, die Rauigkeitshöhe z_0 . Um herauszufinden wie stark der Einfluss der Makrofauna auf z_0 ist wurde Abb. 5-43 erstellt. Hierfür wurden die Abundanzzahlen mit einer Gleichung nach (Dade, *et al.* 2001) von Individuen/m² in z_0 überführt.

$$z_0 = C_r \cdot \psi \cdot k_r \quad (5-1)$$

Hierbei ist z_0 die hydrodynamische Rauigkeitshöhe proportional zur Höhe k_r , ψ (psi) ist der Bedeckungsgrad, C_r ist eine Konstante zwischen 0,5-1 wenn $\psi \ll 1$. Die gewonnenen Daten können dann in der Karte als 1x1 cm Boxen dargestellt werden, und somit genau den Boxgrößen des Modells angepasst werden.

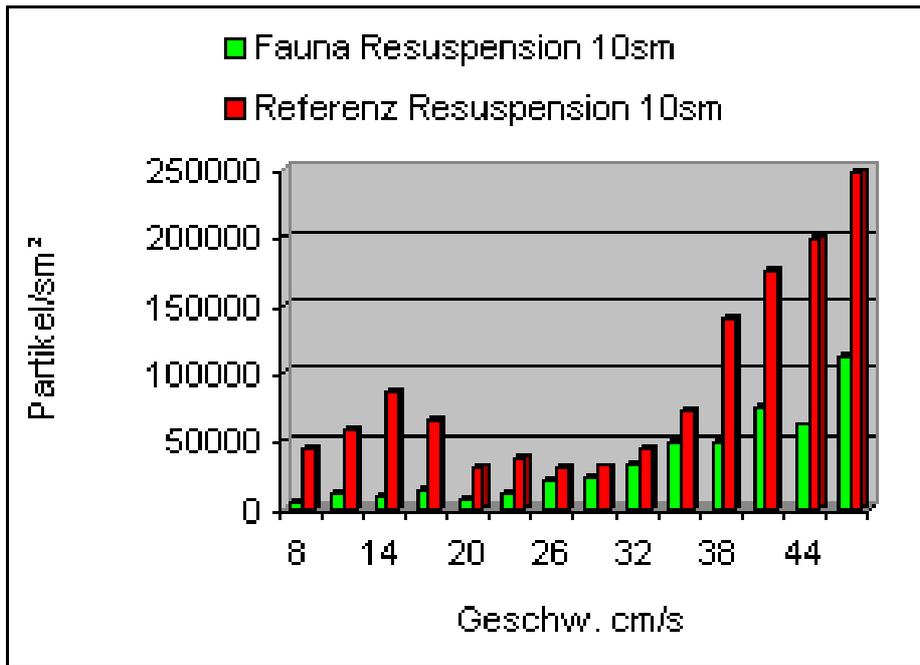


Abb. 5-41: Resuspension der Partikel interpoliert auf 100 sm²

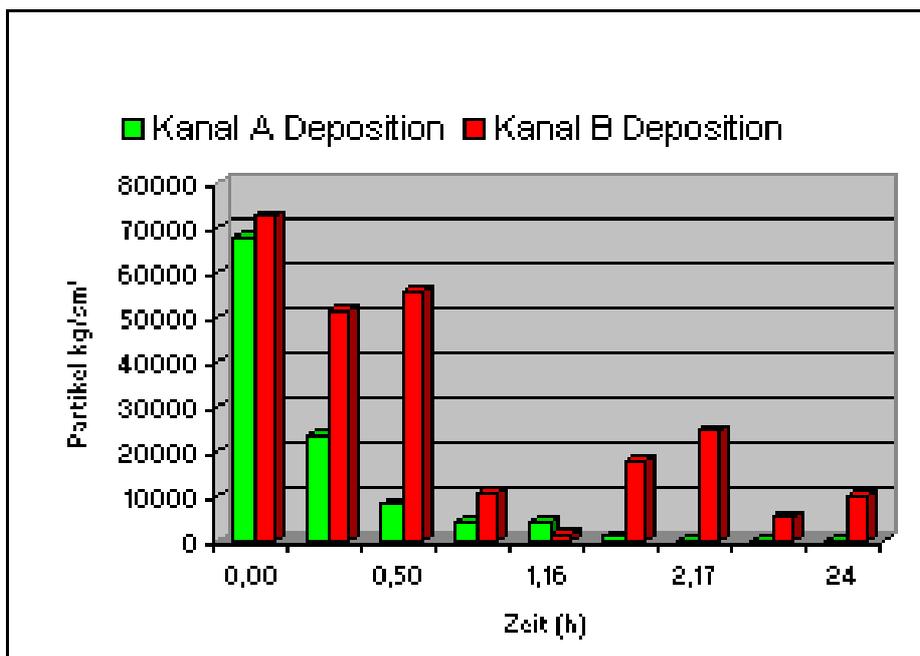


Abb. 5-42: Deposition von besiedelten und unbe-siedelten Sedimenten, interpoliert auf 100 sm²

Für eine flächendeckende Darstellung in der Mecklenburger Bucht über die Staatsgrenzen hinweg, müssen die Daten interpoliert werden.

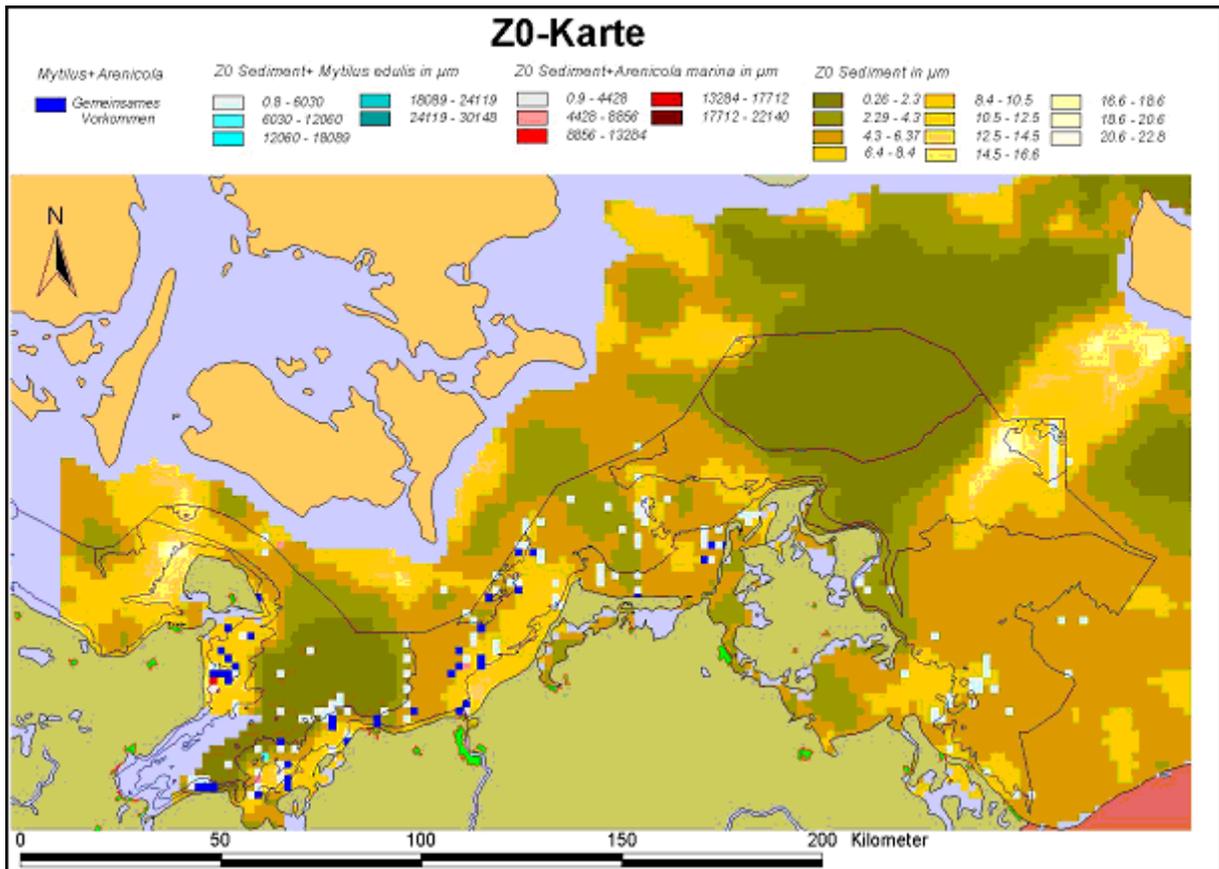


Abb. 5-43: Dargestellt sind Rauigkeitslängen (z_0). Flächendeckend eingezeichnet sind die z_0 unterschiedlicher Sedimenttypen (Brauntöne). Werte der vorhandenen Benthosdaten sind punktförmig darüber projiziert. Türkis zeigt die z_0 von *Mytilus edulis*, rot *Arenicola marina*. Die blauen Flächen zeigen das gemeinsame Vorkommen von *Arenicola* und *Mytilus*. Die Benthosorganismen erhöhen z_0 im Vergleich zum Sedimentwert erheblich und müssen daher berücksichtigt werden.

5.2.2 Bodennaher Partikeltransport und Scherfestigkeit von Sedimentoberflächen

(G. Graf, B. Bohling, S. Forster, T. Leipe, K. Lochte, M. Powilleit, T. Rieling, R. Turnewitsch, K. Ziervogel)

Die Arbeiten in diesem Teilprojekt lassen sich in zwei Themenbereiche unterteilen: der eine Teil befasst sich mit dem Erosionsverhalten küstennaher Sedimente unter besonderer Berücksichtigung von biogenen Sedimentauflagen. Mithilfe unterschiedlicher Erosionsgeräte wurden dazu Experimente mit natürlichen Sedimenten verschiedener Korngrößenzusammensetzung aus der Mecklenburger Bucht durchgeführt.

Im zweiten Teil werden schwerpunktmäßig die Partikeldynamik in der bodennahen Wassersäule sowie deren Charakterisierung untersucht. Von besonderem Interesse sind hierbei natürlich auftretende Resuspensionsereignisse und die sich anschließenden Prozesse der Partikelaggregation und Sedimentation in Abhängigkeit von Partikelgrößen und Partikelqualitäten. Da davon auszugehen ist, dass Erosionsverhalten und Aggregation stark durch mikrobielle Aktivitäten

beeinflusst werden, wurden zudem Freilanduntersuchungen zur mikrobiologischen Besiedlung und Modifikation bodennaher Partikel durchgeführt.

5.2.2.1 Erosionsverhalten küstennaher Sedimente der Mecklenburger Bucht

In der ersten Projektphase wurde ein Methodenvergleich zwischen den verwendeten Erosionsgeräten („Gust“-Mikrokosmos und Strömungskanal) zur Bestimmung kritischer Schubspannungen durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse sicherzustellen. Dabei ergab sich, dass beide Geräte bei langsamer Strömung gut übereinstimmen, bei hohen Strömungen jedoch eine Korrektur bei der Berechnung der Schubspannungen für den Strömungskanal nötig ist. Dies lässt sich durch eine Interkalibrierung erreichen.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, das Erosionsverhalten natürlicher Sedimentoberflächen zur Modellierung des Sedimenttransportes in der Mecklenburger Bucht zu untersuchen. Der dafür wichtigste Parameter ist die kritische Bodenschubspannungsgeschwindigkeit (u_{cr}^*), der zunächst über die Korngröße für den Bereich des Untersuchungsgebietes berechnet wurde (u_{cr-th}^*). Die Werte lagen zwischen 0.4 cm s^{-1} für den Sedimenttyp „Feinsand“ und 3.8 cm s^{-1} für kohäsiven Schlick. Diese theoretischen Schwellenwerte wurden mit Ergebnissen aus Experimenten mit der Erosionskammer „Mikrokosmos“ (Gust und Müller, 1997) verglichen. Der Versuchsaufbau ermöglicht die Untersuchung des Erosionsverhaltens der Sedimentoberflächen unter naturnahen Bedingungen. Durchgeführt wurden die Experimente zu unterschiedlichen Jahreszeiten an natürlichen Feinsand- (19 m Wassertiefe) und Schlickoberflächen (24 m). Die Feinsandsedimente mit einer mittleren Korngröße von $132 \mu\text{m}$ stammten aus dem Gebiet der DYNAS-Probeverklappungsstelle. Der Schlick mit einer mittleren Korngröße von $21 \mu\text{m}$ wurde aus dem Bereich der tiefsten Stelle der Mecklenburger Bucht beprobt. Neben den Proben mit natürlichen Sedimentoberflächen wurden Kontrollkerne im „Mikrokosmos“ gemessen, indem die Oberflächen beider Sedimenttypen gesiebt, in den Versuchsaufbau zurück überführt und erneut gemessen wurden. Zur besseren Beschreibung des Erosionsvorganges definierten Ziervogel & Bohling (2003.) zwei Schwellenwerte: die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Rolltransport von Oberflächenpartikeln ($u_{cr-initial}^*$) wurde durch Beobachtung festgelegt. Der Schwellenwert für signifikante Erosion ($u_{cr-erosion}^*$) konnte hingegen beim Anstieg der Erosionsrate über einen Hintergrundwert ($\varepsilon > 5.0 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) gemessen werden. Zur Modellierung des Sedimenttransportes wurden aus den Ergebnissen der fünf Probenahmezeitpunkten mittlere Schubspannungsgeschwindigkeiten von $u_{cr-initial}^*$ und $u_{cr-erosion}^*$ berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 5-44 dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen: für den Transport des unkonsolidierten Oberflächenmaterials (‘fluffy layer’) an der ‘Schlickstation’ wurden mittlere Werte von $u_{cr-initial}^* = 0.39 \text{ cm s}^{-1}$ gemessen. Partikel an der ‘Feinsandstation’ wiesen einen mittleren Schwellenwert für den Initialtransport von 0.5 cm^{-1} auf. Bei höheren Schubspannungsgeschwindigkeiten zeigten beide Sedimenttypen unterschiedliche Erosionsverhalten: Signifikante Erosion an der ‘Feinsandstation’ ereignete sich bei mittleren Werten von $u_{cr-erosion}^* = 1.15 \text{ cm s}^{-1}$, während Partikel an der ‘Schlickstation’ bereits bei einem mittleren Schwellenwert von 0.62 cm s^{-1} erodierten. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass ein Transport von Oberflächenpartikeln auf natürlichen Sedimenten unterhalb der

berechneten u_{cr-th}^* -Werte stattfindet. Das hier beobachtete Erosionsverhalten von Schlicksedimenten wird in großem Masse von einer 'fluffy layer' beeinflusst, die zu jedem Zeitpunkt der Probennahme deutlich ausgebildet war.

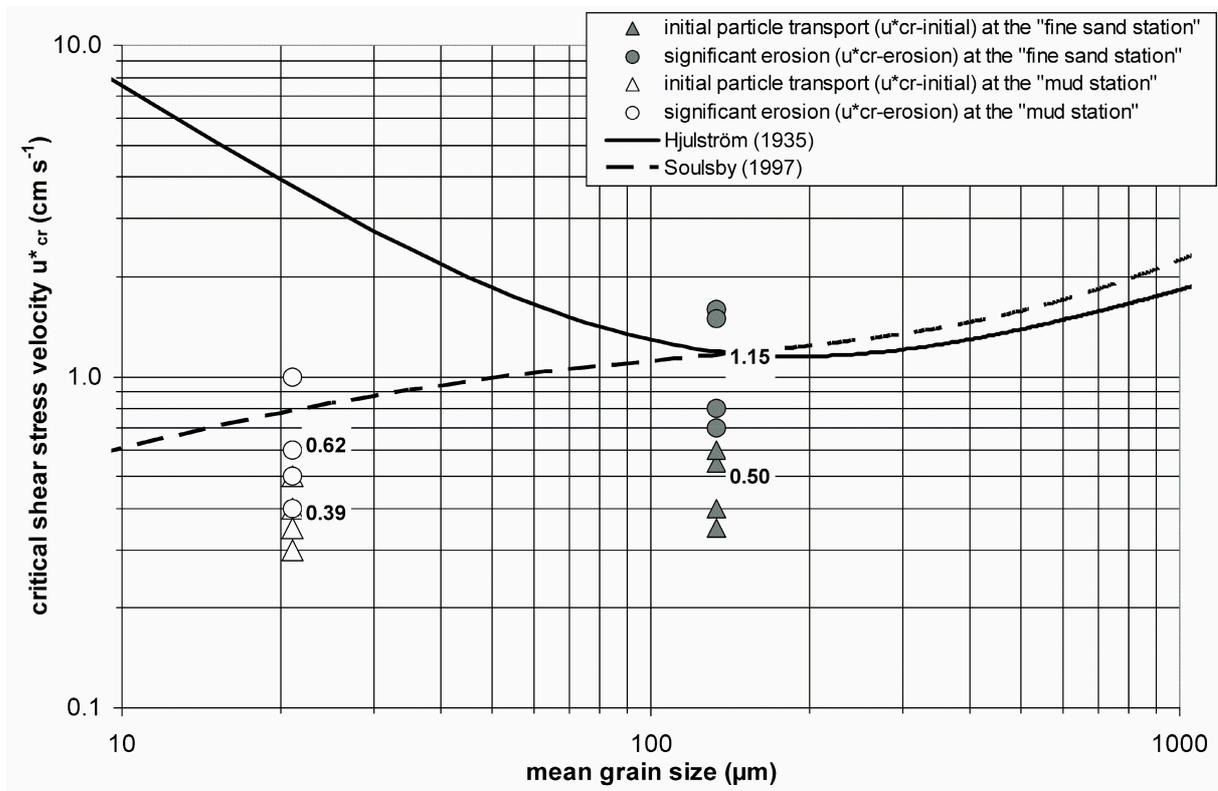


Abb. 5-44: Vergleich der experimentell ermittelten Erosionsschwellenwerte mit Literaturwerten von Hjulström (1935) and Soulsby (1997). Die Zahlen beschreiben die mittleren Werte von $u_{cr-initial}^*$ und $u_{cr-erosion}^*$. Der mittlere Erosionsschwellenwert der „Feinsandstation“ liegt im Bereich der Literaturwerte. Das Erosionsverhalten der Oberflächenpartikel an der „Schlickstation“ wird in großem Masse von der unkonsolidierten 'fluffy layer' beeinflusst. Daher liegen die kritischen Schwellenwerte deutlich unter der Kurve von Hjulström (1935) und im Bereich der Kurve von Soulsby (1997), der für seine Berechnungen nicht-kohäsive Sedimente berücksichtigt hat (aus Ziervogel & Bohling, im Druck).

Zur besseren Einordnung dieser Ergebnisse auf das Strömungsregime der Mecklenburger Bucht wurden Erosionsschwellenwerte aus Strömungsmessungen im Bereich der „Feinsandstation“ (insgesamt 2952 hydrographische Messwerte, s. Leipe) sowie aus Modelldaten der bodennahen Strömung an der „Schlickstation“ berechnet. In einem Zeitraum von 4 Monaten erreichten nur zwei „Sturmereignisse“ die Strömungsgeschwindigkeit, die dem mittleren Wert von $u_{cr-erosion}^* = 1.15 \text{ cm s}^{-1}$ für Feinsand entsprach. Während eines Simulationszeitraumes von einem Jahr wurde dieser Wert an der „Feinsandstation“ nur einmal erreicht. An der „Schlickstation“ konnten 39 dieser Ereignisse festgestellt werden. Daraus folgt, dass die Strömungsgeschwindigkeiten unter „normalen“ Bedingungen nicht ausreichen, um die kritischen Erosionsschwellenwerte aus den Mikrokosmosexperimenten zu erreichen.

Betrachtet man die Einzelmessungen der Erosionsexperimente beider Stationen (Abb. 5-45), die bei der Modellierung des Sedimenttransportes keine Berücksichtigung finden können, wohl aber für das Verständnis des biologischen Einflusses auf die Oberflächenstabilität von Belangen sind, so wird deutlich, dass die Schwellenwerte der verschiedenen Jahreszeiten Variationen aufzeigten.

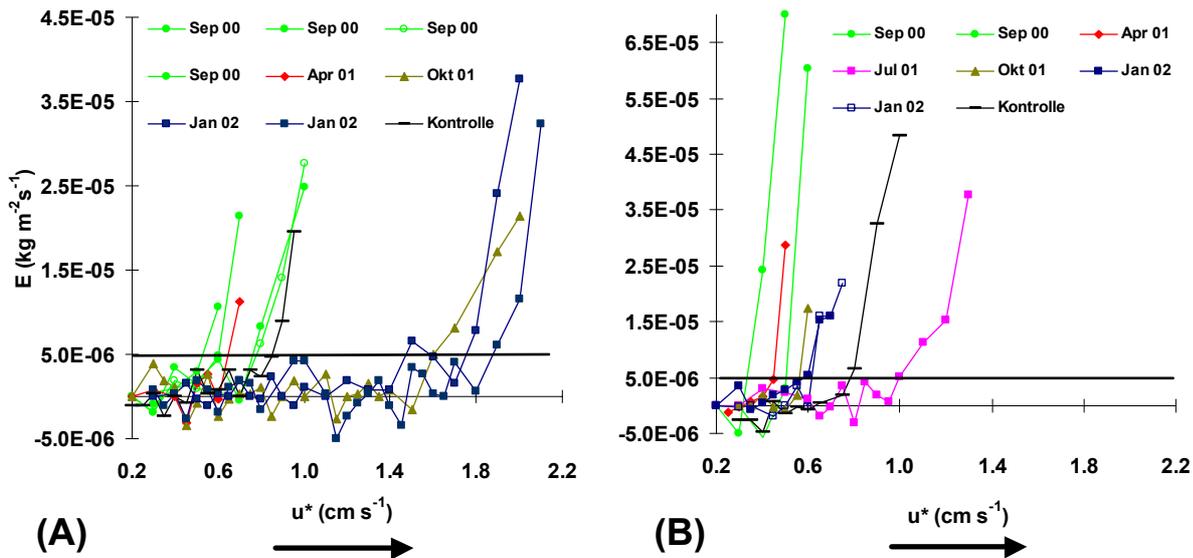


Abb. 5-45: Erosionsraten natürlicher Sedimentoberflächen der "Feinsand-" (A) und "Schlickstation" (B) zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Balken () zeigen Schwellenwert für signifikante Erosion ($u^*_{cr-erosion}$) an (s. Text). Es wurden jeweils zwei Bereiche für $u^*_{cr-erosion}$ bestimmt: bei (A) liegt Bereich 1 bei 0.7 cm s^{-1} und Bereich 2 bei 1.7 cm s^{-1} (Kontrollkern: 0.9 cm s^{-1}). Bei (B) liegt Bereich 1 bei 0.7 cm s^{-1} und Bereich 2 bei 1.0 cm s^{-1} (Kontrollkern: 0.8 cm s^{-1}). Die Variationen werden mit einer möglichen „Schleimproduktion“ benthischer Mikroorganismen in Verbindung gebracht.

Die $u^*_{cr-erosion}$ -Werte an der „Feinsandstation“ schwankten um einen Faktor 2.4. Es ließen sich zwei Bereiche für den kritischen Schwellenwert bestimmen (Abb. 5-45 A): Bereich 1 lag bei 0.7 cm s^{-1} und wurde im September 2000 sowie im April 2001 erreicht. Damit lagen diese Werte unter dem des Kontrollkerns, der bei 0.9 cm s^{-1} den Schwellenwert der signifikanten Erosion erreichte. Der zweite Bereich lag bei 1.7 cm s^{-1} und wurde im Oktober 2001 und Januar 2002 gemessen. An der „Schlickstation“ lagen mit einer Ausnahme die Werte für $u^*_{cr-erosion}$ bei 0.7 cm s^{-1} (Abb. 5-45 B). Dies entsprach den Werten des Bereiches 1 der „Feinsandstation“ und war geringer als der Schwellenwert des Kontrollkerns (0.8 cm s^{-1}). Nur im Juli 2001 stieg der Wert für $u^*_{cr-erosion}$ auf 1.0 cm s^{-1} an. Insgesamt variierte der Schwellenwert um einen Faktor 1.5. Die Schwellenwerte für den Initialtransport ($u^*_{cr-initial}$) zeigten bei beiden Sedimenttypen ebenfalls Variationen um den Faktor 1.5. Darüber hinaus zeigten die Werte für $u^*_{cr-initial}$ und $u^*_{cr-erosion}$ bei beiden Sedimenttypen eine signifikant positive Korrelation (Tab. 5-7).

Können diese Variationen im Erosionsverhalten mit Aktivitäten benthischer Mikroorganismen in Verbindung gebracht werden? Allgemein gilt, dass benthische Mikroalgen vor allem in lichtdurchfluteten Bereichen, wie dem Gezeitenwatt, die Stabilitätseigenschaften der Sedimentoberflächen verändern (u.a. Paterson und Black, 1999; Ziervogel, 2001). Epipelische (bewegliche) Diatomeen produzieren bei ihrer Vertikalwanderung im Sediment und der Photosynthese exopolymere Substanzen, kurz EPS genannt. Diese „Schleimproduktion“ der Algen führt zu einem Verkleben der Sedimentkörner und einem Anstieg der Oberflächenkohäsion, so dass die Bodenrauigkeit geringer wird und die Stabilität des Sediments zu nimmt. Die exopolymere Substanzen der Sedimentalgen bestehen hauptsächlich aus Kohlenhydraten (Decho, 2000). In der Literatur wurde oft ein linearen Zusammenhang zwischen der Konzentration kolloidale Kohlenhydrate und der

Chlorophyll a Konzentration (Biomasseindikator der Algen) in kohäsiven Sedimenten festgestellt (u.a. Underwood and Smith, 1998). Dieser Zusammenhang gilt als Indiz für Biostabilisationseffekte durch Mikroalgen. Auch für Diatomeen aus dem Sublitoral konnten Stabilitätseigenschaften in Laborexperimenten nachgewiesen werden (Madsen et al., 1993).

In dieser Arbeit wurden neben dem prozentualen Wassergehalt (MC) und den Chlorophyll a Konzentrationen (Chl. a) die Konzentrationen kolloidaler Kohlenhydrate aus dem Oberflächensediment quantitativ bestimmt und mit den Erosionsschwellenwerte einem Korrelationstest unterzogen (Tab. 5-7).

Tab. 5-7: Pearson Korrelationskoeffizienten der Mittelwerte von Sedimentparametern und Erosionsschwellenwerten. An der „Schlickstation“ korrelieren die wasserlöslichen Kohlenhydrate (Col S) und der prozentuale Wassergehalt (MC) der Oberflächensedimente (0-5 mm) mit den Erosionsschwellenwerten. An der „Feinsandstation“ (132 μ m) korreliert keiner der Parameter mit den kritischen Schwellenwerten. (Signifikanzniveau wurde mit dem t-test bestimmt).

	„Schlickstation“		„Feinsandstation“	
	$u^*_{cr-initial}$	$u^*_{cr-erosion}$	$u^*_{cr-initial}$	$u^*_{cr-erosion}$
$u^*_{cr-initial}$	X	0.85*	X	0.96***
Col S	0.99***	0.89**	0.14	0.58
Col EDTA	0.63	0.39	0.41	-0.06
Chl a	0.57	0.12	-0.18	0.02
MC	-0.83*	-0.88**	0.72	0.4

$n = 5$ ($n = 4$), *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

Die Kohlenhydrate wurde mit Saline- sowie EDTA-Lösung extrahiert, um sowohl die wasserlöslichen (kolloidale saline Fraktion), als auch die wasserunlöslichen Kohlenhydrate (kolloidale EDTA Fraktion) zu quantifizieren (Underwood et al., 1995). Die bakterielle Verfügbarkeit der kolloidale EDTA Fraktion wird allgemein als gering eingeschätzt (Underwood et al., 1995). Im Bezug auf Biostabilisationseffekte von Diatomeenmatten spielt hingegen diese Fraktion eine bedeutendere Rolle, als die wasserlöslichen Kohlenhydrate (de Brouwer et al., 2000). Die Ergebnisse der Experimente und der Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

An der „Schlickstation“ blieben die Konzentrationen der kolloidalen Kohlenhydrate der wasserunlöslichen Fraktion (Col EDTA) konstant, während die wasserlösliche Fraktion (Col S) ein deutliches Maximum im Juli 2001 aufwies. Zu diesem Zeitpunkt stieg auch der $u^*_{cr-erosion}$ -Wert auf seinen Maximalwert an. Die Korrelationsanalyse nach Pearson ergab, dass für diesen Sedimenttyp zwischen den Mittelwerten der Col S Konzentrationen und den Erosionsschwellenwerten ein linearer, signifikant positiver Zusammenhang bestand (Tab. 5-7). Es konnte zusätzlich eine signifikant negative Korrelation zwischen dem Wassergehalt und $u^*_{cr-erosion}$ festgestellt werden. An der „Feinsandstation“ waren diese Zusammenhänge statistisch nicht belegbar, obwohl ein Trend der Col S Konzentrationen mit den ansteigenden $u^*_{cr-erosion}$ -Werten im Oktober 2001 und Januar 2002 deutlich wurde. Dieser Trend ließ sich für die Col EDTA Fraktion nicht nachweisen. Darüber hinaus wies der Wassergehalt an der „Feinsandstation“ einen positiven, nicht signifikanten Zusammenhang mit den Erosionsschwellenwerten auf.

Zusammenfassend gilt, dass die Konzentrationen der Col S Kohlenhydrate als Indiz für Erosionsschwelle gelten können. Die Quelle der „Schleime“ konnte jedoch nicht gesichert bestimmt werden. Zum besseren Verständnis der Prozesse werden weitere Datensätze aus der Pommernbucht ausgewertet und mit dem hier vorliegenden verglichen.

Des Weiteren soll die Dynamik des Feinmaterials natürlicher Feinsandsedimente der Mecklenburger Bucht in Laborexperimenten untersucht werden (s.u. Konzept der Fortführung). Neben den hier untersuchten Erosionsfähigkeiten des unkonsolidierten Materials werden dabei die Messungen der Aggregationszeiten und die Verweildauer im bodennahen Wasserkörper im Vordergrund stehen. Mit diesen Ergebnissen lassen sich bodennahe Transportwege von lithogenem und organischen Material in die Becken der Mecklenburger Bucht abschätzen

5.2.2.2 Partikeldynamik in der bodennahen Wassersäule und an Grenzflächen sowie deren Charakterisierung

Ziel der durchgeführten Arbeiten war eine *in situ* Beschreibung natürlicher Resuspensionsereignisse an verschiedenen Stationen der Mecklenburger Bucht sowie eine Charakterisierung der in der Wassersäule suspendierten Partikelfracht. Hierzu wurden verschiedene Freilanduntersuchungen durch unterschiedliche Bearbeiter (Turnewitsch, Rieling, Powilleit) im Untersuchungsgebiet durchgeführt: Es wurden auf mehreren Ausfahrten zu unterschiedlichen Jahreszeiten zeitlich hoch aufgelöste (> 20 min) Zeitreihen (bis zu 24 h) der Vertikalverteilung von potentieller Temperatur, Salzgehalt, Dichte, Trübung, Chlorophyll-*a*- (Chl *a*) und Phycoerythrin-Fluoreszenz aufgezeichnet und Wasserproben für die Analyse von gesamtpartikulärem Material (TPM), partikulärem organischen Kohlenstoff (POC), partikulärem Stickstoff (PON) und Pigmenten genommen. Es zeigte sich, dass es auch in den flachen Küstengewässern zu Anreicherungen von Partikeln und Aggregaten an internen Grenzschichten (Thermokline, Halokline) kommen kann. An diesen Grenzschichten ist die Verteilung der Partikel durch die kurzzeitige Dynamik interner Wellenphänomene gesteuert. So zeigte die Dichteverteilung im Juli 2001 eine bodennahe durchmischte Schicht (BNL), mit einem wellenförmigen Verlauf, an deren Wellenrücken erhöhte Verhältnisse von Chlorophyll-*a*-Fluoreszenz zu Trübungswerten an der Oberkante gefunden wurden. Wellenrücken und Wellentäler wurden als Orte von erhöhtem vertikalen Austausch zwischen benachbarten Kompartimenten (Oberflächensediment, BNL und Wasserschicht über der BNL) identifiziert (Abb. 5-46). Dabei wurden die relativen Trübungen in der BNL und die oberhalb der BNL jeweils von anderen Prozessen gesteuert. Meistens traten erhöhte Verhältnisse von Chl *a*/Phycoerythrin-Fluoreszenz in der BNL gegenüber denen in der darüber liegenden Wasserschicht auf. Insgesamt wurde deutlich, dass die BNL zusammen mit auftretenden internen Wellen eine effektive Kontrolle auf die Austauschvorgänge zwischen tieferen Wasserschichten und dem Oberflächensediment ausüben können (Turnewitsch & Graf, 2003).

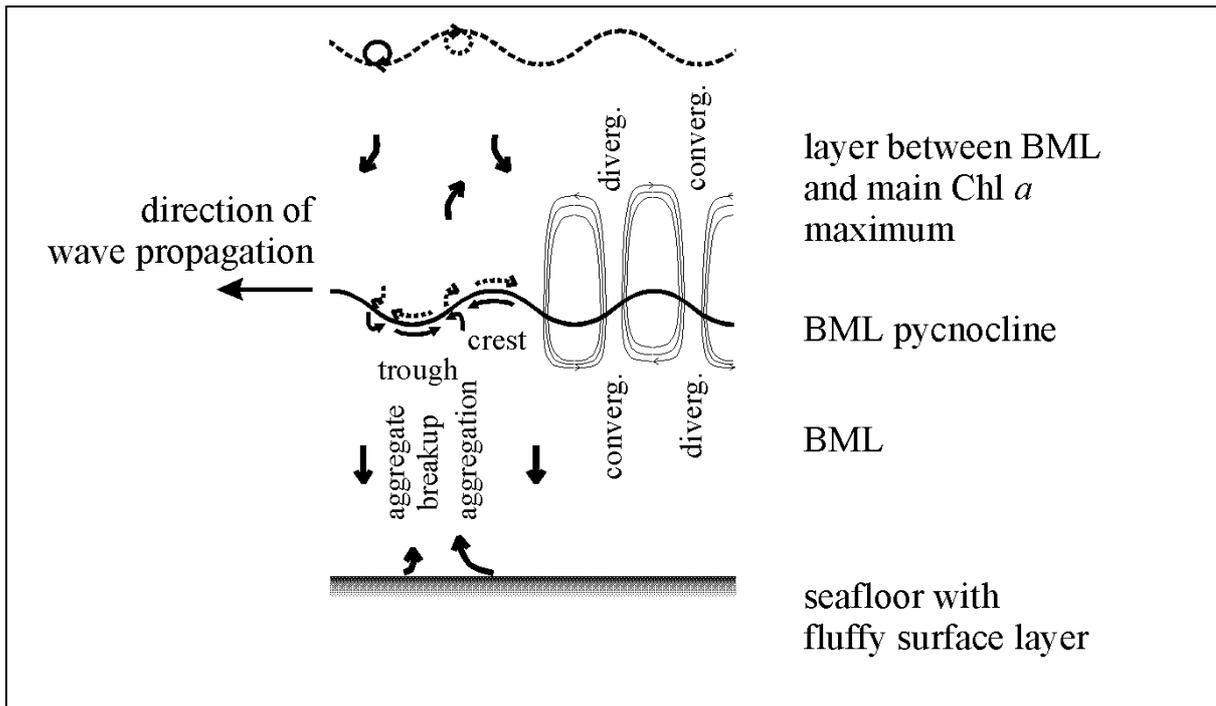


Abb. 5-46: Schematische Darstellungen der durch interne Wellen induzierten Wasserbewegung und ihr Einfluss auf die POM-Dynamik in der bodennahen durchmischten Wasserschicht (BML) (linke Seite) sowie der dadurch gebildeten Konvergenz- und Divergenzzellen (aus: Turnewitsch & Graf, 2003).

Zur Darstellung der Resuspensionsdynamik unter in situ Verhältnissen wurden unter Bedingungen minimaler Planktonkonzentrationen während des Januars 2002 Untersuchungen zur Partikeldynamik über verschiedenen Sedimenttypen (Schlick, Feinsande, Sande) durchgeführt. Zur Analyse des Ursprungs der vermessenen Partikel wurden Proben aus dem Pelagial und der BNL hinsichtlich ihrer Morphologie, Menge und biochemischen Zusammensetzung entlang eines küstensenkrechten Transekts vor dem Ostseebad Kühlungsborn untersucht. In Abb. 5-47 sind die Salinitäten und Trübungswerte entlang dieses Transekts dargestellt. Mit zunehmender Wassertiefe wird die Ausprägung einer Halokline bei 18 PSU sichtbar. Dieser Tiefenwasserkörper fällt durch hohe Trübungswerte und Sestonkonzentrationen auf (Abb. 5-48). Die Ausdehnung der Trübungszone zeigte eine deutliche Abhängigkeit von der Qualität des darunter liegenden Sedimentes. Insbesondere über Schlickten mit ausgeprägter "fluffy layer" wurde eine ausgeprägte bodennahe Trübungszone gefunden. Dies deutete auf starke Resuspensionsereignisse und Partikeltransporte in der BNL hin, die auch anhand von Videoaufnahmen dokumentiert wurden.

CTD-Profile

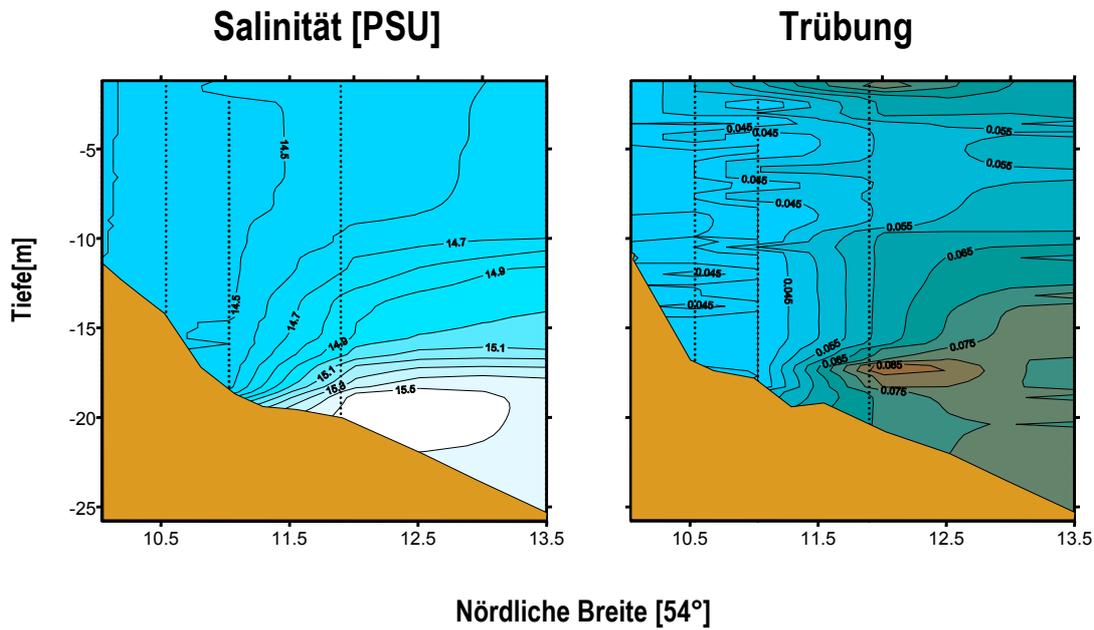


Abb. 5-47: Dargestellt sind Isohalinen (14,5 - 15,5 PSU) und Isolinien der relativen Trübung (0,045 – 0,085) in der Wassersäule auf 5 Stationen eines senkrecht zur Küste verlaufenden Transekts in der Mecklenburger Bucht (Jan. 2002). Die Skalierung der x-Achse entspricht geografischen Minuten auf 54° nördlicher Breite.

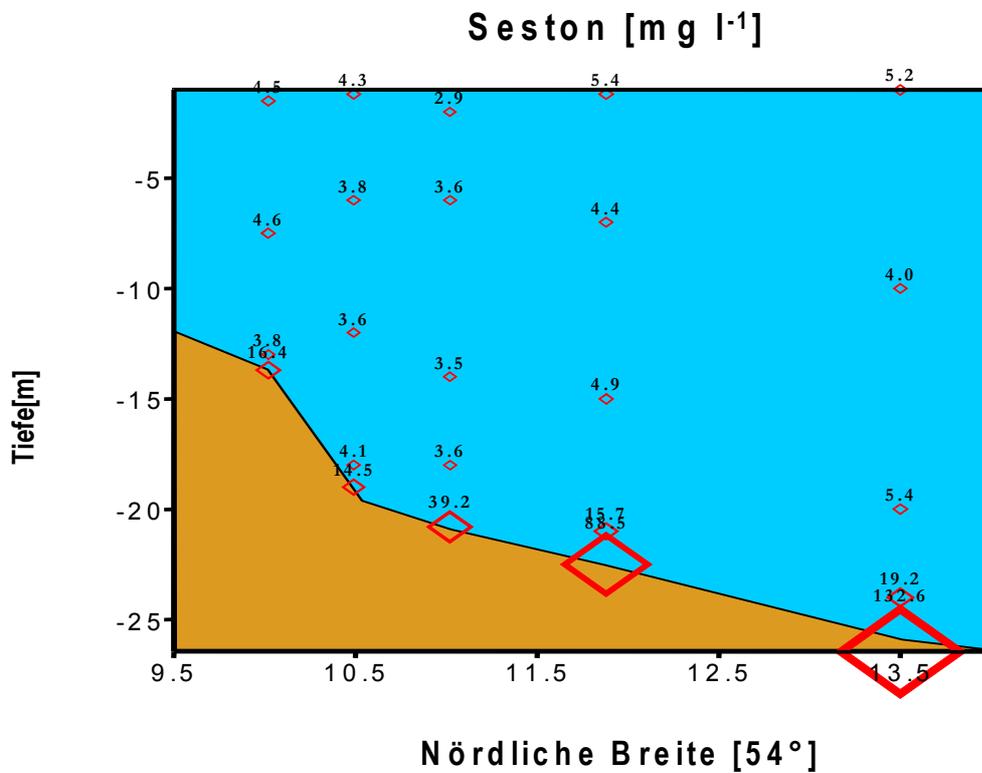


Abb. 5-48: Sestongehalte in der Wassersäule auf 5 Stationen eines senkrecht zur Küste verlaufenden Transekts in der Mecklenburger Bucht (Jan. 2002). Die Größe der Quadrate ist proportional zur gemessenen Sestongehalte. Die Skalierung der x-Achse entspricht der in Abb. 5-47.

Die Ergebnisse zur Charakterisierung der Partikelfracht zeigten, dass die resuspendierten Partikel der bodennahen Trübungszone im Wesentlichen biogenen Ursprungs waren. Aufgrund ihrer biochemischen Zusammensetzung (Aminosäurespektren) ließen sich die Partikel in der Nepheloidschicht denen der Sedimentauflage („fluffy layer“) zuordnen (Abb. 5-49). Im Pelagial wurden überproportional hohe Leucin, Phenylalanin, und Isoleucin Konzentrationen gefunden, die belegten, dass das pelagische organische Material im wesentlichen planktischen Ursprungs war. Hohe Glycin-Gehalte in der BNL und der „fluffy layer“ deuteten hingegen auf einen fortgeschrittenen mikrobiellen Abbau des partikulären Materials, und demzufolge auf einen Ursprung an der Sedimentoberfläche, hin.

Fluorometrische Bildanalysen und Vermessungen der Partikel zeigten, dass der Großteil der resuspendierten Partikel aus hyalinen, transparenten extrazellulären Polysacchariden (TEP) bestand (Abb. 5-50). Es konnte somit belegt werden, dass das Auftreten von TEP im Pelagial flacher Küstengewässern nicht nur aus planktischen Prozessen („sloppy feeding“, Produktion von TEP durch nährstofflimitiertes Phytoplankton) resultiert, sondern durch hydrodynamische Prozesse an der Sediment/Wasser-Kontaktzone gesteuert wird. Da das Auftreten von TEP durch die hohe „stickiness“ ein zentrales Bindeglied innerhalb des Aggregationsgeschehens darstellt, ist davon auszugehen, dass die resuspendierten, mikroskopischen TEP-Partikel eine wichtige Funktion innerhalb des vertikalen Partikeltransportes in der BNL übernehmen und wesentlich zur Erhöhung der Aggregationsraten beitragen. Zentrale Steuerfaktoren der Resuspension von mikroskopischen TEP-Partikeln können windinduzierte Salzwassereinbrüche in Bodennähe sein. So konnte exemplarisch an CTD-Vermessungen des Wasserkörpers über 18 h in 30 Minuten-Abständen an der Darßer Schwelle gezeigt werden, dass ein lateraler Salzwassereinstrom zur Ausbildung einer deutlichen Resuspensionszone führt. Die Dauermessungen über 18 h belegten zudem, dass die Resuspension der TEP-Partikel aus der „fluffy layer“ in den bodennahen Wasserkörper an distinkte hydrographische Ereignisse (Zusammenbruch der Halokline) gekoppelt war. Es wurden Resuspensionshöhen von bis zu 7 m über Grund erreicht. Dabei zeigten Bildanalysen, dass der Großteil der biogenen Partikel einen mittleren Durchmesser $<30 \mu\text{m}$ besaß (Abb. 5-50). Aus den Durchmessern ließen sich mittlere Sedimentationsraten von ca. 70 cm d^{-1} abschätzen. Resuspendierte, biogene Partikel zeigen somit lange Verweilzeiten im Pelagial, wo sie mit weiteren planktischen Komponenten interagieren können (Aggregation, Grazing).

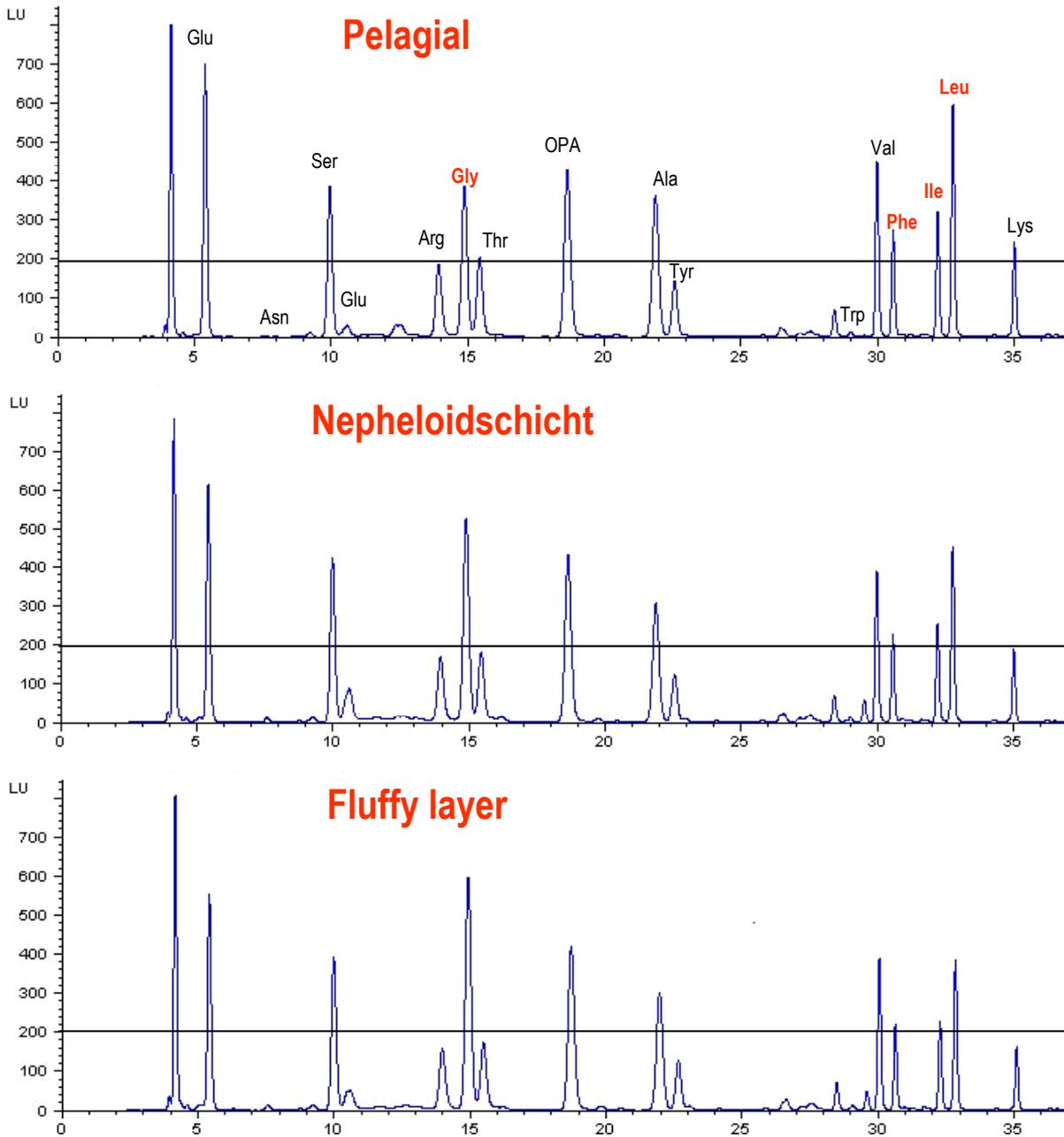


Abb. 5-49: Dargestellt sind Aminosäurespektren aus POM nach HCL-Hydrolyse und OPA-Derivatisierung aus dem Pelagial, der bodennahen Trübezone (BNL) und der Sedimentauflage („fluffy layer“). Die rot markierten Aminosäuren Glycin, Phenylalanin, Isoleucin und Leucin zeigen die wesentlichen Unterschiede zwischen den Kompartimenten an.

Da das Aggregationspotential („stickiness“) von Partikeln stark vom mikrobiellen Abbaugrad der Partikel abhängt, wurden Untersuchungen zur mikrobiellen Modifikation des organischen Materials der BNL durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere in der BNL hohe bakterielle Abundanzen und Produktionsraten gefunden wurden (Tab. 5-8).

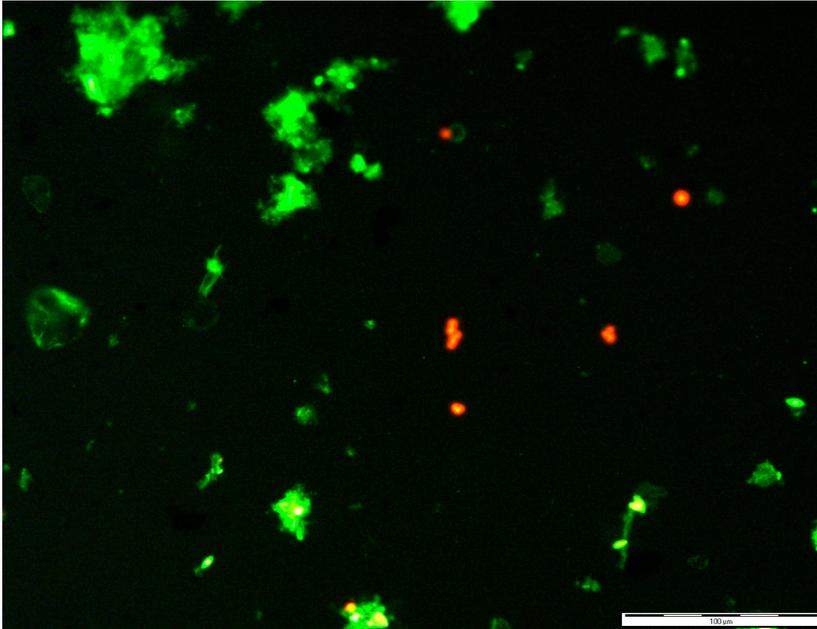


Abb. 5-50: Fluoreszenzmarkierung extrazellulärer Polysaccharide mit DTAF 5-(4,6-Dichlortriazinyl)-Aminofluorescein (grün - TEP-Fraktion, rot – Chlorophyll-Fluoreszenz von Picoplanktern). Maßstab entspricht 100 μm .

Tab. 5-8: **Tab. 1:** Bakterielle Abundanz und Produktion im Pelagial und in der BNL während der Untersuchung des Transektes. Größte Tiefe entspricht der Probe aus dem Bodenwasserschöpfer von der BNL.

Station	deg	depth [m]	Bakterienzahl [10^6 DAPI counts]	Bakterielle Produktion [$\mu\text{g C l}^{-1} \text{h}^{-1}$]
5a	10,02	-1,5	1,6	4,0
5b	10,02	-7,5	1,7	4,2
5c	10,02	-13,0	1,7	4,5
5f	10,02	-13,7	6,4	12,2
3a	10,49	-1,2	1,9	4,2
3b	10,49	-6,0	1,5	4,1
3c	10,49	-12,0	1,3	3,2
3d	10,49	-18,0	1,5	4,0
3e	10,49	-19,0	3,9	11,3
2a	11,02	-2,0	1,7	4,5
2b	11,02	-6,0	1,3	4,0
2c	11,02	-14,0	1,3	4,0
2d	11,02	-18,0	1,2	3,1
2f	11,02	-20,8	12,4	29,1
4a	11,88	-1,2	1,5	4,0
4b	11,88	-7,0	1,6	4,5
4c	11,88	-15,0	1,7	4,8
4d	11,88	-21,0	5,7	9,1
4f	11,88	-22,5	29,1	74,0
1a	13,50	-1,0	1,6	4,1
1b	13,50	-10,0	1,5	4,0
1c	13,50	-20,0	1,8	5,1
1d	13,50	-24,0	5,9	13,5
1f	13,50	-26,5	42,4	98,1

Das organische Material unterlag zudem hohen hydrolytischen Abbauaktivitäten durch Mikroorganismen (Abb. 5-51). Dies deutete darauf hin, dass die Partikel im zeitlichen Verlauf stark biochemisch modifiziert werden. Da die enzymatische Hydrolyse insbesondere den leicht verfügbaren Anteil an aggregationsfördernden TEP stark beeinflussen kann, ist hiermit möglicherweise ein zentraler Prozess identifiziert worden, der die Aggregationsdynamik auf mikrobiologischer Ebene steuert.

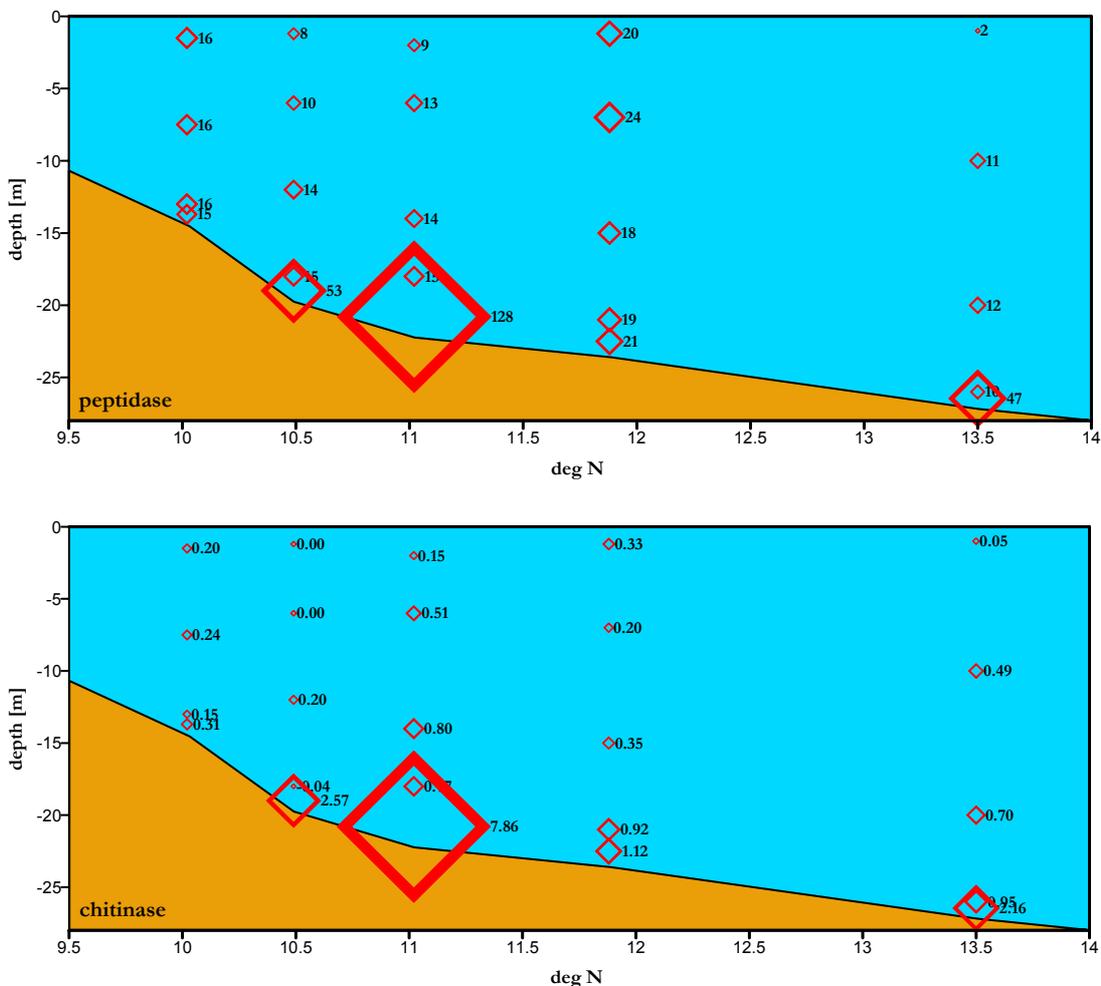


Abb. 5-51: Mikrobielle Aktivitäten (Peptidase, Chitinase) in der Wassersäule auf 5 Stationen eines senkrecht zur Küste verlaufenden Transekts in der Mecklenburger Bucht (Jan. 2002). Die Größe der Quadrate ist proportional zur gemessenen Peptidase- bzw. Chitinase-Aktivität. Die Skalierung der x-Achse entspricht geografischen Minuten auf 54° nördlicher Breite.

Einen weiteren Aspekt bei der Untersuchung der Partikeldynamik stellte die Frage nach Veränderung der bodennahen Partikelfracht durch benthische Lebensgemeinschaften in der Mecklenburger Bucht („*in situ*-Experiment“) dar. Dazu wurden auf einem entsprechend den vorherrschenden Bodenströmungen festgelegten „Versuchsfeld“ in ca. 16 m Wassertiefe südlich Warnemünde Reede (i.e. drei dicht beieinander liegende Stationen) über einer bekannten Makrofaunagemeinschaft in möglichst kurzen Zeitabständen Wasser- und Bodenwasserproben in verschiedenen Höhen über Grund genommen. Aus der Differenz der zu analysierenden suspendierten Partikelfracht in den verschiedenen

Wasserkörpern zwischen den Stationen und der aktuellen Strömungsgeschwindigkeit an den Stationen sollten Aussagen zur (Bio)Deposition bzw. (Bio)Resuspension abgeleitet werden. Die gewonnenen Wasserproben wurden bezüglich folgender Parameter untersucht: O_2 -Gehalt, Seston, Chlorophyll-Äquivalente und C/N. Die Makrozoobenthosbesiedlung dieser Stationen wurde durch van Veen-Greiferproben quantitativ erfasst.

Die Profile des O_2 -Gehaltes im bodennahen Wasser zeigen in allen Fällen verringerte Werte in Tiefen von 10 – 40 cm über Grund (ü.G.) im Vergleich zu Werten an der Wasseroberfläche und in mittleren Wassertiefen (10 m). Hervorgerufen durch erhöhte Sestongehalte in Bodennähe kommt es hier zu verstärkten mikrobiellen Aktivitäten und Abbauprozessen mit einhergehender erhöhter O_2 -Zehrung (siehe auch enzymatische Aktivitäten Abb. 5-51). Die C/N Werte im bodennahen Wasser weisen auf stickstoffverarmte Partikel hin, die vermutlich von älterem resuspendierten Material stammen. Auch die verringerten Chlorophyllwerte in Bodennähe bestätigen dies (Abb. 5-52).

Leider erlaubten die stark schwankenden Strömungsbedingungen auf dem gewählten Versuchsfeld keine weitergehenden Auswertungen bezüglich der Biodeposition bzw. Bioresuspension durch Makrofauna.

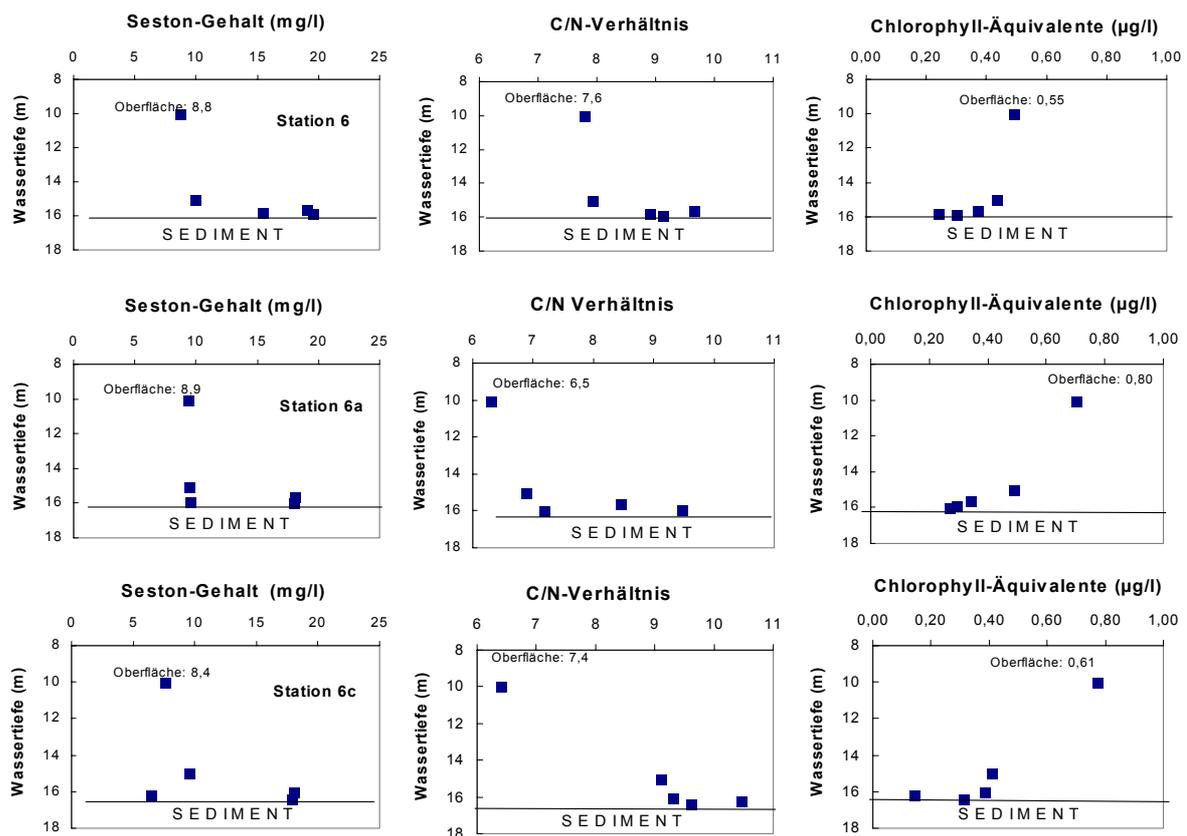


Abb. 5-52: Profile des Sestongehaltes (mg/l), der molaren C/N-Verhältnisse sowie der Chlorophyll-Gehalte (µg/l) in der Wassersäule und im bodennahen Wasser von 3 benachbarten Stationen während eines „in situ Experiments“ zur Bestimmung von Bio(resuspension) und Bio(deposition) im November 2002.

5.2.2.3 Ergebnisse des Eventsamplereinsatzes

(T. Leipe, R. Bahlo)

Der „Event-Sampler“ ist ein autonom arbeitendes Gerät, welches am Meeresboden abgesetzt wird, fortlaufend hydrographische Daten erfasst und zu bestimmten Ereignissen (events) Filterproben von Schwebstoffen entnimmt. Die Parameter Salzgehalt, Temperatur, Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit werden stündlich gemessen und abgespeichert. Die Sensoren und die Probenahme des Wassers für die Filtration befinden sich in einer Höhe von 1,30 m über Grund. Die filtrierte Schwebstoffproben werden im Labor hinsichtlich der SPM-Konzentrationen (mg l^{-1}), des Kohlenstoffgehaltes und der mineralogischen Zusammensetzung untersucht. Für letzteres kommt ein spezielles Verfahren der Partikelmikroanalyse mittels Raster-Elektronenmikroskop und EDX zum Einsatz.

Der erste Einsatz des Event-Samplers auf dem DYNAS-Verklappungsfeld erfolgte im Zeitraum vom 19. Juli bis zum 26. September 2001. Wegen mechanischer Probleme an den rotierenden Teilen des Filtergestells konnten in dieser Einsatzperiode leider keine Filterproben gewonnen werden. Die Sensoren arbeiteten jedoch einwandfrei, so dass wir für diesen Zeitraum eine komplette hydrographische Datenreihe aufzeichnen konnten. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit über die Zeit:

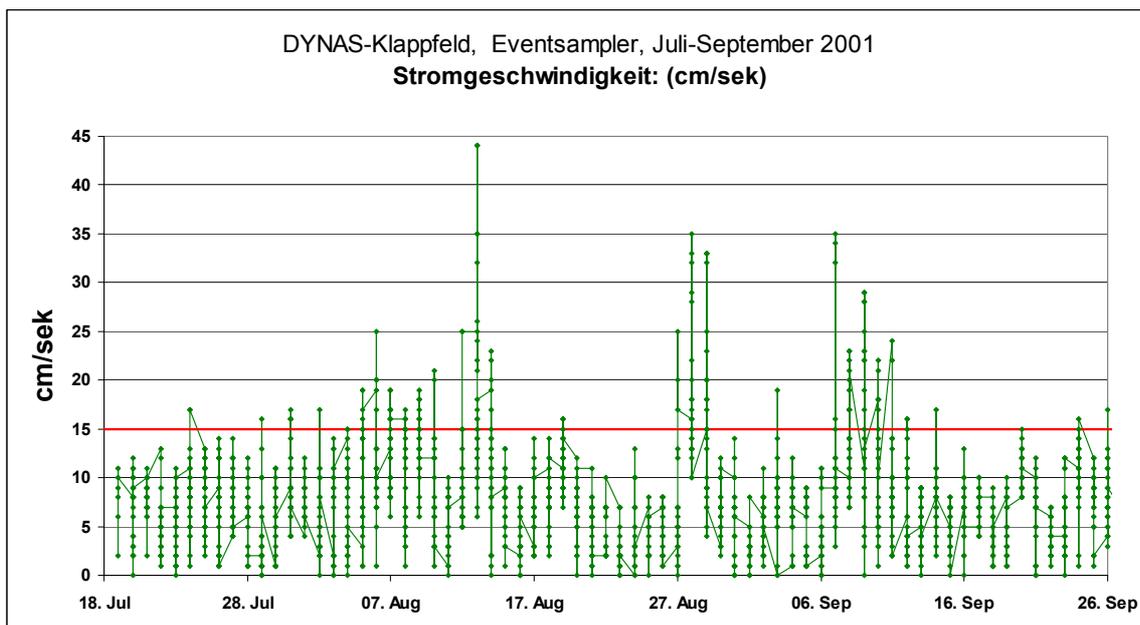


Abb. 5-53: Eventsamplereinsatz auf dem DYNAS-Klappfeld: Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum Juli bis September 2001

Die zweite Einsatzperiode des Event-Samplers vom 16. Oktober bis zum 6. Dezember 2001 an der Nordost-Markierungstonne der Klappstelle brachte dann einen vollen Erfolg. In diesem Zeitraum konnten 10 Ereignisse (events) beprobt werden, welche mit vorzugsweiser Strömungsrichtung (SW-NO) und steigenden Strömungsgeschwindigkeiten definiert und vorprogrammiert worden waren. Die folgenden Abbildungen stellen den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit (oben) und die vom Sampler beprobten „events“ dar (unten):

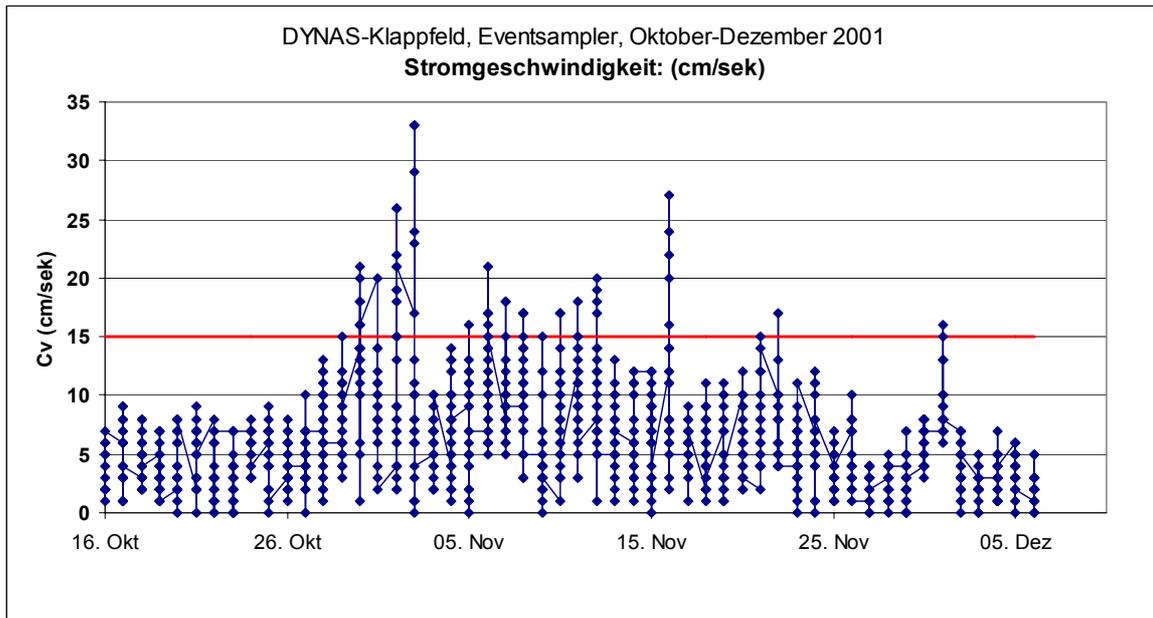


Abb. 5-54: Eventsampler auf dem DYNAS-Klappfeld: Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum Oktober bis Dezember 2001

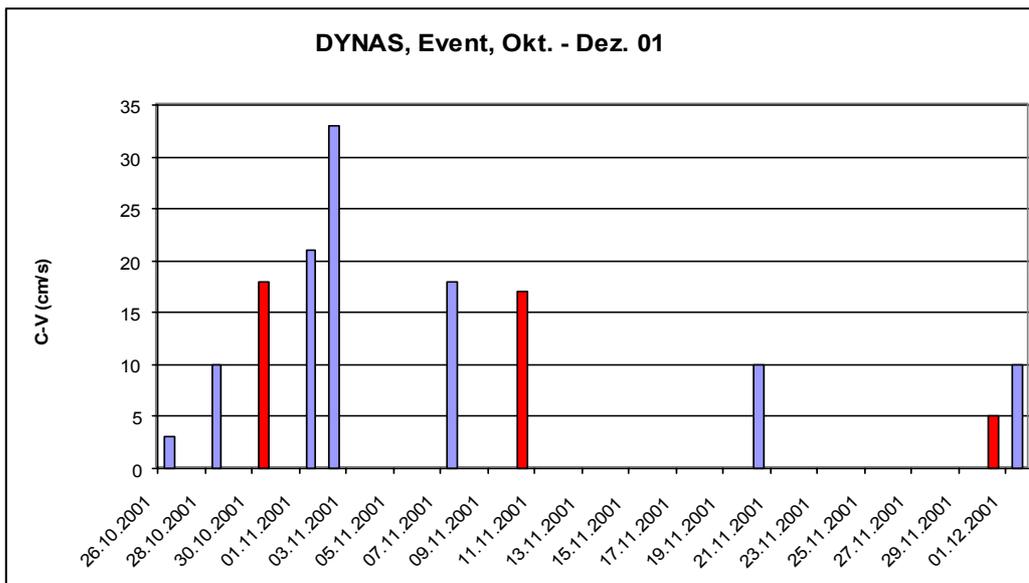


Abb. 5-55: 'Events' auf dem DYNAS-Klappfeld im Zeitraum Oktober bis Dezember 2001. Die blauen Balken symbolisieren „events“ mit einer Strömungsrichtung von SW nach NO, die roten Balken den inversen Fall der Strömung von NO nach SW.

Die zu den „events“ gehörigen Filter wurden analysiert. Die kompletten Messdaten sind in Tab. 5-9 enthalten.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Es besteht ein generell positiver Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit (C-v) und Schwebstoffkonzentration (SPM). In der betreffenden Wasserschicht 1,3 m über Grund traten bei C-v unterhalb von 15 cm s⁻¹ überwiegend SPM-Konzentrationen von 1 bis 2 mg l⁻¹ auf. Diese Werte entsprechen den zu erwartenden durchschnittlichen SPM-Konzentrationen in der Wassersäule der

westlichen Ostsee unter ruhigen hydrographischen Bedingungen. Bei C-v über 15 cm s^{-1} stiegen die SPM-Konzentrationen (sprunghaft) auf Werte von 6 bis 9 mg l^{-1} an. Dieser Effekt lässt sich eindeutig auf das Resuspensionsverhalten feinkörnigen Materials aus der sogenannten „fluffy layer“ interpretieren.

Aus früheren Untersuchungen und Laborexperimenten wissen wir, dass diese „fluffy layer“, welche zumeist aus Aggregaten feinkörniger Partikel (bes. Tonminerale) und organischen Substanzen besteht und als Flockenschicht auf dem sandigen Untergrund aufliegt, bei C-v oberhalb $4\text{-}5 \text{ cm s}^{-1}$ in Bewegung kommt und aufgewirbelt wird. Ausgehend von einem normalen, bodennahen Strömungsprofil sollten bei C-v von $>15 \text{ cm s}^{-1}$ in 1,3 m über Grund solche Bedingungen von C-v $>5 \text{ cm s}^{-1}$ am Boden herrschen.

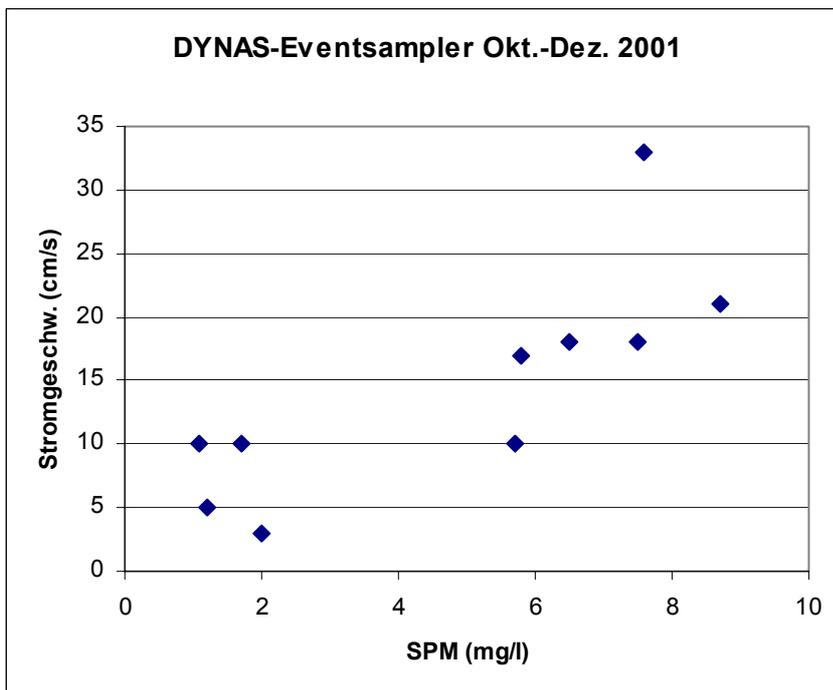


Abb. 5-56: Konzentration von SPM in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit in einer Meßhöhe von 1,3 m über dem Meeresgrund.

Diese kritische Größe von C-v. $> 15 \text{ cm s}^{-1}$ (siehe rote Linie in den Abbildungen zum Verlauf der Stromgeschwindigkeit) wurde im Zeitraum der beiden Einsatzperioden des Samplers (Juli-Dezember 2001) an insgesamt 41 Tagen für mindestens 122 Stunden überschritten. Strömungsgeschwindigkeiten von über 30 cm s^{-1} traten immerhin noch an 5 Tagen über insgesamt 12 Stunden auf. Neuere Untersuchungen an der Darßer Schwelle haben gezeigt, dass bei Werten über 40 cm s^{-1} dann auch Sedimente mit Korngrößen bis $100 \mu\text{m}$ resuspendiert und transportiert werden. Solche Extremereignisse treten zwar selten auf, sind aber dann für den Transport großer Sedimentmengen verantwortlich.

Die mineralogische Zusammensetzung der Schwebstoffe aus der „fluffy layer“ in den küstennahen Sandgebieten, entspricht weitgehend derjenigen der Schlicke in den benachbarten Ablagerungsgebieten (Mecklenburger Bucht). Aus den mineralogischen Daten des untersuchten Materials lässt sich ableiten, dass mit steigenden Schwebstoffkonzentrationen die Anteile von Dreischichtsilikaten

(Tonmineralen) zu nehmen, weil diese in dem „fluffy layer“ Material konzentriert vorliegen. Kalzit kann als möglicher Indikator der Verfrachtung von Material aus dem verklappten Mergel angesehen werden. Für die übrigen mineralischen Komponenten der Schwebstoffe lassen sich keine direkten Beziehungen zu den hydrographischen Zuständen im Untersuchungsgebiet herstellen.

Die Methodik der automatische Partikelanalyse mittels REM und EDX kam außer für die Filterproben des „Event-Samplers“ auch für andere Schwebstoff- und Sedimentproben des DYNAS Teilprojektes 3.1. zum Einsatz. Diese Ergebnisse sind in den Berichten und Manuskripten der Kollegen Ziervogel und Bohling enthalten.

Tab. 5-9: Ergebnisse des Event-Samplers-Einsatzes in der Zeit vom Oktober bis Dezember 2001.

Ergebnisse des Einsatzes des "Event-Samplers" auf der DYNAS-Klappstelle												
Probe-Nr.	f 1/2	f 3/4	f 5/6	f 7/8	f 9/10	f 11/12	f 13/14	f 15/16	f 17/18	f 19/20		
Datum	26.10.2001	28.10.2001	30.10.2001	01.11.2001	02.11.2001	07.11.2001	10.11.2001	20.11.2001	30.11.2001	01.12.2001		
Parameter	Maß											
C-V	3	10	18	21	33	18	17	10	5	10		
C-D	23	29	239	44	50	62	278	55	169	81		
SPM	2.0	1.7	7.5	8.7	7.6	6.5	5.8	1.1	1.2	5.7		
C-ges.	5.1	3.6	2.8	3.3	2.8	3.3	3.7	3.5	2.6	2.0		
Opal	15.6	40.6	14.3	19.2	15.9	18.3	17.9	16.7	19.2	19.3		
Quarz	9.0	22.9	13.7	10.9	19.5	16.9	12.5	12.8	19.4	12.8		
Calcit	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	2.7	4.4	6.1	2.2		
Fe-Ox.	4.7	1.6	1.2	0.8	1.3	0.6	1.0	0.0	1.2	0.7		
Mn-Ox.	6.2	0.5	4.1	0.0	0.6	0.6	0.0	0.8	0.2	0.2		
Chlorit	8.8	2.1	16.8	8.5	7.4	7.7	6.4	14.4	5.3	8.5		
Kaolinit	3.3	2.1	1.4	1.7	1.7	4.0	2.7	3.1	3.6	2.0		
Illit	8.1	5.2	5.4	8.5	10.0	10.3	8.2	9.9	9.3	9.7		
Illit-VL	33.4	9.4	33.5	37.0	26.1	22.9	28.6	22.5	17.2	27.4		
Smectit	5.0	13.0	4.6	7.9	8.9	8.9	12.2	10.2	9.3	9.4		
Kalifeldspat	3.6	2.1	2.9	2.9	5.5	6.6	5.2	2.9	4.8	4.9		
Ti-Min.	0.5	0.0	0.6	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	0.4		
Dolomit	0.2	0.5	0.2	0.6	0.6	0.9	0.7	0.5	2.2	1.1		
Pyrit	0.5	0.0	0.4	0.0	0.6	0.3	0.3	0.5	0.2	0.7		
Fe-POx	0.5	0.0	0.8	0.0	0.2	0.6	0.2	0.3	0.8	0.4		
Ca-POx	0.7	0.0	0.0	0.6	0.6	0.3	0.3	0.0	0.2	0.0		
3SS/2+4SS	3.84	6.63	2.39	5.21	4.96	3.59	5.43	2.43	4.02	4.40		
K/C	0.38	1.00	0.09	0.20	0.23	0.52	0.42	0.22	0.69	0.24		

6 Verklappungsexperiment

6.1 Übersicht

(J. Kraft)

Die an eine Baumassnahme des Seekanals Rostock-Warnemünde gebundene Verklappung von Baggergut konnte am 20./21. Juni 2001 erfolgreich durchgeführt werden.

Die Abb. 6-1 zeigt eine Szene bei der Baggerung der Sandfalle vor der Hafeneinfahrt Warnemünde am 21.6.01. Die Abb. 6-2 zeigt die Situation bei der Sandverklappung auf der DYNAS-Klappstelle. Im Bild zu sehen sind neben der Klappschute der Tonnenleger „Rosenort“ sowie das FS „Professor Albrecht Penck“.

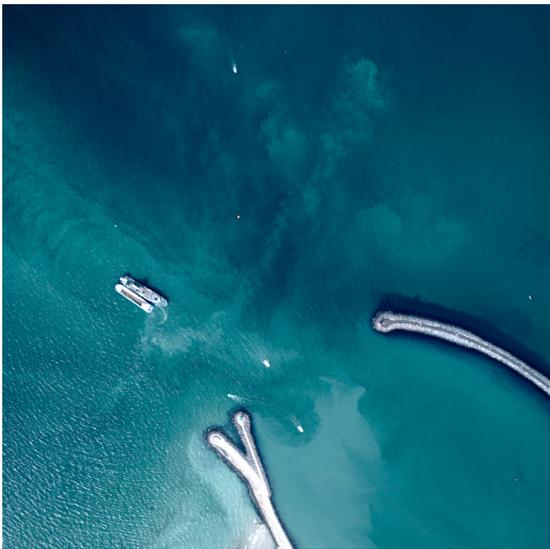


Abb. 6-1: Verklappungsprozess auf der Probeklappstelle mit Schute, MS „Rosenort“ und FS „Prof. A. Penck“.

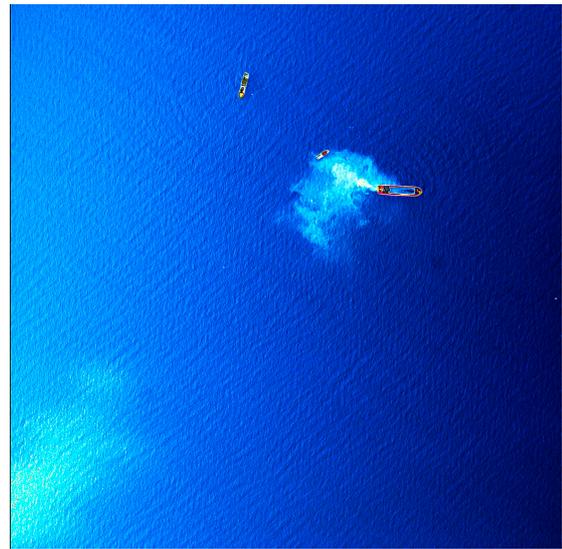


Abb. 6-2: Baggerung der Sandfalle vor der Hafeneinfahrt von Warnemünde (Klappschute liegt am Bagger).

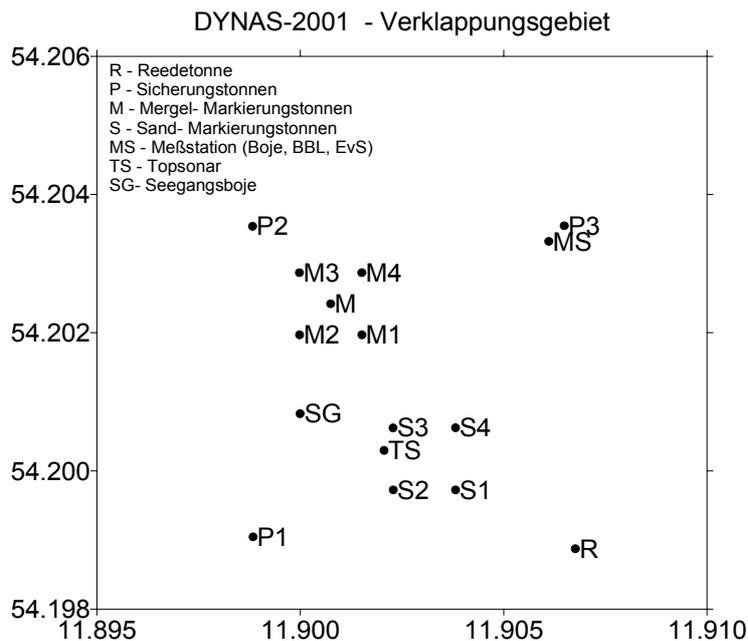


Abb. 6-3: DYNAS-Probeklappstelle mit Positionen von Dauermessstellen.

Ablaufplan Meßarbeiten Verklappungsexperiment DYNAS

	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Messung
Meßstation (MS, WSA)	—										—	Strömung/Tribung
Bodenströmung (MS)	◆										—	bodennahe Strömung
Eventsampler (MS)										◆		Beprobung SPM
Klappschnuten			◆◆									Verklappung/Beprobung
FS "Prof. A. Penck"	◆		—		◆							ADCP, CTD, Optik, Videoschlitten
"Prandl"	◆		—		—					—	◆	Fächerechlot, Eventsampler,
MS "Rosenort"			◆◆									Topsonar
TL "Dauber Ort"	◆		—		—						◆	Einsatzleitung/ Koordinierung
Flugzeuge			◆◆									Luftbild, CASI
Satelliten	—		—								—	SSST/ VTS

Abb. 6-4: Ablaufplan Meßarbeiten Verklappungsexperiment DYNAS.

Abb. 6-3: zeigt eine Karte der DYNAS-Probeverklappungsstelle mit Positionen von Dauermessstellen.

Die Abb. 6-4: gibt einen Überblick über den logistischen Einsatz der Mess- und Beobachtungsverfahren während der Verklappung.

6.1.1 Zielstellung und Ablauf des Experiments

6.1.1.1 Zielstellung des Klappexperiments

Die Zielstellung des Verklappungsexperiments bestand in der Untersuchung der im Wasserkörper und auf der Gewässersohle durch die Baggerbodenverklappung ausgelösten physikalischen Prozesse.

Dabei ist zu unterscheiden nach dem Prozessgeschehen im Augenblick der Bodenverklappung sowie im Laufe eines längeren Zeitraums danach.

Im Augenblick der Verklappung geht es um das Fallen des Baggergutes durch die Wassersäule und dessen Ablagerung auf der Sohle sowie die Ausbildung von Trübungswolken und deren Ausbreitung infolge Strömung, Seegang, Dichte- und Temperaturschichtungen

Bei längerfristigen Prozessen steht die Morphodynamik im Vordergrund, d.h. die Erfassung der zeitabhängigen Formänderung der Sohle im Ergebnis der Wechselwirkung von Strömungen, Welleneinfluss und Sedimentprozessen auf der (beweglichen) Sohle

6.1.1.2 Voraussetzungen für das Klappexperiment

- Das Klappgebiet vor Kühlungsborn wurde so bestimmt, dass es sich in einem natürlichen und noch nicht anthropogen beeinflussten Zustand befindet und den allgemeinen Kriterien einer Klappstelle entspricht. Es herrschen sedimentologisch, morphologisch, chemisch und biologisch ungestörte Verhältnisse vor; Wassertiefen-, Strömungs- und Sedimentverhältnisse sowie Lage der Klappstelle zu anderen Nutzungen entsprechen den üblichen Kriterien.
- Innerhalb des Gebietes wurden klar definierte Klappfelder für die Bodenarten Mergel und Sand ausgegrenzt, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Genaues Aufmaß der Unterwassertopographie als Nullmessung, Betonung der DYNAS-Klappstelle an sich, Erfassung der sedimentologischen, chemischen und biologischen Ausgangsverhältnisse, Auslegung fester Messstellen und deren Markierung, Markierung der Einzelklappfelder.
- Die DYNAS – Klappfläche wurde vor, während und für bestimmte Zeit nach dem Klappexperiment von jeglichen Nutzungsbeeinträchtigungen aus Schifffahrt und Fischerei freigehalten, um auszuschließen, dass Messungen und Beobachtungen verfälscht werden.
Strom- und schifffahrtspolizeiliche Sperrung, Schleppnetze haben Einfluss auf Morphologie und Biologie u.a.m.
- Im Interesse eines zeitlich und organisatorisch gestrafften Experimentablaufs war es erforderlich, dass die Bodenarten Mergel und Sand an zwei aufeinander folgenden Werktagen zur Verfügung standen. Nur über den koordinierten Einsatz der am Experiment Beteiligten war es möglich, die Beobachtungen und in situ Messungen aus der Luft, vom Schiff aus, im Wasserkörper und auf der Sohle effizient und kostenoptimal durchzuführen.

6.1.1.3 Durchführung des Verklappungsexperiments

Vorbemerkungen:

Das Klappexperiment wurde am 20. und 21. Juni 2001 durchgeführt. Der Baggerboden Mergel und Sand entstammte aus der Baggerung der Sandfanggrube, westlich vom Seekanal und nördlich der Westmole von Warnemünde. Beim Vorhaben „Sandfallenbaggerung“ handelt es sich um eine Auftragsleistung des WSA Stralsund zur Reduzierung des Sedimenteintrags in den Seekanal - also eine Leistung zur Verbesserung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt. Die Verbringung des Baggergutes aus der Sandfallenbaggerung war auf der WSA-Klappstelle KS 552a vorgesehen, lediglich 5000 bis 6000 m³ Boden sollten auf der speziell für eine Probeverklappung eingerichteten DYNAS- Klappstelle verklappt werden, wobei der Kostenneutralität halber die Transportentfernungen zu beiden KS identisch gehalten wurden. Das ausführende Baggerunternehmen war die Fa. Nassbaggerei DETLEF HEGEMANN GmbH mit dem Bagger „USEDOM“ und den Klappschuten „DARSS“ und „ZINGST“.

Ablauf:

Der Ablauf des Experiments seitens der Baggerung und Verklappung geht aus den zwei Protokollen des WSA Stralsund hervor (Anlage 1):

Protokoll vom 20.06.01 (Mergelverklappung),

Protokoll vom 21.06.01 (Sandverklappung).

Am 20.06.01 erfolgte die Mergelverklappung, die auf die Minute genau nach dem vorgegebenen Zeitplan abgelaufen ist. Die Verklappung des Mergels (insgesamt 2882 m³), konnte im Rahmen der vorgegebenen Sollpositionen und veranschlagten Mengen realisiert werden.

Am 21.06.01 erfolgte die Sandverklappung. Dabei handelte es sich um einen Mischboden mit einem größeren Sandkornanteil, vermischt mit Mergel, Ton und Mudde, was daran lag, dass die Baggergrube geologisch keine reine, baggertechnisch fassbare Sandfraktion aufwies.

Die Verklappung erfolgte aus der Langsamfahrt der Schute heraus, wobei die vorgegebenen Positionen eingehalten werden konnten. Die Suche nach geeignetem Baggergut führte zu Verzögerungen im zeitlichen Ablauf des Experiments. Der Baggerausfall aufgrund einer defekten Eimerleiter führte dann dazu, dass nur drei anstelle von 5 – 6 geplanten Schuten zur Verklappung gekommen sind. Mit 2.428 m³ war die Menge jedoch für die weiteren Untersuchungen ausreichend, zumal eine Nachbeklappung erneute Fächerecholotaufnahmen vor und nach der Nachbeklappung erforderlich gemacht hätte. In dieser Hinsicht war eine Terminkoordination zwischen der Baggerfirma und der GKSS objektiv nicht mehr möglich.

6.2 Beobachtungen in der Wassersäule

(H. Siegel)

Das DYNAS Teilprojekt 3.1 umfasste hinsichtlich der schiffsgebundenen Untersuchungen folgende Schwerpunkte:

1. Erfassung der Hydrographie und Strömung im Verklappungszeitraum
2. Untersuchung der vertikalen und horizontalen Verteilung der Schwebstoffe während der Verklappung am 20. und 21.06.2001
3. Synoptische Aufnahme der Schwebstoffverteilung an der Wasseroberfläche während der Verklappung und der Wasseroberflächentemperatur im Expeditionszeitraum mit Flugzeug- und Satellitendaten

Die Arbeiten im Rahmen dieser Aufgaben des Teilprojektes 3.1 konzentrierten sich auf die Begleituntersuchungen zum Verklappungsexperiment.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Während des Verklappungsexperimentes wurde ein umfangreicher Datensatz zur Validation von Modellergebnissen gewonnen. Die meteorologische Situation war durch schwache westliche Winde mit stark wechselnder Bewölkung geprägt. Während der Luftbild- und CASI-Befliegungen waren trotzdem gute Bedingungen vorhanden. Die Wassersäule war charakterisiert durch eine starke vertikale Schichtung mit Sprungschichten in 12 und 16 m in Temperatur und Salzgehalt.

Die Strömungsstrukturen waren vor der Verklappung durch großräumigen Ausstrom und geringen Einstrom an der Küste bestimmt, der sich bei der zweiten Aufnahme verstärkte und während des dritten Umlaufs komplett umstellte. Das Verklappungsgebiet lag im Bereich starker Stromscherungen und zeitlicher Variationen. Die Schwebstoffwolken konnten durch die optischen Methoden und die ADCP-Streuintensität erfasst werden. Durch die geringe Turbulenz in der Deckschicht sank die bei der Verklappung entstandene Schwebstoffwolke im Vergleich zu Testuntersuchungen bei Windstärke 5-6 sehr schnell und war schon nach ca. 1 Stunde kaum noch visuell vom Schiff zu beobachten. Die Luftaufnahmen belegen, dass die Wolke an der Oberfläche nach Westen gedriftet ist und nach ca. 40 min nur noch schwach sichtbar war.

Das feine Material sammelte sich an der Sprungschicht, wodurch dort wesentlich höhere Werte optischer Parameter und der Schwebstoffkonzentration als in der Oberflächenwolke gemessen wurden. Durch die vertikalen Stromscherungen befand sich das Maximum der Schwebstoffwolke am ersten Tag im Bereich der Sprungschicht an der nordwestlichen Ecke des Verklappungsgebietes und über dem Boden durch nordöstlich gerichtete Strömung an der Nordostecke.

Nach der Mergelverklappung waren in der Bodenschicht an der Messstation schnell erhöhte Trübungen messbar. Die Schwebstoffe, die sich an der Sprungschicht angesammelt hatten, erreichten erst in der Nacht die Station. Am zweiten Tag waren wegen der größeren Entfernung zur Messstation nur in der Bodenschicht hohe Trübungen messbar. Nach starker Windmischung waren in der Bodenschicht regelmäßig hohe Trübungen gemessen worden.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse zu Hydrographie, Strömung und Schwebstoffverteilung während der Verklappung ist der Anlage 1 zu entnehmen.

6.3 Boden / Sediment

6.3.1 Sidescan-Sonar-Aufnahmen des DYNAS-Testfeldes und kombinierte Visualisierung der Sidescan-Sonar-Daten mit den GKSS-Fächerlot-Daten

(F. Tauber)

Das DYNAS-Testfeld wurde mehrfach mit Sidescan-Sonar aufgenommen: im März 2000 im ursprünglichen Zustand, im Juni 2001 unmittelbar nach der Verklappung, September 2001, Oktober 2001, April 2002 und Oktober 2002, wobei die Qualität der Daten in Abhängigkeit von Wellengang und eingesetztem Schiff starken Schwankungen unterlag. Die Sidescan-Sonar-Daten der Aufnahme unmittelbar nach der Verklappung (horizontale Koordinaten: Longitude und Latitude im System WGS-84) wurden mit den GKSS-Fächerlot-Daten (Gauß-Krüger-Koordinaten im Bessel-Ellipsoid, Bezugsmeridian 9° E) zunächst in ein einheitliches lokales Bezugssystem gebracht. Im gemeinsamen Bezugssystem wurden die Sidescan-Sonar-Intensitäten und die bathymetrischen Daten auf ein gemeinsames quadratisches Raster umgerechnet. Daraus wurden dreidimensionale Ansichten des Testfeldes und speziell der Mergelklappstelle berechnet, wobei die Sidescan-Sonar-Intensitäten als Oberflächentextur dem Relief überlagert wurden. Zur Darstellung der Raumtiefe wurden Zentralperspektive und Luftperspektive angewandt. In den so erzeugten Grafiken zeigte sich, dass einige Details nur im Sidescan sichtbar sind (z.B. die „Aureolen“ aus feinem Material um die Klappstellen), während andere nur im Relief erscheinen (z.B. Mikrorelief im Süden des Testfeldes).

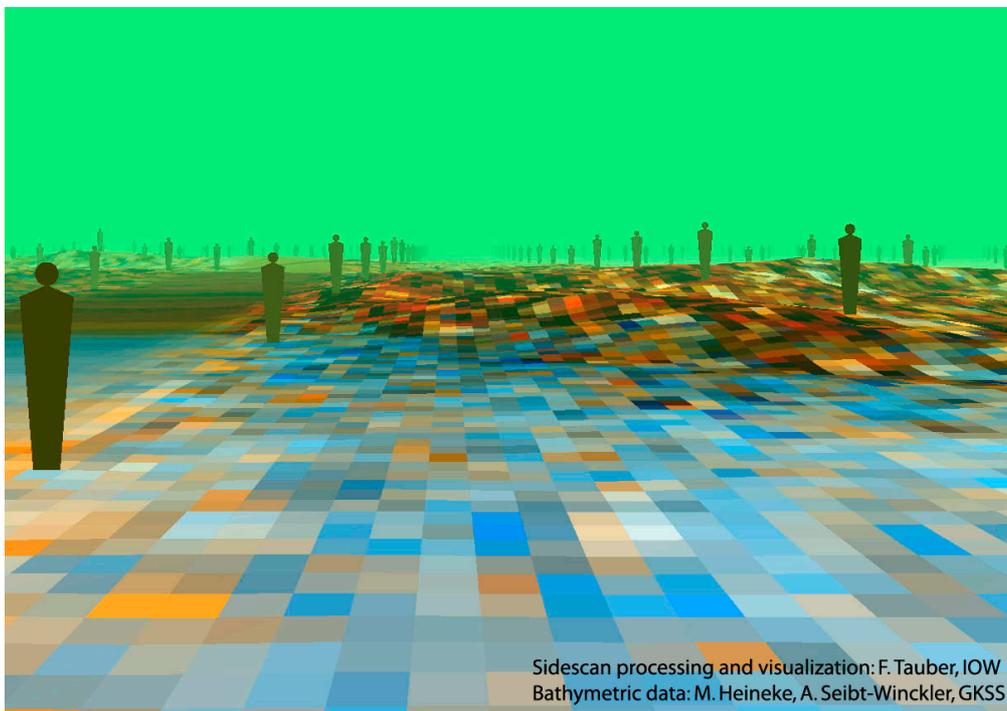


Abb. 6-5: Mergelklappstelle im DYNAS-Testfeld, Ansicht von Süden. Die Perspektive der Ansicht wurde so berechnet, wie sie dem Betrachter erscheinen würde, wenn er auf dem Meeresboden steht. Zur besseren Veranschaulichung der Größenverhältnisse wurden 1,8 m hohe Personensymbole eingefügt. Die Seitenlänge der als Kacheln erscheinenden Pixel beträgt 0,3 m. Die unterschiedliche Färbung des Meeresbodens in der Darstellung zeigt Unterschiede in den akustischen Eigenschaften der Sedimentoberfläche (orange bis hellgrau auf der Fläche im Vordergrund: ursprüngliche Sedimentoberfläche, hellgrau bis blau: Schwebstoff-Aureole um die Verklappung, rötlich-braune Hügel: verklappter Mergel).

6.3.2 Vermessung der Klappstelle mit einem Flachwasserfächerecholot

(G. Größ, M. Heineke, R. Riethmüller, A. Seibt-Winckler)

Auf dem DYNAS Workshop 2001 wurden die gewonnenen Vermessungsergebnisse des Flachwasserfächerecholots EM3000 der Firma SIMRAD vom Juni und August 2001 vorgestellt. Bisher sind nur die Daten vom August 2001 genauer ausgewertet, die Junimessung wurde aufgrund der wetterbedingten Fehler bislang für die Auswertung nicht berücksichtigt¹. Im Oktober 2002 wurde das Klappfeld ein weiteres Mal vermessen. Die Fächerlotpeilungen wurden von Bord des Forschungsschiffes „Ludwig Prandtl“ des GKSS- Forschungszentrums durchgeführt. Zur Positionierung wurde ein PDGPS (Precise Differential Global Positioning System der Firma Trimble) mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich verwendet. Die Peilungen fanden in Nordsüd- und Ostwestrichtung statt. Für diesen Bericht sind nur Daten von den Nordsüdprofilen ausgewertet. Die Linien waren so angeordnet, dass in jeder Richtung eine 200 %-tige (halbe Fächerbreite) Überdeckung pro Kampagne und dementsprechend eine 400 %-tige Überdeckung des Meeresbodens in den Rohdaten erreicht wurde.

Die Bereinigung der Positions- und Tiefenwerte wurde mit dem Programm „Neptune“ durchgeführt. Es wurden alle Tiefen, die über dem 3- fachen der Standardabweichung einer 1.0 m² Gitterzelle lagen, beseitigt. Mit der Software „Cfloor“ unter Verwendung des „Seabed“-Algorithmus ist aus den etwa 25 Punkten pro m² ein Geländemodell mit einer Rasterweite von 1 m berechnet worden. Die Vermessungsdaten von 2002 zeigen relativ zu den Augustdaten 2001 einen Offset von 21cm. Die Geländemodelldaten der 2002-Messung wurden deshalb durch einen additiven Term um diesen Wert angehoben. Vermutlich ist der Offset durch die geänderte Installation des Lotes an Bord der „Ludwig Prandtl“ entstanden.

Um die Sedimentumlagerungen des verklappten Materials aufzuzeigen wurden die Tiefendifferenzen über den Mergel und Sand-Klappstellen aus den berechneten Geländemodellen analysiert.

6.3.2.1 Bathymetriedaten vom August 2001

In den berechneten digitalen Geländemodellen sind die vier Mergel- und die drei Sandverklappungen deutlich zu erkennen. Die Abb. 6-6 zeigt die berechneten Wassertiefen der Mergel- und Sandklappstellen. Sie liegen, bezogen auf Normal Null (NN), zwischen 17.0 m und 19.5 m.

Die bei der Verklappung des Mergels entstandenen vier ringförmigen „Krater“ variieren im Durchmesser zwischen 18.0 m und 28.0 m. Ihre jeweiligen mittleren Höhen liegen zwischen 0.9 m und 1.0 m und der Maximalwert ist 1.7 m. Mit einer Ausdehnung von 125 m x 125 m für das Mergelfeld, berechnet sich die Klappfläche zu ca. 17000 m². Die Stärken der Kraterwände betragen im Mittel 10.0 m. Die Wassertiefe im Inneren der „Krater“ entspricht der des umgebenden Seebodens. Dies deutet daraufhin, dass es sich um Originalseeboden ohne Sedimentablagerungen handelt.

¹ Siehe Fehlerbetrachtung

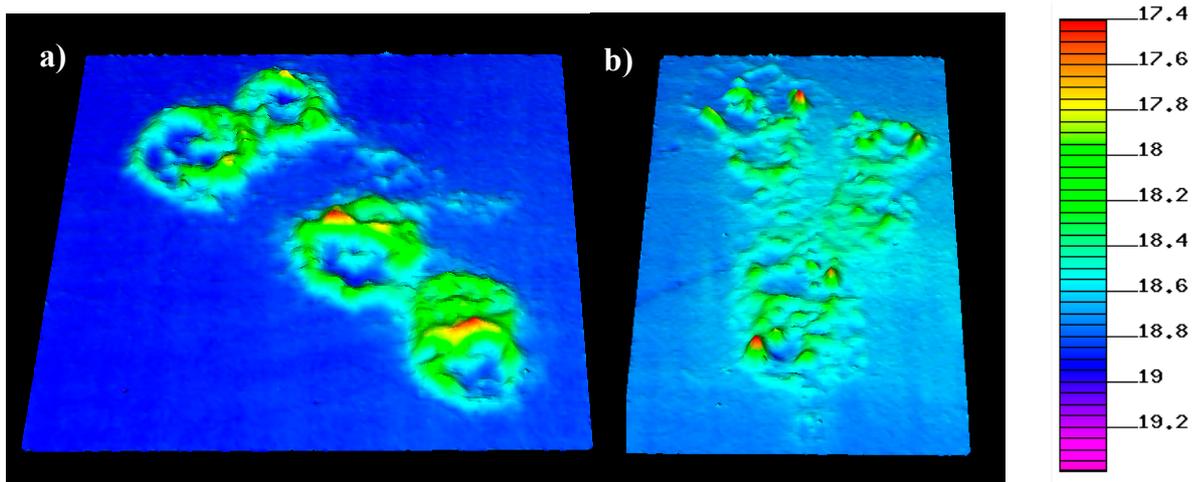


Abb. 6-6: Geländemodell des Meeresbodens der Mergelklappstelle a) und der Sandklappstelle b) vom August 2001 (5-fach überhöht). Die Farbscala zeigt die Wassertiefen bezogen auf NN.

Die Sandverklappungsstellen weisen im Gegensatz zum Mergelklappfeld nur undeutliche „Kraterformen“ auf. Die diffuseren Tiefenstrukturen erklären sich durch die Verklappungsart und Materialbeschaffenheit des Sandes. Im Gegensatz zum Mergel hat die Verklappung des Sandes bei fahrenden Schuten stattgefunden, so dass der verklappte Sand über eine Fläche von ca. 114.0 x 110.0 m verteilt wurde. Die betrachtete Fläche weist eine Ausdehnung von 12500 m² auf. Im Sandfeld konnten Peakhöhen bis zu 1.5 m und ein mittlerer Durchmesser von 23.0 m festgestellt werden.

6.3.2.2 Bathymetriedaten vom Oktober 2002

Am 25.10.02 wurde die Verklappungsstelle ein weiteres Mal in Ostwest und in Nordsüdrichtung vermessen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Geländemodelle der Oktobermessung.

Aus den Fächerecholotpeilungen der Mergelklappstelle ist zu erkennen, dass sich die Kraterdurchmesser nur wenig verändert haben (siehe Tab. 6-1). Die Maximalhöhe der „Kraterwände“ wurde mit 1.0 m vermessen und die mittlere Wandstärke mit 13.0 m. Der Durchmesser variiert zwischen 18.0 m und 30.0 m.

Für das Sandklappfeld konnte eine maximale Höhe von 0.7 m ermittelt werden. Die abgeschätzte Wandstärke beträgt ca. 6.0 m. Eine Wandstärke für die „Sandkrater“ wird aufgrund der diffusen Struktur nicht angegeben.

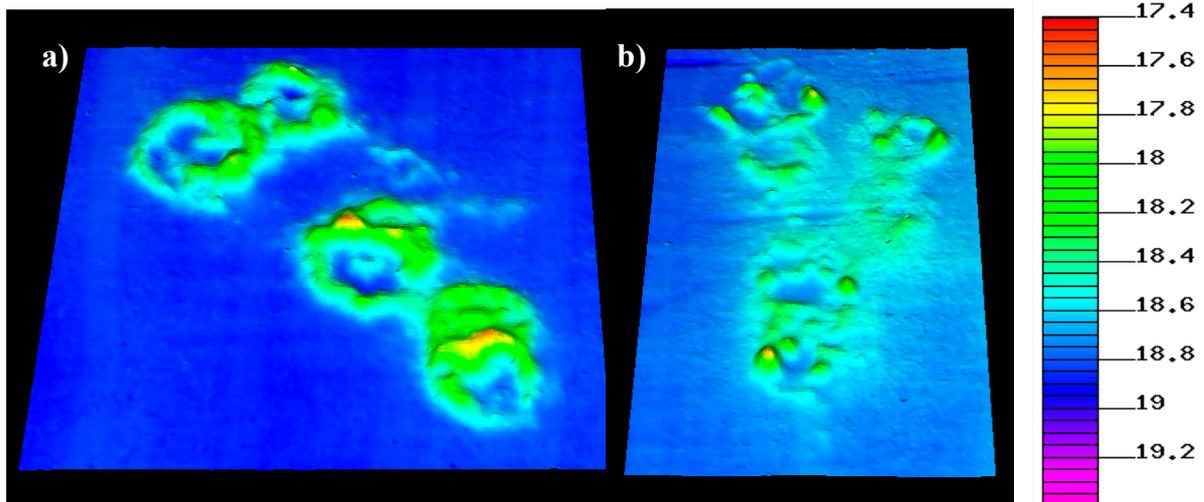


Abb. 6-7: Geländemodell des Meeresbodens aus Nordsüdprofilen der Mergelklappstelle a) und der Sandklappstelle b) vom Oktober 2002 (5-fach überhöht). Die Farbskala zeigt die Wassertiefen bezogen auf NN.

6.3.2.3 Vergleichende Betrachtung der Fächerlotpeilung von August 2001 und Oktober 2002

In der Tab. 6-1 sind die Vermessungsergebnisse der Mergel- und Sandklappstelle vergleichend gegenübergestellt.

Tab. 6-1: Vermessungsergebnisse der Mergel- und Sand-„Krater“ vom August 2001 (1.Messung) und Oktober 2002 (2.Messung).

Eigenschaften der „Krater“	Mergel 1. Messung	Sand 1. Messung	Mergel 2. Messung	Sand 2. Messung
Durchmesser [m] ²	18.0- 28.0	3.0- 9.0	18.0- 30.0	5.0- 8.0
Mittlerer Durchmesser [m] ³	23.0	6.0	20.0	6.0
Wandstärke [m]	6.0- 22.0	-----	10.0- 15.0	-----
Mittlere Wandstärke [m]	10.0	-----	13.0	-----
Höhe [m]	1.7	1.5	1.0	0.7

Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass sich innerhalb eines Jahres die Durchmesser der „Mergel- und Sandkrater“ kaum verändert haben. Die Peakhöhen haben sich für beide Sedimentarten verringert. Sowohl der Mergel als auch der Sand haben sich in die Breite verteilt. Dies ist an den leicht angewachsenen Wandstärken und aus den nachfolgenden Abbildungen zu erkennen.

Die Veränderung ist für die Mergel- und Sandklappstelle nachfolgend dargestellt.

²Mergel: Kraterdurchmesser Abstand bestimmt von Peak zu Peak; Sand: Durchmesser der Peaks

³ berechneter Mittelwert aus den Einzelvermessungen

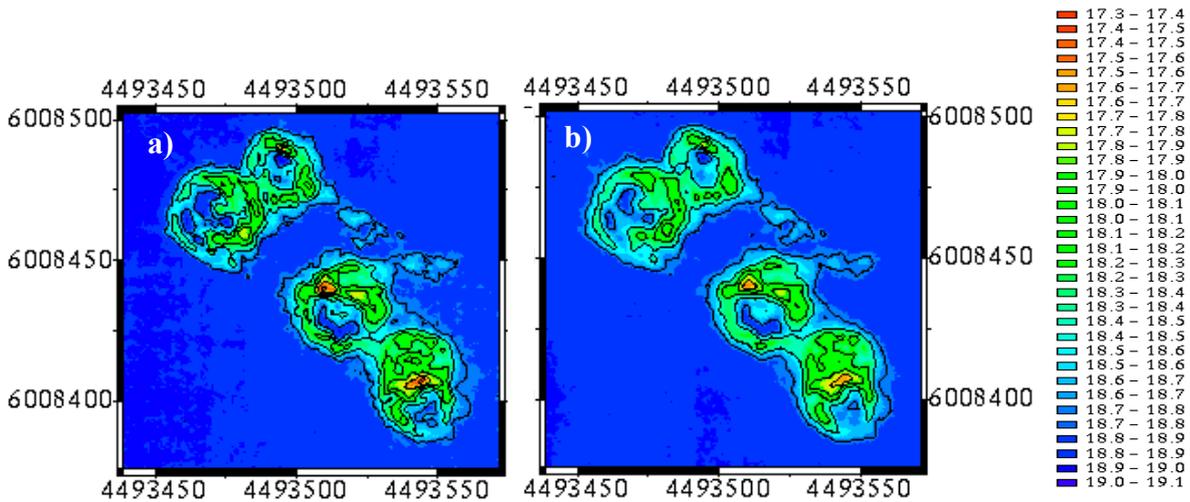


Abb. 6-8: 2D Tiefendarstellungen des Mergels vom August 2001 a) und Oktober 2002 b). Die Farbskala zeigt die Wassertiefen bezogen auf NN.

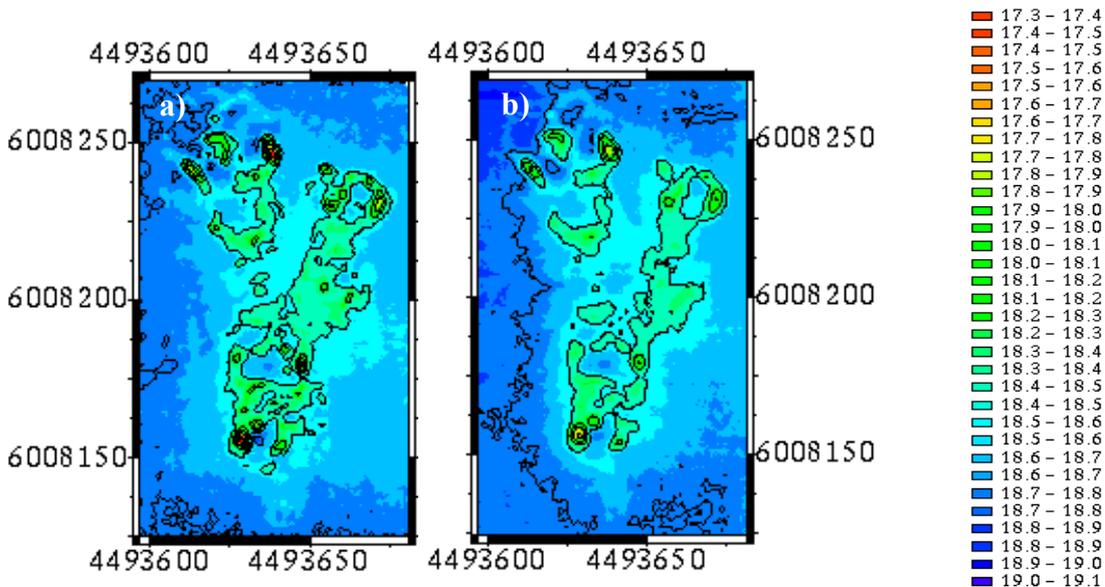


Abb. 6-9: 2D Tiefendarstellung des Sandklappfeldes vom August 2001 a) und Oktober 2002 b). Die rechte Farbskala zeigt die Wassertiefen bezogen auf NN.

Um die Sedimentverlagerungen quantitativ zu erfassen, wurde aus den Gelände-modellen der August 2001 und Oktober 2002 Kampagnen ein Differenzmodell erstellt.

Die Tiefenwerte der Knotenpunkte (1.0 m x 1.0 m Gitter) der Augustmessung 2001 wurden von denen der Oktober 2002-Messung subtrahiert. Das heißt, dass Erosion durch negative Werte dargestellt wird. Die Farbabstufung der Differenzbilder beträgt 10 cm in den Wassertiefen. Die schwarz eingezeichneten Polygone in Abb. 6-10 und Abb. 6-11 sind die Nullmeterlinien. Auffällig ist, dass sich häufig direkt neben starken Erosionsflächen Sedimentationsflächen gebildet haben.

Beim Mergel ist eine Reduktion der Kraterhöhe um maximale 0.7 m festgestellt worden. Entsprechend zeigen sich Abträge von 0.7m für die Sandpeaks.

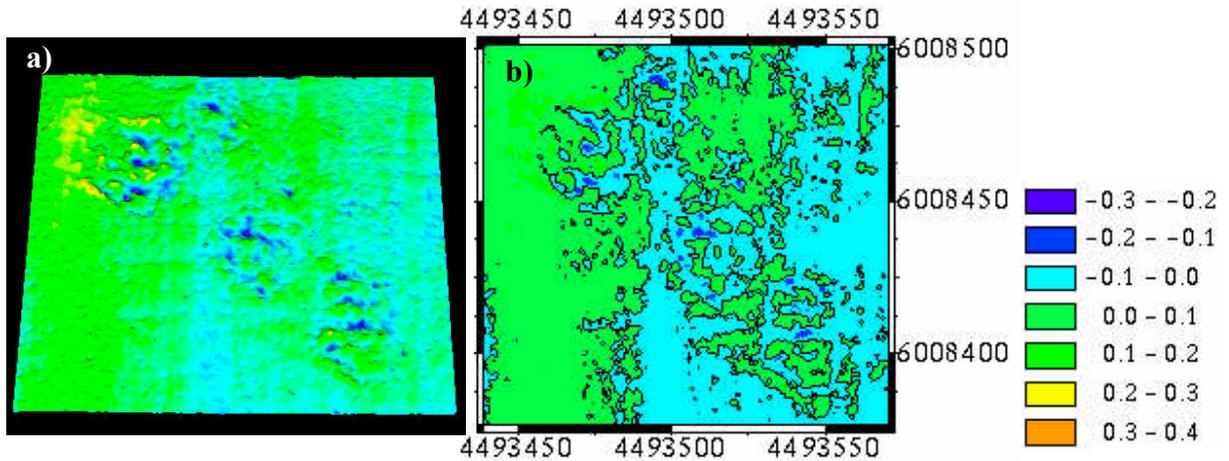


Abb. 6-10: 3D Geländemodell a) und 2D Tiefendarstellung b) des Mergel-Differenzbildes (Oktober 2002 minus August 2001).

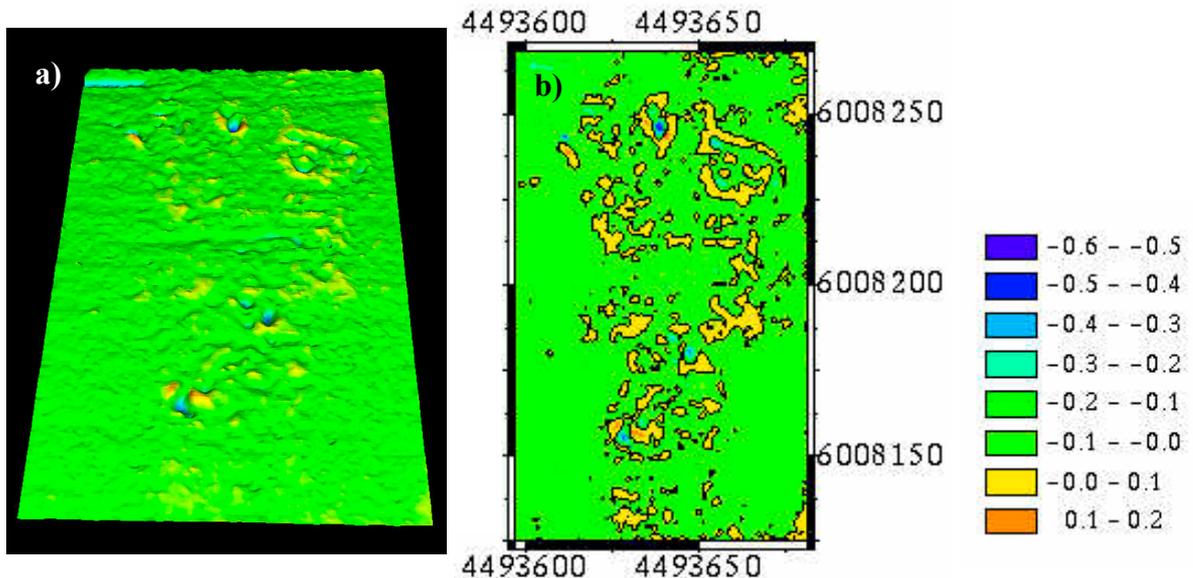


Abb. 6-11: 3D Geländemodell a) und 2D Tiefendarstellung b) des Sand-Differenzbildes (Oktober 2002 minus August 2001).

6.3.2.4 Absolute und relative Volumenberechnung

Die Volumenberechnung basiert auf zwei unterschiedlichen Verfahren, die miteinander verglichen wurden. Im ersten Verfahren sind die Volumina der Verklappungsstellen mittels einer Referenzfläche errechnet worden. Dazu ist in einem Umringspolygon, das die Begrenzung der Klappflächen beschreibt, eine Fläche interpoliert worden, gegen welche die Volumina der Geländemodelle verrechnet wurden. Die Tiefen der Eckpunkte des Umringspolygons sind aus den drei Geländemodellen (Nordsüd- und Ostwestmessung von August 2001 und Oktober 2002) ermittelt worden. Die Differenz der so berechneten Volumina entspricht der Materialumlagerung in dem betrachteten Gebiet. Das zweite Verfahren basiert auf der direkten Differenzbildung der Geländemodelle von August 2001 und Oktober 2002. Darüber hinaus kann eine Aussage über den Verlust des Materials in der

Wassersäule während der Verklappung durch den Vergleich der Volumina mit den Ausgangsvolumen getroffen werden.

Die Tab. 6-2 zeigt das Ausgangsvolumen in den Schuten, sowie die Volumina beider Messungen und deren Differenz.

Tab. 6-2: Volumenbestimmung im betrachteten Mergel- und Sandklappfeld.

	Ausgang ⁴	Aug. 01	Okt. 02	Verlust ⁵	Differenz Oktober 02 – August 01
Mergel	2880	2450	2557	- 420	107
Sand	2430	1520	1105	- 910	- 415

Es sind bei der Verklappung selbst bis hin zum August 2001 im Mergelklappfeld 420 m³, das entspricht 14 %, und im Sandklappfeld 910 m³, entsprechend 37 % Sediment, verloren gegangen.

Für den Zeitraum zwischen erster und zweiter Messung wurde ein Eintrag von 107 m³ Sediment in das Mergelklappfeld und ein Abtrag von 415 m³ Sediment aus der Sandklappstelle festgestellt.

Die Tab. 6-3 zeigt die Ergebnisse des zweiten Verfahrens. Dargestellt sind die sedimentierten und erodierten Volumina zwischen den beiden Messkampagnen. Dabei sind beim Mergel ca. 190 m³ erodiert und ca. 300 m³ sedimentiert. Daraus folgt ein Nettotransport von 100 m³, oder 4 % des Ausgangsvolumens, in das Gebiet hinein.

Für die Sandklappstelle konnte ein Abtrag von 430 m³ und ein Auftrag von 30 m³ beobachtet werden. Daraus berechnet sich ein Abtrag von 400 m³. Das heißt, 16 % des Ausgangsvolumens sind aus dem Gebiet heraus transportiert worden.

Tab. 6-3: Bilanz des relativen Sedimenttransportes im betrachteten Mergel- und Sandklappfeld.

[m ³]	Erosion	Sedimentation	Gesamt	Fehler	Max. Sediment- bewegung	Min. Sediment- bewegung
Mergel	- 192	297	+105	+/-200	- 100	+300
Sand	- 427	27	- 400	+/-150	- 550	- 250

Der Vergleich der Ergebnisse des ersten (Tab. 6-2) und zweiten Verfahrens (Tab. 6-3) zeigt, dass die Volumina annähernd gleich sind.

Für die Volumenbetrachtungen muss noch die relative Genauigkeit des Fächercholotsystems in Betracht gezogen werden. Begleitende Analysen der Fächerlotmessungen wurden im Institut für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass der maximale Fehler für die mittlere Wassertiefe des DYNAS-Klappfeldes 5 cm beträgt. Diese Fehlerbestimmung basiert auf Analysen der Fächerlotmessungen vom Juni und August 2001. Wir gehen davon aus, dass der tatsächliche Fehler kleiner als 5 cm ist, da die Junimessung durch starken Seegang beeinträchtigt war.

⁴ Ausgangsvolumen in den Klappschuten, bestimmt nach einem geeichten Verfahren (WSA)

⁵ Verlust bei der Verklappung in der Wassersäule und während des Zeitraumes Juni bis August 2001

Ein Fehler von 5 cm führt zu einer Messunsicherheit in der Volumenberechnung von +/- 200 m³ beim Mergel und von +/- 150 m³ beim Sand.

6.3.3 Erfassung der DYNAS Sedimentverklappung (Sand) vom 21.6.2001 mit Rundumsicht-Sonar (NEU!)

(T. Wever, R. Lühder)

Der Scanningsonar Turm wurde am 21.6.2001 von Bord der MS Rosenort betrieben. Das Schiff lag während des Einsatzes westlich des Verklappungsfeldes vor Anker. Zwischenzeitlich verlegte die MS Rosenort um die Position für die Messungen besser halten zu können. Nach dem Verklappungsexperiment blieb der Sonarturm auf dem Meeresboden stehen, um später zu verschiedenen Zeitpunkten zu unveränderten Bedingungen Wiederholungsmessungen durch angedockte Schiffe vorzunehmen zu können.

6.3.3.1 Messsystem

Das Messsystem besteht aus einem 5 m hohen Turm, an dessen Spitze ein Rundumsicht-Sonarkopf (Scanning Sonar) angebracht ist. Dieser ermöglicht kontinuierliche Messungen über den vollen 360° Bereich. Die Nominalfrequenz des Sonars beträgt 330 kHz. Der horizontale Öffnungswinkel ist 1,7°, der vertikale 60°. Die mechanische Auflösung erlaubt Messungen in 0,225° Schritten. Es können verschiedene Reichweiten (Sichtweiten) gewählt werden. Das System wird über Kabelverbindung vom Schiff aus betrieben. Die Messergebnisse werden als Ausdruck auf einem Farbplotter dargestellt. Sie können alternativ auch ausgelesen und als Datenspeicher gesichert werden.

6.3.3.2 Messungen

Für die Messungen der Verklappung wurde eine Reichweite (Radius des Sonarbildes) von 100 m gewählt. Der Durchmesser der unten dargestellten Sonarbilder beträgt 200 m. Die Wassertiefe betrug ca. 18,5 m. Damit befand sich der Sonarkopf ca. 13,5 m Tiefe unter der Wasseroberfläche.

6.3.3.3 Ergebnisse

Die vier folgenden Bilder stellen Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten dar.

|

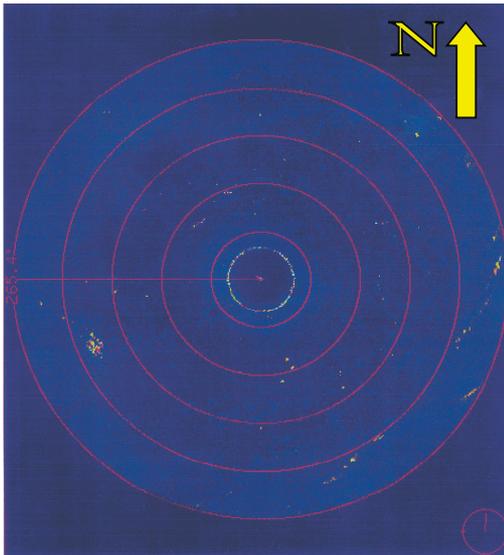


Abb. 6-12: Die erste Abbildung (DYNAS9.RSD) zeigt ein Bild unmittelbar vor Beginn der ersten Verklappung. In ca. 70 m Entfernung in Richtung von 240° ist der Anker der MS Rosenort als starkes Echo erkennbar. Weitere Strukturen, insbesondere vom Meeresboden sind auf dieser Aufnahme nicht erkennbar.

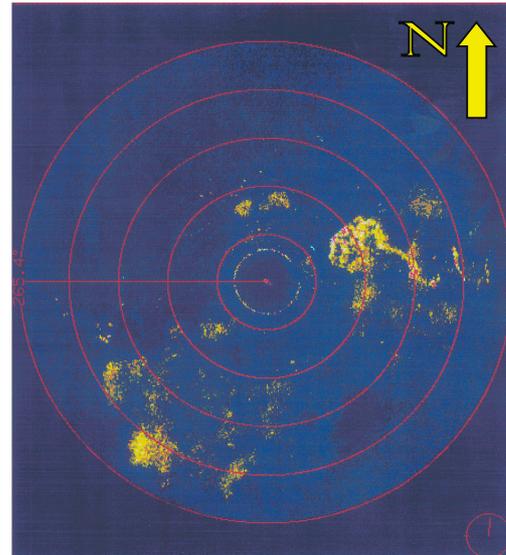


Abb. 6-14: Die dritte Abbildung (DYNAS12.RSD) gibt das Ergebnis einer Messung 30 Minuten nach der Verklappung wieder. Der Rumpf der Schute ist nicht erkennbar. Es zeigen sich mehrere diffuse Wolken in der Wassersäule, die eine Bewegung nach Westen andeuten. Diese Beobachtung ist in Übereinstimmung mit hydrographischen und Strömungsmessungen, die am 21.6.01 in der gesamten Wassersäule westliche Strömungen belegen. Ebenfalls erkennbar ist der Anker der MS Rosenort. Da auf der Schute noch nicht begonnen worden war, das Restmaterial auszuspülen, ist auszuschließen, dass die beobachteten Reflexionen von künstlich erzeugten Blasenwolken herrühren.

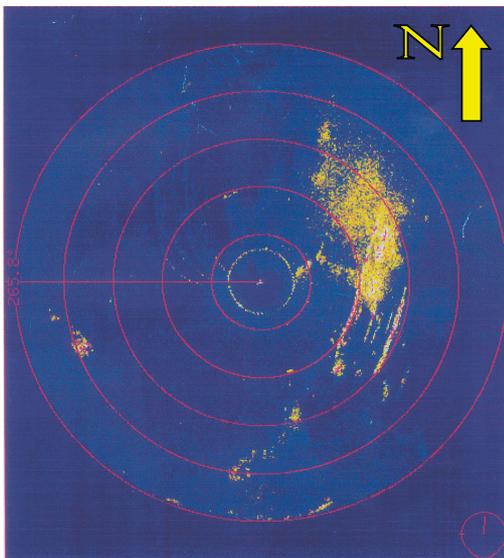


Abb. 6-13: Die zweite Messung (DYNAS10.RSD) wurde gleichzeitig mit dem Öffnen des Schute (Verklappungsbeginn) gestartet und dauerte etwa 4 Minuten. In östlicher Richtung sind bei 40 m und 60 m Entfernung in 15° ausgerichtete lineare Strukturen zu erkennen, die dem Unterwasserschiff des Klappschute zuzuordnen sind. Die Schute war sehr langsam aus Süd in das Verklappungsgebiet eingelaufen. Die diffusen Echos im NO-Quadranten stammen von der Suspensionswolke des verklappten Materials. Schraubenwasser der Schute ist offenbar nicht beobachtet worden.

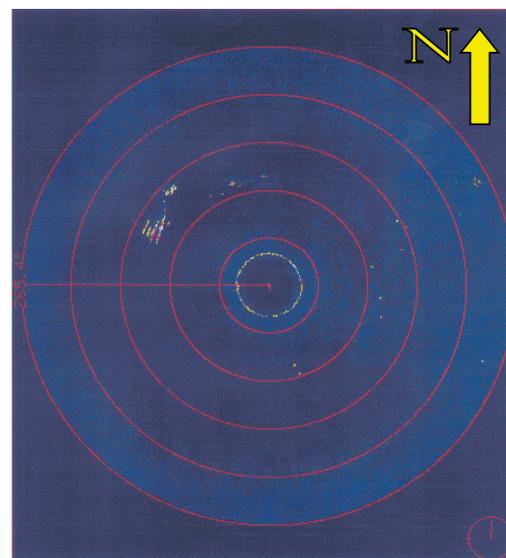


Abb. 6-15: Die vierte Abbildung (DYNAS13.RSD) stellt das Ergebnis einer Messung $4\frac{1}{2}$ Stunden nach der Verklappung dar. In einer Entfernung von 50 m unter 290° ist der Anker der MS Rosenort, die zwischenzeitlich ihre Position geändert hatte, zu erkennen (der Messturm blieb an seiner alten Position). Weder aus der Wassersäule noch vom Meeresboden sind Echos zu erkennen. Zunächst überraschend ist das Ergebnis, dass vom Meeresboden keine Echos erkennbar sind. Das verklappte Material auf dem Meeresboden hätte erkennbar sein müssen.

Hydrographische Messungen während des Experimentes ergaben, dass sich sowohl in 12 m als auch in 16 m Tiefe deutliche Sprungschichten in Salzgehalt und Temperatur ausgebildet hatten. Mit einer Höhe von 5 m über dem Boden befand sich der Sonarkopf in ca. 13,5 m Wassertiefe genau zwischen beiden Sprungschichten. Die untere Sprungschicht verhinderte offenbar, dass der Meeresboden akustisch überhaupt erfasst wurde. Damit konnte mit der ersten Messung vor der Verklappung kein Bild über den Urzustand des Meeresbodens vor der Verklappung gewonnen werden. Zu einem späteren Zeitpunkt nach dem Experiment im Abstand mehrerer Wochen konnten keine weiteren Messungen durchgeführt werden, da der Messturm kurz nach dem Verklappungsexperiment durch widrige Umstände beschädigt wurde und geborgen werden musste.

6.3.3.4 Zusammenfassung

- (1) Die Messungen mit dem Rundumsicht-Sonar belegen eine westliche Transportrichtung des verklappten Materials am 21.6.2001.
- (2) Es ist deutlich erkennbar, dass suspendiertes Material noch 30 Minuten nach der Verklappung in der Wassersäule oberhalb der Sprungschicht in 16 m Tiefe vorhanden war.
- (3) Sprungschichten unterhalb des Sonarkopfes verhinderten die akustische Erfassung des Meeresbodens im Zeitraum um das Experiment (Abschirmung).

6.3.3.5 Ökologische Auswirkungen auf die Makrofauna

(J. Kleine)

In einem begleitenden Projekt der BfG wurden die ökologischen Auswirkungen des Baggerguts auf die benthischen Makroinvertebraten anhand der DYNAS-Testverklappung im Freiland und mit Überschüttungsexperimenten im Labor untersucht. Das Untersuchungsgebiet wurde vor und 2 Wochen nach der Verklappung beprobt. Sowohl bei Artenvorkommen als auch bei der Artenabundanz der beiden Klappfelder Sand und Mergel zeigten sich in der Vorher-Situation keine Unterschiede. Die Gesamtindividuenzahl lag bei 1233 ± 20 bzw. 1134 ± 19 Individuen/m². Auf dem Klappfeld Sand wurden 34, auf dem Klappfeld Mergel 36 Taxa gefunden. Bei den Proben die nach der Verklappung genommen wurden zeigte sich ein anderes Bild. Im Randbereich der Mergelverklappung verringerte sich die Gesamtindividuenzahl auf 560 ± 19 Individuen/m² die der Sandverklappung sogar auf 255 ± 11 Individuen/m². Der Rückgang der gefundenen Taxa war mit 30 bei der Sandverklappung und 24 bei der Mergelverklappung weniger ausgeprägt.

Tab. 6-4: Einfluß der Verklappung auf die Abundanzen der Makrofauna.

Ind./m ²	Klappfeld Sand			Klappfeld Mergel		
	Vorher	Nachher	Abnahme [%]	Vorher	Nachher	Abnahme [%]
Polychaeta	479	65	86	379	116	69
Mollusca	241	56	77	232	225	3
Crustacea	490	128	74	513	215	58
Sonstige	22	7	68	10	3	68

Vergleicht man die Prozentuale Abnahme der Individuen/m² so wird der große Einfluss der Verklappung auf das Makrozoobenthos und. eine Abnahme der Individuenzahlen von mindestens 60 % deutlich.

Bei dem Verschüttungsexperiment im Labor wurden ausgewählte Vertreter des Makrozoobenthos der Mecklenburger Bucht in Plexiglasröhren (Ø 10 cm, Höhe 60 cm) mit zwei der DYNAS-Verklappung ähnlichen Mischsedimenttypen überschüttet. Der erste Ansatz wurde mit den Bivalviern *Arctica islandica*, *Mya arenaria* und *Macoma balthica* bestückt. Diese wurden mit den zwei künstlich hergestellten Mischsedimenten zu zwei Überschüttungshöhen (15 und 40 cm) verklappt.

Für den zweiten Ansatz wurden die Polychaeten *Harmothoe sp.*, *Pectinaria koreni* und *Nephtys sp.* ausgewählt. Hier wurde allerdings auf Größe und Lebensweise Rücksicht genommen und die Überschüttungshöhen für *Harmothoe sp.* und *Pectinaria koreni* bei 10 und 20 cm gewählt. Die Überschüttungshöhen bei *Nephtys sp.* betragen 20 und 40 cm.

Arctica islandica wurde zu einem hohen Prozentsatz bei beiden Sedimenten verschüttet und reagierte sehr schlecht auf die Verklappung. Die filtrierende Muschel *Mya arenaria* reagierte auf die Verklappung zu einem hohen Prozentsatz mit Graben, manche stellten mit dem Siphon wieder einen Kontakt zur Oberfläche her, was als durchgegraben gewertet wurde. Einen noch höheren Prozentsatz an durchgegrabenen Individuen zeigte *Macoma balthica*. Die in beiden Mischsedimenten vorhandenen Mergelbrocken, schafften bis zu einer bestimmten Größe, wassergefüllte Hohlräume die von *Macoma balthica* und *Mya arenaria* als „Ruheareale“ genutzt werden konnte und sich so positiv auf die Freigrabebemühungen auswirkten. Überschritten sie diese Größe, so dass sie die Fläche innerhalb der Plexiglasrohre „versiegelten“ verschlechterten sie die Chance auf das Freigraben, da keine der Muscheln sie direkt durchdringen konnte.

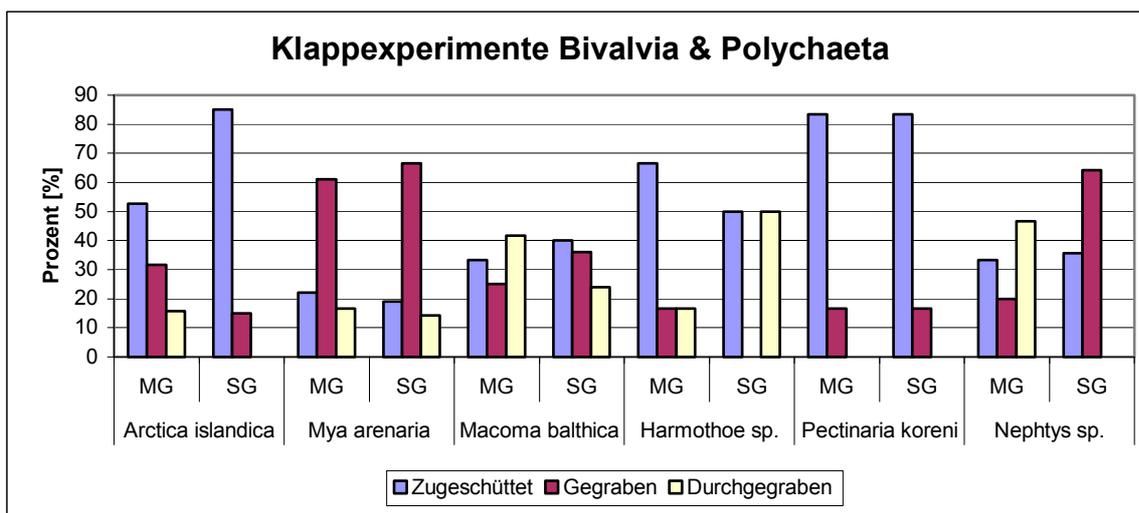


Abb.6-16 Reaktion der Makroinvertebraten auf eine Verklappung im Labor, **Mg** = Mergelgemisch, **Sg** = Sandgemisch, **Zugeschüttet** = keine Reaktion, **Gegraben** = Zurücklegen einer Grabstrecke im Klappsediment, **Durchgegraben** = Kontakt zu Sedimentoberfläche hergestellt.

Die 3 ausgewählten Polychaeten bei dem zweiten Ansatz spiegeln die drei möglichen Lebensräume der Polychaeten im Sediment wieder. Der epibenthisch und

zum Teil auch hemipelagisch lebende Schuppenwurm *Harmothoe sp.* reagiert zwar empfindlich auf die Verklappung (mindestens 50 % zugeschüttet) doch zeigte er bei geringen Überschüttungshöhen (18 %) und im Sandgemisch (50%) die Fähigkeit auf die Verklappung zu antworten. Der Röhrenbauende Polychaet *Pectinaria koreni* hat kaum eine Überlebenschance bei einer Verklappung, da die Grabkapazitäten meist beschränkt sind und der Körper zu fragil ist. Im Experiment wurden in beiden Sedimenten 90 % verschüttet. Der endobenthisch lebende Polychaet *Nephtys sp.* zeigte die beste Reaktion auf die Verklappung. 21 % gruben sich bis zur neuen Sedimentoberfläche problemlos und in der kürzesten Zeit durch. Wie auch bei den Bivalviern bestimmte der Anteil und die Größe des Mergels maßgeblich den Erfolg sich durchgraben zu können.

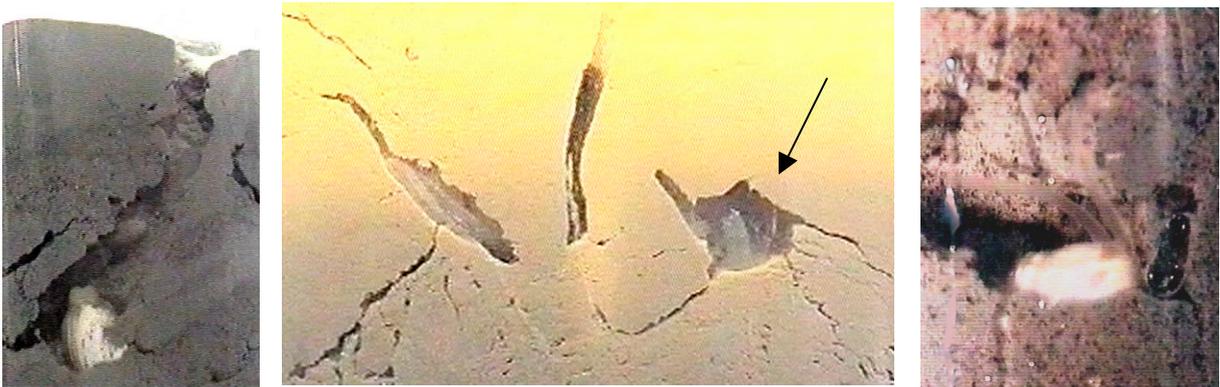


Abb.6-17 Grabspuren von *Mya arenaria* (1) und *Macoma balthica* (2)+(3);(1) *Mya arenaria* durchgegraben, (2) *Macoma* in Oberflächennähe, Pfeil = Siphon, (3) *Macoma balthica* mit Siphonen.

7 Modellierung

7.1 Übersicht

(J. Harff)

Abb. 7-1 gibt einen Überblick über das Bearbeitungsschema von Daten im Forschungsprojekt DYNAS. Unter Modellierung im Sinne dieses Schemas wird die Ableitung von Sekundärdaten aus primären Forschungsdaten verstanden.

Das betrifft sowohl die Bestimmung von Parametern für Sedimenttypen, die als Schätzungen der Parametern von Verteilungsfunktionen aufgefasst werden, als auch die Berechnung von abgeleiteten Variablen aus Primardaten auf Grund empirisch oder theoretisch gewonnener Beziehungen zwischen den Variablen. Als Modelldaten werden ebenso Ergebnisse von räumlichen Interpolationen aufgefasst, die auf Grund von Modellannahmen der Parameterfunktionen von Zufallsfeldern gewonnen werden. Im Zentrum steht die Anwendung des im Rahmen des Projektes entwickelten Sinkstofftransportmodells auf den Seebereich zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonabecken. Dabei sollen die natürlichen Transportwege für unterschiedliches partikuläres Material bei wechselnden hydrographischen Bedingungen untersucht werden. Weiterhin sollen die Verteilungsmuster resuspendierter Partikel aus einem Klappstellenbereich von Baggergut bestimmt und Szenarien für variierende Bedingungen berechnet werden. Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen werden als Modelldaten visualisiert.

Für das Datenmanagement wurde ein projektspezifisches System entwickelt, das im Jahresbericht 2000 erläutert ist.

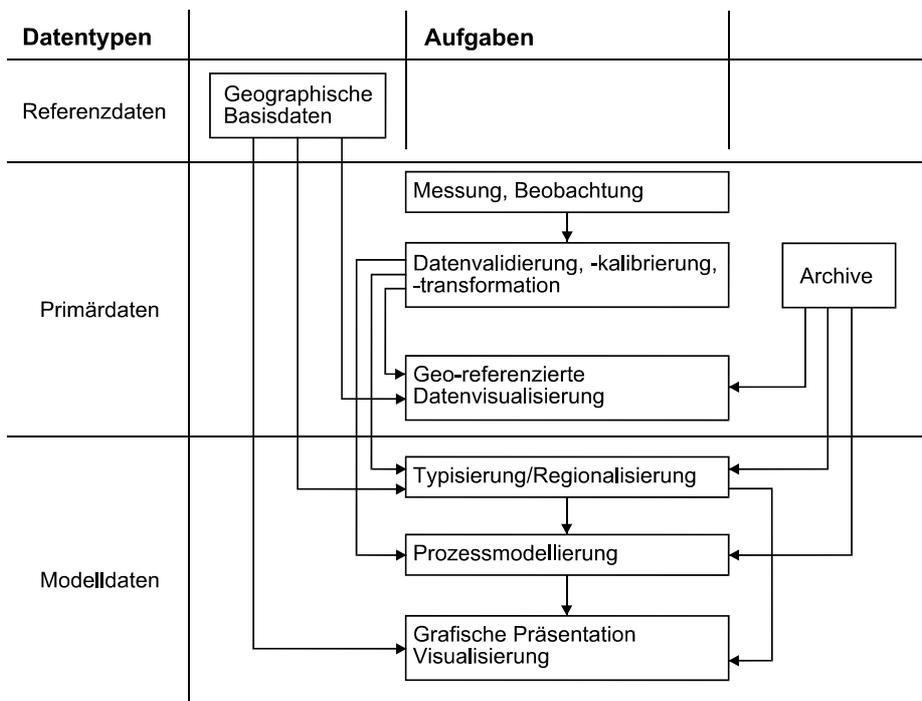


Abb. 7-1 Bearbeitungsschema für Daten im Rahmen des Verbundprojektes DYNAS (modifiziert nach Harff 1997).

7.2 Sekundärdaten

(S. Forster, B. Bobertz)

Ein typisches Beispiele für Sekundärdaten sind die mittlere Korngröße oder die Permeabilitätsabschätzung nach Krumbein & Monk (1942). Die Bestimmung der Permeabilität ist aufwendig, was eine flächenhafte Ermittlung dieser Größe ausschließt. Für eine großräumige Darstellung, Interpretation und somit für eine Unterstützung der Planung weiterer Messkampagnen muss auf Sekundärdaten ausgewichen werden, die sich aus flächenhaft vorhandenen Daten, wie z.B. Korngrößenparameter (Median, Sortierung) berechnen lassen. Hierbei kommen häufig empirisch ermittelte Zusammenhänge und Gleichungen zur Anwendung.

Im Rahmen der Arbeiten in DYNAS prüften wir den Zusammenhang von Permeabilität und Korngrößenparametern um dann die Verteilung der Permeabilität von Oberflächensedimenten der südlichen Ostsee abzuleiten (Forster et al. *subm.*; siehe auch Anlage 2).

Die Permeabilität ist ein Schlüsselfaktor für die Einschätzung der Stoffumsätze in sandigen Sedimenten, die noch nicht ausreichend verstanden werden (SCOR-WG 114; Boudreau et al. 2001). Permeable Sedimente zeigen unter Einfluss von Strömung, Wellen und Bioturbation Transportphänomene, die den Umsatz von Kohlenstoff stimulieren und die benthisch-pelagische Kopplung intensivieren. Somit stellt die Kenntnis der Verteilung dieser Sedimenteigenschaft eine Grundlage für zukünftige Einschätzungen des Umsatzes am Meeresboden dar.

Der Vergleich von Messungen der Permeabilität sandiger Oberflächensedimente aus dem Untersuchungsgebiet mit Berechnungen aus Korngrößenverteilung nach Krumbein & Monk (1942) ergab eine Überschätzung der Permeabilität um einen Faktor 2.6, während noch größere Abweichungen bei Berücksichtigung der Porosität nach der Carman–Kozeny Relation (Niield & Bejau 1992) auftraten. Wahrscheinlichste Gründe für diese Abweichungen sind die vertikalen Heterogenität in Körnung, Wassergehalt und organischem feinem partikulären Material, die wiederholt beobachtet wurde.

Es wurden Korngrößenparameter (mittlere Korngröße, Sortierungsgrad) aus den Primärdaten zweier unterschiedlicher Quellen abgeleitet - aus dem umfangreichen Datenarchiv des IOW und der von Bohling neu erhobenen Daten zur Korngrößenverteilung in der Mecklenburger Bucht. Diese Parameter wurden nach Krumbein & Monk (1942) in eine Permeabilität umgerechnet und mittels des von uns festgestellten Faktors 2.6 korrigiert. Das Ergebnis für den Archivdatensatz ist in Abb.7-2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht alle als Sand klassifizierten Bereiche für advective Durchströmung hinreichend permeabel sind (Schwellenwert $k > 2.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$). Etwa 30% des Meeresbodens sind in diesem Sinne impermeabel, mehr als 47% sind permeabel und weitere 23%, die wegen des schlechten Sortierungsgrades außerhalb der Gültigkeit der empirischen Formel nach Krumbein & Monk (1942) liegen, müssen intensiver untersucht werden. Auf Grund der o.g. Berechnungen ist ihre Lage nun weitgehend bekannt.

Prinzipiell kann diese Karte nun als Basis für regionale Korrelationen mit Strömungsdaten herangezogen werden und somit der Lokalisierung von Sedimenttypen dienen, die im o.g. Sinne strömungsbedingt advektiv beeinflussten Umsatz zeigen. Auch in Kombination mit Makrozoobenthosorganismen ist dies ein weiterer Schritt zu regionalen Abschätzungen von z.B. biogener Porenwasserirrigation.

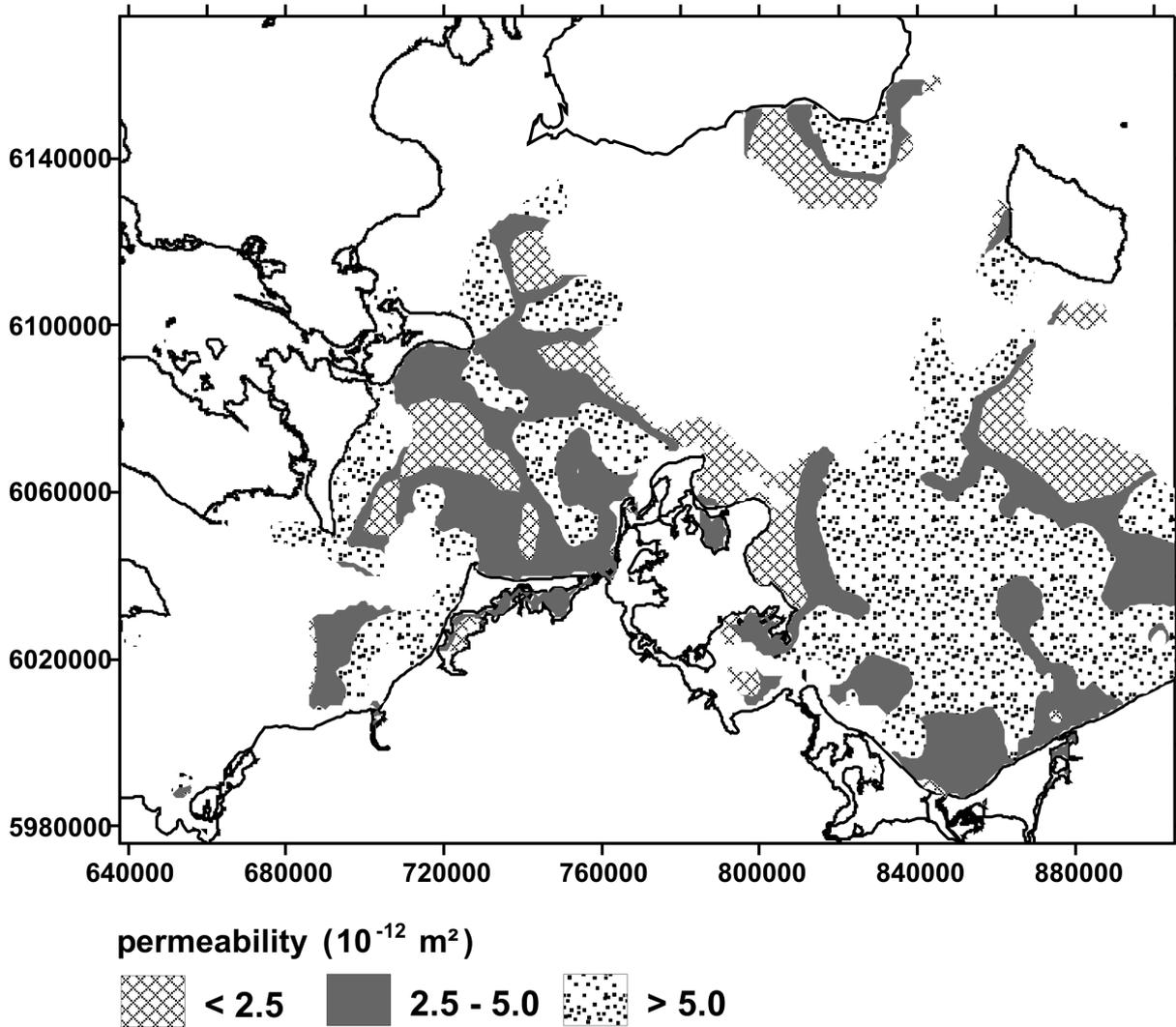


Abb.7-2 Regionale Verteilung der Sedimentpermeabilität. Karte basiert auf einem Archivdatensatz, Berechnungen nach Krumbein & Monk (1942) und der Reduktion der Werte um den Faktor 2.6. Weiße Gebiete sind auf Grund der schlechten Sortierung (< 0.7) von der Berechnung ausgenommen.

7.3 Parametrisierung des IOW-Sedimenttransportmodells

(B. Bobertz, J. Harff)

Ziel ist es, flächendeckende Informationen über den Meeresboden beschreibende Parameter für das IOW-Ostseemodell zu gewinnen. Diese dienen als Eingabeparameter für das Sedimentmodul (siehe Abschnitt 7.4) des Modells. Von entscheidender Bedeutung sind hier:

- die **mittlere Korngröße** m_d ,
- die **kritische Schubspannung** u^* ,
- die **Rauhigkeitslänge** z_0 .

7.3.1 mittlere Korngröße (md)

Daten über die Granulometrie der Oberflächensedimente in der liegen für die westliche Ostsee vor. Diese wurden im Rahmen eines BMBF-Projektes von 1992-1996 (Förderkennzeichen BMBF-03F0079A) aus dem Daten-Fundus des ehemaligen Institutes für Meeresforschung der DDR zusammengetragen, aufbereitet und digital erfasst und so einer weitergehenden Nutzung zugänglich gemacht (Harff et al., 1997).

Tauber (1995) entwickelte eine Methode um von einzelnen Datensätzen dieses stark heterogenen Datenmaterials granulometrische Parameter (median, sorting) abzuleiten, welche über den gesamten Datenfundus vergleichbar sind. Diese Methode wurde von Bobertz (2000) erweitert, um auch asymmetrische Verteilungen mittels eines Schiefeparameters (skewness) zu beschreiben (Gleichung 7-1).

$$F(x) = \begin{cases} \left(1 + e^{-1.7 \frac{x-med}{so-sk \cdot \tanh(z)}} \right)^{-1}, & so > sk \cdot \tanh(z) \vee sk = 0 \\ 1, & so \leq sk \cdot \tanh(z) \wedge sk > 0 \\ 0, & so \leq sk \cdot \tanh(z) \wedge sk < 0 \end{cases} \quad (7-1)$$

- F* .. Wert der Kornsummenkurve an der Stelle *x* (phi Skale Krumbein, 1934)
x .. Korngröße auf der phi Skale
med .. "median"
so .. "sorting", (*so* > 0)
sk .. "skewness"

Zur Anpassung der Parameter-Werte an einen gegebenen Korngrößendatensatz implementierte Bobertz (2000) einen auf einer Evolutionsstrategie beruhenden Algorithmus (Rechenberg, 1973). In diesem werden die anzupassenden Parameter als Genom eines Individuums einer Population kodiert. Dem evolutionären Prinzip des "survival of the fittest" Individuum (Darwin, 1859) folgend wird der Genpool der Population durch Mutation, Kombination und Selektion iterativ optimiert. Als Maß für die Fitness eines Individuums dient die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den Datenpunkten und den Funktionswerten welche sich an den entsprechenden Stellen. Die konkreten Werte für die Parameter der unter (1) angegebenen Funktion sind im Genom des Individuums enthalten. Die Individuen erzeugen Nachkommen indem sie paarweise zufällige Teile ihres Genoms kombinieren. Die Wahrscheinlichkeit für die Reproduktion eines Individuum steigt mit dem Grad seiner Fitness. Das Genom der einzelnen Nachkommen wird anschließend mutiert, indem die Parameter um Werte einer gaußnormalverteilten Zufallsvariablen verändert werden. Die genutzte Anpassungsprozedur ist robust gegenüber ungünstigen Startwerten und auftretenden lokalen Optima. Die methodenbedingten minimalen Ergebnisabweichungen (kleiner +/-0.001) verschiedener Optimierungsdurchläufe ist für die weiterfolgende Verarbeitung irrelevant.

Der Parameter median und sorting sind mit den entsprechenden Werten nach Folk und Ward (1957) vergleichbar. Der Parameter skewness wurde in diese Studie nicht mit einbezogen.

Jeder Datensatz des oben genannten Datenfundus wurde der Anpassungsprozedur unterzogen. Die resultierenden Werte für die Parameter median und sorting wurden mittels Block-Kriging (Journel & Huijbregts, 1978) auf das Modellgitter interpoliert, um

Aussagen über die mittlere granulometrische Beschaffenheit der Oberflächensedimente innerhalb einer Modellbox zu erhalten (siehe Abb. 7-3). Als Inputparameter md wurde der Korngrößenparameter median genutzt. Um in den Gebieten außerhalb der westlichen Ostsee md für das Modell zur Verfügung zu stellen, wurden Karten zur Verteilung von Oberflächensedimenten analysiert und die dort präsentierten Sedimenttypen nach dem nachfolgenden Abschnitt dargelegten Methodik einem einheitlichen Klassensystem zugeordnet. Jeder Klasse ist eine mittlere Korngröße und somit md zugeordnet.

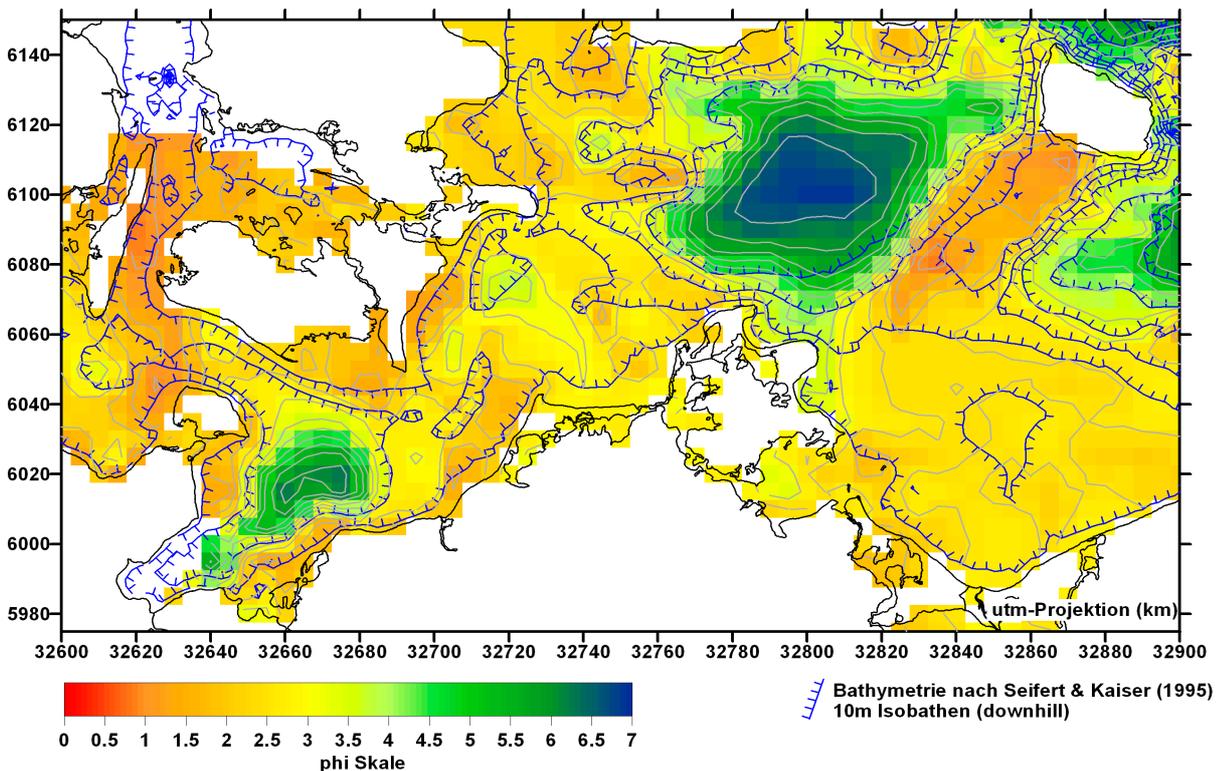


Abb. 7-3: Auf das 3sm-Modellgitter interpolierter Korngrößenparameter median nach Bobertz (2000). Zur besseren Übersicht sind geglättete Isolinien der Bathymetrie und des median mit dargestellt.

7.3.2 kritische Schubspannung (u^*)

Die kritische Schubspannung kann nicht flächendeckend bestimmt werden. Um trotzdem Informationen über die Werte dieses Parameters zu erhalten, wurde das Proxy-Target-Konzept angewandt.

Dieses Konzept geht davon aus, dass Informationen über den Zielparameter (Target) in begrenztem Umfang vorliegen. Weiterhin wird angenommen, dass ein Parameter existiert, der eine Korrelation zum Target aufweist (Proxy). Dieser Proxy muss flächendeckend für das untersuchte Gebiet vorliegen.

Im DYNAS-Schlüsselgebiet wurden von Bohling (siehe 5.1) verschiedene Sedimentparameter bestimmt. Aufgrund dieser Untersuchungen konnten 6 Sedimenttypen unterschieden und für diese u^* ermittelt werden. Über den Sedimenttyp sind somit im Schlüsselgebiet (lokal) Informationen zum Target-Parameter (u^*) verfügbar.

Für u^* liegt eine Abhängigkeit zur mittleren Korngröße vor (Miller et al. 1977, Soulsby 1997). Die mittlere Korngröße und somit indirekt der Sedimenttyp kann als Proxy verwendet werden.

Informationen über die Sedimentbedeckung in der Ostsee liegen in unterschiedlicher Qualität und Detailauflösung vor (Emelyanov et al. 2001, Bobertz 2000, Tauber et al. 1999, Repecka & Cato 1998, Emelyanov et al. 1998, Jensen et al. 1996, Tauber & Lemke 1995, Emelyanov et al. 1994, Nielsen 1992b, SHD-DDR 1987). Diese Daten wurden evaluiert, selektiert, kombiniert und in die Sedimenttypen des Sedimentmoduls transformiert. Aus technischen Gründen sind im Sedimentmodul vorläufig 4 Typen festgelegt worden (Tab. 7-2).

Als besonders sensitiv in Hinblick auf die Genauigkeit der Sedimenttypenverbreitung ist der Bereich der südwestlichen Ostsee anzusehen, da hier der Fokus der Betrachtungen zum Sedimenttransport liegt.

Für den größten Teil der südwestlichen Ostsee liegen Korngrößendaten vor (Bobertz 2000, Tauber 1995). Von diesen wurden die Korngrößenverteilung beschreibende Parameter (Median, Sortierung) abgeleitet. Die Klassifikation von Bohling beruht überwiegend auf der mittleren Korngröße und der Sortierung des Sediments. Diese beiden Parameter können somit genutzt werden, um die Klassenbeschreibung aus dem Schlüsselgebiet direkt auf die Korngrößenparameter im Zielgebiet zu übertragen.

Als Prozedur kam eine Diskriminanzanalyse zur Anwendung. Die ursprüngliche Einteilung in 6 Klassen im Schlüsselgebiet wurde zuvor auf 3 Klassen reduziert um den technischen Einschränkungen des Sedimentmoduls gerecht zu werden (eine 4. Klasse ist für Festgestein reserviert). Die aus dem Schlüsselgebiet stammenden Daten weisen eine stark geclusterte Verteilung im Merkmalsraum auf. Das machte eine manuelle Korrektur der Klassengrenzen notwendig. Um die lokal stark heterogene Verteilung des Zieldatensatzes (südwestliche Ostsee) sowohl im geographischen als auch im Merkmalsraum auszugleichen, wurden die auf ein Gitter interpolierten Werte für Median und Sortierung (Bobertz 2000) als Target genutzt (Abb. 7-3).

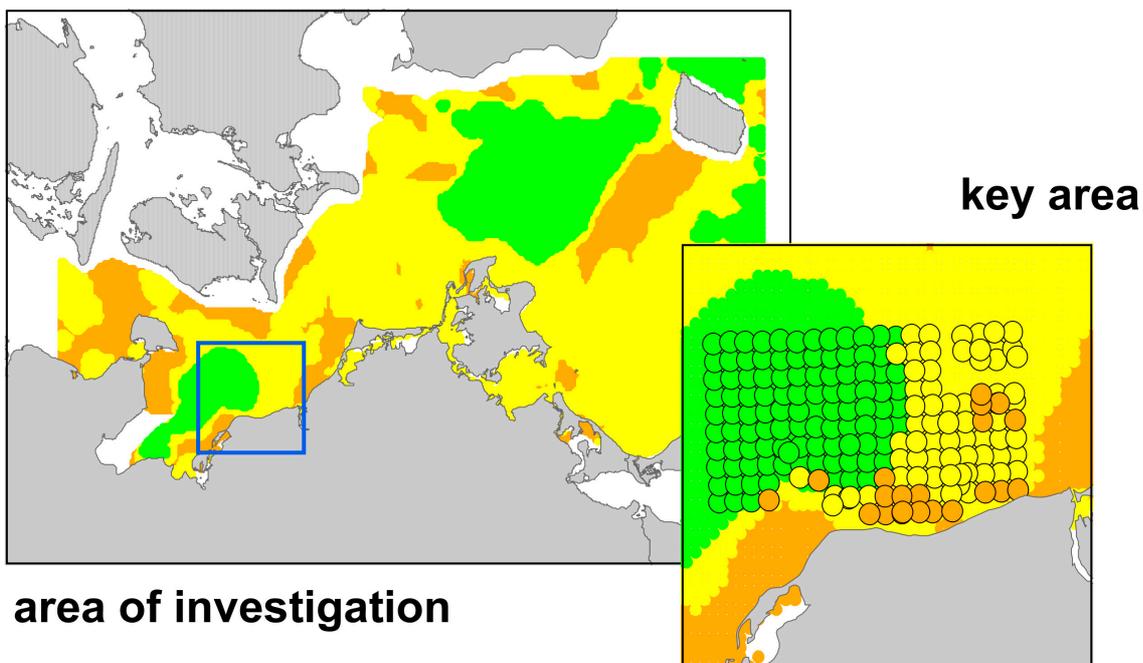
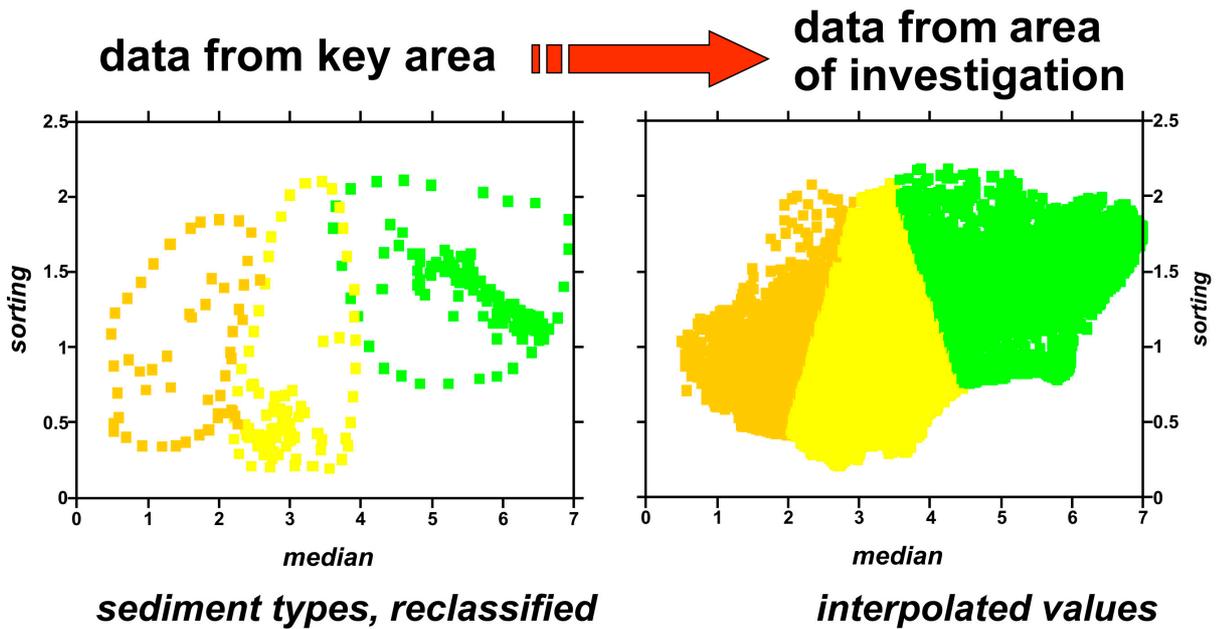


Abb. 7-4: Übertragung der Klassifikation aus dem Schlüsselgebiet in das Untersuchungsgebiet (südwestliche Ostsee).

Die verbleibenden (großen) Lücken in der Abdeckung durch Sedimentdaten wurden durch Integration von verschiedenen Datenquellen (Sedimentkarten) geschlossen. Die dort genutzten Klassifikationen wurden nach ihrer Ähnlichkeit zu den im Sedimentmodul verwendeten 4 Klassen manuell übertragen. In Gebieten mit sich überschneidenden Datensätzen wurde diejenige Quelle genutzt, die in einer höheren Auflösung vorlag.

Ingesamt wurden folgende Quellen genutzt:

Tab. 7-1: Datengrundlagen für die Erstellung der Modellsedimenttypenkarte.

Quelle	Bereich	Bemerkung
SHD-DDR, 1984	Mecklenburger Bucht	Kartenmaterial digitalisiert von Meyer (2002)
Repecka & Cato, 1998	zentrale Ostsee	digital publiziert als ArcView-Daten
Winterhalter et al., 1981	gesamte Ostsee	digitalisiert im Rahmen von DYNAS von Bobertz (2002)
Bobertz, 2000	südwestliche Ostsee	Korngrößendaten

Die resultierende Karte (Abb.7-5) reflektiert die generelle Sedimentverteilung in der Ostsee, weist jedoch in den Übergangsbereichen der Datenquellen scharfe Grenzen und teilweise Unstimmigkeiten auf. Diese Fehler können jedoch in Hinblick auf die Reichweite des Sedimenttransports in den untersuchten Zeiträumen vernachlässigt werden. Abschließend wurden dem 3sm- und 1sm-Raster des IOW-Ostseemodells die entsprechenden Sedimenttypen zugewiesen.

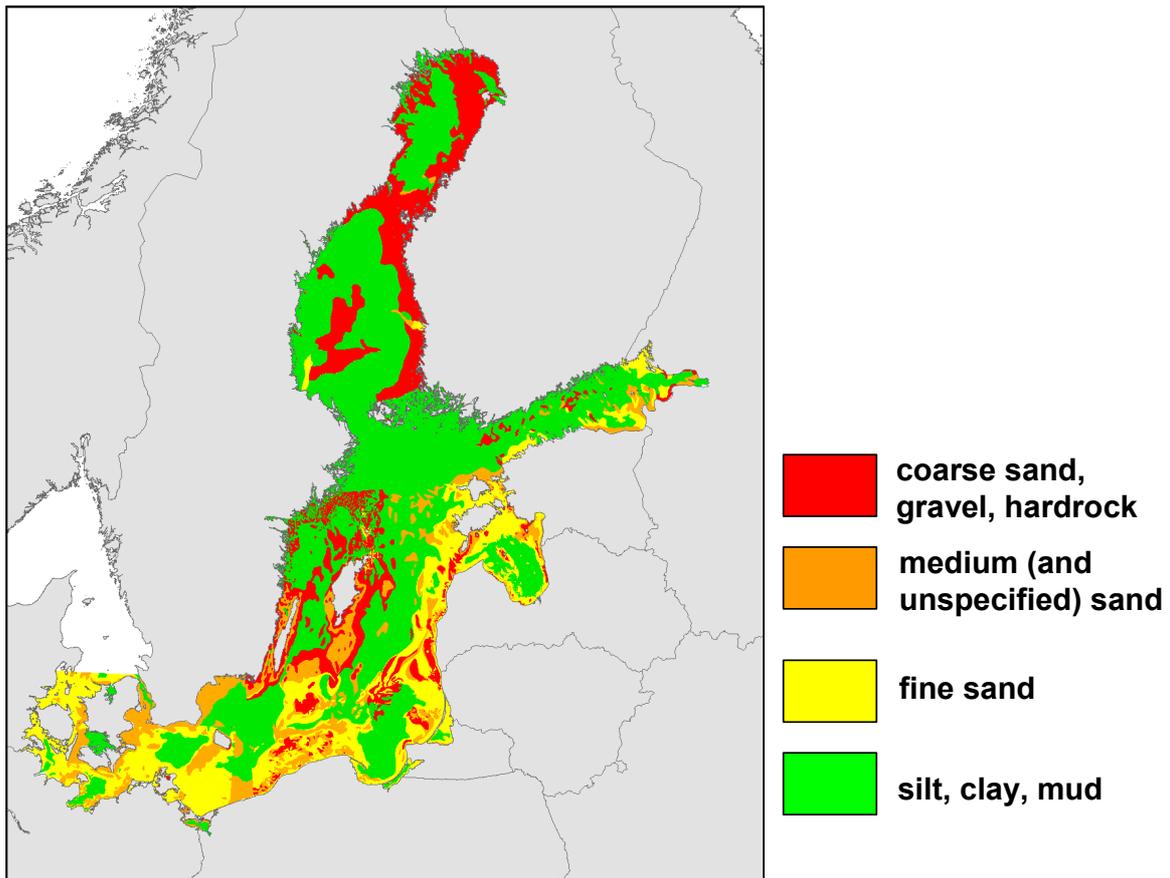


Abb.7-5: Verteilung der 4 Sedimenttypen als Eingangsparameter für das Sedimentmodules in der Ostsee.

7.3.3 Rauigkeitslänge (z_0)

In dieser Phase von DYNAS werden zwei Arten von Rauigkeitslängen unterschieden:

- (1) die aus der mittleren Korngröße abgeleitete granulometrische Rauigkeitslänge (z_0^{sed}) und
- (2) die durch biogene Strukturen hervorgerufene biogene Rauigkeitslänge (z_0^{bio}).

granulometrische Rauigkeitslänge z_0^{sed}

Die Abschätzung von z_0^{sed} erfolgt über eine Gleichung nach Soulsby (1997). Aus den zugehörigen mittleren Korngrößen der Sedimentklassen wird z_0^{sed} direkt über die Verteilung der Sedimenttypen in der gesamten Ostsee abgeschätzt.

biogene Rauigkeitslänge z_0^{bio}

Die Annäherung von z_0^{bio} wird über eine Beziehung zwischen dem Bedeckungsgrad des Meersbodens durch biogene Strukturen und deren mittleren Höhe realisiert (Dade et al. 2001). Dazu sind Annahmen zur typischen Geometrie der Strukturen sowie Bestimmungen von Abundanzen notwendig.

Bezüglich der Abundanz von Arten liegt keine den Sedimentkarten vergleichbare Datendichte vor. Im Untersuchungsgebiet für den Sedimenttransport existiert jedoch ein umfangreicher Datensatz (siehe 5.2.1.2), welcher die für die Ermittlung von z_0^{bio} notwendigen Informationen über verschiedene benthische Arten beinhaltet.

Aufgrund der Größe ihrer biogenen Strukturen und dem daraus zu erwartenden starken Einfluss auf z_0^{bio} wurden in der ersten Phase von DYNAS die Arten *Mytilus edulis* und *Arenicola marina* für die weitere Bearbeitung ausgewählt.

Die im Abschnitt 5.2.1.2 präsentierten Artverteilungskarten bieten keine flächendeckende Informationen über die Abundanzen. Aus der nachfolgenden Analyse des Datensatzes ergab sich die Notwendigkeit, eine eigene Methodik zur Interpolation der Abundanzwerte zu entwickeln.

Der Datensatz ist in Hinblick auf die Beprobung sowohl räumlich als auch zeitlich als stark inhomogen zu charakterisieren. Die Abundanzen weisen scheinbar keine räumlichen Abhängigkeiten auf. Weiterhin sind an identischen Stationen zu verschiedenen Zeiten erhebliche Unterschiede in den Abundanzen anzutreffen. Diese Fakten schließen eine direkte Interpolation der Abundanzwerte mittels üblicher Interpolationsverfahren, wie z.B. Kriging (Deutsch & Journel 1992), aus.

Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein räumlich korreliertes, regionales Muster der Besiedlung existiert, welches durch starke lokale und saisonale Faktoren überlagert ist.

Für die Parametrisierung im Sedimentmodul wurde deshalb das nachfolgende Konzept entwickelt:

Um der vorliegenden räumlichen und zeitlichen Verteilung der Daten gerecht zu werden, wird ein Zufallsfeld Z angenommen, welches in der Umgebung U um einen Modellgitterknoten definiert ist. Der Autokorrelationsradius r für Z liegt in der Größenordnung der biogenen Strukturen selbst. Alle in U auftretenden Realisierungen von Z liegen außerhalb von r und sind somit unabhängig voneinander. Es wird weiterhin angenommen, dass die Wahrscheinlichkeitsfunktion f_Z innerhalb von U gleich ist und die zugehörigen Parameter konstant sind. Unter diesen Voraussetzungen kann man

aus den in U liegenden Realisierungen (Werte für die Abundanz) die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion f_Z von Z schätzen.

Als Umgebung wird der Bereich mit einer Entfernung kleiner als der halbe Modellgitterabstand um einen Modellgitterknoten definiert (z.B. im 3sm-Modell eine Kreisfläche mit dem Radius von $1.5sm$). Der Wertebereich von Z wird in eine Reihe von Klassen zerlegt. Hierzu wird eine Reihe von Schwellwerten S ($S = \{s_0, s_1, \dots, s_m\}$, $s_0 < s_1 < s_2 < \dots < s_m$) festgelegt, deren kleinstes Glied $s_0 = 0$ und deren größtes Glied s_m gleich dem Maximum der auftretenden Abundanzen in der Umgebung U ist. Anschließend wird für jeden Schwellwert s_i die Anzahl k_i der Werte mit einer Abundanz a_i ermittelt, die kleiner oder gleich dem Schwellwert s_i ist. Die so gewonnenen (kumulativen) absoluten Häufigkeiten $\{k_i\}$ werden in relative Häufigkeiten $\{n_i\}$ transformiert. Die Wertepaare $\{s_i, n_i\}$ stellen die empirische kumulative Verteilung der gesuchten Wahrscheinlichkeitsfunktion f_Z des Zufallsfeldes Z dar. In erster Näherung kann, unter Annahme einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktion, f_Z durch eine lineare Regression bestimmt werden. Dieser Weg wurde im derzeitigen Stadium der Arbeit beschritten. Mit Hilfe der zu f_Z inversen Funktion ${}^i f_Z$ lässt sich nun ein wahrscheinlicher Wert für die Abundanz in der Umgebung um einen Modellgitterknoten ermitteln.

Aus der Verwendung von Schwellwerten S folgt die Möglichkeit, neben einzelnen Zahlwerten auch Wertebereiche mit dem gezeigten Verfahren zu berücksichtigen. Das wird notwendig, wenn zu konkreten Messwerten auch Ergebnisse aus Schätzungen aus visuellen Beobachtungen involviert werden.

In Anlehnung an das Indikatorkriging (Journel & Huijbregts 1978) können die Wahrscheinlichkeiten bzw. relativen Häufigkeiten interpoliert werden. Als Eingangsdaten werden dazu die Modellgitterknoten g_j^+ , welche in ihrer Umgebung U_j mehrere Werte für die Abundanz aufweisen, verwendet. Für die Bestimmung ihrer Wahrscheinlichkeitsfunktionen f_{X_j} , kamen die gleichen Schwellwerte S zur Anwendung. Somit lassen sich für alle Gitterknoten g_j^- , in deren Umgebung U_j keine Werte für die Abundanz liegen, die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen f_{Z_j} aus den interpolierten relativen Häufigkeiten $\{\check{n}_i\}$ konstruieren. Es kann nun die Verteilung der Abundanz im Untersuchungsgebiet bestimmt werden, welche mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p unterschritten bzw. überschritten $(1-p)$ wird.

Als Wahrscheinlichkeitsgrenze wurde im derzeitigen Stand der Arbeit $p=0.5$ gewählt, was den Medianen der Wahrscheinlichkeitsfunktionen entspricht. Aus der ermittelten Abundanz wurde die biogene Rauhlängigkeit z_0^{bio} für jeden Modellgitterknoten und jede Art (*M. edulis*, *A. marina*) nach Dade et al. (2001) bestimmt. Anschließend wurde das Maximum aus den ermittelten z_0^{bio} als die zu verwendende biogene Rauhlängigkeit genutzt. Aufgrund der ökologischen Voraussetzungen für das Auftreten von *A. marina* sind die sich für diese Art ergebenden z_0^{bio} ab einer Wassertiefe von 20m zu ignorieren.

resultierende Rauhlängigkeit

Als Eingabeparameter für das Modell wurde das Maximum von z_0^{sed} und z_0^{bio} verwendet (Abb.7-6).

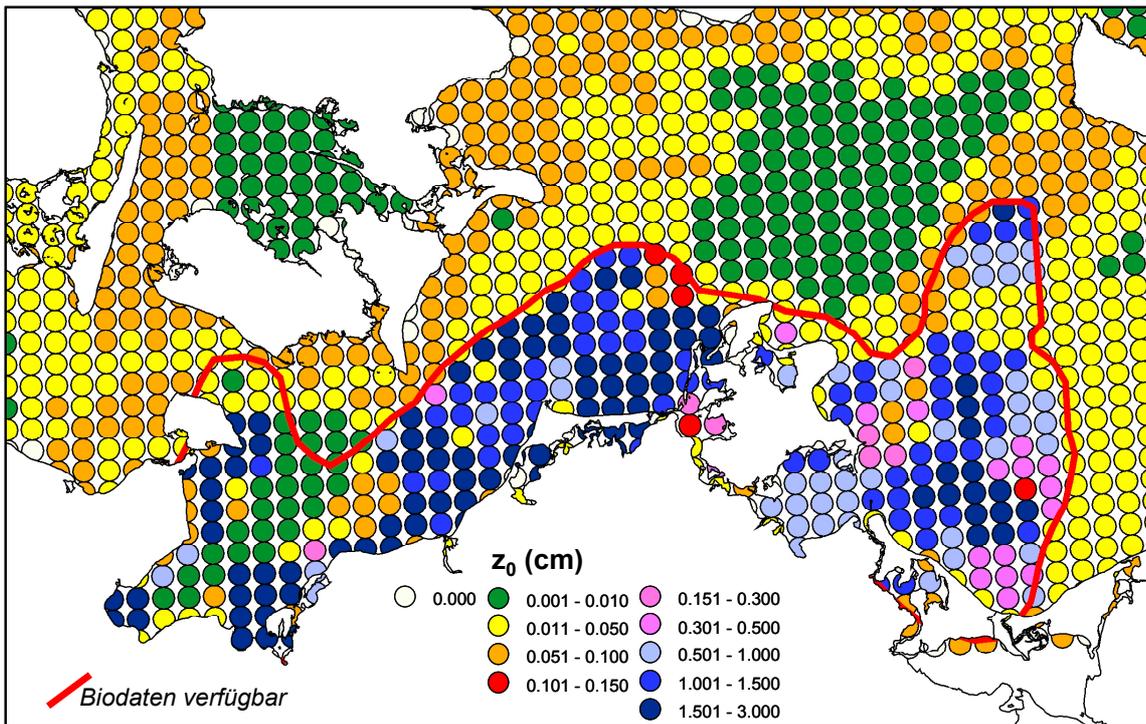


Abb.7-6: Ausschnitt aus der Verteilung der Rauheitslänge auf dem 3sm-Raster des IOW-Ostseemodells.

7.4 Numerische Simulation

(K. Kuhrts, T. Seifert, W. Fennel)

7.4.1 Aufgabenbeschreibung

Ziel des Teilprojekts 2 war die Entwicklung eines Sedimenttransportmodells und dessen

Anwendung für das Seegebiet zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonabecken. In der ersten Projektphase wurde ein Modellsystem entwickelt, das eine Beschreibung der grundlegenden physikalischen Prozesse ermöglicht. Mit Hilfe dieses Modells wurden die am Meeresboden wirkenden Kräfte sowie die zu erwartenden Ausbreitungsmuster von sedimentärem Material bei unterschiedlichen Wetterbedingungen untersucht.

7.4.2 Modellkonzept

Grundlage des Modellsystems ist das hydrodynamische Modell MOM3 [Griffies et al. 1999], das am IOW seit einigen Jahren erfolgreich betrieben wird. Die benötigten Programmkomponenten zur Beschreibung von Seegang und Sedimenttransport wurden als Module in das Modellsystem MOM3 implementiert und stehen allen Nutzern des Modellsystems MOM3 zur Verfügung.

In den letzten Jahren gab es eine Reihe von Publikationen über 3-dimensionale Sedimenttransportmodelle, die entweder auf dem Euler-Bild [Jankowski et al. 1996, Holt und James 1999, Ribbe und Holloway 2001] oder einer Lagrange-Beschreibung

[Puls et al. 1994, Black und Vincent 2001] des Sedimenttransportes basieren. In der Lagrange-Beschreibung wird das sedimentäre Material durch eine große Anzahl von Testteilchen repräsentiert. Dieses Vorgehen erlaubt eine hohe räumliche Auflösung der Sedimentverteilung, kann aber im Fall kleiner Konzentrationen zu unrealistischen Fluktuationen führen. Im Euler-Bild wird eine Transportgleichung für die Sedimentkonzentrationen gelöst. Dieser Zugang gewährleistet eine korrekte Beschreibung auch kleiner Sedimentkonzentrationen hat aber den Nachteil, dass die räumliche Auflösung der Sedimentverteilung durch das Modellgitter beschränkt ist.

Wir haben für unser Sedimenttransportmodul das Euler-Bild zugrunde gelegt, um eine spätere Kopplung des Sedimentes mit biologischen oder chemischen Tracern aus MOM3 zu ermöglichen.

Das hydrodynamische Modell MOM3 verwendet geophysikalische und z-Koordinaten zur Beschreibung der horizontalen und vertikalen Auflösung. Dieses Gitter wird vom Sedimenttransportmodul übernommen. Eine räumliche Variation der Gitterauflösung (Telescoping) ist unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen möglich. Bei der Verwendung eines vollständigen Ostseemodells mit einer offenen Grenze zur Nordsee ist die horizontale Auflösung in der westlichen Ostsee allerdings auf Größenordnungen von 1 km beschränkt. Auf die Einrichtung eines regionalen Modells für den Bereich der westlichen Ostsee mit mehreren offenen Grenzen wurde verzichtet, um das Problem unphysikalischer Strukturen als Ergebnis fehlender Information an den Rändern zu vermeiden.

Da starke Bodenströmungen in der gezeitenfreien Ostsee die Ausnahme sind ist klar, dass die Resuspension von abgelagertem Sediment vor allem durch Wellen ausgelöst wird. Zur Berücksichtigung der Auswirkung von Wellen auf den Sedimenttransport wurden ein Wellenmodell und ein Bodengrenzschichtmodell in MOM3 implementiert.

Zur Berechnung der Wellen haben wir das parametrische Wellenmodell von Donelan und Schwab [Liu et al. (1984)] unter Benutzung der TMA-Skalierung [Rosenthal et al. 1985] auf den Flachwasserbereich erweitert

Zur Modellierung der Bodengrenzschicht verwenden wir ein von Grant und Madsen (1979) vorgeschlagenes Konzept, das von einer Dominanz der Wellenwirkung am Boden ausgeht.

Ein Schema unseres Modellsystems ist in Abb. 7-7 dargestellt. Eine ausführliche Dokumentation der erstellten Modellkomponenten sowie die verwendeten Literaturarbeiten kann Kuhrtz et al. (2002) entnommen werden. Die folgenden Abschnitte 7.4.2.1-7.4.2.3 geben einen kurzen Einblick über die zugrunde liegenden Modellkonzepte.

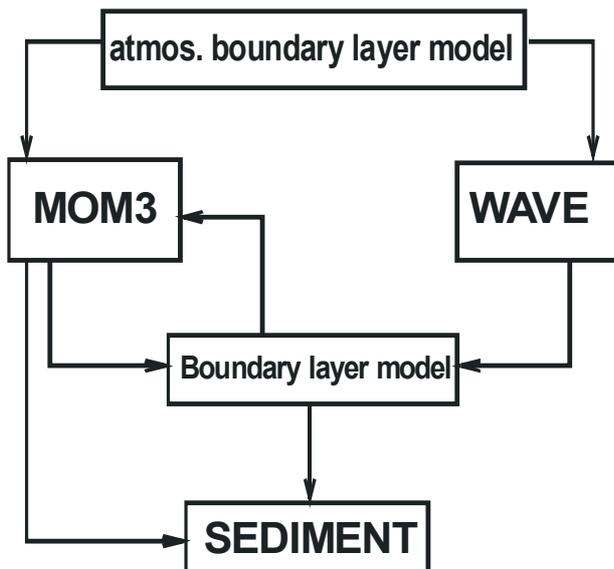


Abb. 7-7: Schematische Darstellung des Modellsystems

7.4.2.1 Wellenmodell

Für die Modellierung des Wellenfeldes wurde ein von Donelan und Schwab entwickeltes parametrisches Wellenmodell [Liu et al. (1984)] zu Grunde gelegt. In diesem Modell wird die Impulsgleichung für das Wellenfeld numerisch gelöst, wobei man von einer JONSWAP-Form des Frequenzspektrums ausgeht.

Da in flachen Gebieten die Energie des Wellenfeldes durch das JONSWAP-Spektrum überschätzt wird, haben wir in diesen Gebieten eine Transformation des Spektrums in das korrespondierende Texel-Marsen-Arsloe (TMA) –Spektrum, Bouws et al. (1985), vorgenommen.

Die berechneten Parameter des Wellenfeldes, wie Peak-Frequenz und Wellenhöhe, werden dann dem hydrodynamischen Modell und dem Bodengrenzschichtmodell zur Berücksichtigung der durch das Wellenfeld erzeugten Turbulenz übergeben.

7.4.2.2 Bodengrenzschichtmodell

Die Berechnung des Schwebstoff- und Sedimenttransportes erfordert die Bestimmung der durch Strömung und Wellen erzeugte Bodenschubspannung im Modell. Dabei muss insbesondere die Wechselwirkung von Wellen und Strömung am Boden berücksichtigt werden.

Das hydrodynamische Modell berechnet die Geschwindigkeit im bodennächsten Gitterpunkt etwa in 0.5-1.5 m über dem Meeresboden. Daher benötigen wir ein zusätzliches Modellmodul, um den Bereich der Sedimentoberfläche und der Bodenreibungsschicht zu erfassen. Wir wählten ein analytisches Bodengrenzschichtmodell, um die von der Strömung erzeugte Bodenschubspannung unter Berücksichtigung möglicher Welleneinwirkungen zu berechnen.

Eine schematische Darstellung unseres Bodengrenzschichtmodells ist in Abb. 7-8 skizziert.

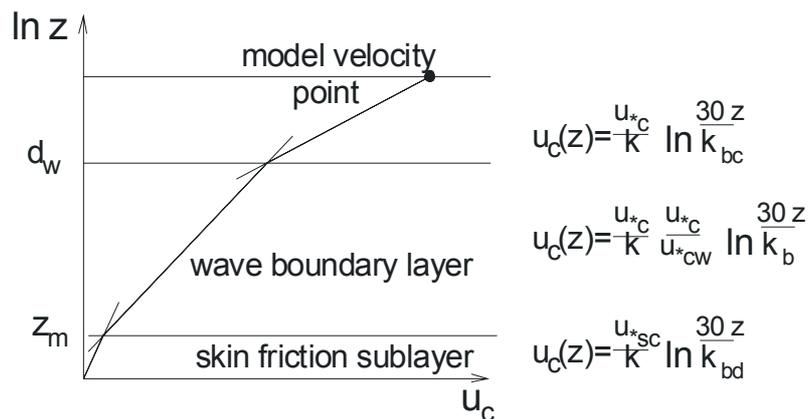


Abb. 7-8: Schematische Darstellung des Bodengrenzschichtmodells

Zur Berücksichtigung der wellenbedingten bodennahen Turbulenz, die zu einer scheinbaren Erhöhung der auf die Strömung wirkenden Bodenrauigkeit führt, benutzen wir ein von Grant und Madsen (1979) vorgeschlagenes Konzept. Grundlage dieses Modells ist die Annahme, dass sich am Boden eine Wellengrenzschicht der Dicke δ_w ausbildet. Innerhalb und oberhalb der Wellengrenzschicht wird von einer logarithmischen Form des Geschwindigkeitsprofils ausgegangen. Die Geschwindigkeitsprofile in beiden Schichten werden dann iterativ bestimmt. Dabei wird angenommen, dass sich die durch die Wellen verursachte Bodenschubspannung nicht wesentlich durch die Strömung ändert. Zur Berechnung der welleninduzierten Bodenschubspannungsgeschwindigkeit verwenden wir eine von Nielsen (1992) vorgeschlagene Parametrisierung

$$u_{*w}^2 = \frac{1}{2} f_w U_M^2, \quad f_w = \min\left\{\exp\left[5.5\left(\frac{k_b}{A}\right)^{0.2} - 6.3\right], 0.3\right\}. \quad (7-2)$$

Die am Meeresboden wirkende Bodenschubspannung besteht aus zwei Anteilen. Die effektive Bodenschubspannung (skin friction) stellt den Anteil der Bodenschubspannung dar, der direkt auf die Sedimentkörner wirkt und damit relevant für den Sedimenttransport ist. Größere Strukturen des Meeresboden wie Rippel oder Dünen verursachen durch auftretende Druckunterschiede zusätzlich eine Bodenschubspannung (form drag). Um diesen Anteil der Bodenschubspannung zu eliminieren, verwenden wir einen von Smith und McLean (1977) vorgeschlagenen Ansatz. Dabei wird angenommen, dass es nahe der Sedimentoberfläche eine sehr schmale Schicht der Dicke z_m gibt, innerhalb der die Kornrauigkeit die relevante Rauigkeit für die Strömung darstellt. Innerhalb dieser Schicht bestimmt die relevante Bodenschubspannungsgeschwindigkeit (skin friction velocity) das Geschwindigkeitsprofil. Die von den Wellen verursachte relevante Bodenschubspannungsgeschwindigkeit wird mit Hilfe von Gl. (7-2) berechnet, wobei der Rauigkeitsparameter k_b durch die Kornrauigkeit ersetzt wird.

7.4.2.3 Sedimenttransportmodell

Im Sedimenttransportmodell werden zwei unterschiedliche Mechanismen für den Transport des Sedimentes berücksichtigt: Transport in Suspension und bodennaher rollender Transport.

Zur Beschreibung des Transportes in Suspension wird die folgende 3-dimensionale Gleichung numerisch gelöst

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (c \cdot \vec{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (c \cdot w_{\text{sink}}) = \vec{\nabla} \cdot (\nu \vec{\nabla} c).$$

Dabei steht c für die Konzentration des suspendierten Materials, \vec{u} bezeichnet die Geschwindigkeit der Strömung, w_{sink} ist die Sinkgeschwindigkeit des betrachteten Sedimenttyps und ν ist der turbulente Austauschparameter. Der Austausch von Material zwischen der Wassersäule und dem Boden wird durch die folgende Randbedingung berücksichtigt

$$\left[c \cdot w_{\text{sink}} - \nu_z \frac{\partial c}{\partial z} \right]_{\text{bottom}} = Q.$$

Der Quellterm Q beschreibt die Menge sedimentären Materials, die pro Flächen- und Zeiteinheit am Boden resuspendiert oder deponiert wird, und ist eine Funktion der relevanten Bodenschubspannungsgeschwindigkeit u_{*s}

$$Q = \begin{cases} (w_{\text{sink}} \cdot c)_{\text{bottom}}, & u_{*s} \leq u_{*d} \\ 0, & u_{*d} < u_{*s} \leq u_{*r} \\ q_r, & u_{*r} < u_{*s} \end{cases} \quad (7-3)$$

Die Größen u_{*d} und u_{*r} bezeichnen die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Deposition und Resuspension. Liegt die relevante Bodenschubspannungsgeschwindigkeit u_{*s} unter dem kritischen Wert für Deposition so sinkt suspendiertes Material mit der Rate $(w_{\text{sink}} \cdot c)_{\text{bottom}}$ zum Boden aus. Für den Fall, dass die relevante Bodenschubspannungsgeschwindigkeit u_{*s} den kritischen Wert für Resuspension übersteigt, wird Sediment mit der Rate q_r vom Boden erodiert. Wir verwenden eine Parametrisierung von Puls und Sündermann (1990), um die Erosionsrate in Abhängigkeit von der Bodenschubspannungsgeschwindigkeit zu parametrisieren

$$q_r = M\rho(u_{*s}^2 - u_{*r}^2),$$

wobei M eine Materialkonstante, mit unterschiedlichen Werten für die verschiedenen Materialtypen, ist und ρ die Dichte des Wassers bezeichnet.

Zur Beschreibung des bodennahen Transportes lösen wir die folgende 2-dimensionale Gleichung für die am Boden befindliche Sedimentmenge pro Flächeneinheit C_A

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_b = -Q,$$

wobei der in Gl. (7-3) definierte Quellterm jetzt mit einem negativen Vorzeichen auftritt.

In unserem Modell machen wir die Annahme, dass die Richtung des Bodentransportflusses \vec{q}_b mit der Richtung der bodennahen Geschwindigkeit

übereinstimmt. Zur Bestimmung der Menge des transportierten Materials benutzen wir die Parametrisierung von Meyer-Peter (1948)

$$q_b = \rho_s \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \left(\frac{4u_{*s}^2}{(s-1)gd_{50}} - 0.188 \right)^{1.5}, \quad u_{*s} > u_{*b}.$$

Die kritische Bodenschubspannungsgeschwindigkeit für den Bodentransport u_{*b} ist ein Materialparameter, s bezeichnet hier die relative Dichte des Sedimentes, ρ_s ist die Dichte des Sedimentes und g steht für die Gravitationskonstante.

Zur numerischen Lösung der Transportgleichungen wurden verschiedene Schemata implementiert: upwind, leapfrog und flux corrected transport. Bei der Berechnung der nachfolgenden Modellergebnisse haben wir das upwind Schema benutzt. Für ausgewählte Szenarien wurden außerdem Vergleichsrechnungen mit dem flux corrected transport Schema durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die berechneten Transportmuster unter Verwendung der beiden Schemata im wesentlichen übereinstimmen.

7.4.3 Modellergebnisse

Für die Rechnungen wurde ein horizontal gestrecktes Modellgitter mit einer Auflösung von 3 sm in der westlichen Ostsee benutzt. Die vertikale Auflösung beträgt bis zu einer Wassertiefe von 90 m 3 m. Zur Erstellung der Modelltopographie wurde eine digitale Karte der Ostsee, Seifert et al. (2001), zugrunde gelegt.

Die Bestimmung der Bodenschubspannung setzt die Kenntnis der Bodenrauigkeit voraus.

Die Sedimentcharakteristik des Ostseebodens ist räumlich stark variabel und wurde der Gitterstruktur des Modells entsprechend geglättet. Jeder Modellbox wird am Boden ein repräsentativer Sedimenttyp zugewiesen, der die mittleren Sedimenteigenschaften in diesem Bodengebiet beschreibt. Wir haben vier repräsentative Sedimenttypen ausgewählt, die zusammen mit den angenommenen Sedimentparametern in Tab. 7-2 angegeben sind.

Tab. 7-2 Sedimentparameter für repräsentative Sedimenttypen

Sedimenttyp	$d_{50} [\mu m]$	$k_{bd} [cm]$	$k_b [cm]$
Schlick	20	0.005	0.18
Feinsand	130	0.033	1.17
Mittelsand	250	0.063	2.25
Hardrock	-	0.125	4.50

Die Zuordnung dieser Sedimenttypen auf das Modellgitter wurde vom Teilprojekt 1 vorgenommen (B. Bobertz) und ist in Abb. 7-9 dargestellt. Wir gehen davon aus, dass sich die Sedimentverteilung der Ostsee in einem Gleichgewicht befindet und sich in den betrachteten Zeiträumen nicht ändert. Bei der Berechnung des Sedimenttransportes wird im Moment nur zusätzlich ins Modell eingebrachtes sedimentäres Material berücksichtigt.

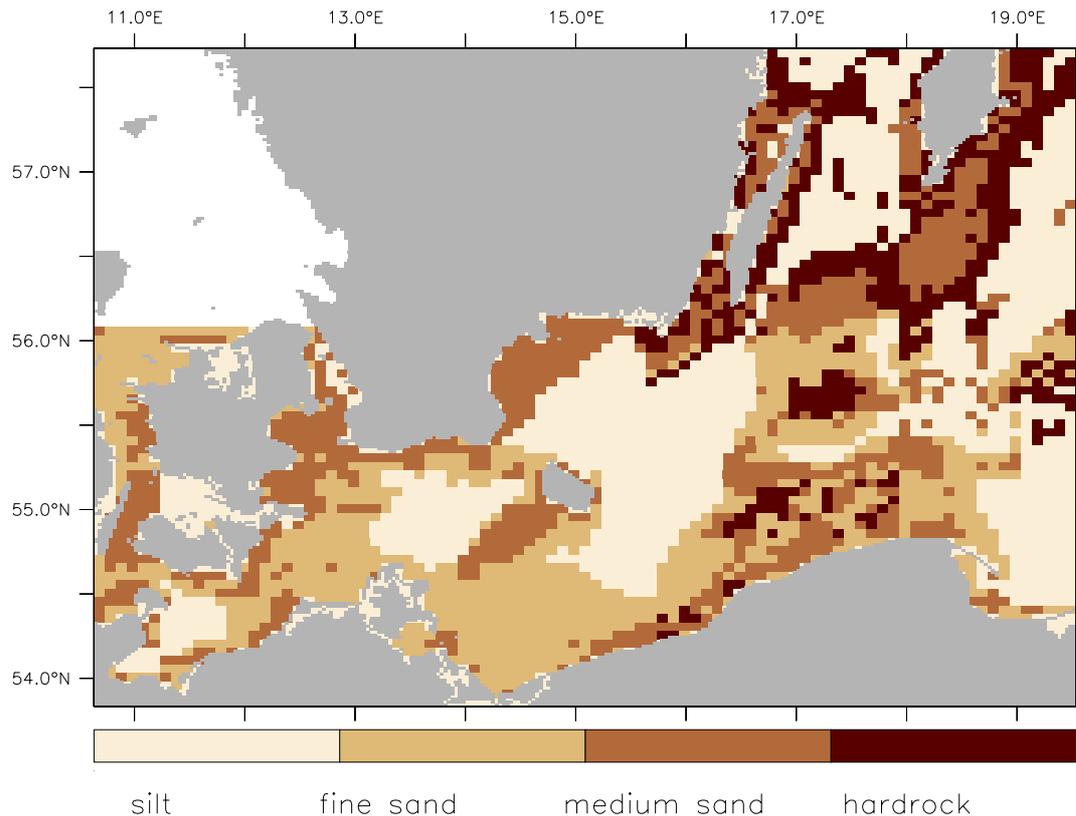


Abb. 7-9 Bodensedimente im Modell

Als Antriebsdaten für unsere Modellsimulation haben wir den reanalysierten Datensatz ERA 15 des ECMWF (europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) verwendet. Für unsere Modellexperimente wurde das Jahr 1993 gewählt, da in diesem Jahr relativ häufig Starkwindlagen in der westlichen Ostsee auftraten.

Um mögliche Transportwege von sedimentärem Material in der westlichen Ostsee zu untersuchen, wurde Sediment an zwei unterschiedlichen Quellen in das System eingebracht. Die Positionen der Quellen befinden sich im Bereich der Probeverklappungsstelle und der Odermündung. Die Quellen sind in Abb. 7-10 mit einem Stern markiert. Um ein idealisiertes Verklappungsexperiment zu simulieren, wurde sedimentäres Material am Anfang der Simulation in die bodennächste Box eingebracht und die Ausbreitung über einen bestimmten Zeitraum verfolgt. Während des Ausbreitungsvorganges gelangte kein zusätzliches Material mehr ins System. Abgelagertes Sediment, das aus diesen Quellen stammt, wird als kleine Störung des Systems betrachtet mit vernachlässigbaren Auswirkungen auf die Sedi- menteigenschaften der entsprechenden Modellboxen.

Für die Modellexperimente betrachten wir zwei ideale Sedimenttypen, die im folgenden als Schwebstoff (SPM) und Feinsand bezeichnen werden. Als Schwebstoff bezeichnet man im allgemeinen partikuläres Material mit einem Durchmesser kleiner $63 \mu m$. Die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffpartikel ist im allgemeinen stark variabel und hängt von Größe und Form der einzelnen Partikel ab. Aggregation bzw. Disaggregation können zu einer Änderung der Partikelgröße und damit auch der Sinkgeschwindigkeit führen. Um die maximale Ausbreitung einer möglichen

Trübungswolke abzuschätzen, benutzen wir die Sinkgeschwindigkeit der feinsten Schwebstofffraktion, $d \approx 2 \mu\text{m}$. Damit stellt das betrachtete SPM ein äußerst mobiles Sediment in der Wassersäule dar. Bei der Betrachtung des Feinsandes gehen wir von einem gut sortierten, nichtkohäsiven Material mit einem mittleren Korndurchmesser von $100 \mu\text{m}$ aus. Die verwendeten Materialparameter sind in Tab. 7-3 gegeben.

Tab. 7-3 Sedimentparameter

Sediment	$w_{\text{sink}} [cm/s]$	$u_{*r} [cm/s]$	$u_{*d} [cm/s]$	$u_{*b} [cm/s]$	$M [s/cm]$
SPM	0.0004	2.0	1.0	-	0.00002
Feinsand	0.4	1.4	1.4	1.1	0.00001

Da im Januar und Februar 1993 starke Sturmereignisse in der westlichen Ostsee auftraten, haben wir diesen Zeitabschnitt ausgewählt, um die Verdriftung des Materials über einen längeren Zeitraum zu verfolgen. Die Initialisierung der Sedimentquellen erfolgte am 30.12.1992. Die Ausbreitung des Sedimentes wurde über einen Zeitraum von 60 Tagen berechnet und die resultierende Verteilung ist in Abb. 7-10 dargestellt.

Ein Teil des SPM aus der Quelle in der Mecklenburger Bucht wird in Richtung Lübecker Bucht transportiert, das meiste Material wird allerdings nahe der Quelle deponiert. In der Oderbucht finden wir einen geringfügigen Transport in Richtung Nordwest wobei auch hier der größte Anteil des Materials nahe der Quelle verbleibt. Ein deutlich anderes Verhalten finden wir für den Feinsand. In diesem Fall ergibt sich ein gerichteter Transport für einen großen Teil des Materials. In der Mecklenburger Bucht findet ein nordöstlicher Transport innerhalb eines schmalen Transportbandes statt. In der Oderbucht ist eine starke Verdriftung nach Osten zu beobachten.

Um die typischen Transportwege zu untersuchen, wurden Simulationen über das gesamte Jahr 1993 ausgeführt. Dabei wurde das Sediment alle 15 Tage an den Quellen reinitialisiert und das Transportmuster über 15 Tage berechnet (Zeitscheibenexperimente).

Das mittlere Transportmuster, das sich jeweils am Ende Zeitraum einstellt, ist in Abb. 7-11 und Abb. 7-12 zusammen mit der Standardabweichung gezeigt. Für das SPM finden wir ausgeprägte Muster für beide Quellen. In der Mecklenburger Bucht gibt es drei Haupttransportwege für verdriftendes Material: in Richtung Fehmarnbelt, Lübecker Bucht und Kadetrinne, wobei der Transport in westliche Richtung deutlich überwiegt. In der Oder Bucht ist ein Transport des Materials nordwestlich oder nordöstlich entlang der Oderbank bevorzugt. Die berechnete Standardabweichung ist etwa eine Größenordnung kleiner als das mittlere Muster. Es kam also in fast allen Modellexperimenten zu einer Verdriftung des Materials auf einem der bevorzugten Transportwege. Für den Fall des Feinsandes finden wir eine deutlich andere Situation. Das mittlere Muster wird von der Deposition des Sandes nahe der Quellen dominiert. Betrachten wir den Transport in der Mecklenburger Bucht, so trägt der nordöstliche Transportweg, den wir in der 60tägigen Simulation beobachten konnten, nur wenig zum Mittelwert bei. Diese Verdriftung des Feinsandes entlang dieses Transportbandes stellt offensichtlich eine sturmbedingte Ausnahme dar. In der Mehrzahl der Fälle überwiegt die Deposition des Materials im betrachteten 15-tägigen Zeitraum.

Um Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von Erosionsereignissen in den einzelnen Gebieten der Ostsee machen zu können, haben wir die im Jahr 1993 auftretenden Bodenschubspannungsgeschwindigkeiten berechnet. In Abb. 7-13 sind die auftretenden Maximalwerte der Bodenschubspannungsgeschwindigkeit (Tagesmittel) für das Jahr 1993 dargestellt. Die Bodenschubspannungsgeschwindigkeit wird stark durch den Beitrag der Wellen dominiert. Hohe Bodenschubspannungen sind deshalb in den flacheren Gebieten zu finden, insbesondere wenn der Wind mit großer Streichlänge (fetch) einwirkt. Um abzuschätzen, in welchen Gebieten die Bodenschubspannungsgeschwindigkeit den kritischen Wert übersteigt, vergleichen wir die berechnete maximale Schubspannungsgeschwindigkeit mit der kritischen Bodenschubspannungsgeschwindigkeit für Erosion. Im Teilprojekt 3 wurden die kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten für die sandigen Sedimente der Mecklenburger Bucht gemessen, Bohling (2002). Diese Messwerte wurden für die repräsentativen Sedimenttypen Fein- und Mittelsand benutzt. Gebiete, die durch den Sedimenttyp Hardrock gekennzeichnet wurden, werden als nicht erodierbar betrachtet. Die kritische Bodenschubspannungsgeschwindigkeit für die Erosion von Schlick ist sehr hoch und konnte deshalb im Teilprojekt 3 nicht bestimmt werden. Wir haben die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Schlick mit mindestens 4 cm/s abgeschätzt. Die für die betrachteten Bodensedimente verwendeten Schubspannungsgeschwindigkeiten sind in Tab. 7-4 aufgelistet.

Tab. 7-4: Schubspannungsgeschwindigkeiten der verwendeten Sedimenttypen.

Sediment	$u_{*krit} [cm / s]$
Schlick	4.0
Feinsand	1.5
Mittelsand	1.8
Hardrock	∞

Die Gebiete, in denen Erosion zu erwarten ist, sind in Abb. 7-13 (unten) dargestellt. Ein hohes Erosionsrisiko ergibt sich insbesondere für die Oderbank und das Seegebiet nördlich und östlich von Darßer Ort.

In einer weiteren Serie von Experimenten haben wir die Umverteilung von Fluff Material untersucht. Leicht erodierbares Material akkumuliert in der westlichen Ostsee in so genannten fluffy layers, die während ruhiger Wetterperioden fast überall auf dem Meeresboden vorkommen. Die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit dieses Materials ist sehr klein und beträgt etwa 0.5 cm/s, Christiansen et al. (2002). Um zu untersuchen, auf welchen Transportwegen und Zeitskalen dieses Material in die tiefen Becken der Ostsee transportiert wird, haben wir Modellexperimente durchgeführt. Dabei wurde das Modell mit einer homogenen Verteilung von fluffy layer am Meeresboden initialisiert und die Umverteilung des Materials über einen Zeitraum von 6 Wochen für vier verschiedene Wetterperioden im Jahr 1993 berechnet. Für die Sinkgeschwindigkeit des Materials haben wir einen Wert von 0.1 cm/s gewählt. Dabei sind wir von der Annahme ausgegangen, dass der Hauptanteil des Materials zu größeren Flocken akkumuliert. Der Anteil des Materials, der in Flocken mit einem Durchmesser größer als 50 μ m aggregiert ist, zeigt eine stark saisonale Variabilität, Christiansen et al. (2002). Wir erwarten deshalb auch eine starke saisonale Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit des Materials mit deutlichen erhöhten Werten im Frühjahr und Sommer. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Wetterlagen auf den Transport des Materials zu untersuchen,

haben wir Simulationen für alle vier Perioden mit derselben Sinkgeschwindigkeit durchgeführt. Außerdem wurde für eine ausgewählte Periode abgeschätzt, wie sich unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten auf die berechneten Transportmuster auswirken.

In Abb. 7-14 sind die Ergebnisse der Simulation mit einer Sinkgeschwindigkeit von 0.1 cm/s für zwei ausgewählte Perioden dargestellt. In der ersten Simulationsperiode 1.1.93-13.2.93 traten mehrere extreme Starkwindereignisse in der Ostsee auf. Durch die lange Zeit anhaltenden starken Winde wurde das Material aus den flachen Gebieten fast vollständig in die tiefen Becken transportiert. Die höchsten Konzentrationen von Fluff Material sind dabei an den Randgebieten der tiefen Becken zu finden. Aufgrund der abnehmenden bodennahen Turbulenz in diesen Gebieten sinkt das in der Wassersäule transportierte Material aus und der Einfluss von Wellen und Strömung ist im allgemeinen zu schwach, um das Material wieder zu resuspendieren. Signifikante Akkumulationsgebiete sind dabei der südwestliche Rand des Arkonabeckens, die Bornholm See, die Danziger Bucht und der Nemunas Kanal. In der zweiten Periode 15.3.93-28.4.93 ist der Transport deutlich schwächer. Nur in den ersten Tagen der Simulationsperiode, als Windgeschwindigkeiten von 18 m/s in der westlichen Ostsee erreicht wurden, trat ein merklicher Transport von Fluff Material auf. Auch in dieser Periode ergab sich in bestimmten Gebieten eine starke Akkumulation von Material statt: am südwestlichen Rand der Bornholm See, in Teilen der Pommernbucht und in der Kadetrinne. Verglichen mit der ersten Periode verbleibt deutlich mehr Material in den flachen Gebieten. Entsprechende Simulationen für typische Sommersituationen zeigen einen deutlich schwächeren Transport von Material. Größere Mengen von Material werden nur von der Oder bzw. Ronnebank wegtransportiert.

Simulationen mit kleineren Sinkgeschwindigkeiten von 0.01 bzw. 0.001 cm/s zeigen, dass das Fluff Material weiter in die tiefen Becken hinein transportiert wird. Allerdings findet sich auch in diesen Fällen eine deutliche Akkumulation in den Randgebieten. Die erwartete Akkumulation von feinem Material in den Zentren der tiefen Becken kann mit den im Modell berücksichtigten Prozessen nicht erklärt werden. Hier stellt sich die Frage, ob es noch andere wichtige Prozesse der Resuspension gibt. So könnte zum Beispiel ein weiterer Transport des Materials von den Rändern der Becken in die Zentren durch die Berücksichtigung von Bioresuspension verursacht werden.

7.4.4 Zusammenfassung

Unsere Ergebnisse zeigen, dass es in der Mecklenburger Bucht und in der Oder Bucht bevorzugte Transportwege für sedimentäres Material gibt. Diese Transportwege zeigen eine starke Abhängigkeit vom Typ des betrachteten Materials. Während das SPM auch in die oberen Wasserschichten eingemischt werden kann, und somit aufgrund der vertikalen Stromscherung Ein- und Ausstrom am Transport mitwirken, wird der Sand vorwiegend durch den bodennahen Einstrom transportiert. Die maximalen Bodenschubspannungen in der westlichen Ostsee zeigen eine starke räumliche Variabilität. Hohe Werte der Bodenschubspannung treten insbesondere in den flachen Gebieten durch Welleneinwirkung auf. Durch einen Vergleich der berechneten maximalen Bodenschubspannungsgeschwindigkeiten mit gemessenen

Werten für die kritischen Werte für Erosion wurden potentielle Erosionsgebiete in der westlichen Ostsee identifiziert.

Unsere Modellexperimente zeigen außerdem, dass der Transport von feinem Material, das zu fluffy layern akkumuliert, im wesentlichen bei starken Windereignissen auftritt. Als grobe Abschätzung kann gesagt werden, dass der Transport von Fluff Material in den flachen Gebieten bei einer Windgeschwindigkeit von etwa 10 m/s beginnt. Der Transport von den flachen Gebieten zu den Hängen der tiefen Becken findet auf einer Zeitskala von einigen Wochen statt. Der Transport in die Zentren der tiefen Becken hinein konnte mit dem verwendeten Modellsystem nicht beschrieben werden. Die Berücksichtigung zusätzlicher Transportmechanismen wie z.B. Bioresuspension könnte zu einer Erklärung dieses Transportes im Modell führen.

7.4.5 Weiterführende Arbeiten

Die Simulation der Strömungsverhältnisse in der westlichen Ostsee ist relativ schwierig, da neben den lokalen Windantrieben die großräumigen Druckgradienten eine wesentliche Rolle spielen. Deshalb ist es erforderlich, die gesamte Ostsee im Modell zu erfassen. Der damit verbundene Rechenaufwand ist hoch. Auf der CRAY T3E der Universität Rostock konnten wir nur eine Modellauflösung von 3sm in der westlichen Ostsee realisieren. Inzwischen haben wir ein Modell mit einer Auflösung von 1sm in der westlichen Ostsee vorbereitet, das auf dem neuen Höchstleistungsrechner Nord (HLRN) bereits getestet wurde. Zukünftige Rechnungen werden wir mit dieser verbesserten Auflösung durchführen.

Außerdem besteht die Möglichkeit, Ökosystemkomponenten des biogeochemischen Modells der Ostsee (Neumann 2002) zu integrieren und die Bildung von fluffy layer im Modell zu simulieren. Umwandlungsprozesse dieses Materials und der damit verbundene Transport von Mineralien können dann mit Hilfe des Sedimenttransportmodells beschrieben werden. Dazu soll eine Erweiterung des Sedimentmoduls zur Beschreibung von Aggregaten vorgenommen werden. Durch die Bereitstellung von Daten über Bioresuspension durch das TP 3 sollen außerdem die Zeitskalen des Transportes von den Beckenhängen in die Zentren der tiefen Becken untersucht werden.

TIME : 27-FEB-1993 23:58

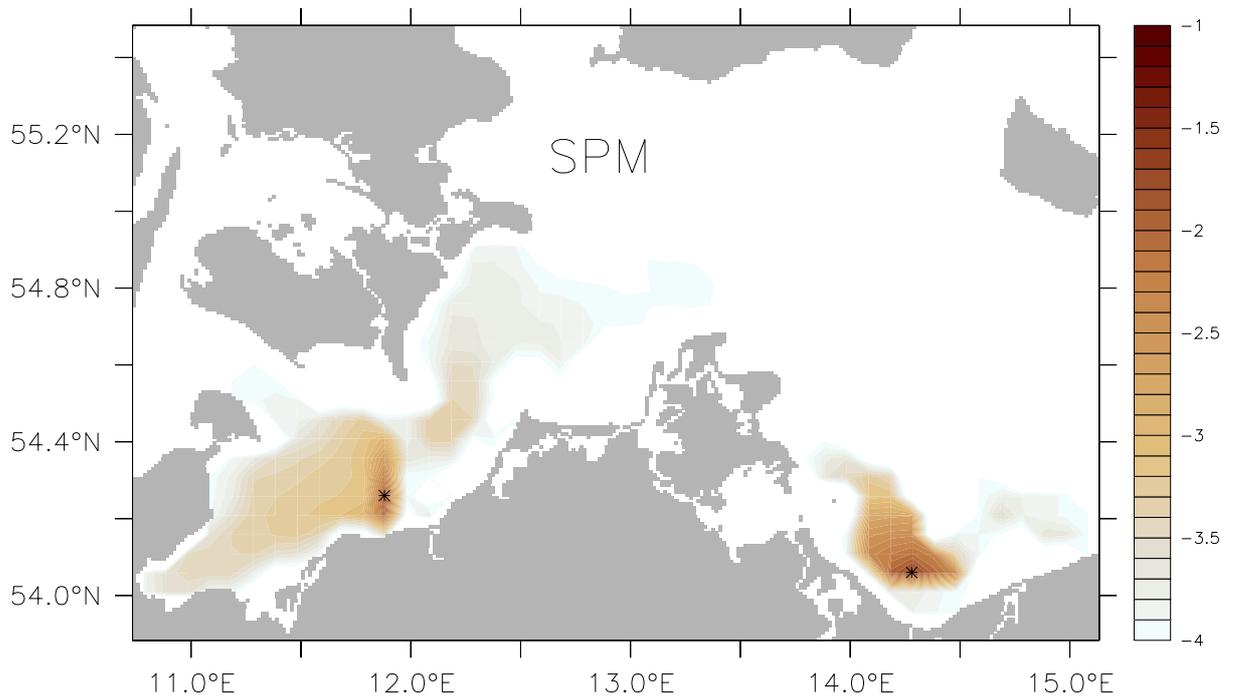
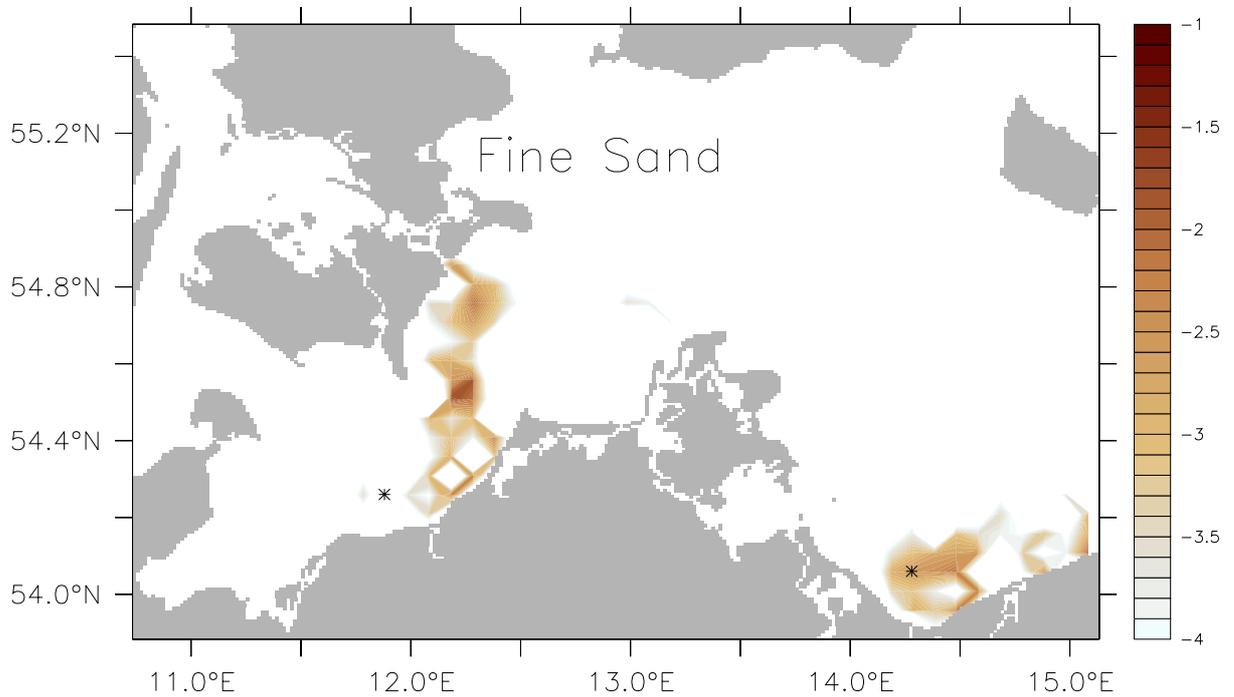
 $\log(\text{vertical integrated distribution [g/cm}^2\text{)})$  $\log(\text{vertical integrated distribution [g/cm}^2\text{)})$

Abb. 7-10: Vertikal integrierte Sedimentkonzentration nach einer Ausbreitungszeit von 60 Tagen (logarithmisch dargestellt).

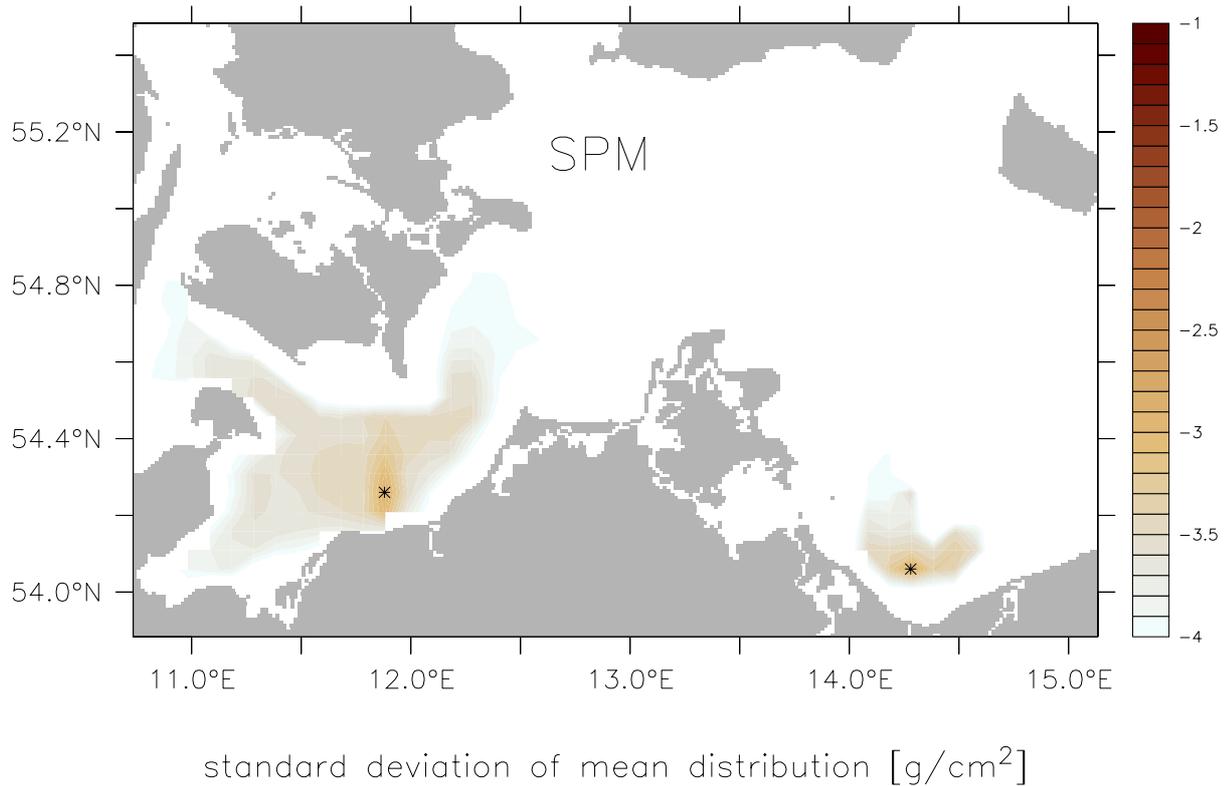
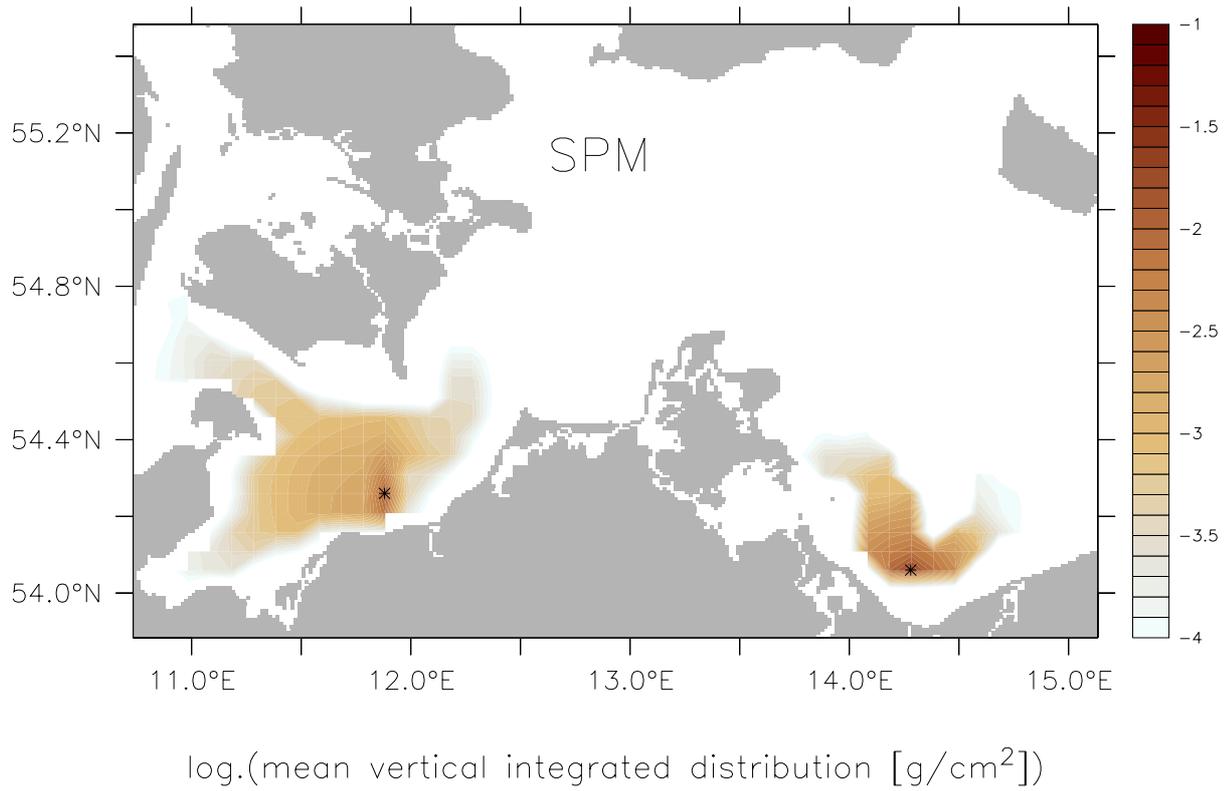


Abb. 7-11: Mittleres Ausbreitungsmuster und Standardabweichung der Transportmuster basierend auf 15-tägigen Zeitscheiben für das Modelljahr 1993.

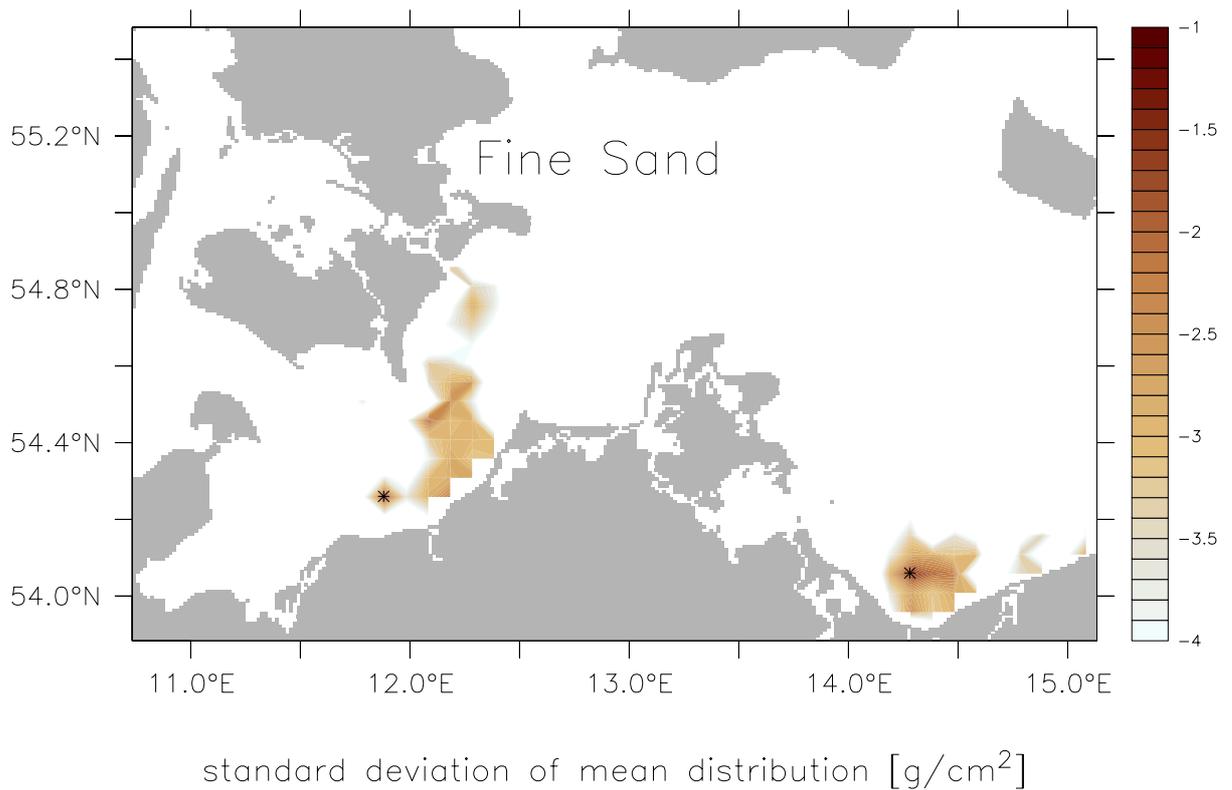
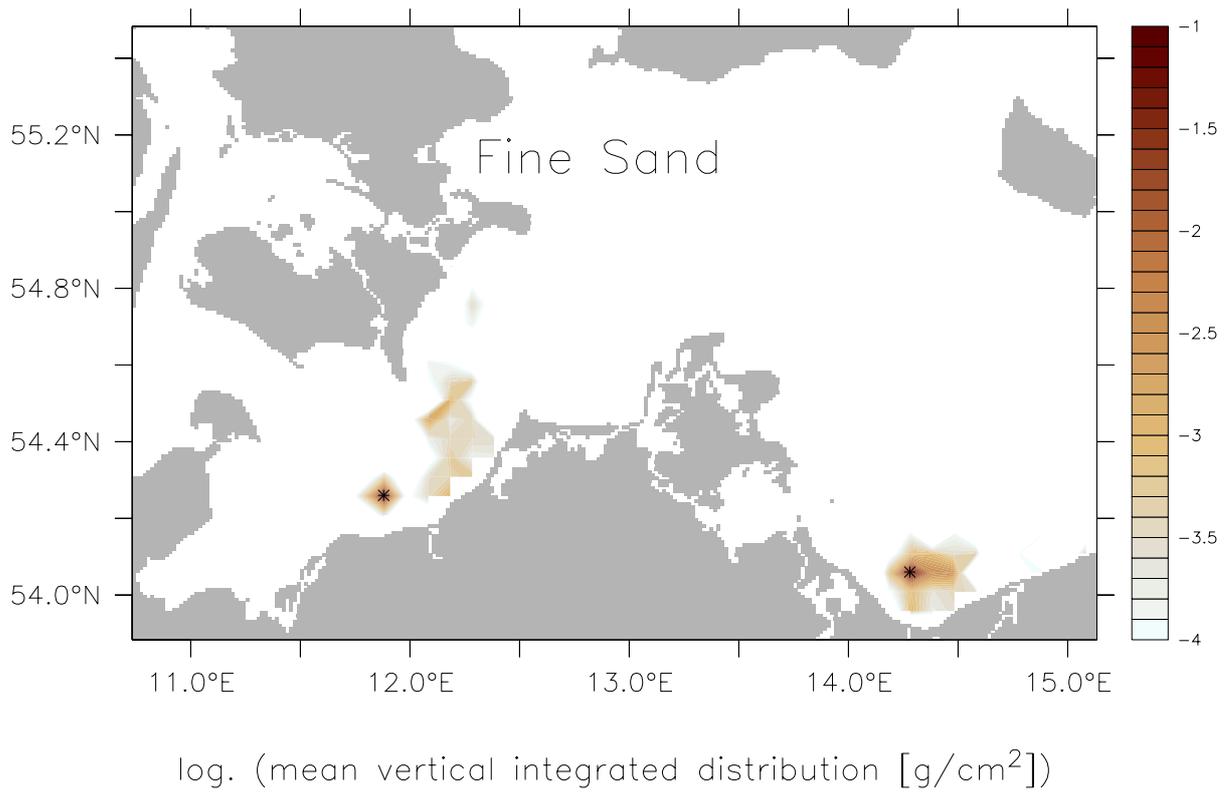


Abb. 7-12: Mittleres Ausbreitungsmuster und Standardabweichung basierend auf 15tägigen Zeitscheiben für das Modelljahr 1993.

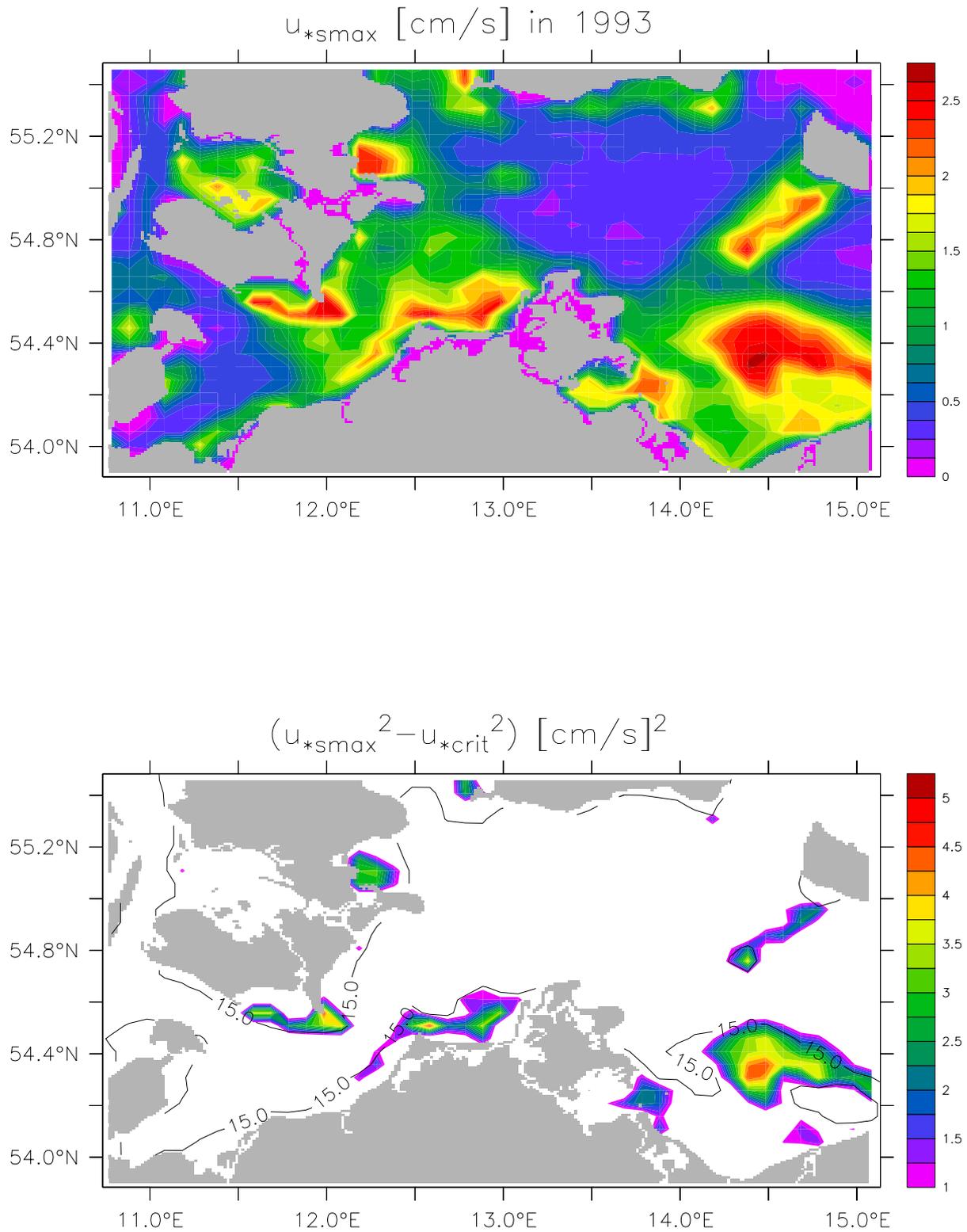


Abb. 7-13: Maximalwerte der Tagesmittel der Bodenschubspannungsgeschwindigkeit im Jahr 1993 (oben), mögliche Erosionsgebiete (unten).

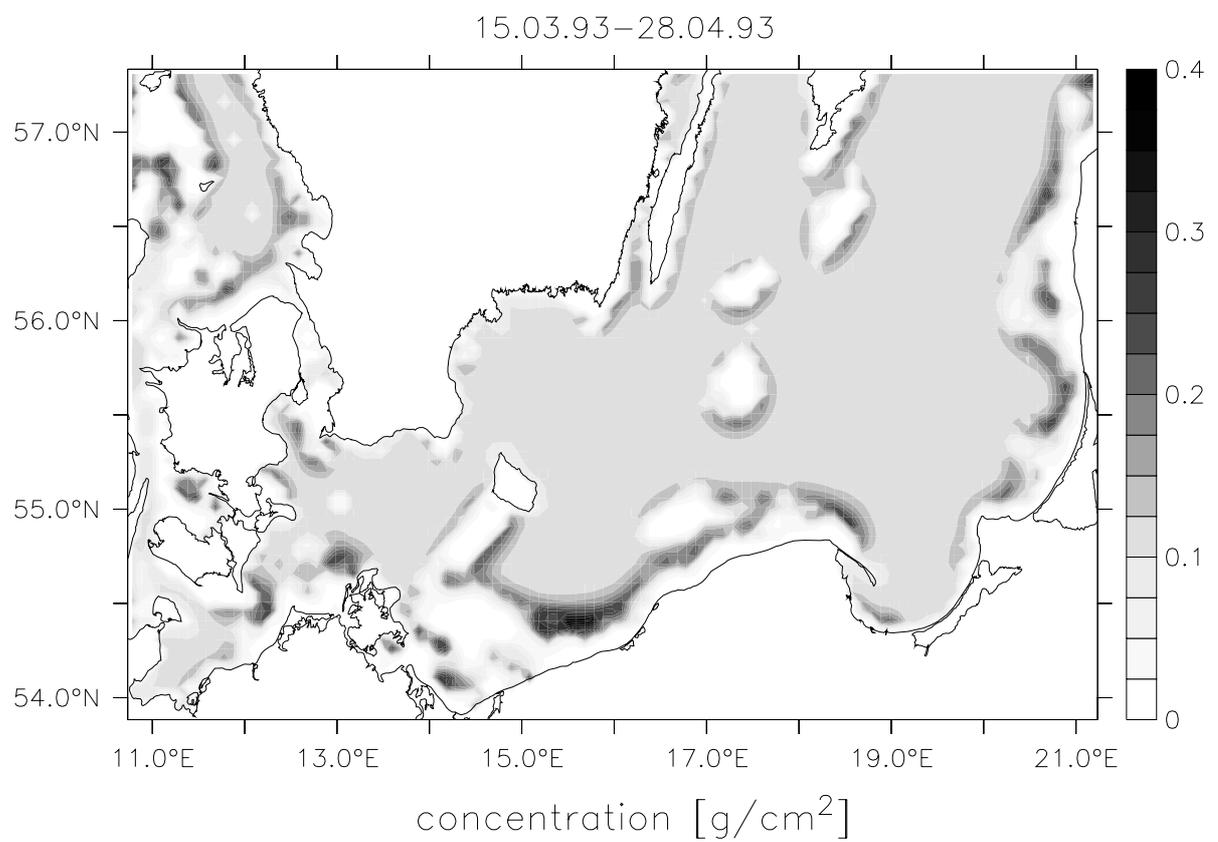
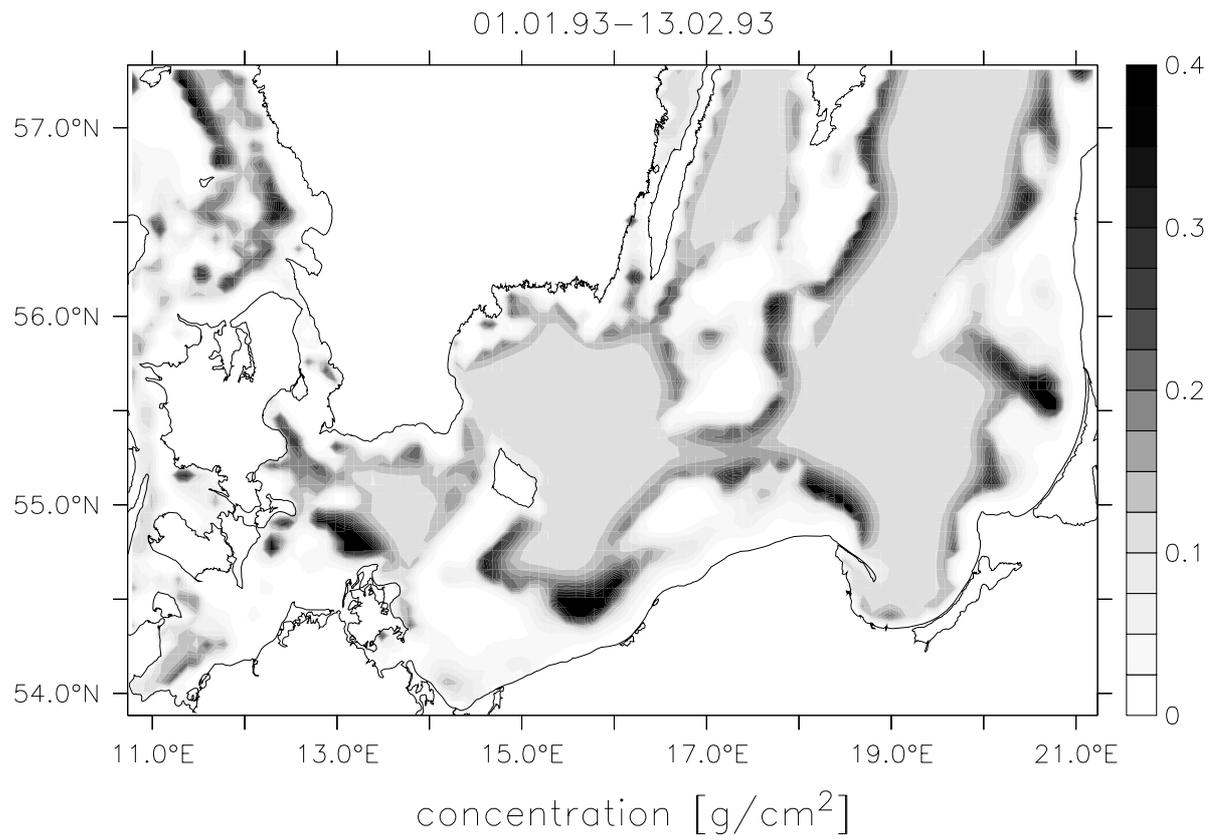


Abb. 7-14: Fluff Konzentration (vertikal integriert) am Ende der Simulationsperiode.

7.5 Korrelation von sedimentologischen Daten und Simulationsergebnissen

(B. Heise)

Die vollständige Diplomarbeit mit dem Titel „Strömungsschwankungen am Meeresboden zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonabecken nach Modellierungsergebnissen und mögliche Auswirkungen auf die Sedimentation“ ist über die DYNAS-Homepage verfügbar.

Im Rahmen der zu diesem Thema entstandenen Diplomarbeit ging es hauptsächlich darum folgende Fragen zu beantworten:

- Ist es allgemeingültig möglich sogenannte Strömungsereignisse ausreichend quantitativ einzugrenzen?
- Handelt es sich während dieser Ereignisse um die Perioden des Untersuchungszeitraumes, in denen das anstehende Sediment qualitative verändert wird?
- Weiterhin sollte untersucht werden, ob die bodennahen Strömungen Präferenzrichtungen aufweisen.

Die gewonnenen Ergebnisse sollten graphisch so dargestellt werden, dass sie eine erste synoptische Aussage über das zeitliche Auftreten und die Intensität der Beanspruchung des anstehenden Sedimentes zulassen. So können Abschätzungen erfolgen in welchen Gebieten mit aktiver Erosion, bzw. Abtrag von eingebrachtem Material zu rechnen ist.

Zuerst musste der Begriff des Strömungsereignisses quantitativ definiert werden. Hierzu wurden zwei Kriterien festgelegt, bei denen ein empirisch abgeleiteter Schwellwert überschritten werden muss, damit in dem untersuchten Zeitraum von einem Strömungsereignis gesprochen werden kann. Bei den Kriterien handelt es sich um die Strömungsbeständigkeit und den Winkel zwischen den Ellipsentangenten. Die Zeiträume mussten eine Mindestdauer von 72 Stunden besitzen, in denen die festgelegten Kriterien für die Strömung erfüllt waren, um in der Arbeit als Strömungsereignis berücksichtigt zu werden.

Um die Beziehung von Strömung am Grund und dem anstehenden Sediment zu untersuchen, wurde eine graphische Methode entwickelt. Die Abb.7-15 stellt graphisch verschiedene charakterisierende Parameter der Strömungsereignisse in Bezug zu denen vom Sediment dar. In dieser Darstellung sind die Parameter Median, Sortierung, Strömungsrichtung, Strömungsereignisse, kritische Schubspannung, Freistromgeschwindigkeit und jahreszeitliches Auftreten der Strömungsereignisse verarbeitet. Jeder der farbigen Punkte kennzeichnet ein Strömungsereignis. Durch die Lage im Kreis wird zum einen die mittlere Strömungsrichtung und zum anderen die mittlere Strömungsgeschwindigkeit während dieses Strömungsereignisses dargestellt. Die farbige Klassifizierung der Punkte zeigt den Zeitpunkt innerhalb des Modelljahres an. Die schwarzen Kreise mit den Nummerierungen 1 bis 4 (variable Größe) stellen Freistromgeschwindigkeiten dar, die zum Transport der angegebenen Korngrößen nötig sind. Die Freistromgeschwindigkeiten wurden aus den kritischen Schubspannungen berechnet. Die unter den Nummerierungen 1 bis 4 stehenden Prozentzahlen zeigen den Anteil an der Korngrößenverteilung des anstehenden Sediments bis zu der Korngröße, die zu der dargestellten Freistromgeschwindigkeit angegeben ist.

Der rote Kreis (mit U beschriftet) gibt die minimale Freistromgeschwindigkeit an, welche nötig ist, um Sedimentkörner mit Korngrößen kleiner oder gleich dem Median erodieren zu können.

Der graue Kreisring kennzeichnet den Bereich zwischen Median + Sortierung und Median - Sortierung. Damit liegen in diesem Korngrößenbereich, der durch Freistromgeschwindigkeiten dargestellt wird, ca. 2/3 der Masse aller Sedimentkörner des anstehenden Sediments. Durch die Größe des entstandenen Kreisringes kann eine Einschätzung der Sortierung des Sediments erfolgen.

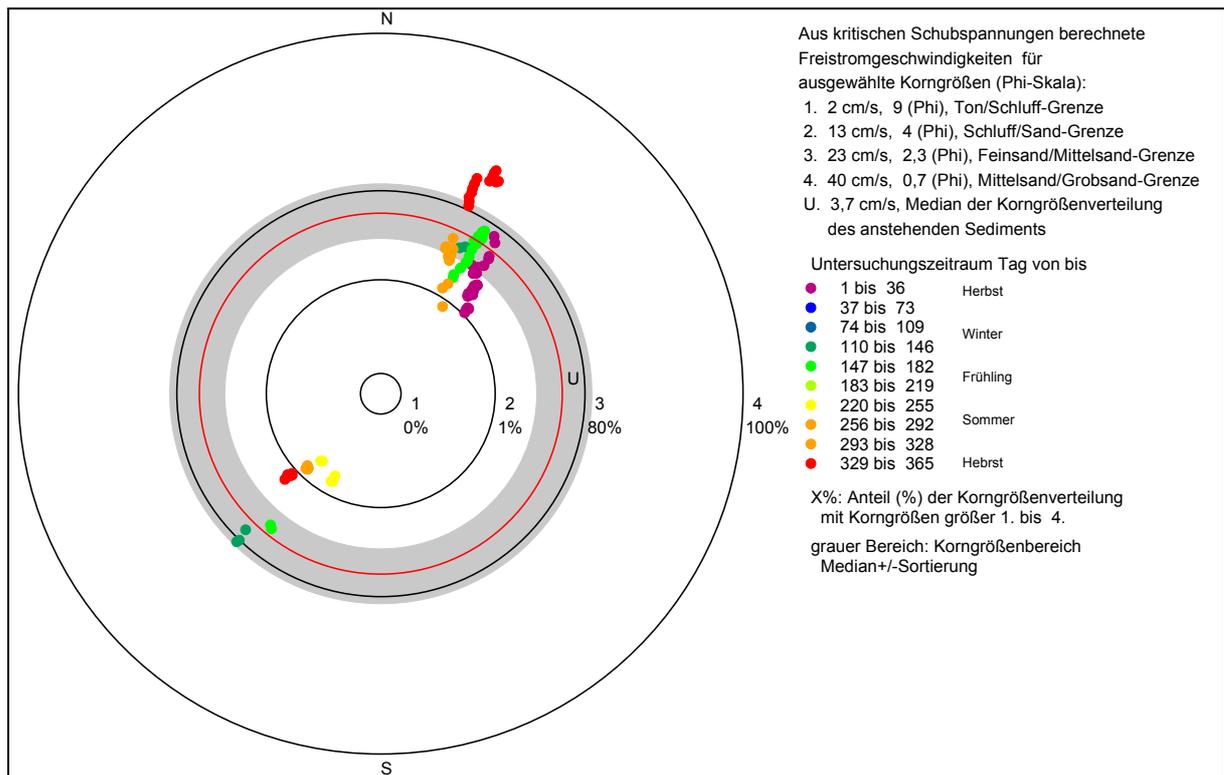


Abb.7-15: Darstellung der Hauptströmungslagen in Bezug zur Strömungsrichtung und zum anstehenden Sediment (Gitterknoten $x=31$, $y=36$, nördlich Darsser Ort).

Das vorgestellte Diagramm bietet eine hochkomprimierte Zusammenstellung von Strömungssituation am Grund und der möglichen Reaktion des anstehenden Sediments.

8 Datenbank und GIS

(B. Bobertz, S. Hölzel)

8.1 Einleitung

Die Zentrale Aufgabe des TP 1 war die Koordination der Kommunikation der einzelnen TP's und der Aufbau und Betrieb einer Meta- und Ergebnisdatenbank.

Die Problematik des Informationsmanagement und der Datenhaltung ist national sowie international umfassend thematisiert worden. Die Kommunikation über e-Mail mit gestaffelten Verteilergruppen und Websites mit verschiedenen Projektpartnern ist Standard (z.B. Morwin), der auch im Projekt DYNAS zum Einsatz kam.

Zur zentralen Datenhaltung existieren verschiedenste Lösungen, die über das Internet abrufbar sind, z.B. CoastBase, EU-SEASED, GeoMIS.Bund, GEIN, NOKIS, UDK, WBD, MARE, MarLIN, PANGAEA, und unterschiedliche Ansätze verfolgen. Die drei letzteren ermöglichen den direkten Download von gefundenen Informationen und Datensätzen. Alle übrigen Systeme stellen Metadaten-Informationssysteme dar. Das in der Aufbauphase von der DFG geförderte PANGAEA bietet den umfassendsten und für die in DYNAS gestellten Anforderungen am ehesten geeigneten Ansatz. Der Charakter als Datenbank zur Langzeithaltung von Informationen und die damit verbundenen Datenhaltungsmechanismen schränkt eine dynamische, flexible Nutzung der Datenbank im laufenden Arbeitsprozess ein. Es wurde ab Milestone 1 der Aufbau und die Haltung einer lokalen Datenbank umgesetzt.

Das genutzte Datenbankmanagementsystem (DBMS) Microsoft Access erwies sich in der letzten Phase von DYNAS - der Ergebniszusammenstellung – als den Anforderungen nicht genügend. Die Speicherung von Nutzerrechten in der lokalen Registry macht einen netzweiten Zugriff unmöglich, da Nutzer der Datenbank zufällig oder gewollt, Daten in der Datenbank manipulieren können.

8.2 Datenbankmanagementsystem (DBMS)

In Kooperation mit dem DFG geförderten Projekt SINCOS (Förderkennzeichen FOR 488/1-1) wurde die Datenbank auf das DBMS MySQL migriert. Die Strukturierung der Informationen der Datenbank mittels 1:N Relationen ist ideal geeignet, um in GIS über Joint- bzw. Related Tables eingebunden zu werden.

MySQL (<http://www.mysql.com>) steht unter der GPL und ist auf einer großen Anzahl von Betriebssystemen (Linux, Microsoft Windows, FreeBSD, Sun Solaris, IBM's AIX, Mac OS X, HP-UX, AIX, QNX, Novell NetWare, SCO OpenUnix, SGI Irix, Dec OSF) implementiert. Die Haltung der Datenbank läuft über einen Server auf den Clients zugreifen. Es ermöglicht ein hoch granulare Rechtevergabe bis auf Tabellen-Ebene mittels serverseitiger Haltung von Benutzer- und Gruppen-Rechten. Dieses Konzept harmoniert mit der Einbindung und Präsentation der Datenbank über einen Webserver.

Das Management der Datenbank kann über verschiedene Möglichkeiten realisiert werden. Im Projekt erfolgte die Administration über das Tool PHPMyAdmin – eine in PHP realisierte Software - und in speziellen Fällen direkt über eigene PHP-Skripte oder SQL-Anweisungen. Die Verwendung von PHP als serverseitige Lösung ermöglicht die Nutzung der Datenbank mittels Web-Browser von jedem beliebigen Internet-Zugang aus. Eine lokale Installation von Zusatzprogrammen ist nicht erforderlich. Auch das Laden von Applets und die damit verbundenen Problematiken können somit umgangen werden.

8.3 Implementation

Die DYNAS-Datenbank läuft auf einem Server des IOW. Der administrative Zugriff erfolgt über PHP von einem beliebigen Client aus. Die Integration der Daten in ein GIS geschieht über zwei Wege:

- Direktanbindung über ODBC und
- Download von georeferenzierten Daten mittels vordefinierter Abfragen über die DYNAS-Homepage.

Aufgrund der LAN-Struktur des IOW, welche durch eine Firewall vom Internet abgeschirmt ist, ist ein ODBC-Zugriff von außerhalb des IOW-LAN nicht möglich. Der Nutzer muss die gewünschten Daten per Download auf sein lokales System speichern und anschließend in das GIS importieren.

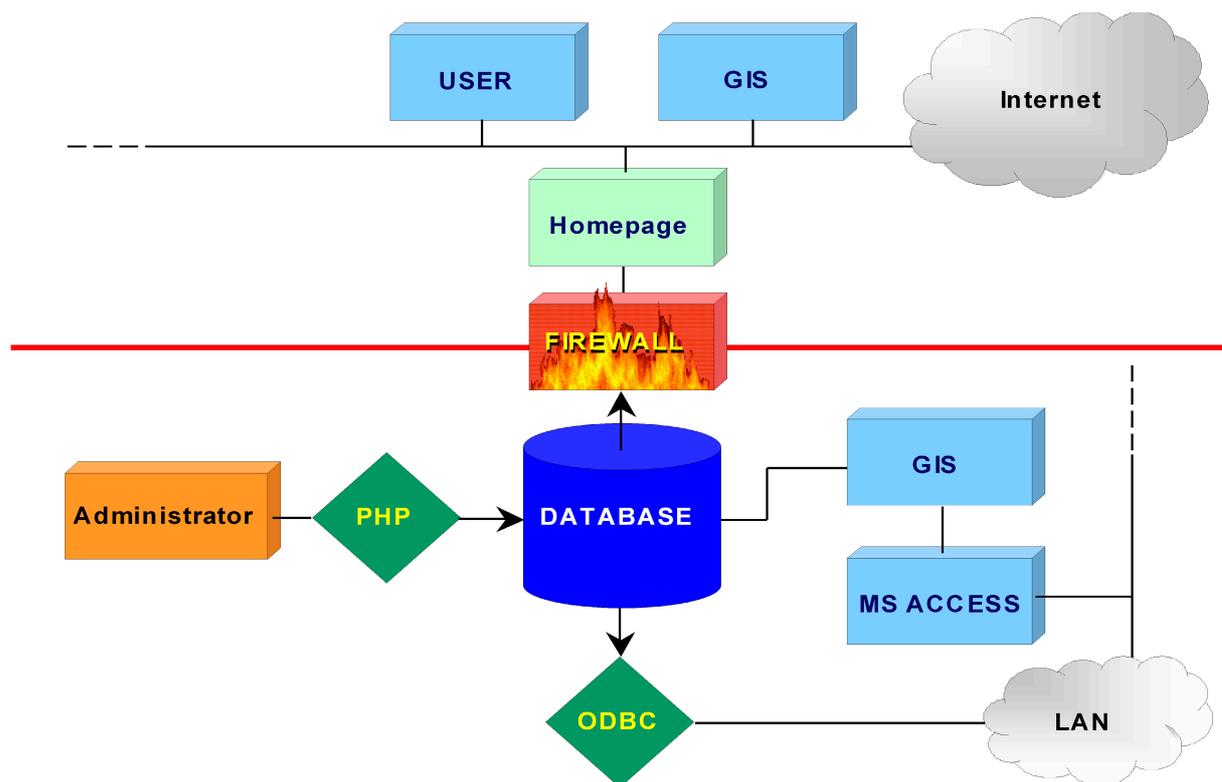


Abb. 8-1: Anbindung der DYNAS-Datenbank.

8.4 Datenbankstruktur

Die Datenbank ist streng 1:N-relational. Jeder Datensatz einer Tabelle enthält eine tabellenweit eindeutige Identifikation (ID). Auf diese ID wird in verknüpften Tabellen Bezug genommen. Thematisch lassen sich drei Bereiche unterscheiden:

- die Meta-Daten,
- die Konstanten und
- die Ergebnisdaten.

Die Metadaten sind nach dem nachfolgenden Schema strukturiert. Unter 'Kampagne' wird im Kontext der Datenbank eine bestimmte Ausfahrt oder Messkampagne verstanden. Innerhalb einer 'Kampagne' werden verschiedene 'Stationen' angefahren. Unter 'Station' versteht man die Gesamtheit aller räumlich zusammengehörigen Aufnahmereignisse (Messungen, Probenahmen, usw.). eine Station kann also auch ein geophysikalisches Profil oder eine Luftbildaufnahme beinhalten. Die an einer Station durchgeführten Messereignisse bzw. Messgeräteinsätze (Kernnahme, Wasserproben, Taucheinsätze, Echolot, Sidescansonar, usw.) werden als 'Event' bezeichnet. Jedes 'Event' ist durch ein eigenes Messverfahren charakterisiert. Auch wenn der Einsatz zweier Messverfahren (z.B. Echolot und Geochirp) zeit- und positionsgleich erfolgt, sind es zwei unterschiedliche Events. Abhängig von der Art des Events existieren spezifische Tabellen, die das entsprechende Event mittels einer ID referenzieren, z.B. Informationen über Oberflächenproben bzw. Kernnahmen. Jedem dieser speziellen Tabellen ist eine Geometrietabelle zugeordnet. Hier ist die Position der Beprobung, die Positionen der Profilabschnitte oder auch die Begrenzungspunkte eines flächenbeschreibenden Polygons jedes Datensatzes gespeichert. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die beschriebene Struktur.

Die Konstanten Datentabellen enthalten Informationen, die sich über die Projektzeit (fast) nicht ändern, z.B. die Projektmitarbeiter. Auf diese kann über die entsprechenden ID's referenziert werden.

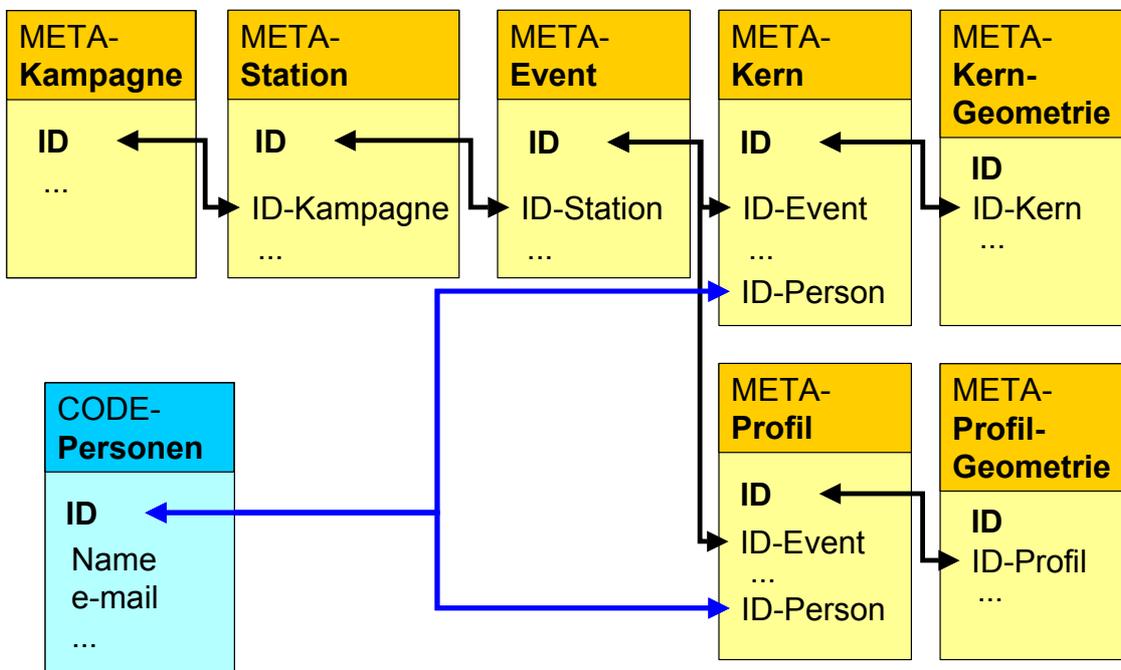


Abb. 8-2: Auszug aus dem Entity-Relationship-Diagramm der Metadaten in der DYNAS-Datenbank.

Die Ergebnisdaten sind in analoger Weise organisiert. Über entsprechende ID's referenzieren Tabellen mit verschiedenen Ergebnisarten auf eine Tabelle mit einer allgemeinen Beschreibung der Art der Ergebnisse. Jede dieser Tabellen kann

optional mit einer Geometrietabelle verlinkt sein, welche die Position von punktförmigen Daten, z.B. die Korngrößenparameter, oder die Positionen der Eckpunkte von Modellszenarien enthält. Die hierarchische Ebene der entsprechenden Geometrietabelle hängt von der Art des Ergebnisses ab. Die Geometrietabelle für Zeitreihenmessungen an festen Positionen, wie z.B. Daten des Eventsamples, sind vor der eigentlichen Datentabelle gelinkt. Im Falle von Punkt- bzw. Flächeninformationen wie sie für die Korngrößenparameter oder Szenarienmovies vorliegen, sind die Geometrietabellen hinter den Tabellen mit den entsprechenden Informationen gelinkt. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Struktur.

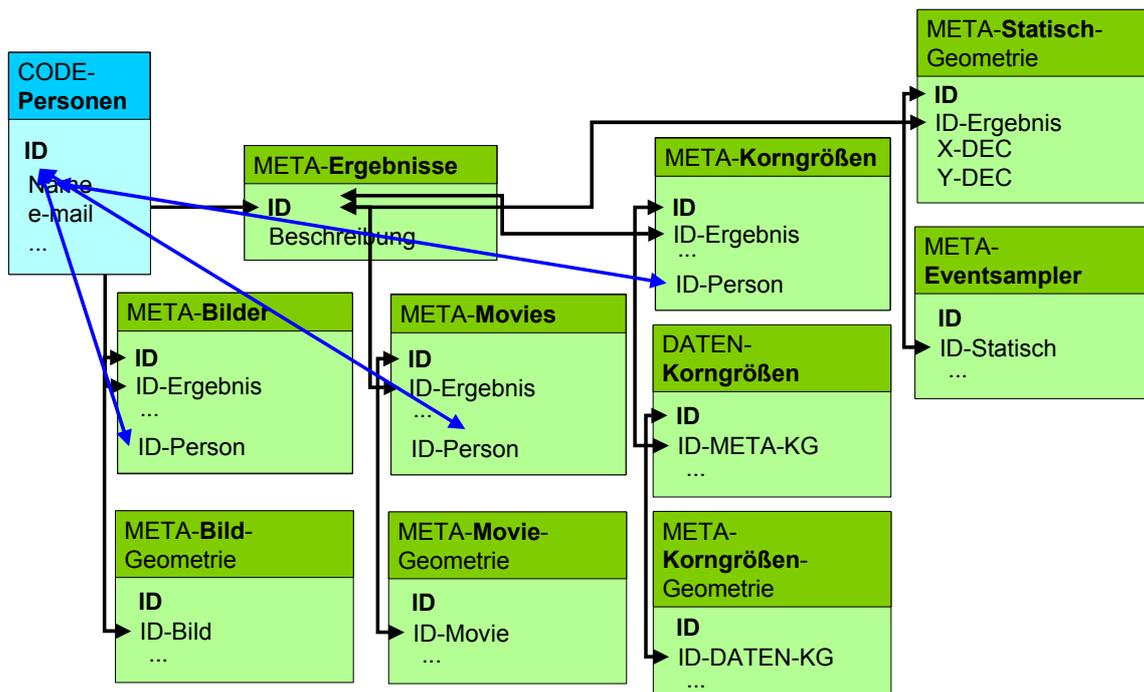


Abb. 8-3: Auszug aus dem Entity-Relationship-Diagramm der Ergebnisdaten in der DYNAS-Datenbank.

Die Struktur der Datenbank ist in Master-Tabellen gespeichert. Diese können durch die PHP-Skripte ausgewertet werden, die zur Präsentation und Nutzung der Datenbank entworfen wurden. Durch die Speicherung der Relationen in den Master-Tabellen ist eine Unabhängigkeit von datenbankspezifischen Lösungen gewährleistet.

8.5 Datenbankzugriff über die DYNAS-Homepage

Der Zugriff auf die Inhalte der Datenbank über die DYNAS-Homepage bietet die Möglichkeit interaktiv durch die Datenbank zu browsen und über die gebotenen vordefinierten Abfragen gewünschte Informationen herunter zu laden. Die Abfragen sind in der Datenbank gespeichert. Sie bestehen aus SQL-Anweisungsschnipseln und weiteren Informationen, welche durch PHP-Skripte ausgewertet werden. Einen Eindruck von der Funktionsweise der Abfrageseite gibt die nachfolgende Abbildung.

DYNAS database - Kerntabelle

area of interest (clear / default)

select your area with two clicks in the image
or use the input elements below
first click: upper left corner
second click: lower right corner

(coordinates in decimal degree)

north: 56
west: 9.2 east: 14.5
south: 53.8

select a map: Übersicht Ok

download (semicolon separated text)

data preview
records to show: 20 Matches: 1296 (1- 20)

Fahrt	Projekt	Stations-ID	Event	Gerät	Datum	Longitude	Latitude	Datenhalter
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	1	TS-Sonde	1998-09-23	12.1024999619	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	10	MUC	1998-09-23	12.1024999619	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	11	TS-Sonde	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	12	Bodenwasserschöpfer	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	13	Secchischeibe	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	14	Handwasserschöpfer	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	15	Handwasserschöpfer	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	16	Handwasserschöpfer	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff
Tonnenleger Darßer Ort	DYNAS	220120	17	KG	1998-09-24	12.1028995514	54.3084983826	Harff

Abb. 8-4: Beispiel für den Download-Dialog auf der Datenbankseite der DYNAS-Homepage. Das dargestellte Dateninventar reflektiert einen frühen Stand (Anfang Mai).

8.6 Datenbankzugriff über ODBC

Der Zugriff über ODBC (Open DataBase Connectivity) bietet sich speziell mit der direkten Anbindung der Datenbank an ein GIS an. Hierzu ist die lokale Installation des MySQL-ODBC-Treiber nötig. dieser kann über die MySQL-Homepage herunter geladen und kostenlos genutzt werden (<http://www.mysql.com/downloads/api-myodbc.html>). Über die Windowssystemsteuerung kann anschließend die Datenbank als neue ODBC-Datenquelle definiert werden.

ArcView 3.x als auch ArcGIS 8.x (beide Versionen kamen während des Projektbearbeitung zum Einsatz) bieten die Möglichkeit ODBC-Datenquellen zu nutzen. Hier zu müssen nach der Einbindung der Datenquelle manuell die Verknüpfungen einmalig angegeben werden. Bei allen Versionen von ArcGIS tritt jedoch bei der Nutzung von ODBC-Datenquellen ein Fehler auf, der bei der Herstellerfirma (ESRI) unter der Bearbeitungsnummer CQ00156410 geführt und bis zum Zeitpunkt der Berichtverfassung nicht behoben ist.

8.7 GIS

Zur Laufzeit des Projektes DYNAS kam als GIS die Software ArcView 3.x und deren Nachfolger ArcGIS 8.x der Firma ESRI zum Einsatz. Sie spielten die zentrale Schnittstelle bei der Kompilation, Synthese und dem Transfer von Informationen zum IOW-Modell. Die in der Parametrisierung gewonnenen Parameterverteilungen wurden in das GIS importiert und auf das generierte Modellraster transferiert. Mittels dieser Systeme wurden Karten der Verteilung der Oberflächensedimente in der Ostsee digitalisiert und existierende digitale Karten importiert. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die zentrale Stellung des GIS.

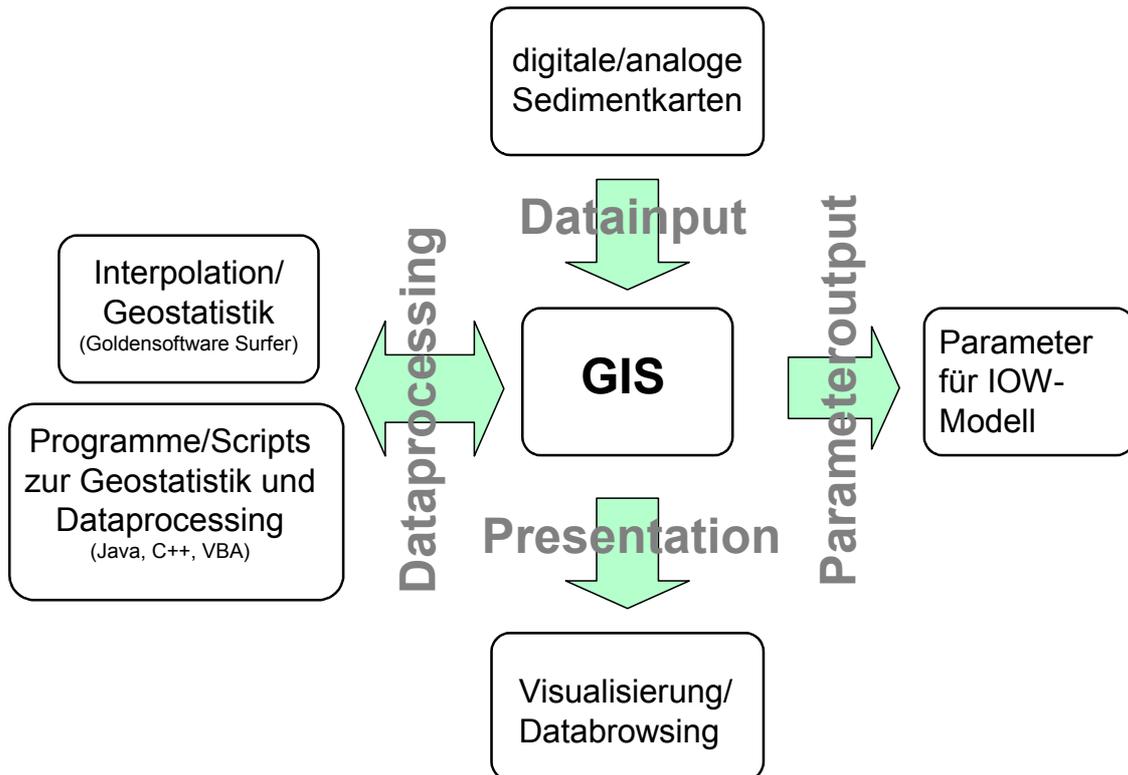


Abb. 8-5: Das GIS als zentrale Schnittstelle zwischen den einzelnen Software-Tools und Datenquellen.

Literatur

- Aharonson, E. F., Karasikov, N., Roitberg, M. und Shamir, J. (1986): Galai-CIS-1 - A novel approach to aerosol particle size analysis. *Journal of Aerosol Science* 17(3): 530-536.
- Black, K. P. und Vincent, C. E., High-resolution Field Measurements and Numerical Modelling of Intra-wave Sediment Suspension on Plane Beds under Shoaling Waves, *Coastal Engineering* 42 (2) (2001) 173-197.
- Bobertz, B. (2000): Regionalisierung der sedimentären Fazies der südwestlichen Ostsee. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Greifswald, Ernst-Moritz-Arndt-Universität: 121.
- Bohling, B., Sedimentological parameters as a basis for investigations on sediment dynamic in the Mecklenburg Bay, Germany, The Seventh Marine Geological Conference "Baltic-7", 21.-27.04.2002, Kaliningrad/Russia: poster presentation.
- Bouws, E., Guenther, H., Rosenthal, W. und Vincent, C. L., Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water 1. Spectral Form, *Journal of Geophysical Research* 90 (C1) (1985), 975-986.
- Brezina, J. (1979): Particle size and settling rate distributions of sand-sized materials. In: 2. Europäisches Symposium "Partikelmeßtechnik", E: Sedimentation, Nürnberg. 1-44.
- Christiansen, C., Edelvang, K., Emeis, K., Graf, G., Jähmlich, S., Kozuch, J., Laima, M., Leipe, T., Löffler, A., Lund-Hansen, L. C., Miltner, A., Pazdro, K., Pempkowiak, J., Shimmield, G., Shimmield, T., Smith, J., Voss, M. und Witt, G., Material transport from the nearshore to the basinal environment in the southern Baltic Sea I. Processes and mass estimates, *Journal of Marine Systems* 35 (2002) 133-150.
- Dade B.W., Hogg A.J., Boudreau B.P., (2001). Physics of flow above the sediment-water interface. In: The benthic boundary layer: Transport processes and biogeochemistry. Boudreau B.P. und Jørgensen B.B., Hrsg., Oxford University Press, Book 1: 4-43
- Daro M.H., Polk P., (1973). The autecology of *Polydora ciliata* along the Belgian coast. *Neth. J. Sea Res.* 6: 130-140
- Darwin, C.R. (1859): *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life.* John Murray, London /GB.
- De Brouwer, J.F.C., Bjelic, S., de Deckere, E.M.G.T. und Stal, L.J., (2000). Interplay between biology and sedimentology in a mudflat (Biezelingse Ham, Westerschelde, The Netherlands). *Continental Shelf Research*, 20: 1159 - 1177.
- Decho, A., (2000). Microbial biofilms in intertidal systems: an overview. *Cont. Shelf Res.*, 20(10-11): 1257-1273.
- Folk, R. L. (1966): A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6: 73 - 93.
- Folk, R. L. und Ward, W. C. (1957): Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-27.

- Forster, S., Bobertz, B. und Bohling, B. (subm.): Permeability of sands in the coastal areas of the southern Baltic Sea: mapping a grain-size related sediment property. *Aquatic Geochemistry*.
- Friedrichs M., Graf G., (2003). Description of a flume channel profilometry tool using laser line scans. *Aquatic Ecology* (in press)
- Friedrichs M., Graf G., Springer B., (2000). Skimming flow induced over a simulated polychaete tube lawn at low population densities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 192: 219-228
- Friedrichs, M. (2001): Bericht zum Methodenvergleich zwischen Mikrokosmos und Strömungskanal. Rostock, interner Bericht (unveröffentlicht): 4.
- Grant, W. D. und Madsen, O. S., Combined Wave und Current Interaction With a Rough Bottom, *Journal of Geophysical Research* 84 (C4) (1979) 1797-1808.
- Griffies, S. M., Pacanowski, R., Schmidt, M. und Balaji, V., Tracer Conservation with an Explicit Free Surface Method for Z-coordinate Ocean Models, *Monthly Weather Review* 129 (2001) 1081-1098.
- Gust, G. und Müller, V., (1997). Interfacial hydrodynamics and entrainment functions of currently used erosion devices. In: N. Burt, R. Parker and J. Watts (ed), *Cohesive Sediments*. John Wiley & Sons Ltd., pp. 149-174.
- Harff, J., Bliesener, A. et al. (1997): Zusammenstellung und wissenschaftliche Interpretation von Daten über den Meeresboden der westlichen Ostsee aus den Jahren 1953 - 1985, Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Warnemünde.
- Harff, J., Lemke, W., Tauber, F. und Emelyanov, E. M. (1995): Geologische Kartierung der Ostsee. *Geowissenschaften* 13(11): 442 - 447.
- Hartmann-Schröder, G., 1996. Die Tierwelt Deutschlands, 58 Teil, Anelida, Borstenwürmer, Polychaeta. Gustaf Fischer 2
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Calson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973): Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).- *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, A12: 1-95.
- Hjulström, F. (1935): Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Geol. Inst. Univ. Uppsala Bull.*(25): 221-528.
- Jankowski, J. A., Malcherek, A. und Zielke, W., Numerical Modelling of Suspended Sediment due to Deep Sea Mining, *Journal of Geophysical Research* 101 C2 (1996) 3545-3560.
- Journel, A. G. und Huijbregts, C. (1978): *Mining Geostatistics*. London, Academic Press. 600
- Kennedy, J. F. (1995): The Albert Shields Story. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(11): 766-772.
- Kolp, O. (1966): Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung. *Beiträge zur Meereskunde, Akademie-Verl., Berlin*(17-18): 9 - 60.
- Komar, P. D. und Clemens, K. E. (1985): The relationship between a grain's settling velocity and threshold of motion under unidirectional currents. *Journal of Sedimentary Petrology* 56: 258 - 266.

- Krögel, F. (1997): Einfluß von Viskosität und Dichte des Seewassers auf Transport und Ablagerung von Wattsedimenten (Langeooger Rückseitenwatt, südliche Nordsee). Berichte, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen. 102: 168.
- Krumbein, C. W. und Monk, G. D. (1942): Permeability as a Function of the Size Parameters of Unconsolidated Sand. AIME Technical Publications 1492: 153-163.
- Krumbein, W.C. (1934): Size Frequency Distribution of Sediments.- Journal of Sedimentary Petrology, 4: 65 - 77.
- Kuhrts, C., Fennel, W., Seifert, T. und Schmidt, M. (2002): Modelling sedimentary processes in the western Baltic. Copenhagen, CM 2002/P:06, ICES CM documentation annular report (CD-ROM).
- Lau, Y. L. und Droppo, I. G. (2000): Influence of antecedent conditions on critical shear stress of bed sediments. Water-Research 34(2): 663 - 667.
- Lavelle, J. W. und Mofjeld, H. O. (1987): Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist? Journal of Hydraulic Engineering 113: 370 - 385.
- Le Roux, J. P. (1998): Entrainment threshold of natural grains in liquids determined empirically from dimensionless settling velocities and other measures of grain size. Sedimentary Geology 119(1-2): 17 - 23.
- Leipe, T., Loeffler, A., Emeis, K., Jaehmlich, S., Bahlo, R. and Ziervogel, K., (2000). Vertical Patterns of Suspended Matter Characteristics Along a Coastal-basin Transect in the Western. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 51(6): 789-804.
- Liu, P. C., Schwab, D. J., Bennett, J. R. und Donelan, M. A., Application of a Simple Numerical Wave Prediction Model to Lake Erie, Journal of Geophysical Research 89 (C3) (1984) 3586-3592.
- Lopez, F. und Garcia, M. H. (2001): Risk of Sediment Erosion and Suspension in Turbulent Flows. Journal of Hydraulic Research 127(3): 231-235.
- Madsen, K., Nilsson, P. und Sundbaeck, K., (1993). The influence of benthic microalgae on the stability of a subtidal sediment. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 170(2): 159-177.
- McManus, J. (1988). Grain size determination and interpretation: In: Tucker, M. E. (Hrsg.): Techniques in sedimentology. Oxford, Blackwell Scientific Publications. 63 - 85.
- Mehta, A. J. und Lee, S. C. (1994): Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grain. Journal of Coastal Research. 10(1): 170 - 177.
- Meyer-Peter, E. und Müller, R., Formulas for Bed-Load Transport, Rep. 2nd Meet. Int. Assoc. Hydr. Struct. Res., Stockholm 1948, 39-64.
- Miller, M. C., McCave, I. N. und Komar, P. D. (1977): Threshold of sediment motion under unidirectional currents. Sedimentology 24: 507 - 527.
- Mitchener, H. und Torfs, H. (1996): Erosion of mud/sand mixtures. Coastal Engineering 29(1-2): 1- 25.

- Neumann, T., Fennel, W. und Kremp, C., Experimental simulations with an ecosystem of the Baltic Sea: A nutrient load reduction experiment. *Global Biogeochemical Cycles* 16 (2002) (3).
- Nielsen, P., Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport, *Advanced Series on Ocean Engineering* 4, World Scientific Edition (1992).
- Nowell A.R.M., Church M., (1979). Turbulent flow in a depth-limited boundary layer. *J. Geophys. Res.* 84:4816-4824
- Paterson, D.M. und Black, K.S., (1999). Water flow, sediment dynamics and benthic biology. *Advances in Ecological Research*, 29: 155-193.
- Poulos, S. E. (2001): The contribution of near-bed currents to modern sedimentation processes in the deep water of the Hellenic Arc-Trench system, eastern Mediterranean. *Geo-Marine Letters* 20: 201-208.
- Puls, W. und Sündermann, J., Simulation of Suspended Sediment Dispersion in the North Sea, Residual currents and long term transport, Springer Verlag (New York) (1990), 356-372.
- Puls, W., Doerffer, R., und Sündermann, J., Numerical Simulation and Satellite Observations of Suspended Matter in the North Sea, *Journal of Oceanographic Engineering* 19 (1) (1994) 3-9.
- Rechenberg, I. (1973): Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach dem Prinzip der biologischen Evolution.- problemata. Friedrich Frommann Verlag (Holzboog KG.), Stuttgart-Bad Cannstatt.
- Ribbe, J. und Holloway, P. E., A Model of Suspended Sediment Transport by Internal Tides, *Continental Shelf Research* 21 (2001) 395-422.
- Rietz, V., Bobertz, B., Seifert, T. und Harff, J. (2000): Numerical Simulations of Sediment Transport Processes Caused by Currents and Waves in the Western Baltic Sea. In: 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro - Brazil (CD-ROM).
- Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. und Lick, W. (1998): Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(12): 1261 - 1267.
- Rosenthal, W., Bouws, E., Guenther, H. und Vincent, C. L., Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water 1. Spectral Form, *Journal of Geophysical Research* 90 (C1) (1985) 975-986.
- Scholle, T., Niedermeyer, R.-O., Schiller, H. und Kranitz, B. (1996): Modulare laseroptische Partikelanalyse an Oberflächensedimenten des Greifswalder Boddens (südliche Ostsee) unter Berücksichtigung methodischer Aspekte. *Senckenbergia maritima* 27(1/2): 1 - 9.
- Seifert, T. und Kayser, B. (1995): A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. *Meereswissenschaftliche Berichte / Marine Science Reports*. Warnemünde, Institut für Ostseeforschung. 9: 72-88.
- Seifert, T., Tauber, F. und Kayser, B., A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – revised edition, <http://www.io-warnemuende.de> (2001).
- SHD-DDR (1987): Karte der Sedimente in der Mecklenburger Bucht. Rostock, Seehydrographischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik.

- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffahrt (26).
- Smith, D. T. und Buchan, S. (2002): Usefulness of classification and properties of clay-rich sediments in evaluating sea-bed environment conditions. *Geo-Marine Letters* 22: 60-65.
- Smith, J. D. und McLean, S. R., Spatially Averaged Flow Over a Wavy Surface, *Journal of Geophysical Research* 82 (12) (1977), 1735-1746.
- Soulsby, R. L. (1983). The bottom boundary Layer in shelf seas: In: Johns, B. (Hrsg.): *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*. Amsterdam, Elsevier Oceanography Series. 35. 189 - 266.
- Soulsby, R. L. und Whitehouse, R. (1997): Threshold of sediment motion in coastal environments. *Proc. Pacific Coasts and Ports '97 Conf.* University of Canterbury, New Zealand. Christchurch. 1: 149-154.
- Soulsby, R.L., (1997). *Dynamics of marine Sands: A manual for practical applications*. HR Wallingford Report SR, 466. Thomas Telford Publications, 249 pp.
- Springer, B. M., Friedrichs, M., Graf, G., Nittikowski, J. und Queisser, W. (1999): A high precision current measurement system for laboratory flume systems - a case study around a circular cylinder. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 183: 305 - 310.
- Stephens, S., Green, M. O. und Pilditch, C. (2002): Bugs 'n' mud - a sticky problem. *Water & Atmosphere* 10(1): 14-15.
- Tardent P., (1993). *Meeresbiologie: Eine Einführung*. Thieme, Stuttgart
- Tauber, F. (1995): Characterization of Grain-Size Distributions for Sediment Mapping of the Baltic Sea Bottom, *The Baltic - 4th Marine Geological Conference*. SGU/Stockholm Center for Marine Research, Uppsala.
- Tolhurst, T. J., Black, K. S., Paterson, D. M., Mitchener, H. J., Termaat, G. R. und A., S. (2000): A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments. *Continental Shelf Research*. 20(10-11): 1397-1418.
- Turnewitsch, R. & Graf, G. (2003): Variability of particulate seawater properties to bottom mixed layer-associated internal waves in shallow water on a time scale of hours. *Limnol. Oceanogr.* 48(3): 1254-1264.
- Underwood, G.J.C. und Smith, D.J., (1998). In situ measurements of exopolymer production by intertidal epipelagic diatom-dominated biofilms in the Humber estuary. In: K.S. Black, D.M. Paterson and A. Cramp (ed), *Sedimentary processes in the intertidal zone*. Geological Society, London, pp. 125 - 134.
- Underwood, G.J.C., Paterson, D.M. und Parkes, R.J., (1995). The measurement of microbial carbohydrate exopolymers from intertidal sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 40(7): 1243-1253.
- Unsöld, G. (1982): Der Transportbeginn rolligen Sohlmaterials in gleichförmigen turbulenten Strömungen: Eine kritische Überprüfung der Shields-Funktion und ihre experimentelle Erweiterung auf feinstkörnige, nichtbindige Sedimente. *Rep. SFB 95, Universität Kiel* 70: 141.
- Vogel, S (1994). *Life in moving fluids*. Princeton University Press, New Jersey

- Wackernagel, H., (1995). *Multivariate Geostatistics*. Springer, Berlin
- Weiner, B. B., Tscharnuter, W. W. und Karasikov, N. (1998). Improvement in Accuracy and Speed Using the Time-of-Transition Method and Dynamic Image Analysis For Particle Sizing: In: Provder, T. (Hrsg.): *Particle Size Distribution III*, American Chemical Society.
- White, S. J. (1970): Plane bed thresholds of fine-grained sediments. *Nature* 228: 152-153.
- Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W. und Mitchener, H. J. (2000): *Dynamics of estuarine muds: A manual for practical applications*. London, Thomas Telford Publications. 210
- Widdows, J., Brinsley, M., Elliot, M., (1998a). Use of in situ flume to quantify particle flux (biodeposition rates and sediment erosion) for an intertidal mudflat in relation to changes in current velocity and benthic macrofauna. *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone* 139: 85-97.
- Widdows, J., Brinsley, M., Salkeld, P.N., Elliot, M. (1998b). Use of annular flumes to determine the influence of current velocity and bivalves on material flux at the sediment-water interface. *Estuaries* 21(4A): 552-559.
- Wright, L. D. (1989): Benthic boundary layers of estuarine and coastal environments. *Rev. Aquat. Sci.* 1: 75-95.
- Zanke, U. (1977): Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß. *Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover* 46: 156-178.
- Zanke, U. (1982): *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Berlin, Springer-Verl. 402
- Zanke, U. (1990): Der Beginn der Sedimentbewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem. *Wasser & Boden* 42(1): 40-43.
- Zanke, U. (2002): *Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer*. Berlin, Parey Buchverlag. 330
- Ziervogel, K. und Bohling, B. (2003): Sedimentological parameters and erosion behaviour of submarine coastal sediments in the southwestern Baltic Sea. *Geo-Marine Letters*: DOI 10.1007/s00367-003-0123-4.
- Ziervogel, K., (2001). Stabilisation und Destabilisation mariner Sedimente durch benthische Organismen und anthropogene Einflüsse - Eine Literaturstudie. *Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Bericht BfG-1312*: 32 p.

Anlage 1

Siegel, H., Gerth, M., Heene, T., Ohde, T., Rühs, D., Kraft, H. (2001): DYNAS - Teilprojekt 3.1: Hydrografie, Strömung und Schwebstoffverteilung während der Verklappung am 20. / 21.06.2001.- Projektbericht, IOW, Rostock.

Anlage 2

CD-ROM mit ausgewählten Arbeiten

Die HTML-Datei „index.htm“ enthält Links auf die entsprechenden Arbeiten. Zur Darstellung dieser Datei ist ein Webbrowser (z.B. Opera - Copyright © The OpenSSL Project, Netscape - Copyright © Netscape Communications Corporation, Mozilla - Copyright © The Mozilla Organization, Internet Explorer - Copyright © Microsoft Corporation) notwendig. Zur Betrachtung der Arbeiten ist der kostenlose Acrobat Reader® von Adobe Systems Inc.© notwendig.

Bobertz, B. (2000): Regionalisierung der sedimentären Fazies der südwestlichen Ostsee.- Dissertation Thesis, Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald, 121 pp.

Forster, S., Bobertz, B., Bohling, B. (subm.): Permeability of sands in the coastal areas of the southern Baltic Sea: mapping a grain-size related sediment property.- Aquatic Geochemistry.

Heise, B. (2002): Strömungsschwankungen am Meeresboden zwischen Mecklenburger Bucht und Arkonabecken nach Modellierungsergebnissen und mögliche Auswirkungen auf die Sedimentation.- Diplomarbeit, Ernst-Moritz-Arndt- Univ. Greifswald, 205p.

Kuhrts, C., Fennel, W., Seifert, T., Schmidt, M. (2002): Modeling sedimentary processes in the western Baltic.- CM 2002/P:06 ASC Edition ICES CM 2002 Documents 2002, Copenhagen/Denmark.

Maak, S. (2001): Steckbriefe zu einigen Schlüsselarten der Mecklenburger Bucht und deren Integration in ein GIS.- HTML-Präsentation.

Siegel, H., Gerth, M., Heene, T., Ohde, T., Rühs, D., Kraft, H. (2001): DYNAS -Teilprojekt 3.1: Hydrografie, Strömung und Schwebstoffverteilung während der Verklappung am 20. / 21.06.2001.- Projektbericht, IOW, Rostock.

Ziervogel, K. (2001): Stabilisation und Destabilisation mariner Sedimente durch benthische Organismen und anthropogene Einflüsse - Eine Literaturstudie.- Bericht BfG-1312, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Ziervogel, K. und Bohling, B. (2003): Sedimentological parameters and erosion behaviour of submarine coastal sediments in the southwestern Baltic Sea. Geo-Marine Letters: DOI 10.1007/s00367-003-0123-4.