

**Sedimentverteilung und
Benthosverbreitung in den Watten
der Dithmarscher Bucht als Indikator
für morphodynamische Veränderungen**

**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SEDIMORV
im GKSS-Hochschulprogramm**



Autor:
H.-C. Reimers

**Sedimentverteilung und
Benthosverbreitung in den Watten
der Dithmarscher Bucht als Indikator
für morphodynamische Veränderungen**

**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SEDIMORV
im GKSS-Hochschulprogramm**

Autor:

H.-C. Reimers

(Institut für Küstenforschung)

Titelbild



Die Watten der Dithmarscher Bucht:

Überwiegend sandig, aber von sehr unterschiedlichem Erscheinungsbild (Fazies);
links: Blick vom Blauortsand zum Hedwigenkoog,
rechts: Bielshövensand.

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
D-21494 Geesthacht
Germany
Fax.: (49) 04152/871717

Als Manuskript vervielfältigt.
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

Sedimentverteilung und Benthosverbreitung in den Watten der Dithmarscher Bucht als Indikator für morphodynamische Veränderungen – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SEDIMORV im GKSS-Hochschulprogramm

Hans-Christian Reimers

41 Seiten mit 18 Abbildungen und 4 Tabellen

Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens SEDIMORV war es, mögliche Veränderungen in der Sediment- und Morphodynamik der Dithmarscher Watten zu erfassen und vor dem Hintergrund der Eindeichungen in der Meldorfer Bucht (1970–1979) zu beurteilen.

Grundgedanke dabei war, dass die Zusammensetzung und Verteilung der marinen Sedimente die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Ablagerung widerspiegeln und die benthischen Lebensgemeinschaften sich ihrerseits artenspezifisch bestimmten Sedimentfaziestypen anpassen. Somit können Änderungen in der Sedimentverteilung und Benthosbesiedlung Veränderungen der Transport- und Umlagerungsprozesse anzeigen, noch bevor sie morphologisch wirksam werden.

Es wurden sowohl die Verteilung und die Mobilität der im Eulitoral vorkommenden Ablagerungen großräumig kartiert, als auch die jahreszeitliche Variabilität der Sedimentbeschaffenheit und der Benthosbesiedlung untersucht.

Die Ermittlung der morphodynamischen Veränderungen erfolgte durch Auswertung von Tiefenvermessungen und Luftbildern. Sedimentologische Umstrukturierungen wurden durch statistische Faziesanalysen erfasst.

Die morphodynamischen Veränderungen im Bereich der Außensände und der hochgelegenen offenen Watten stimmen weitgehend mit der Verlagerung der Sedimentfaziesräume überein. Die starken Verschiebungen zwischen den Faziestypen in der Meldorfer Bucht deuten zusammen mit den Veränderungen in der Benthosbesiedlung auf weitere morphodynamischen Umstrukturierungen hin.

Sediment Composition and Benthos Distribution in the Dithmarschen Bight as an Indicator for Morphodynamic Changes

Abstract

The aim of the research project "SEDIMORV" was to identify basic changes in the sediment movement and morphodynamics of the Dithmarschen Wadden Sea also taking into consideration the diking in the Meldorf Bight (1970–1979).

The basic concept was that composition and distribution of marine sediments reflect the predominating hydraulic conditions at the time of deposition. On the other hand the benthic communities prefer special types of sediments. Therefore changes in the sediment

distribution and in the benthic communities will indicate changes in the transport process probably before the effects are visible in the morphology.

In this project large scale mappings of the distribution and mobility of eulittoral deposits and analyses of seasonal variability in sediment composition and benthos distribution have been done. The analyses of morphodynamic changes are based on elevation measurements and aerial photographs. Sedimentological restructurings were investigated by statistical facies analyses.

The morphodynamic changes in the area of the outer sand bodies and of the high elevated open tidal flats correlate largely with the shifting of the sediment facies units. The clear shifting between the facies types in the Meldorf Bight together with the changes in the benthic communities point to further morphodynamic restructurings.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	7
1.1	Hintergrund und Ziel der Untersuchungen	7
1.2	Lage des Untersuchungsgebietes	8
2	CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	10
2.1	Geologischer Abriss	10
2.2	Tide- und Seegangsverhältnisse	10
2.3	Sedimentverteilung und Morphodynamik	11
2.4	Benthosbesiedlung	11
2.5	Küsten- und Naturschutz	12
3	MATERIAL UND METHODEN	13
3.1	Sediment- und Benthoskartierung	13
3.2	Sedimentologische Laboranalysen und Auswertungen	15
3.2.1	Sieb- und Schlämmanalyse	16
3.2.2	Laseroptische Partikelanalyse	16
3.2.3	Tracer- und Radiographieanalysen	16
3.2.4	Korngrößenstatistische Auswertungen	17
3.3	Analyse der Benthosproben	17
3.3.1	Makrozoobenthos	17
3.3.2	Mikrophytobenthos	18
3.4	Raumbezogene Daten und Luftbildszenen	18
3.5	Nicht verwendete Ergebnisse	19
3.6	Verlauf der Untersuchungen	19
4	ERGEBNISSE	20
4.1	Morphologische Veränderungen	20
4.2	Sedimentologische Charakteristika und Veränderungen	21
4.2.1	Korngrößenverteilung	21
4.2.2	Sedimentfaziestypen	21
4.2.3	Ergebnisse der Clusteranalyse	23
4.2.4	Sedimentumlagerung und Sedimentschichtung	24
4.2.5	Veränderungen in der Sedimentverteilung	26
4.3	Mikrophyto- und Makrozoobenthos	27
4.3.1	Mikrophytobenthos	27
4.3.2	Makrozoobenthos	28
5	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	29
5.1	Sedimentfaziesräume und Habitate	29
5.2	Veränderung der Sedimentverteilung und Benthosverbreitung	30
5.3	Morphodynamische Veränderungen	30
5.4	Fazit	31
6	LITERATUR	32
7	KARTENANHANG	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Lage des Untersuchungsgebietes in der Dithmarscher Bucht mit den Teilgebieten und den Transekten.	9
Abb. 2:	FTZ-Probennehmer.	14
Abb. 3:	Verlauf der sedimentologischen Laborarbeiten.	15
Abb. 4:	Funktionsweise des CIS-Lasergranulometers (LOT GmbH 1989).	16
Abb. 5:	Charakteristische Korngrößenverteilungen in den Oberflächensedimenten der Dithmarscher Watten.	21
Abb. 6:	Sedimentfaziestypen auf der Basis von Korngrößenstatistischen Berechnungen.	22
Abb. 7:	Dendrogramm nach dem Ward Verfahren.	23
Abb. 8:	Röntgenpositive von Sedimentprofilen mit Tracern vom Bielshövensand; links Frühjahr 2000, rechts Herbst 2000.	24
Abb. 9:	Röntgenpositive von Sedimentprofilen mit Tracern vom Blauortsand; links Frühjahr 2000, rechts Herbst 2000.	25
Abb. 10:	Veränderungen im Kornspektrum auf den drei Transekten innerhalb des Untersuchungszeitraumes.	26
Abb. 11:	Chlorophyll-a-Gehalte und Medianwert der Korngrößenverteilung in den obersten 1–2 mm des Sediments.	27
Abb. 12:	Karte der Wattflächen und Priele (digitalisierte Luftbilder 1973, 1989 u. 1995)	37
Abb. 13:	Karte der Sedimentverteilung 2000 (Flächen) und 1989 (Sechsecke).	36
Abb. 14:	Karte der Sedimentverteilung 1978 (Flächen) und 1989 (Sechsecke).	37
Abb. 15:	Karte der Veränderungen in der Korngrößenzusammensetzung 1978–2000.	38
Abb. 16:	Karte der Medianwerte der Korngrößenverteilung 1999/2000.	39
Abb. 17:	Karte der Arenicola-Abundanzen 1978 (Flächen) und 1999/2000 (Kreise).	40
Abb. 18:	Karte der Chlorophyll-a-Gehalte im Oberflächensediment 1999/2000.	41

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Liste der im Gelände erfassten Parameter (Kartierprotokoll).	13
Tab. 2:	Liste der erfassten Makrofauna-Arten.	18
Tab. 3:	Überblick über den Verlauf der Untersuchungen.	20
Tab. 4:	Individuenzahlen vergleichbarer Makrofauna-Arten.	28

1 EINLEITUNG

Die Sedimentations- und Erosionsprozesse im Wattenmeer werden im wesentlichen durch das Tidegeschehen, den Seegang sowie durch das Materialangebot gesteuert. Dabei ist der Eintrag neuen Materials gegenüber den Umlagerungen im Wattenmeer heute vergleichsweise gering (MC CAVE 1973, REINECK 1978, EISMA 1981).

Zahlreiche morphodynamische Parameter und biologische Einflussfaktoren stehen mit den Umlagerungsprozessen und folglich auch mit der Verteilung und Beschaffenheit der Sedimente in Wechselwirkung. Die Zusammensetzung und Verteilung der marinen Sedimente spiegelt die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Ablagerung wider (MEYER 1999). Die benthischen Lebensgemeinschaften der Watten passen sich ihrerseits artenspezifisch bestimmten Sedimentfaziesräumen an (REINECK 1978). Änderungen in der Sedimentverteilung und Benthosbesiedlung können folglich Veränderungen der Transport- und Umlagerungsprozesse anzeigen, noch bevor sie morphologisch wirksam werden.

Voraussetzungen für die Prognose entsprechender morphodynamischer Veränderungen sind fundierte Kenntnisse über die Verbreitung charakteristischer Sedimentfaziesräume und Habitattypen sowie deren Veränderung in Abhängigkeit von der Änderung des Tideregimes und der hydrodynamischen Beanspruchung. Die Ergebnisse einer wiederholten großräumigen Erfassung der Verteilung mobilisierbarer Sedimente und benthischer Organismen sowie die Resultate einer Quantifizierung von Umlagerungsprozessen bilden hierfür die Grundlage und stellen folglich eine wichtige Datenbasis im Hinblick auf weiterführende Untersuchungen über die Veränderlichkeit des Wattenmeeres dar. Hierzu zählen sowohl Untersuchungen, die sich mit lokalen küstenschutz-, naturschutz- und nationalparkrelevanten Fragestellungen befassen als auch Verpflichtungen zur Charakterisierung und Überwachung der Küstengebiete im Rahmen nationaler und internationaler Meeres- und Gewässerschutzabkommen (Bund/Länder-Messprogramm, OSPAR-Convention, TMAP und die EU-Wasserrahmenrichtlinie).

1.1 Hintergrund und Ziel der Untersuchungen

An der schleswig-holsteinischen Westküste, im Bereich der Dithmarscher Bucht wurde zwischen 1970 und 1978 im Zuge des Generalplanes Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz ein neuer Seedeich errichtet (s. Abb. 1: Speicherkoog). Hierdurch wurde der natürliche Flutraum der Gezeitenrinne „Piep“ mit seinen Quellprieln Wöhrdener Loch, Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch um insgesamt 31 km² verringert (WIELAND 1984 b). Dies kann weitreichende hydrologische, sedimentologische und morphologische Veränderungen zur Folge gehabt haben und auch immer noch haben.

Da für das Gebiet der Dithmarscher Watten zwar langjährige Vermessungsreihen aber kein aktuelles und umfassendes sedimentologisches Datenmaterial existiert, hatte diese Untersuchung die großräumige Kartierung der Verteilung sowie der Mobilität der im Eulitoral vorkommenden Ablagerungen zum Ziel. Zudem sollte die jahreszeitliche Variabilität der Sedimentbeschaffenheit und der Benthosbesiedlung auf ausgewählten Transekten untersucht werden. Mit Hilfe dieser Kartierung sollten grundlegende hydrologische und großräumige morphodynamische Veränderungen im Gegensatz zu lokalen Variabilitäten auch in Hinblick auf die zuvor genannte Eindeichungsmaßnahmen in der Meldorfer Bucht erfasst werden.

Die vorliegende Kartierung gliederte sich in zwei Untersuchungsschwerpunkte:

1. Eine großräumige sedimentologische Kartierung der Dithmarscher Watten. Diese bestand in erster Linie aus einer Kartierung der Oberflächensedimente und der Benthosverbreitung in Verbindung mit der Auswertung vorhandener Luftbilder, um die Kartierergebnisse mit den Ergebnissen der Luftbildanalyse zu korrelieren. Sowohl die neu gewonnenen Ergebnisse als auch die Ergebnisse älterer Kartierungen (GAST 1980, DEJKEMA 1989, RUNTE 1990, VAN BERNEM 1994) sollten aufbereitet und zum Teil GIS-gestützt ausgewertet werden.
2. Die Erfassung räumlicher und jahreszeitlicher Veränderungen in der Sedimentverteilung und der Benthosverbreitung auf ausgewählten Transekten. Im Mittelpunkt dieses Untersuchungsschwerpunktes standen die Erfassung von jahreszeitlichen Veränderungen der Sedimentverteilung sowie der Verbreitung des Mikrophytobenthos, des Makrozoobenthos und der Makrophyten auf ausgewählten Transekten im Einzugsbereich der Gezeitenrinne „Piep“, speziell im Bereich des Blauortsandes, des Bielshövensandes und des Helmsandsteerts (s. Abb. 1).

1.2 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet, die Dithmarscher Watten, liegt im südöstlichen Teil der Deutschen Bucht an der schleswig-holsteinischen Westküste (s. Abb. 1). Dort erstreckt es sich von der Dithmarscher Küste zwischen Hedwigenkoog und Friedrichskoog im Osten bis zu einer Nord-Süd verlaufenden Linie in der Höhe von Tertius und D-Steert im Westen. Im Norden wird es durch die Gezeitenrinne „Wesselburener Loch“ und im Süden durch den Flackstrom begrenzt. Zentrales Element ist die Gezeitenrinne „Piep“, die von Büsum aus westwärts verläuft und sich nach ca. 10 km in die „Süderpiep“ und die „Norderpiep“ teilt. Das untersuchte Gebiet umfasst eine Fläche von über 200 km².

Auf der unteren Karte in der Abbildung 1 ist das untersuchte Gebiet in Untereinheiten bzw. in Teilgebiete gegliedert. Jedes der 11 Teilgebiete ist über ein dreistelliges Gebietskürzel zu identifizieren. Anhand dieses Kürzels werden die Ergebnisse im Kapitel 4 den jeweiligen Gebieten zugeordnet.

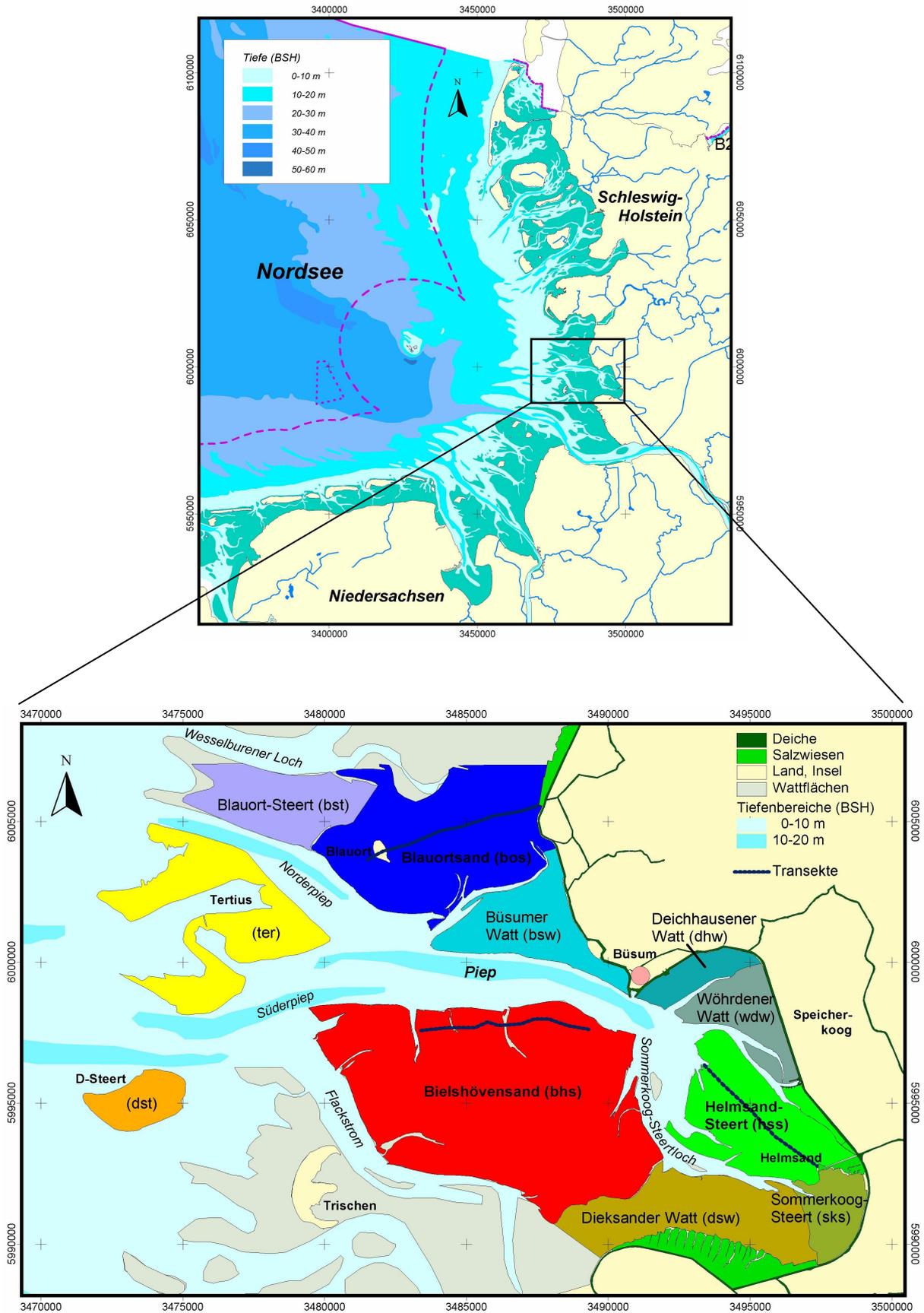


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes in der Dithmarscher Bucht mit den Teilgebieten und den Transekten.

2 CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGSGBIETES

2.1 Geologischer Abriss

Die Entstehung des Nordseebeckens, an dessen südöstlichen Rand das Kartiergebiet liegt, reicht bis ins späte Paläozooikum zurück (ZIEGLER & LOUWERENS 1979). Seitdem konnten sich dort mächtige Sedimentschichten ablagern.

Das heutige Bild der Nordseeküste wurde im wesentlichen durch die klimatischen Veränderungen und die geologischen Entwicklungen im Quartär geprägt. Im ersten Abschnitt, dem Pleistozän waren es die gestaltenden Kräfte im Wechselspiel der Kalt- und Warmzeiten, im zweiten Abschnitt, dem Holozän, der Meeresspiegelanstieg und die postglaziale Sedimentation.

Das für diese Landschaft wohl prägenste Ergebnis der nacheiszeitlichen Sedimentation sind die Watten, die einen „ausgesprochenen Spezialfall innerhalb der Küstenregion“ darstellen (SEIBOLD 1974). Sie erstrecken sich von Esbjerg in Dänemark bis nach Den Helder in den Niederlanden und umfassen mit einer Fläche von ca. 8000 km² den Flachwassersaum der südlichen Nordsee bis zu einer Wassertiefe von -10 m NN.

Ihre Entstehung, die vor ca. 5000 J. v. h. begann, verdanken die Watten einem zufälligen Zusammentreffen unterschiedlichster Faktoren (MENKE 1976, SCHWEDHELM & IRION 1985): Hierzu zählen das pleistozäne und postglaziale Relief, die eustatischen Meeresspiegeländerungen im Holozän, die isostatische Landsenkung, die synsedimentäre Kompensation, die Zufuhr von Feinmaterial aus der Nordsee und den Flüssen sowie das gemäßigte Klima mit entsprechender Fauna und Flora. Später kamen anthropogene Einflüsse wie Eindeichungen, Landgewinnung, Besiedlung und die wirtschaftliche Nutzung hinzu.

2.2 Tide- und Seegangsverhältnisse

Die Hydrologie im Untersuchungsgebiet wird im starken Maße durch die Gezeiten geprägt. Der mittlere Tidenhub reicht von 3,1 m im südlichen Teil bis zu 3,4 m im nördlichen Bereich. Das mittlere Tidehochwasser (MThw) erreicht in Büsum ca. 1,60 m über NN, das Tideniedrigwasser (MTnw) ca. 1,60 m unter NN. Der säkulare Meeresspiegelanstieg für den Bereich Büsum wurde von RHODE (1977) mit ca. 20 cm angegeben. Auch WIELAND (1984 b) ermittelte für die letzten 30 Jahre bis 1979 einen Anstieg des MThws in Büsum von 2 mm/Jahr.

Die Gezeitenströmungen in den Wattstromrinnen liegen bei 1,2–1,5 m/s, können aber auch Geschwindigkeiten von annähernd 2,0 m/s erreichen. Auf den Wattflächen werden dagegen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3–0,7 m/s gemessen (REIMERS 1999).

Das Wellenklima im Untersuchungsgebiet variiert stark in Abhängigkeit von der Exposition und der Wassertiefe. Im seewärtigen Bereich wurden signifikante Wellenhöhen von bis zu 4 m gemessen. Bedingt durch die bathymetrischen Verhältnisse reicht die Wirkung starken Seeganges jedoch nur selten bis in die küstennahen Watten. Auf den Wattflächen werden signifikante Wellenhöhen von 0,5 m nur selten überschritten.

2.3 Sedimentverteilung und Morphodynamik

Der sedimentologische Aufbau der Dithmarscher Watten ist durch klastische und überwiegend silikatische Ablagerungen des Holozäns gekennzeichnet. Auf den glaziofluvialen Sanden des pleistozänen Untergrundes findet sich im Liegenden der holozänen Abfolge ein weitgehend erodierter Torfhorizont. Darauf folgen die siltig-tonigen Ablagerungen des „Dithmarscher Klei“ (DITTMER 1938). Dieser wird teilweise diskordant, teilweise konkordant von bis zu 30 m mächtigen sandigen Folgen mit schlickigen Einschaltungen überlagert (DITTMER 1952).

Die rezente Verteilung der Oberflächensedimente im gesamten deutschen Watt wurde von DEJKEMA (1989) und v. BERNEM (1994) bearbeitet. Die Sedimentverteilung einzelner Teilgebiete im Eulitoral ist von GAST (1984), RICKLEFS (1989), RUNTE (1990), KESPER (1992), Störtenbecker (1992) und REIMERS (1999) eingehend untersucht und beschrieben worden.

Die zentralen morphologischen Elemente des Untersuchungsgebietes bilden die Gezeitenrinnen *Piep* sowie die Priele *Sommerkoog-Steertloch*, *Wöhrdener Loch* und *Kronenloch* mit den angrenzenden Wattflächen (s. Abb. 1 u. Abb. 12 im Anhang). Von See her kommend umschließen die *Norder-* und die *Süderpiep* den teilweise supratidalen Sandkörper *Tertiussand* und vereinigen sich östlich von diesem zur *Piep*. Diese erstreckt sich in annähernd gerader Linie bis in den Bereich der Hafeneinfahrt von Büsum. Im Norden der Gezeitenrinne liegt das Wattgebiet des Blauortsandes, im Süden das des Bielshövensandes. Südöstlich von Büsum spaltet sich die *Piep* in die drei oben genannten Priele auf. Nach SPIEGEL (1997) liegen 73 % der Watten östlich der supratidalen Sände im Eulitoral.

Die auffälligsten und bisher am intensivsten untersuchten morphodynamischen Veränderungen sind im Bereich der supratidalen Sandkörper, die auch als Außensände bezeichnet werden, zu verzeichnen. So wurden in der Vergangenheit besonders die bemerkenswerten Verlagerungen des Blauortsandes, des Tertiussandes und der Insel Trischen untersucht (KESPER 1992, RUNTE 1994, WIELAND 1972, WIELAND 2000).

2.4 Benthosbesiedlung

Die auf und im Gewässerboden lebenden Organismen, das Benthos, sind relativ standorttreu und können Störungen nur schwer ausweichen. Daher gelten Veränderungen in der Benthosgemeinschaft als Indikator für grundlegende Veränderungen in einem Ökosystem (KRÖNCKE 1998).

Das Benthos wird entsprechend seiner Größe in Mikro-, Meio- und Makro-(zoo bzw. phyto)-benthos eingeteilt. Im Rahmen dieser Kartierung wurde in erster Linie die Verbreitung des Makrozoobenthos, und der Makrophyten sowie die Variationen in der Mikrophytobenthosbesiedlung untersucht.

Zum Mikrophytobenthos gehören überwiegend einzellige Algen, wie die Kieselalgen und die Blaugrünalgen. Durch ihre hohe Wachstumsrate bilden sie neben dem Phytoplankton die wichtigste Grundlage für das Nahrungsnetz des Wattenmeeres (ASMUS et al. 1994). Die Kieselalgen, auch Diatomeen genannt sind bestens an unterschiedlichste Umweltbedingungen angepasst und bilden die wichtigsten autotrophen Organismen auf den Watten der Deutschen Nordseeküste (v. BERNEM 1994). Hier sind sie zumeist als dichte bräunliche

„Diatomeenrasen“ zu finden. Hohe Individuenzahlen können durch das Ausscheiden extrazellulärer Polysaccharide (EPS) die strömungsinduzierte Resuspendierbarkeit der Oberflächensedimente gegenüber unbesiedelten Flächen herabsetzen (FÜHRBÖTER 1983, ASMUS et al. 1994, RIETHMÜLLER 1999).

Als Makrozoobenthos wird die endobenthische Makrofauna bezeichnet, die bei Siebungen mit Maschenweiten von 0,5–1 mm im Rückstand verbleiben. Hierzu zählen überwiegend Mollusken (Schnecken und Muscheln), Anneliden (Ringelwürmer) und Arthropoden (Krebstiere und Asseln). Bereits seit Beginn der biologischen Wattenforschung stand das Makrozoobenthos im Vordergrund der Untersuchungen. Im Gegensatz zu Mikrofauna ist die Artenvielfalt der Makrofauna im Wattenmeer vergleichsweise gering. Seit dem 17. Jahrhundert hat sich jedoch das Artenspektrum durch Einwanderung und Einschleppung deutlich vergrößert (MICHAELIS & REISE 1994).

Zu den Makrophyten im Wattenmeer werden die Großalgen und die Seegrasbestände gezählt. Die Verbreitung der makroskopischen, mehrzelligen Algen ist auf den sub- und intertidalen Sedimentflächen des Wattes im Gegensatz zu anderen Lebensräumen wie beispielsweise dem Helgoländer Felswatt eher spärlich. Durch den Einfluss des Menschen ist das Vorkommen von Grünalgen in den letzten Jahren jedoch deutlich angestiegen, die Bestände an Braunalgen, Rotalgen und Seegräser sind dagegen zurückgegangen (REISE et al. 1994).

2.5 Küsten- und Naturschutz

Wesentlich an der Entwicklung des Küstenraumes und des Wattenmeeres waren der Küstenschutz und die Landgewinnung beteiligt. Als Folge zunehmender Bevölkerungszahlen und verstärkter Landnutzung in den Marschgebieten begann man ungefähr ab der vorletzten Jahrtausendwende mit der Errichtung von Deichen.

In Dithmarschen wurde das besiedelte Gebiet annähernd zeitgleich mit einem großen Ringdeich umgeben (BANTELMANN 1966). Eine stetige Vergrößerung der Landfläche ist hier seit dem 15. Jh. gut dokumentiert (WIELAND 1990). Die ehemalige Insel Büsum gehört seit dem Ende des 16. Jh. zum Festland. Noch bis zum Beginn des 18. Jh. verlief die Küste von Meldorf bis südlich von Marne relativ geradlinig (GAST 1998). Erst 1853/54 erfolgte die Angliederung des Dieksandes an den Kronprinzenkoog im Süden der Meldorfer Bucht.

Zur Gewinnung von Neuland wird seit Mitte des 19. Jahrhunderts die natürliche Auflandung des Watts durch das Anlegen rechteckiger Sedimentationsfelder, sogenannter Lahnungsfelder, gefördert. Die Entwässerung dieser Lahnungsfelder erfolgt durch künstlich angelegte Entwässerungsgräben (Gruppen), die zum nächsten Priel oder Wattstrom führen.

Auf Drängen des Naturschutzes wird die Vorlandgewinnung seit Mitte des letzten Jahrhunderts nur noch für den aktiven Küstenschutz genutzt und nicht mehr mit dem Ziel der Schaffung neuer Agrarflächen betrieben.

Durch die Zurücknahme der Landgewinnung und der Vorlandbewirtschaftung sowie mit der Einrichtung des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer ist auch der gestaltende Einfluss des Menschen auf das Küstenvorfeld deutlich zurückgegangen.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Sediment- und Benthoskartierung

Die sedimentologische und biologische Kartierung bestand in der Grobansprache der Wattablagerungen, der Besiedlung und der Oberflächencharakteristika (s. Tab. 1) sowie in der Probenahme für die anschließenden sedimentologischen und biologischen Analysen. Des Weiteren wurden einfache bodenphysikalische Feldmessungen durchgeführt und die Umlagerungsintensität und -tiefe mit Luminophoren-Tracerstäben ermittelt (s. Kap. 3.2.3). Die bodenphysikalischen Untersuchungen bestanden in der Messung der Scherfestigkeit, der Ermittlung des Wassergehalts und des Feststoffanteils.

Table 1: Liste der im Gelände erfassten Parameter (Kartierprotokoll).

<u>Kartierprotokoll</u>			
Wattgebiet:.....	Datum:.....	Wetter:.....	Begleitpersonen.....
1. Position und Zeit:	1.1 DGPS-Position		
	1.2 Höhe bzgl. MTNW		
	1.3 Geländeneigung u. Abstand zu Rinnen u. Prielen		
	1.4 Zeit bzgl. Niedrigwasser		
2. Oberflächencharakteristika:	2.1 Rippeln (Form, Höhe, Breite, Streichrichtung)		
	2.2 Wasserbedeckung		
3. Sediment:	3.1 Grobansprache an einem 30-cm-Sedimentprofil		
	3.2 Schichtung		
	3.3 Redoxhorizont(e)		
	3.4 Umlagerung (Tracer)		
	3.5 Scherwerte (Flügelsonde) u. Eindringtiefe		
	3.6 Wassergehalt		
	3.7 Schill im und auf dem Sediment		
4. Diatomeen:	Besiedlungsdichte (Oberflächenbedeckung)		
5. Makrophyten:	Art, Vorkommen und Besiedlungsdichte		
6. Makrozoobenthos:	Art, Vorkommen und Besiedlungsdichte		
7. Proben:	7.1 Sedimente entspr. der Schichten		
	7.2 Oberflächenpr. für Wassergehalt u. Feststoffanteil		
	7.3 Mikrophytobenthos		
	7.4 Makrozoobenthos		

Die Positionsbestimmung im Feld erfolgte mit einem GPS-Empfänger (Global Positioning System) an dem ein zusätzlicher Barkenempfänger angeschlossen war. Die resultierende DGPS-Position (Differential-GPS) hat eine Fehler von weniger als 5 m. Diese Genauigkeit ist ausreichend um auch großräumige morphologische Veränderungen zu erfassen.

Im Rahmen halbjährlicher Regelbeprobungen wurden jeweils im Frühjahr und Herbst auf den Transekten Blauortsand, Bielshövensand und Helmsandsteert Tracerstäbe ausgebracht und Mikrophytobenthosproben entnommen. Nach 2–4 Wochen folgte die Beprobung der Tracer sowie der Oberflächensedimente und des Makrozoobenthos.

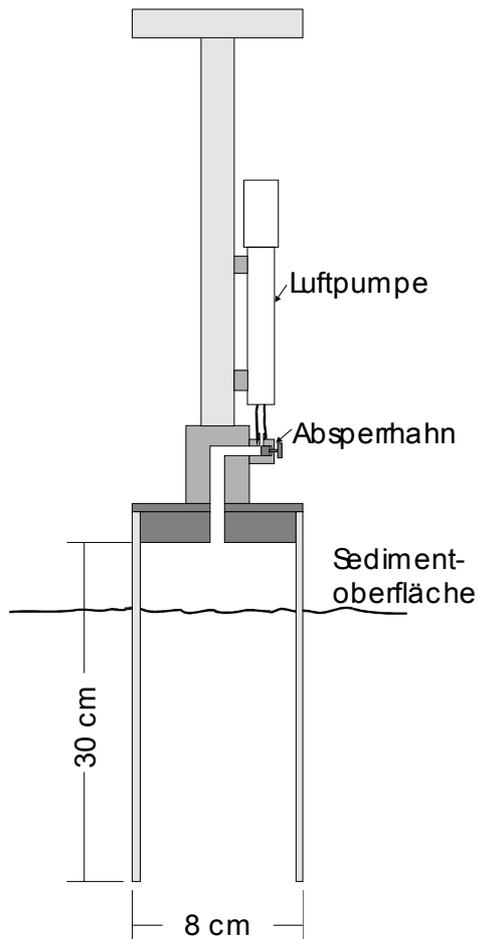


Abb. 2: FTZ-Probennehmer.

Zur Entnahme der Sediment- und Makrozoobenthosproben wurde ein von der AG Küstengeologie/Küsteningenieurwesen des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste neu entwickelter Probennehmer verwendet, mit dem nahezu ungestörte Sedimentprofile von über 30 cm Mächtigkeit entnommen werden können (s. Abb. 2).

Die definierten Probenmengen, die für die Bestimmungen des Wassergehalts und für die Chlorophyll-a-Messungen erforderlich waren, wurden mit einer entsprechend präparierten 5-ml-Einwegspritze entnommen (WOLFSTEIN 1998, REIMERS 1999).

Für die Probennahme wird die Spritze senkrecht in die Wattoberfläche gedrückt. Hierdurch erhält man eine Mischprobe der obersten 5 cm des Wattbodens. Zur Aufbewahrung wird das Material in eine luftdicht verschließbare Probenflasche gegeben. Die weitere Bearbeitung der Proben erfolgt im Labor.

3.2 Sedimentologische Laboranalysen und Auswertungen

Der Ablauf der sedimentologischen Laborarbeiten ist dem nachfolgenden Diagramm zu entnehmen.

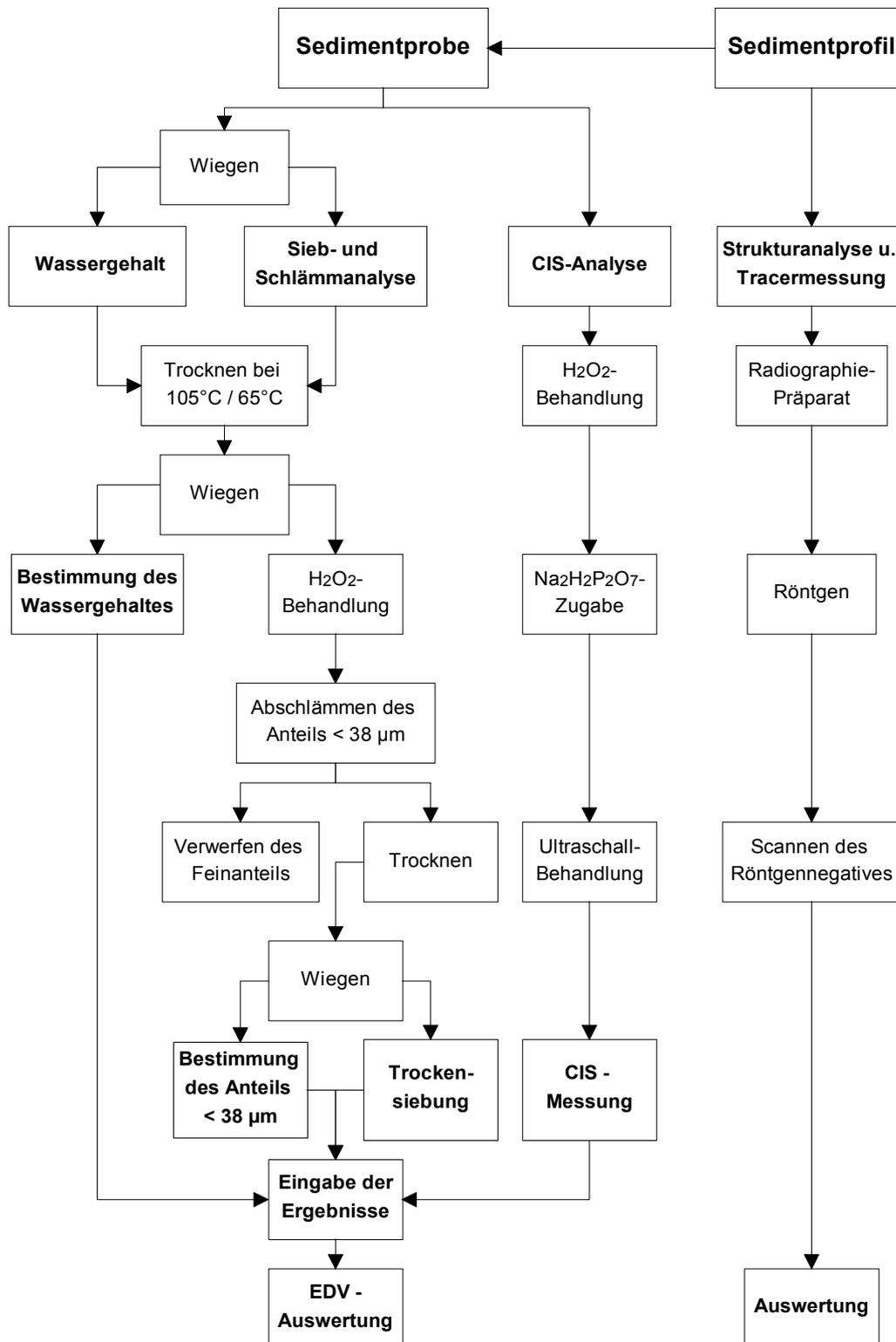


Abb. 3: Verlauf der sedimentologischen Laborarbeiten.

3.2.1 Sieb- und Schlämmanalyse

Durch die Sieb- und Schlämmanalyse (s. Abb. 3) wurden die Korngrößenfraktionen von 38–500 μm entsprechend den Richtlinien der American Society of Testing and Materials (ASTM) in Siebabweitungen von 0,25 Φ ($\Phi = -\log_2 S$; $S = \text{Korngröße in mm}$) ermittelt. Bei früheren Untersuchungen wurde meist nur bis zu einer Korngröße von 63 μm fraktioniert. Die Erweiterung des Siebbereiches auf 38 μm hatte den Vorteil, dass hierdurch weit über 95 % der untersuchten Wattsedimente mittels Siebung granulometrisch vollständig erfasst werden konnten und keine zusätzliche Feinkornanalyse notwendig war.

3.2.2 Laseroptische Partikelanalyse

Für die Bestimmung der Korngrößen $< 38 \mu\text{m}$ wurde ein aus der industriellen Produktüberwachung stammendes Lasergranulometer der Firma CIS Galai (computerized inspection system) verwendet, bei dem mit Hilfe eines laseroptischen Verfahrens und eines CCD-Videomikroskops (s. Abb. 4) die Partikelzahl, die Korngrößen wie auch die Korngestalt erfasst werden können (LOT GmbH 1989).

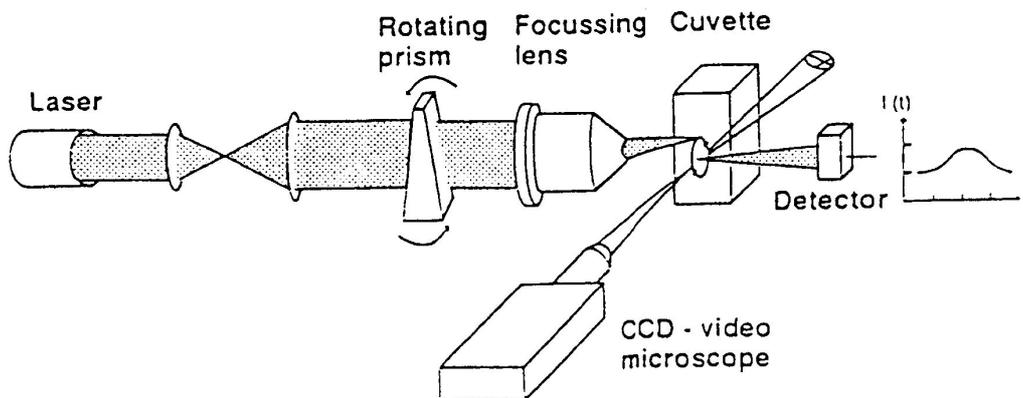


Abb. 4: Funktionsweise des CIS-Lasergranulometers (LOT GmbH 1989).

3.2.3 Tracer- und Radiographieanalysen

Sedimentumlagerungen sind in einem hochdynamischen Lebensraum wie dem Watt nur sehr schwer zu messen. Höhennivellements der Geländeoberfläche liefern oftmals nur das Endergebnis einer Wechselfolge von Sedimentation und Erosion. Daher wurden bei diesen Untersuchungen zusätzlich Luminophoren-Tracerstäbe eingesetzt. Ein Tracerstab besteht aus Luminophorensand, dem gemahlener Baryt (Bariumsulfat, BaSO_4) als Röntgenkontrastmittel beigefügt wurde und einem wasserlöslichen Bindemittel. Im Watt wird der Tracerstab senkrecht an einer markierten Position ins Sediment gedrückt.

Nachdem das Bindemittel sich im Kontakt mit dem Porenwasser aufgelöst hat, können die Tracerpartikel zusammen mit dem sie umgebenden Sediment umgelagert werden. Dies ist eine zuverlässige und bewährte Methode, um Umlagerungen zu quantifizieren (RUNTE 1989, 1990). Nach RUNTE (1989) lassen sich damit auch in sehr stark bioturbaten Sedimentprofilen die maximale Umlagerungstiefe und die minimale Sedimentneubildungsrate zwischen zwei Beprobungen ermitteln.

An den Sedimentprofilen der Tracerstationen wurden zusätzlich im Labor Röntgenstrukturanalysen mit Hilfe von Radiographien durchgeführt. Auf diese Weise konnten makroskopisch nicht sichtbare Feinschichtungen aufgelöst werden (vergl. WERNER 1967). In Verbindung mit der oben genannten Vermessung der Tracerstäbe ließen sich auf diese Weise Veränderungen in den Ablagerungsbedingungen untersuchen, die sich innerhalb des Beprobungszeitraumes ereignet haben.

3.2.4 Korngrößenstatistische Auswertungen

Die korngrößenstatistische Auswertung für die Ermittlung von Sedimentfaziestypen erfolgte in erster Linie nach der **Momenten-Methode** (TUCKER 1985; MCMANUS 1991). Zudem wurden die Verfahren nach FOLK & WARD (1957) sowie nach INMANN angewandt. Während die Momenten-Methode von der vollständigen Verarbeitung der Korngrößenanalysen ausgeht, berücksichtigen die beiden anderen Verfahren nur einige diskrete Perzentile.

Um im zweiten Schritt die Sedimentproben durch den Vergleich verschiedener korngrößenstatistischer Parameter verlässlich bestimmten Ablagerungsbereichen zuordnen zu können, wurden diese einer **Clusteranalyse** unterzogen. Als Proximitätsmaß diente die quadrierte euklidische Distanz, eines der am häufigsten verwendeten Ähnlichkeitsmaße. Für die anschließende Agglomeration wurde das Verfahren nach WARD (1963) verwendet. Im Gegensatz zu den Linkage-Verfahren, die Gruppen aufgrund geringer Distanzen bilden, vereinigt das Ward-Verfahren Objekte miteinander, die die Varianz innerhalb eines Clusters am wenigsten erhöhen.

3.3 Analyse der Benthosproben

Die Makrozoobenthosproben wurden im Labor auf die darin vorkommenden Arten und Individuenzahlen, die Mikrophytobenthosproben auf deren Chlorophyll-a-Gehalt hin analysiert.

3.3.1 Makrozoobenthos

Die Proben eines Untersuchungsjahres wurden nach Abschluss der Feldarbeiten am Institut für angewandte Biologie (Freiburg/Elbe) hinsichtlich der Arten und Populationsdichten untersucht. In der Tabelle 2 sind die durch Nasssiebung mit einem Sieb von 1mm Maschenweite erfassten Arten aufgelistet. Die WATIS-CodeNr ist ein in der WATIS-Datenbank (VAN BERNEM 1994) verwendeter Artenschlüssel, der Informationen über Stamm, Klasse, Ordnung/Familie, Gattung/Art und das Alter der Arten enthält.

Tabelle 2: Liste der erfassten Makrofauna-Arten.

CodeNr	Gattung / Art	CodeNr	Gattung / Art
15310010	Hydrobia c.f. ulvae	18126010	Scoloplos armiger
15330010	Retusa obtusa	18131070	Pygospio elegans
15516010	Cerastoderma edule	18135010	Tharyx killariensis
15525010	Macoma balthica	18141020	Heteromastus filiformis
15526010	Ensis americanus	18149040	Lanice conchilega
15529010	Mya arenaria	18304020	Tubificoides benedeni
18109010	Eteone longa	22435010	Bathyporeia sarsi
18109011	Eteone c.f. spetsbergensis	22435040	Bathyporeia pilosa
18109040	Phyllodoce mucosa	22435070	Bathyporeia guilliamsoniana
18116020	Nereis diversicolor		
18117010	Nephtys hombergi		

3.3.2 Mikrophytobenthos

Anhand der Mikrophytobenthosproben wurde in erster Linie der Chlorophyll-a-gehalt der obersten Sedimentlage (1–2 mm) ermittelt. Die Bestimmung erfolgte sowohl durch photometrische Messung nach LORENZEN (1967) als auch im HPLC-Verfahren (high performance liquid chromatography) nach der Methode von MANTOURA & LLEWELLYN (1983), die wie bei WOLFSTEIN (1998) beschrieben modifiziert wurde.

Die Ergebnisse der Flüssigkeitschromatographie geben durch die begleitenden Markerpigmente zusätzlich einen Hinweis auf die Zusammensetzung des Mikrophytobenthos und deren Gattungen. Hier sind u.a. das Fucoxanthin für die Diatomeen und Peridinin für die Dinoflagellaten zu nennen.

3.4 Raumbezogene Daten und Luftbildszenen

Die morphologischen Untersuchungen des Dithmarscher Wattenmeeres stützten sich im Wesentlichen auf Wattvermessungen und Luftbildszenen des Amtes für ländliche Räume (ALR) Husum sowie auf Seevermessungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

Vermessungsdaten lagen aus den Jahren 1974 (KFKI-Karte: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen), 1977–1996 (BSH) und 1987–1997 (ALR), Luftbildszenen aus den Jahren 1973, 1989 und 1994/95 vor. Eine weitere Luftbildbefliegung des gesamten

schleswig-holsteinischen Wattenmeeres, die innerhalb des Untersuchungszeitraumes geplant war, konnte aufgrund technischer und meteorologischer Probleme nicht durchgeführt werden.

Zur Archivierung, Analyse und besseren Weiterverarbeitbarkeit der Daten wurden diese in einem Datenbankmanagementsystem (MS Access) organisiert. Die Kartierdaten und Analyseenergebnisse wurden durch SQL-Datenbankabfragen fortwährend in einem Geographischen Informationssystem (GIS) aktualisiert.

3.5 Nicht verwendete Ergebnisse

Im Verlauf der Untersuchungen wurde ein am FTZ entwickeltes Video- Wasserlinien-Verfahren (REIMERS 1999) auf den offenen Watten der Dithmarscher Bucht eingesetzt. Während sich dieses Verfahren bei morphologischen Untersuchungen im Küstenvorfeld sehr bewährt hat, ist es für die freien Wattflächen nicht geeignet.

Des weiteren wurden digitale Nahaufnahmen aus ca. 20 cm Entfernung von der Wattoberfläche und der Mikrophytobenthosbesiedlung unter definierten Lichtverhältnissen mit einer speziell dafür konstruierten Vorrichtung gemacht. Die Ergebnisse der bildanalytischen Auswertung der digitalen Nahaufnahmen ließen sich auch unter Verwendung unterschiedlichster Algorithmen nicht mit den gemessenen Chlorophyll-a-Gehalten korrelieren.

3.6 Verlauf der Untersuchungen

Zu Beginn der Untersuchungen wurden in verschiedenen Bereichen Vorerkundungen durchgeführt, um das Spektrum der einzelnen Parameter zu ermitteln und um die Transektlängen zu bestimmen, die in einer Niedrigwasserphase bearbeitet werden konnten. Bereits im Februar 1999 wurde mit der Kartierung des Blauortsandes und des Bielshövensandes begonnen. Parallel dazu erfolgte die Analyse der Luftbildszenen aus den Jahren 1973, 1989 und 1995. Zwischen der Frühjahrs- und der Herbstbeprobung 1999 wurde die Kartierung im Bereich der Meldorfer Bucht und im westlichen Teil des Blauortsandes (Blauortsteert) fortgesetzt. Ebenfalls im Sommer wurde das Videowasserlinienverfahren (s. Kap. 3.5) zusammen mit einem Sedimenttransport-Messsystem auf dem Bielshövensand erprobt. Im Dezember konnten nur wenige Tage nach dem Sturmereignis Anatol die Veränderungen im Bereich des Blauortsandes erfasst werden.

Noch im Winter, vor der Frühjahrsbeprobung 2000, wurden die deichnahen Gebiete um Büsum (Büsumer u. Deichhausener Watt) sowie vor dem Dieksander Koog und dem Friedrichskoog kartiert. Die noch nicht bearbeiteten Teile des Bielshövensandes, des Tertiusandes und der Meldorfer Bucht konnten bis zur Herbstbeprobung aufgenommen werden. Mehrere Versuche Side-Scan-Aufnahmen im Wesselburener Loch und im Dieksander Priel zu machen schlugen fehl, da starke morphodynamische Veränderungen ein sicheres Befahren der Rinnen verhinderten. Der zeitliche Ablauf der Kartierung und der halbjährlichen Regelbeprobungen sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Überblick über den Verlauf der Untersuchungen.

1999											
Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	bhs, bos	ter, dst wbw			hss	bhs, bst	sks, dst	bos			bos
			F99						H99		
						Video-Wasser- linienverfahren					Sturm Anatol
2000											
Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	dhw	bsw, dsw			bhs			ter, wdw	bhs		
			F00						H00		
					Side-Scan Wesselburener Loch						

Bhs = Bielshövensand, bos = Blauortsand, bst = Blauort-Steert, bsw = Büsumer Watt,
dhw = Deichhausener Watt, dst = D-Steert, dsw = Dieksander Watt, hss = Helmsand-Steert,
sks = Speicherkoog Süd, ter = Tertius, wbw = Wesselburener Watt, wdw = Wöhrdener Watt.
Regelbeprobungen: F99/H99 = Frühjahr/Herbst 1999, F00/H00 = Frühjahr/Herbst 2000.

4 ERGEBNISSE

4.1 Morphologische Veränderungen

Morphologische Veränderungen ließen sich aus den Luftbildern und aus den im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten DGPS-Vermessungen (1999) vor allem für die Bereiche der Außensände D-Steert, Tertius und Blauortsand sowie für den West- und Ostrand des Bielshövensandes feststellen. Hier lagen im wesentlichen Tendenzen einer Ostverschiebung sowie einer Ost-West-Komprimierung der morphologischen Einheiten vor (s. Abb. 12 im Anhang).

Auf dem D-Steert und auf dem Tertius konnten in den jeweils nördlichen Bereichen maximale Verschiebungen von 100 m/Jahr ermittelt werden. Die südlichen Bereiche der Sandkörper scheinen dagegen relativ lagestabil.

Der Vergleich der Luftbilder aus den Jahren 1973, 1989 und 1995 sowie die Analyse der Vermessungsdaten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie von 1977–1996 zeigten zudem für den Bereich der Meldorfer Bucht einschneidende morphologische Veränderungen. Die Sohle des Sommerkoog-Steertloches, der südöstlichen Fortführung der Ge-

zeitenrinne „Piep“, hat sich in dem angegebenen Zeitraum deutlich weiter ostwärts verlagert. Hierbei wurden Erosionsbeträge von über 8 m im nördlichen Teil der Rinne und Sedimentationsbeträge von über 4 m am Nordostrand des Bielshövensandes erreicht. Nach der Eindeichung des nördlichen Speicherkooges (1978) kam es zu einer zunehmenden Sedimentation in den Prielen Wöhrdener Loch, Kronenloch und Helmsander Loch sowie im unmittelbaren Küstenvorfeld des neugebauten Deiches und auf dem Helmsandsteert. Dies wird auch beim Vergleich der Prielnetz Karten durch die Verringerung der Zahl der kleineren Priele und der Verkürzung der Priellängen deutlich (s. Abb. 12 im Anhang).

4.2 Sedimentologische Charakteristika und Veränderungen

4.2.1 Korngrößenverteilung

Das Korngrößenspektrum der Ablagerungen im Dithmarscher Watt ist mit 2 bis 350 μm recht breit gefächert. Die überwiegende Masse des Dithmarscher Wattkörpers wird jedoch von Sedimenten der Sandkornfraktion ($> 63 \mu\text{m}$) aufgebaut (s. Abb. 13 im Anhang).

Durch den Vergleich der Korngrößenverteilungen war es möglich, die Sedimente vier unterschiedlichen Ablagerungsmilieus und Faziestypen zuzuordnen (s. Abb. 5).

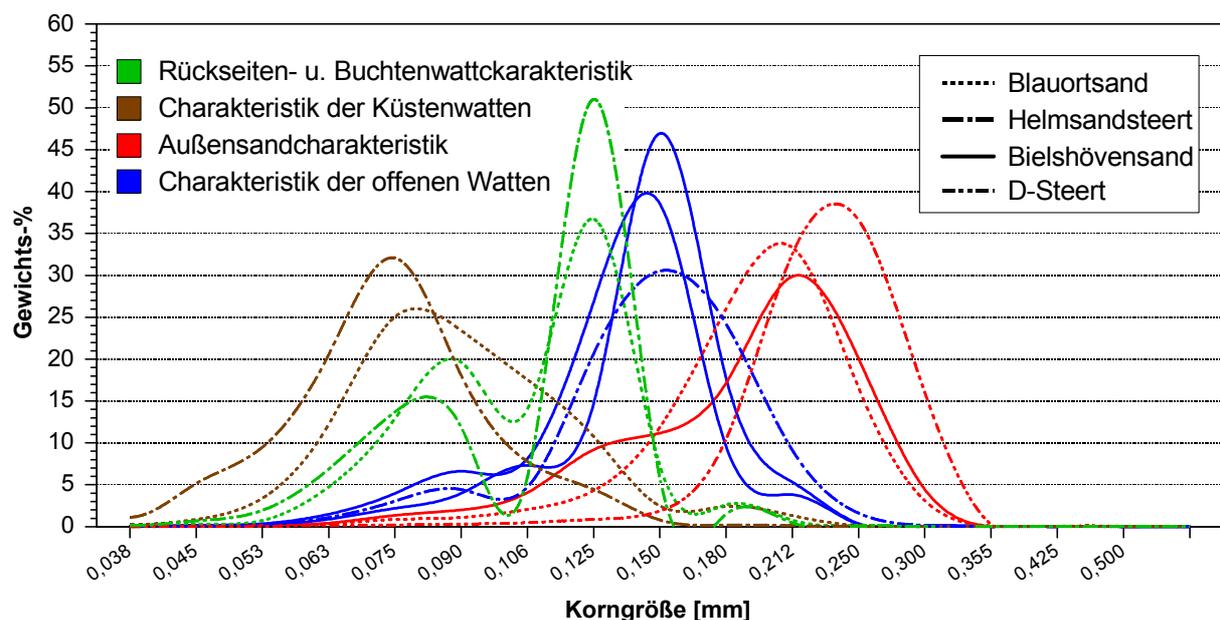


Abb. 5: Charakteristische Korngrößenverteilungen in den Oberflächensedimenten der Dithmarscher Watten.

4.2.2 Sedimentfaziestypen

Durch die korngrößenstatistische Auswertung mit Hilfe der Momenten-Methode (vergl. Kap. 3.2.4) ließen sich ebenfalls vier unterschiedliche Sedimentfaziestypen bzw. -räume der Dithmarscher Watten voneinander trennen (s. Abb. 6):

1. Faziesbereiche mit Außensandcharakteristik.

Die Sedimente mit Außensandcharakteristik zeichnen sich durch eine fein- bis mittel-sandige Korngrößenverteilung aus ($\bar{X} < 2,8 \text{ PHI}^\circ$). Die Ablagerungen sind mit einer Standardabweichung von $\sigma < 0,6$ gut sortiert.

Die Kornhäufigkeitskurve ist mit $\alpha_3 < 0,2$ schwach positiv schief bis annähernd symmetrisch. In diese Gruppe fallen ausschließlich Proben vom D-Steert, vom Tertiusand und vom Blauortsand sowie einige Proben von besonders hoch gelegenen Bereichen auf dem Bielshövensand.

2. Faziesbereiche mit den Charakteristiken eines offenen Watts.

Hier sind Ablagerungen mit einem relativ breiten Korngrößenspektrum (siltig-feinsandig $\bar{X} = 2,8\text{--}3,8 \text{ PHI}^\circ$) zu finden. Sie sind mit $\sigma = 0,6\text{--}0,87$ mäßig sortiert und haben eine deutlich positiv schiefe Verteilung ($\alpha_3 = 0,2\text{--}1$). In diese Gruppe fallen vor allem Proben, die von den hohen Wattflächen des Bielshövensandes, des Wesselburener Wattes und des Helmsandsteerts stammen.

3. Faziesbereiche mit Rückseiten- und Buchtenwattcharakteristik.

Die Sedimente dieses Faziesbereichs sind zumeist siltig bis tonig und nur vereinzelt etwas feinsandig ($\bar{X} > 3,8 \text{ PHI}^\circ$). Sie zeichnen sich durch eine schlechte Sortierung von $\sigma > 0,87$ und eine stark positive Schiefe von $\alpha_3 > 1$ aus. In diese Gruppe fallen zudem Proben aus der Nähe von steilen Prielhängen. Die Sedimente der Rückseiten- und Buchtenwatten lassen sich aufgrund ihrer Bimodalität deutlich von den übrigen unterscheiden.

4. Faziesbereiche mit Küstenwattcharakteristik.

In Küstennähe und im Bereich flacher Prielhänge und Prielköpfe sind die Sedimente feinkörniger oder ähnlich feinkörnig wie beim Faziestyp 3. Die Sortierung ist mit $\sigma > 1$ noch schlechter und die Schiefe mit $\alpha_3 > 2$ deutlich stärker als bei den Rückseiten- und Buchtenwatten (s. Abb. 5 u. 6).

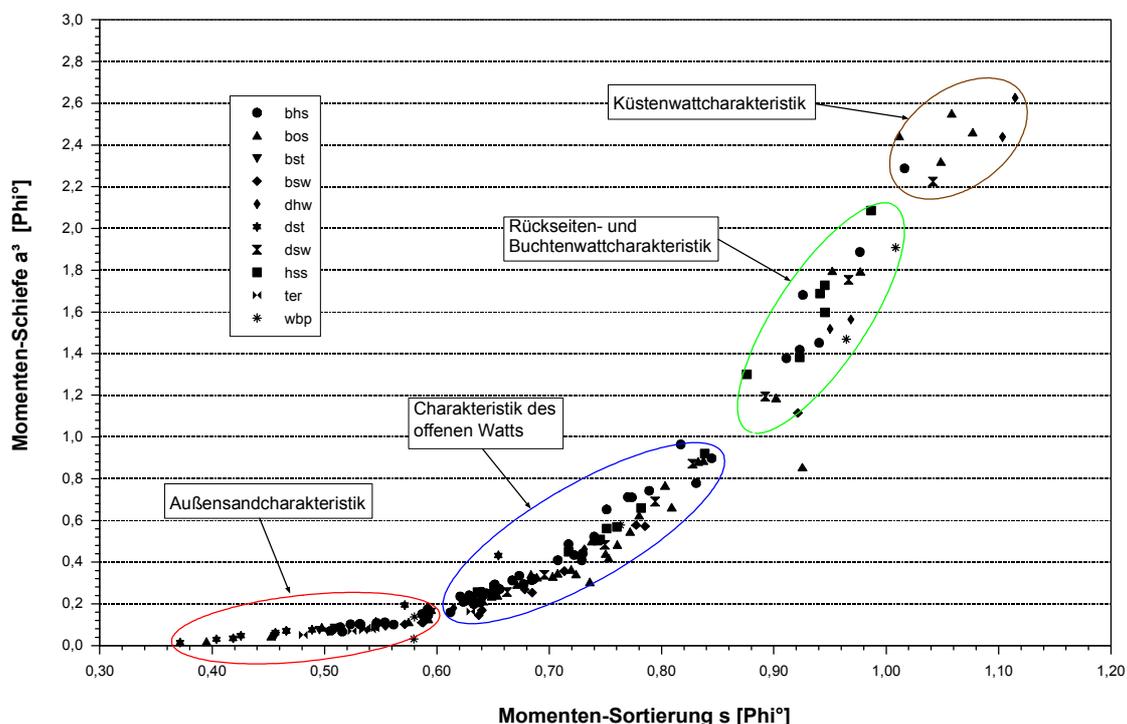


Abb. 6: Sedimentfaziestypen auf der Basis von korngrößenstatistischen Berechnungen.

Diese Art der Untergliederung nach Faziestypen ist zudem ein energetischer Ansatz zur Beschreibung unterschiedlicher Ablagerungs- bzw. Erosionsgebiete. Vom Faziestyp 1 zum Typ 4 nimmt die hydrodynamische Beanspruchung des Sedimentes sukzessive ab.

4.2.3 Ergebnisse der Clusteranalyse

Die im Kapitel 4.2.1 mehr oder weniger subjektiv aufgrund der Ähnlichkeit der Kornverteilungskurven und im darauffolgenden Kapitel mit der Momenten-Methode vorgenommene Unterteilung nach Sedimentfaziestypen sollte durch ein weiteres Verfahren und unter Berücksichtigung möglichst vieler Parameter verifiziert werden. Hierfür bot sich die Clusteranalyse an, die Gruppen (Cluster) auf der Basis von statistischen Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Parametern bildet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 7 in Form eines Dendrogramms dargestellt.

Aus den Kartiererergebnissen und den Ergebnissen der Laboranalyse von 215 ausgewählten Stationen wurden mit Hilfe der Clusteranalyse 2 Hauptgruppen mit jeweils zwei Untergruppen, die sich durch eine ausreichende Distanz voneinander trennen lassen, errechnet. Die beiden Hauptgruppen trennen die stark hydrodynamisch beanspruchten Außensandbereiche und offenen Watten (Cluster 1 u. 2) von den weniger beanspruchten Rückseiten- und Buchtenwatten sowie den Küstenwatten (Cluster 3 u. 4).

In den Untergruppen weisen die Cluster 1 und 2 eine deutlich höhere Distanz zueinander auf als die Cluster 3 und 4. Dies spiegelt die bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen Ähnlichkeiten in den Ablagerungsbedingungen der Rückseiten- und Buchtenwatten mit denen der Küstenwatten wieder.

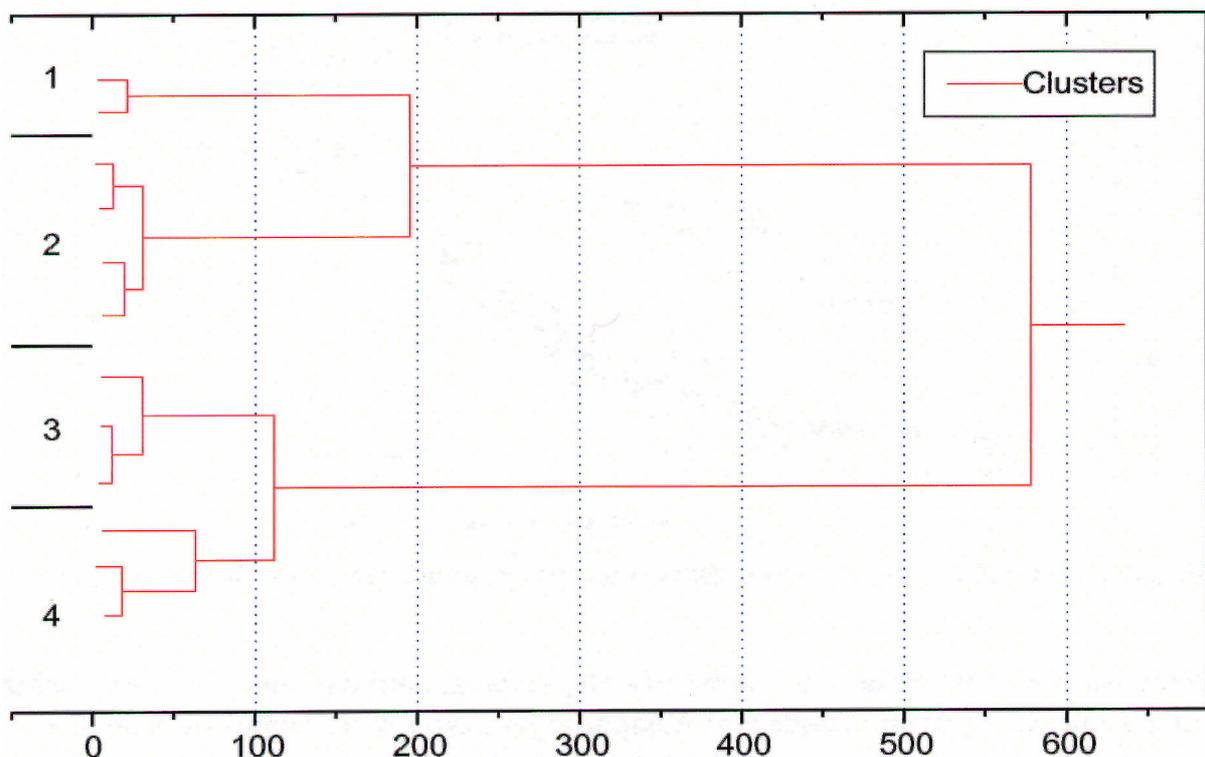


Abb. 7: Dendrogramm nach dem Ward-Verfahren.

4.2.4 Sedimentumlagerung und Sedimentschichtung

Makroskopisch erkennbare Schichtungen waren in den beprobten Sedimentprofilen von 30 cm nur vereinzelt zu finden. Durch die Radiographiemethode konnten die bisher nicht sichtbaren Feinschichtungen aufgelöst werden. In Verbindung mit der Vermessung der Tracerstäbe ließen sich auf diese Weise Veränderungen in den Ablagerungsbedingungen der letzten Wochen und Monate untersuchen.

In den relativ homogen sandig wirkenden Sedimentprofilen aus den Bereichen mit Außen-sandcharakteristik und den offenen Watten sind in den Radiographien deutliche Rippelstrukturen (Abb. 8 linkes Profil oben) sowie zum Teil auch Blasen- und Flaserschichtungen (Abb. 8 rechtes Profil unten) zu erkennen. Die sandigen Rippelschichtungen über dem Tracer in den Profilen der Abbildung 8 dokumentieren aufgrund der größeren Korngrößen eine Phase mit Sandsedimentation unter deutlicher Seegangseinwirkung. In der Zeit von ca. 15–20 Tagen, die sich der Tracer im Sediment befunden hat, sind im linken Profil nur wenige Millimeter erodiert und ca. 3 cm sedimentiert worden. Im rechten Profil sind die Umlagerungen mit ca. 5 cm Erosion und 7 cm Sedimentation wesentlich höher. Eine derartig hohe Mobilität der Sedimente verhindert dass entsprechende Bereiche besiedelt werden. Die Flaserschichtungen im rechten Profil unterhalb des Tracers deuten dagegen auf einen mehrfachen Wechsel zwischen ruhigeren und turbulenteren Bedingungen hin.

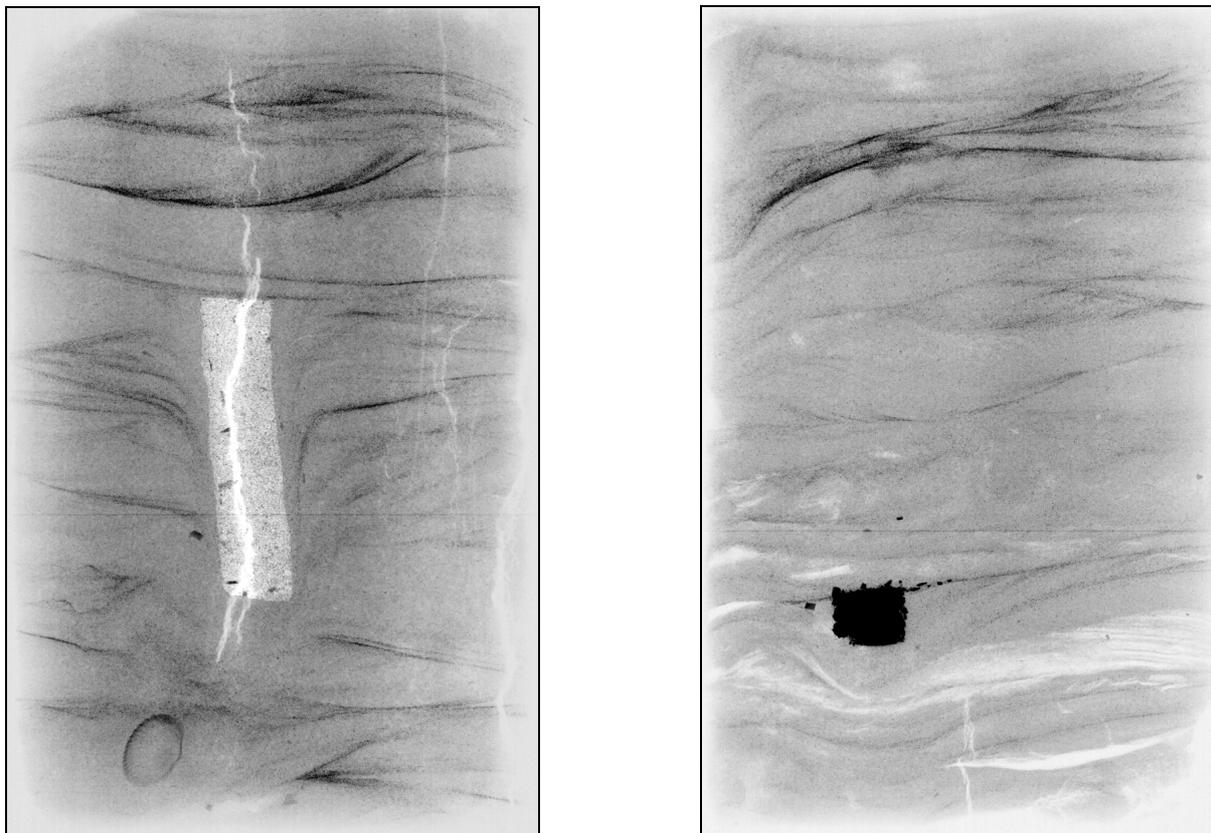


Abb. 8: Röntgenpositive von Sedimentprofilen mit Tracern vom Bielshövensand;
links: Frühjahr 2000, rechts: Herbst 2000.

Die Sedimentprofile aus den Rückseiten-, Buchten- und Küstenwatten sind zumeist durch starke Bioturbation gekennzeichnet (s. Abb. 9). Unter den wesentlich geringeren See- gangseinwirkungen, die in der überwiegenden Zeit des Jahres in diesen Bereichen herrschen, kann sich eine intensive Besiedlung im Substrat ausbreiten. Wesentlich seltener als in den Faziestypen 1 und 2 treten hier hydrodynamische Belastungen auf, die wie im rechten Profil in der Abbildung 9 zu stärkeren Erosionen führen (von dem Tracer sind nur noch einige wenige Partikel zu erkennen). Da aber auch die Sedimentationsraten deutlich geringer sind als in den zuvor genannten Faziestypen, sind Erosionsgebiete, die teilweise nur während eines Sturmereignisses entstanden sind, in den Rückseiten- und Buchtenwatten oftmals noch über Wochen und Monate im Feld zu erkennen.

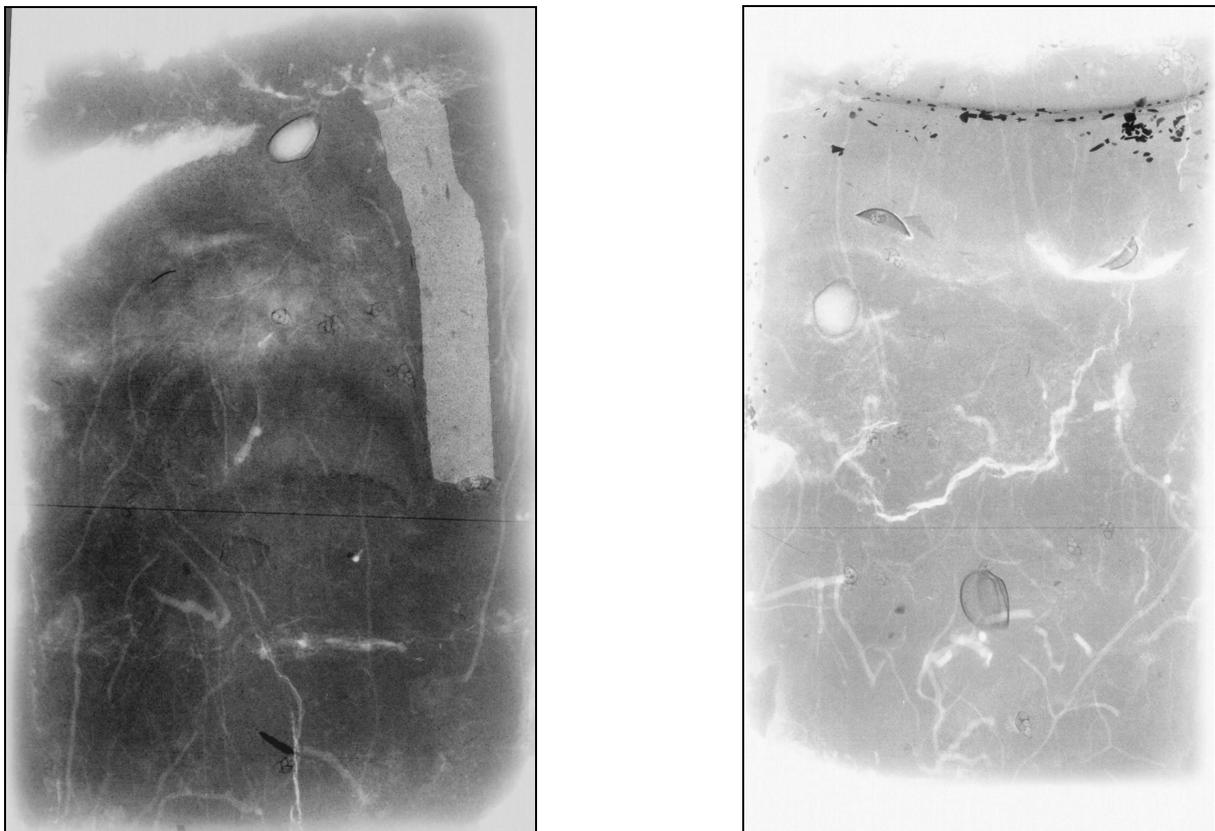


Abb. 9: Röntgenpositive von Sedimentprofilen mit Tracern vom Blauortsand;
links: Frühjahr 2000, rechts: Herbst 2000.

Im Frühjahr 1999 und 2000 waren die Erosionsbeträge mit ca. 1 bis 5 mm in 15–20 Tagen sowohl in den offenen Watten als auch in den Rückseiten- und Buchtenwatten deutlich geringer als im Herbst. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Faziestypen sind jedoch die Sedimentationsraten, die mit 3–7 cm in den offenen Watten erheblich über denen in den Rückseiten- und Buchtenwatten lagen. Der mit Hilfe der Tracer gemessene Unterschied in den Sedimentations- und Erosionsraten innerhalb eines Faziestyps waren im Vergleich der Jahre 1999 und 2000 eher gering.

4.2.5 Veränderungen in der Sedimentverteilung

Betrachtet man lediglich die Gewichtsanteile $< 63 \mu\text{m}$, so lassen sich Vergleiche mit den Kartierungen von GAST (1980) aus dem Jahr 1978, mit van BERNEM (1994) aus dem Jahr 1989 und mit den von DEJKEMA 1989 zusammengestellten Habitatkarten ziehen. Die Feinkornanteile ($< 63 \mu\text{m}$) haben sich demnach seit 1978 auf dem nördlichen Bielshövensand nur unwesentlich geändert (s. Abb. 13–14 im Anhang). Auch die Lage der Priele, nicht aber deren Verlauf, scheint den Luftbildanalysen zufolge relativ stabil (s. Abb. 12 im Anhang).

Auf dem Helmsandsteert (Meldorfer Bucht) haben zwischen 1978 und 1999/2000 die Flächen mit feinkörnigen Oberflächensedimenten deutlich zugenommen (s. Abb. 15 im Anhang). Diese Zunahme des Feinkornanteils seit 1978 lässt sich möglicherweise auf die verkürzte Deichlinie und die dadurch geringere Entfernung zur Küstenlinie nach der Vordeichung des Speicherkooges zurückführen.

In den untersuchten zwei Jahren sind dagegen auf den Transekten keine signifikanten Änderungen in der Sedimentverteilung zu verzeichnen (s. Abb. 10). Auf den Transekten Blauortsand und Helmsandsteert wechselt das Kornspektrum vom Frühjahr zum Herbst geringfügig. Auf dem Bielshövensand sind die jahreszeitlichen Variationen sogar noch geringer.

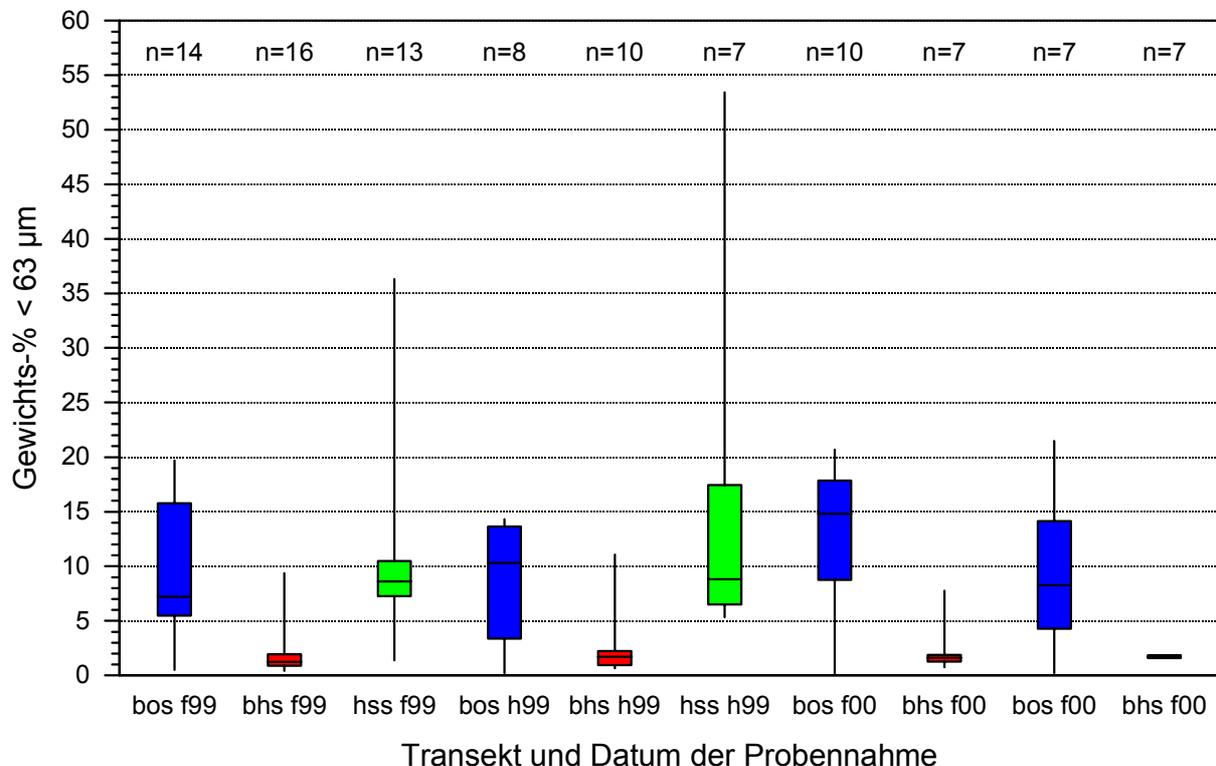


Abb. 10: Veränderungen im Kornspektrum auf den drei Transekten innerhalb des Untersuchungszeitraumes.

4.3 Mikrophyto- und Makrozoobenthos

4.3.1 Mikrophytobenthos

Die Besiedlung der Wattflächen mit Diatomeen erwies sich bereits bei der Grobansprache im Gelände als lokal sehr variabel und über kurze Zeiträume als stark veränderlich.

Die Analyse der Chlorophyll-a-gehalte der obersten 1–2 mm des Sediments ergaben keine eindeutigen saisonalen Unterschiede. Die Ergebnisse zeigten lediglich die große Spannweite der ermittelten Werte. Während sie im 1. Projektjahr zwischen 2 und 36 mg/m² lagen, erreichten sie im 2. Projektjahr deutlich höhere Werte von bis zu 200 mg/m² (s. Abb. 18 im Anhang).

Obwohl die gemessenen Variabilitäten in den Chlorophyll-a-gehalten relativ hoch waren, ließ der Vergleich mit den entsprechenden Korngrößenanalysen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Besiedlungsdichte und dem besiedelten Substrat vermuten. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten lagen sowohl bei linearer als auch bei Polynom-Regression auf dem Blauortsand bei annähernd 0,6 und auf dem Bielshövensand sogar zwischen 0,8 und 0,9 (s. Abb. 11).

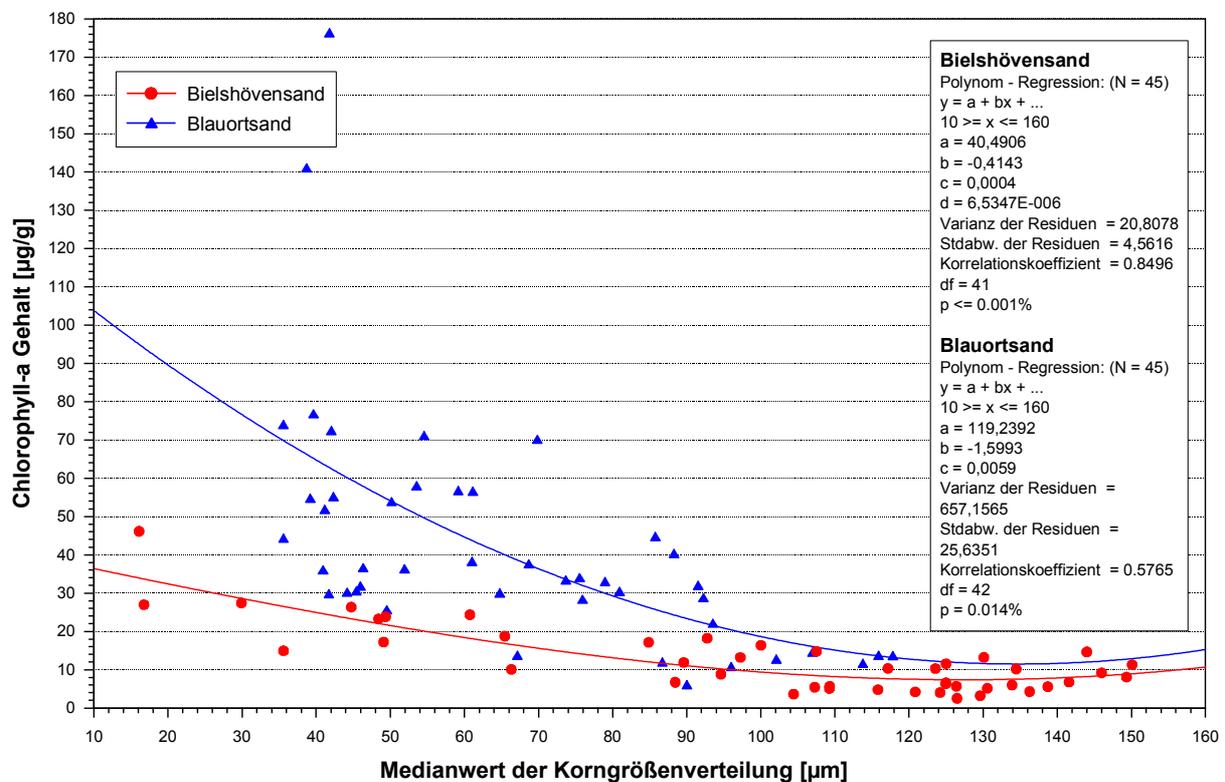


Abb. 11: Chlorophyll-a-gehalte und Medianwert der Korngrößenverteilung in den obersten 1–2 mm des Sediments.

4.3.2 Makrozoobenthos

Obwohl im Rahmen dieser Untersuchung diverse Taxa benthischer wirbelloser Fauna erfasst und untersucht wurden (s. unten und Kap. 3.3.1), bot sich für die Betrachtung der Veränderungen in der Makrozoobenthosbesiedlung besonders das Vorkommen des Sandpierzurms *Arenicola marina* an, da auch hierfür vergleichbare Daten aus früheren Kartierungen vorliegen.

Wie bei der Sedimentverteilung konnten auch hier die Besiedlungsdichte der Jahre 1978 und 1999/2000 miteinander verglichen werden. Da *Arenicola* im juvenilen Stadium die schlickigen Watten besiedelt und erst im adulten Stadium in Schlicksandgebiete (Mischwatt) wandert haben vor allem die Schlicksedimentation im Deichnahen Bereich der Meldorfer Bucht und an den Prielrändern zu einem deutlichen Rückgang der Abundanzen adulter *Arenicola* geführt (s. Abb. 17 im Anhang).

Die Artenzusammensetzung an den verschiedenen Makrozoobenthosstationen weisen entsprechend ihrer Habitate zum Teil deutliche, zum Teil aber auch weniger deutliche Unterschiede auf (s. Tab. 4). Dies kann zum einen bedeuten, dass die gewählten Probenstationen oder Probenzahlen als nicht repräsentativ für das jeweilige Habitat gewertet werden dürfen. Zum anderen muss die Verteilung der Habitate nicht zwingend mit der gewählten Einteilung der Sedimentfaziesräume korrelieren.

Tabelle 4: Individuenzahlen vergleichbarer Makrofauna-Arten.

	Blauortsand (Außensand)	Blauortsand (Rückseitenwatt)	Blauortsand (Küstenwatt)	Bielhövensand (offenes Watt)	Bielhövensand (offenes Watt)	Helmsandsteert (exponiertes Buchtenwatt)
<i>Cerastoderma edule</i>	400			3200	1000	2000
<i>Macoma balthica</i>		4000	200	800	1200	400
<i>Mya arenaria</i>						200
<i>Nereis diversicolor</i>		1000				
<i>Nephtys hombergi</i>	600		200			600
<i>Pygospio elegans</i>			600			
<i>Heteromastus filiformis</i>	2400	5200	200	8600	600	
<i>Tubificoides benedeni</i>		12800		1400	200	
<i>Hydrobia c.f. ulvae</i>	364600	36600	200	21200	23200	293600

Der Vergleich von im Gelände gezählten Abundanzen (*Arenicola* und *Mya*) mit den Individuenzahlen aus den Benthosproben zeigt jedoch, dass die Ergebnisse der relativ groben Geländeerhebungen wesentlich besser zur Verbreitung von Sedimentfaziestypen passt als die detaillierte Analyse von Einzelproben.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

In dem Forschungsvorhaben „SEDIMORV“ sollten mögliche Veränderungen in der Sediment- und Morphodynamik der Dithmarscher Watten erfasst und vor dem Hintergrund der zwischen 1970 und 1979 in der Meldorfer Bucht durchgeführten Eindeichungen beurteilt werden.

Der folgende Grundgedanke war dabei Ausgangspunkt der Untersuchungen: Die Zusammensetzung und Verteilung der marinen Sedimente spiegeln in der Regel die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Ablagerung wider und die benthischen Lebensgemeinschaften passen sich ihrerseits artenspezifisch bestimmten Sedimentfaziestypen an. Somit können Änderungen in der Sedimentverteilung und Benthosbesiedlung Veränderungen der Transport- und Umlagerungsprozesse anzeigen, noch bevor sie morphologisch wirksam werden.

Da zum einen kein umfassendes und aktuelles sedimentologisches Datenmaterial für die Dithmarscher Bucht vorlag und zum anderen Veränderungen in der Struktur des Lebensraumes als wirkliche Umstrukturierungen im Gegensatz zu lokalen Variabilitäten erfasst werden sollten, wurden sowohl die Verteilung und die Mobilität der im Eulitoral vorkommenden Ablagerungen großräumig kartiert, als auch die jahreszeitliche Variabilität der Sedimentbeschaffenheit und der Benthosbesiedlung auf ausgewählten Transekten untersucht.

5.1 Sedimentfaziesräume und Habitate

Durch die übliche Einteilung der Ablagerungen in der Gezeitenzone nach Watttypen (Schlick-, Misch- und Sandwatt) bzw. durch die Darstellung des Anteils einzelner Korngrößenfraktionen am Gesamtsediment wird zwar die Beschaffenheit der Wattedimente beschrieben aber nicht die hydromorphologischen Eigenschaften ganzer Wattkörper wiedergegeben. Daher wurden im Rahmen dieser Untersuchungen zunächst Sedimentfaziesanalysen vorgenommen um den Vergleich der hier durchgeführten Kartierung mit früheren Kartierungen in Bezug auf die oben genannten Fragestellungen besser beurteilen zu können.

Die Sedimentfaziesanalysen bestanden in Korngrößenstatistischen Berechnungen nach der Momenten-Methode sowie in einer Clusteranalyse, bei der sowohl die kartierten als auch die Korngrößenstatistischen Parameter berücksichtigt wurden. Hierdurch ließen sich 4 grundlegende Sedimentfaziestypen der Dithmarscher Watten voneinander trennen:

1. **Bereiche mit Außensandcharakteristik** (stark hydrodynamisch beanspruchte, gut sortierte und hoch mobile Sandkörper).
2. **Offene Watten** (stark hydrodynamisch beanspruchte Sandkörper mit hohen Umlagerungsraten aber überwiegend stabil).
3. **Rückseiten- und Buchtenwatten** (mäßig beanspruchte und mäßig sortierte Mischsedimentkörper die auf den Wattflächen zu saisonaler und im Bereich von Prielrändern zu längerfristiger Erosion bzw. Sedimentation neigen).
4. **Küstennahe Watten** (schlecht sortierte, Mischsedimentkörper mit deutlichem Schlickanteil, die nur geringen hydrodynamischen Beanspruchungen unterliegen).

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die hier vorgenommene komplexere Einteilung nach Sedimentfaziestypen besser zu Charakterisierung der hydrodynamischen Beanspruchung von Sedimentations- und Erosionsgebieten und auch zum Vergleich mit Habitaten geeignet ist als die Einteilung nach Watttypen. Die in der Abbildung 16 dargestellte Verteilung der Medianwerte der Korngrößenhäufigkeiten gibt am ehesten die räumliche Verbreitung der Sedimentfaziestypen wieder.

5.2 Veränderung der Sedimentverteilung und Benthosverbreitung

Der Vergleich mit früheren Kartierungen (GAST 1980 und van BERNEM 1994) stützt sich im Wesentlichen auf Veränderungen im Anteil der $< 63 \mu\text{m}$ Fraktion am Gesamtsediment und auf das Vorkommen und die Abundanz adulter *Arenicola marina*.

Obwohl der überwiegende Teil des Dithmarscher Wattkörpers aus sandigen Sedimenten besteht, konnten durch diesen Vergleich grundlegende sedimentologische und auch biozönotische Veränderungen vor allem für den Bereich der Meldorfer Bucht ermittelt werden.

Auf dem Helmsandsteert haben zwischen 1978 und 1999/2000 die Bereiche mit feinkörnigen Oberflächensedimenten infolge des Deichbaus deutlich zu- und die Abundanzen adulter *Arenicola marina* abgenommen. Auf dem nördlichen Bielshövensand konnte dagegen nur unwesentliche Änderung in den Feinkornanteilen und Besiedlungsdichten ermittelt werden. Auch auf den Transekten waren in den zwei Untersuchungsjahren keine signifikanten Änderungen in der Sedimentverteilung und Makrozoobentosbesiedlung zu verzeichnen.

Die ebenfalls untersuchte Mikrophytobenthosbesiedlung unterlag demgegenüber zu starken lokalen, saisonalen und auch jahresübergreifenden Veränderungen. Während die Chlorophyll-a-Gehalte im 1. Projektjahr mit 2 bis 36 mg/m^2 bei vergleichbaren Werten wie die von WOLFSTEIN (1998) vor dem Hedwigenkoog und im Büsumer Watt gemessenen lagen, erreichten sie im 2. Projektjahr deutlich höhere Werte, die mit bis zu 200 mg/m^2 mit denen von RIETHMÜLLER (1999) im Büsumer Watt ermittelten vergleichbar sind.

5.3 Morphodynamische Veränderungen

Die Ermittlung der morphodynamischen Veränderungen erfolgte sowohl anhand von Vermessungen des Amtes für ländliche Räume in Husum und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie als auch anhand der DGPS-Vermessungen, die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden Luftbilder der Jahre 1973, 1989 und 1994 analysiert und Sedimentations-, Erosions sowie Umlagerungsraten mit speziellen Tracerstäben bestimmt.

Diese Untersuchungen ergaben, dass die bedeutendsten Veränderungen im Dithmarscher Watt im Bereich der Außensände, an der West- und Ostflanke des Bielshövensandes sowie in der Meldorfer Bucht stattfanden.

Die Außensände weisen landwärts gerichtete Verlagerungen von bis zu 100 m pro Jahr auf. Im Bereich der Meldorfer Bucht wurden durch Verlagerung der Priele und Gezeitenrinnen Erosionen von über 8 m und Höhenzunahmen durch Sedimentation von über 4 m ermittelt. Während es sich bei den Außensänden um Verlagerungen eines Faziestyps handelt liegen in der Meldorfer Bucht deutliche Faziesverschiebungen zwischen unterschiedlichen Typen vor.

5.4 Fazit

Im Bereich der Außensände und der hochgelegenen offenen Watten stimmen die morphodynamischen Veränderungen weitgehend mit der Verlagerung der Sedimentfaziesräume überein. Die Verschiebungen zwischen den Faziestypen in der Meldorfer Bucht decken sich zudem mit den Veränderungen in der Arenicola-Besiedlung.

Da jedoch immer noch ein deutlicher Trend in den beschriebenen Veränderungen zu erkennen ist, muss in diesen Gebieten auch zukünftig von weiteren morphodynamischen Umstrukturierungen ausgegangen werden. Somit hatten und haben auch heute noch die Gewinnung und Eindeichung von über 25.000 ha Neuland in Dithmarschen einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung des Wattenmeeres.

6 Literatur

- ASMUS, R. et al. (1994): Mikrophytobenthos – empfindliche Oberflächenhaut des Wattbodens. In: LOZÁN J. L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.
- BANTELMA, A. (1966): Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland. *Die Küste*, **14**: 5–99; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- van BERNEM, K.-H. et al. (1994): Thematische Kartierung und Sensitivitätsraster im deutschen Wattenmeer. GKSS Rep. 94/E/10.
- DEJKEMA, K. S. (1989): Habitats of the Netherlands, German and Danish Waddensea. Research Institute for Nature Management, Texel.
- EHLERS, J. (1988): *The Morphodynamics of the Wadden Sea*. Balkema Verlag, Rotterdam.
- EISMA, D. (1981): Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. In: NIO, S.D. & SCHÜTTENHELM, R.T.E. & WEERING, T.C.E. VAN (Hrsg.): Holocene marine sedimentation in the North Sea basin, Spec. Publ. Int. Ass. Sediment., **5**: 415–428.
- FOLK, R.L. & WARD, W. (1957): Brazos River Bar: A study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrol.* **21**/1, S. 3–26).
- GAST, R. (1980): Die Sedimente der Meldorfer Bucht (Deutsche Bucht): Ihre Sedimentpetrographie und Besiedlung, Typisierung und Schwermetallgehalte. Diss. Univ. Kiel, 262 S., Kiel.
- GAST, R., KÖSTER, R. & RUNTE, K.H. (1984): Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Untersuchungen zur Frage der Sedimentverteilung und Schlicksedimentation. *Die Küste* **40**: 165–257; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- KRÖNCKE, I. (1998): Langzeitveränderungen in den Lebensgemeinschaften am Meeresboden der Nordsee. SDN-Magazin 1998.
- LORENZEN, C.J. (1967): Determination Chlorophyll and Pheopigments: Spectrophotometric Equations. *Limnol. Oceanogr.* **12**, S.343–346.
- MANTOURA, R.F.C., LLEWELLYN, C.A. (1983) The rapid determination of alga chlorophylls and carotenoid pigments and Their breakdown products in natural waters by reverse-phase high high performance liquid chromatography. *Anal. Chim. Acta* **151**: 297–314.
- MC CAVE, J.N. (1973): Mud in the North Sea. In: GOLDBERG, E.D. (Hrsg.): *North Sea Science*: 75–100; Cambridge, Mass.
- MCMANUS, J. (1991): Grain size determination and interpretation. In: TUCKER, M. [Hrsg.] : *Techniques in Sedimentology*: 63–85; Oxford.
- MENKE, B. (1976): Befunde und Überlegungen zum nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg in Dithmarschen und Eiderstedt, Schleswig-Holstein. *Probl. Küstenforsch.*, **11**: 145–161.
- MEYER, C. (1999): Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse. Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben Nr. 48; unveröffentlicht.
- MICHAELIS, H. & REISE, K. (1994): Langfristige Veränderungen des Zoobenthos im Wattenmeer: In: LOZÁN J. L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.
- MIDDELTON G.V. (1976): Hydraulic interpretations of sand size distributions. *J. Geol.* **84**, 405–426.
- PRINZ, H. (1982): *Abriß der Ingenieurgeologie*. Enke Verlag, Stuttgart.
- REINECK, H.-E. (1978): Die Watten der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, **32**: 64–83.
- REISE, K. et al. (1994): Makroalgen und Seegrassbestände im Wattenmeer. In: LOZÁN J. L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.

- REIMERS, H.-C. (1999): Wirkungsweise von Buschlahnungen auf den Sedimenthaushalt von aufwachsenden Deichvorländern. Berichte, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste d. Univ. Kiel, Nr. 17, 140 S., 80 Abb., 4 Tab.; Büsum.
- RICKLEFS, K. (1989): Zur Sedimentologie und Hydrographie des Eider-Ästuars. Berichte-Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 35: 182 S., 85 Abb., 3 Tab., Kiel.
- RIETHMÜLLER, R. et al. (1999): Potentials and limitations of chlorophyll a concentration as an index of sediment surface stabilisation. GKSS Rep. 99/E/35.
- ROHDE, H. (1977): Sturmfluthöhen und säkulare Wasserstandsänderungen an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, **30**.
- RUNTE, K.H. (1989): Methodische Verfahren zur Quantifizierung von Umlagerungen in intertidalen Sedimenten. Meyniana, **41**: 153–165, Kiel.
- RUNTE, K.H. (1990): Sedimentologisch-Morphodynamische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Herzmuschelfischerei mit Spüldredgen im Wattenmeer. Diss. Univ. Kiel, 129 S., Kiel.
- RUNTE, K.-H. (1994): Sedimenttransport unter Sturmflutbedingungen in einem Wattrückensystem des Blauortsandes. Meyniana, 46: 107–125; Kiel.
- SCHWEDHELM, E. & IRION, G. (1983): Heavy metal distribution in tidal flat sediments of the German part of the North Sea.- Proc. Int. Conf. "Heavy Metals in the Environment", Heidelberg 1983: 1037–1040; Publ. by CEP Consultants Ltd., Edinburgh, UK.
- SEIBOLD, E. (1974): Die Meeresregion. In: BRINKMANN, R.: Lehrbuch der allgemeinen Geologie, Band 1, Festland – Meer: 358 S.; Stuttgart (Enke).
- TUCKER, M. (1985): Einführung in die Sedimentpetrographie. 265 S., 219 Abb., 20 Tab.; Stuttgart (Enke).
- WERNER, F. (1967): Röntgen-Radiographie zur Untersuchung von Sedimentstrukturen. Umschau, **16**: 532; Frankfurt a. M..
- WIELAND, P. (1972): Untersuchungen zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort. Die Küste, **23**: 122–149; Heide in Holstein.
- WIELAND, P. (1984 a): Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattforschung. Die Küste **40**: 165–257; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- WIELAND, P. (1984 b): Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste **40**: 165–257; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- WIELAND, P. (2000): Trischen – die Geschichte einer alluvialen Insel im Dithmarscher Wattenmeer. Die Küste **62**: 165–257; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- WOLFSTEIN, K. et al. (1998): Photosynthesis/irradiance parameters of microphytobenthic algae from tidal flats in the German Wadden Sea. GKSS Rep. 98/E/44.

7 Kartenanhang

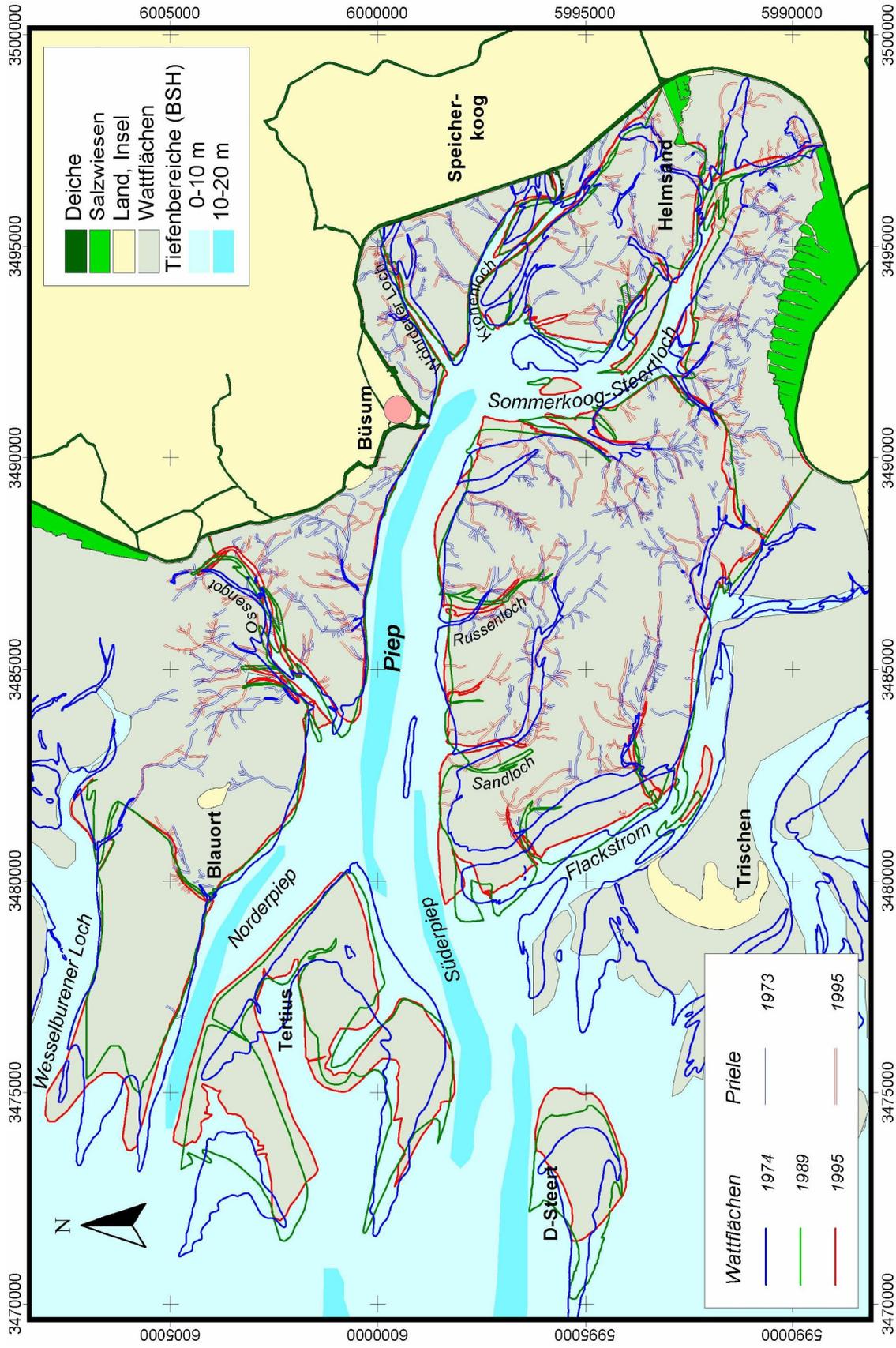


Abb. 12: Karte der Wattflächen und Priele (digitalisierte Luftbilder 1973, 1989 u. 1995).

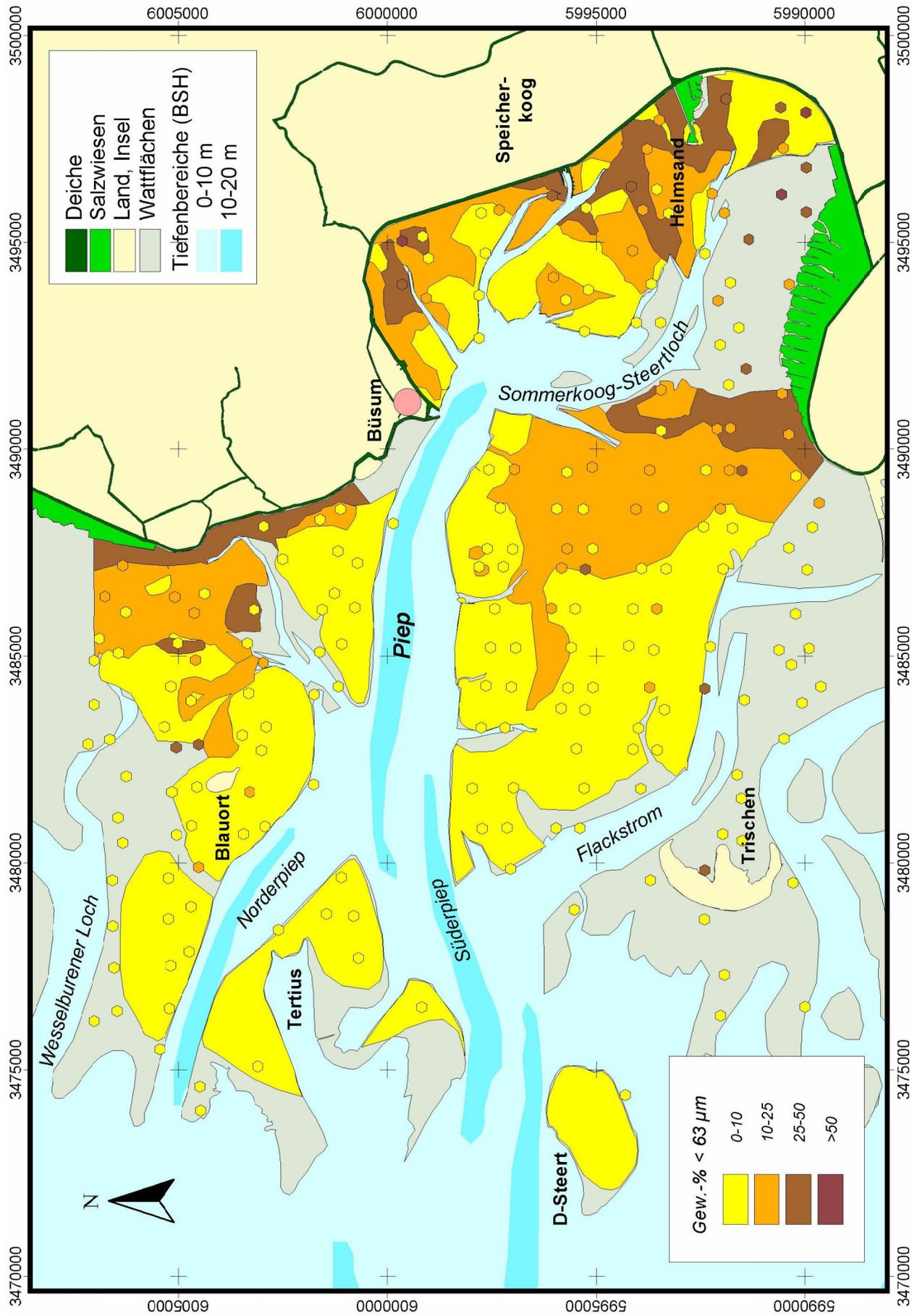


Abb. 13: Karte der Sedimentverteilung 2000 (Flächen) und 1989 (Sechsecke).

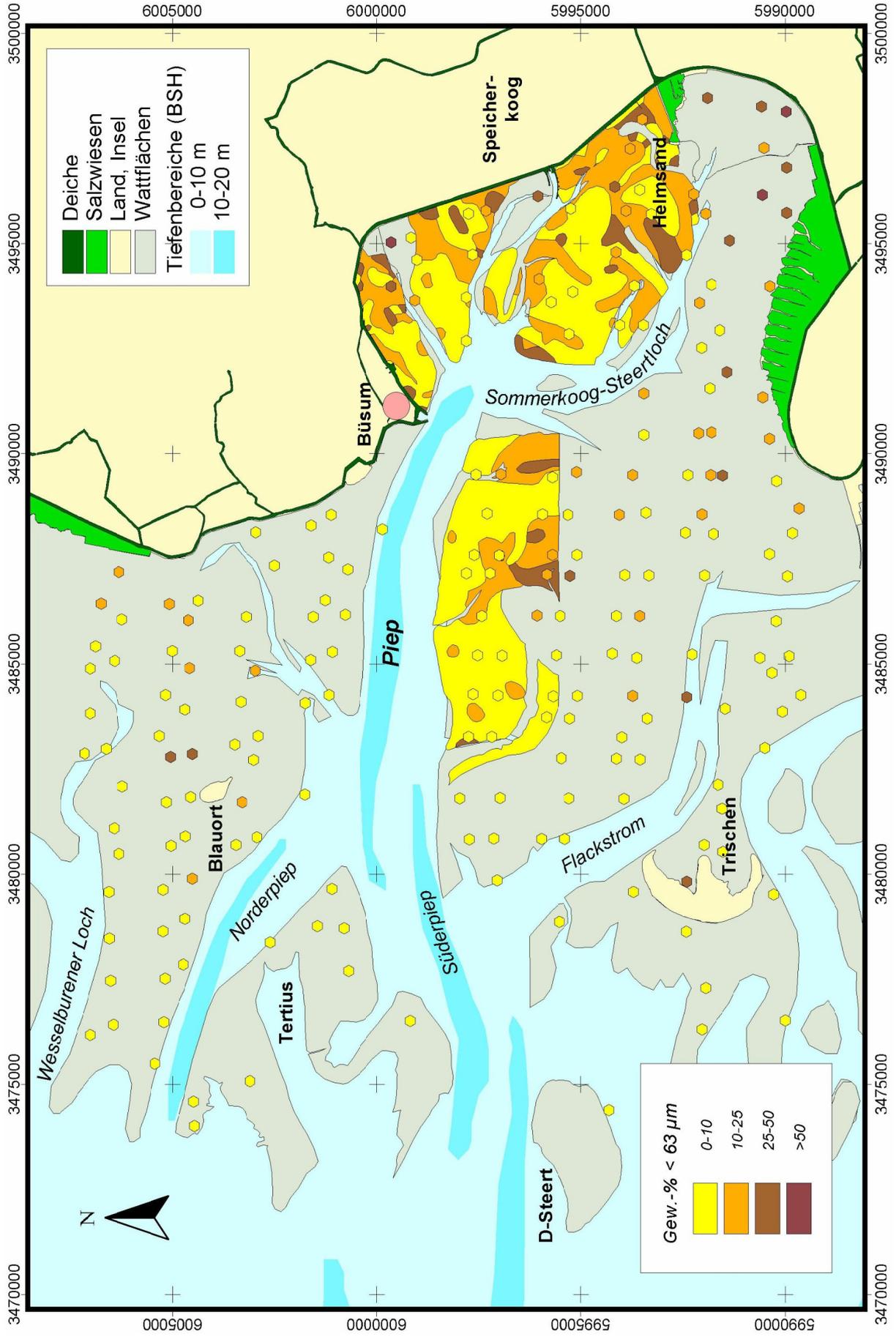


Abb. 14: Karte der Sedimentverteilung 1978 (Flächen) und 1989 (Sechsecke).

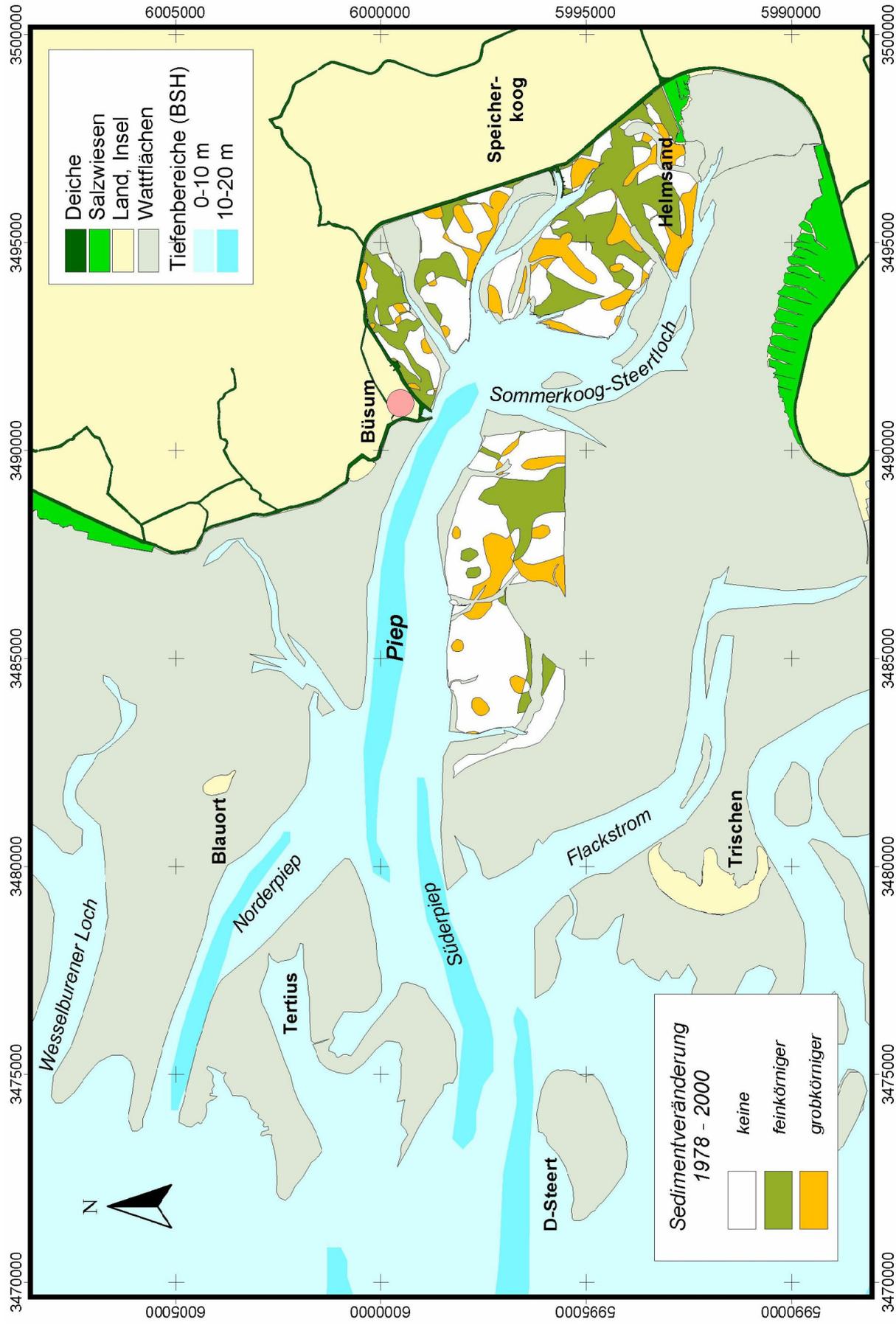


Abb. 15: Karte der Veränderungen in der Korngrößenzusammensetzung 1978–2000

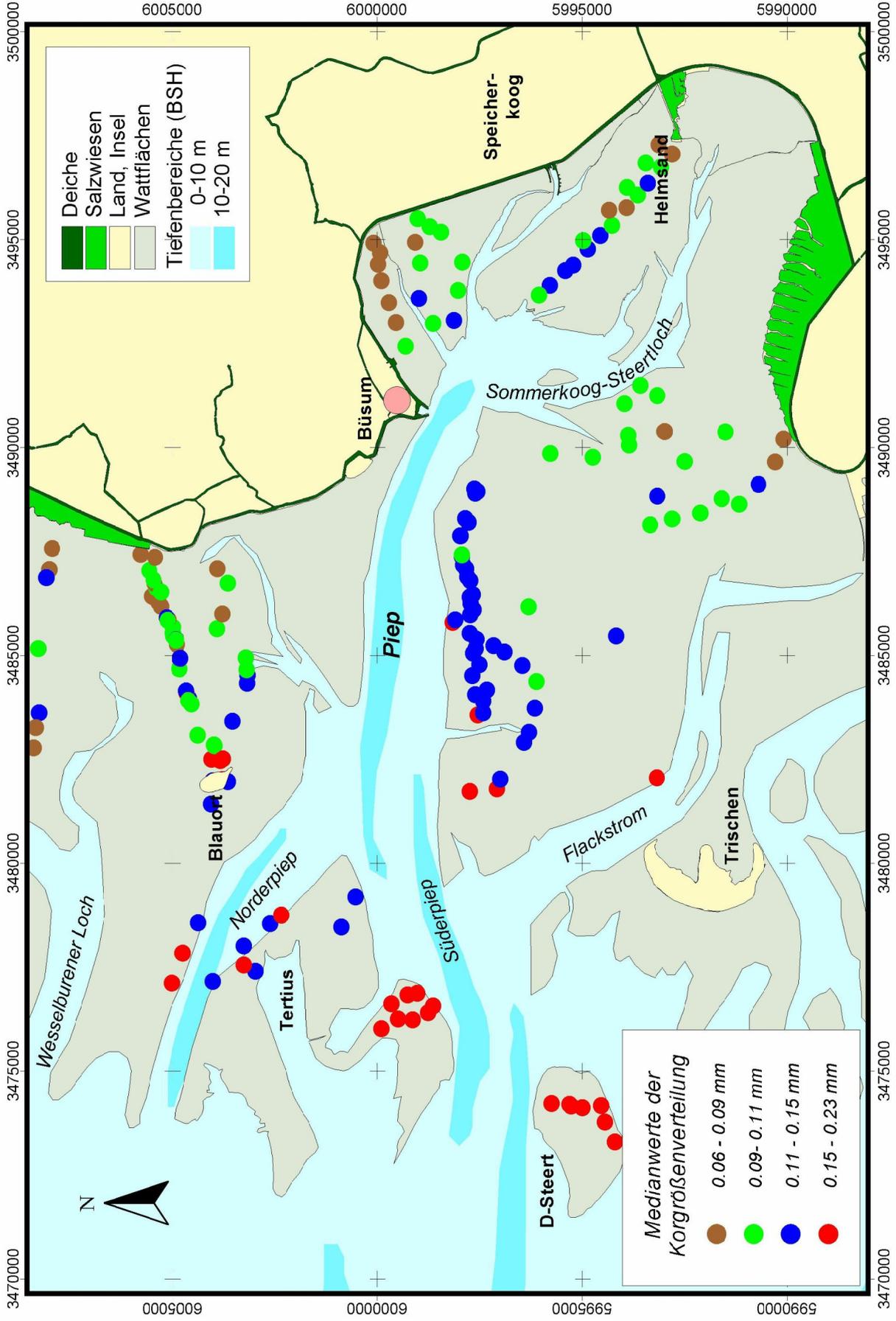


Abb. 16: Karte der Medianwerte der Korngrößenverteilung 1999/2000.

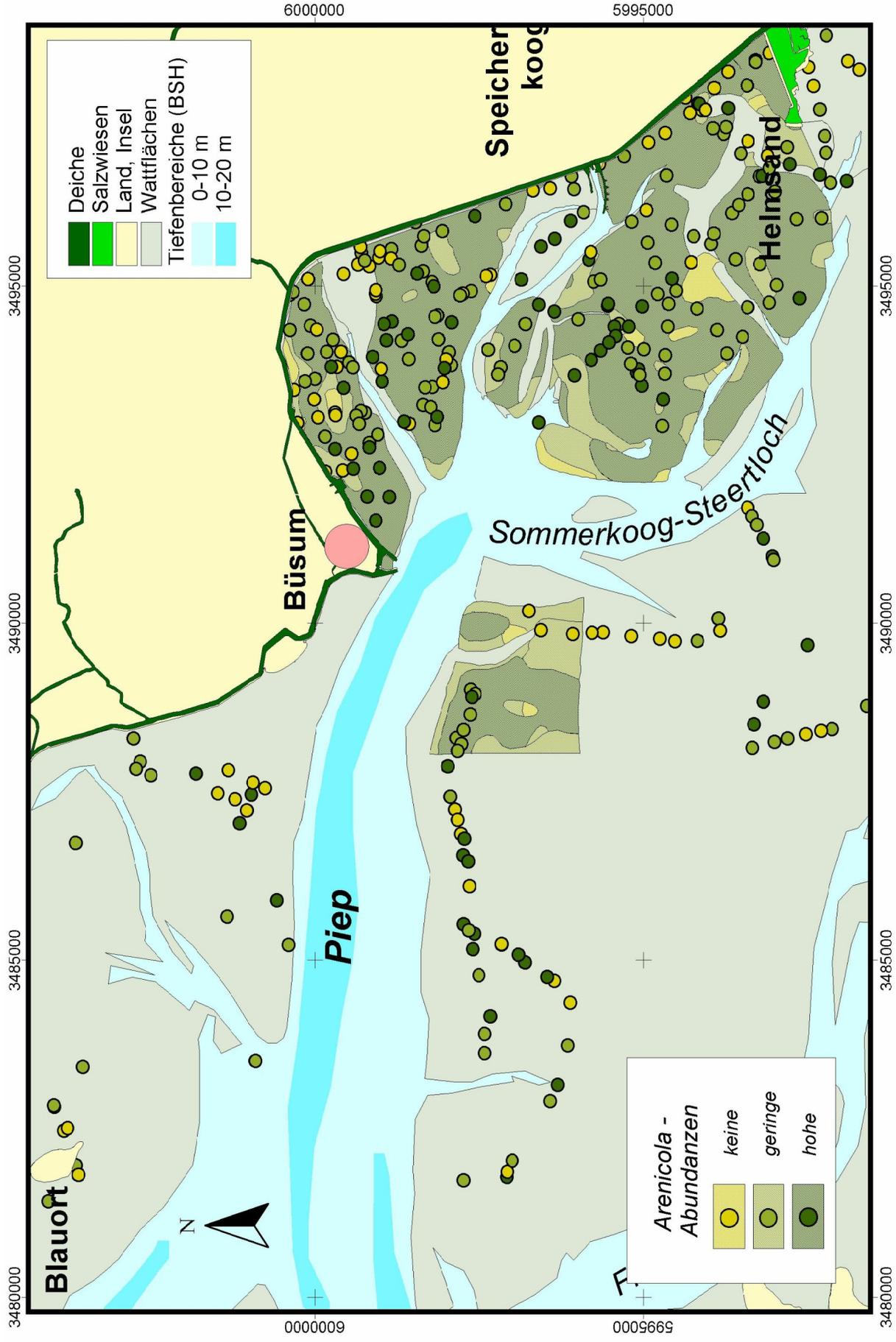


Abb. 17: Karte der *Arenicola*-Abundanzen 1978 (Flächen) und 1999/2000 (Kreise).

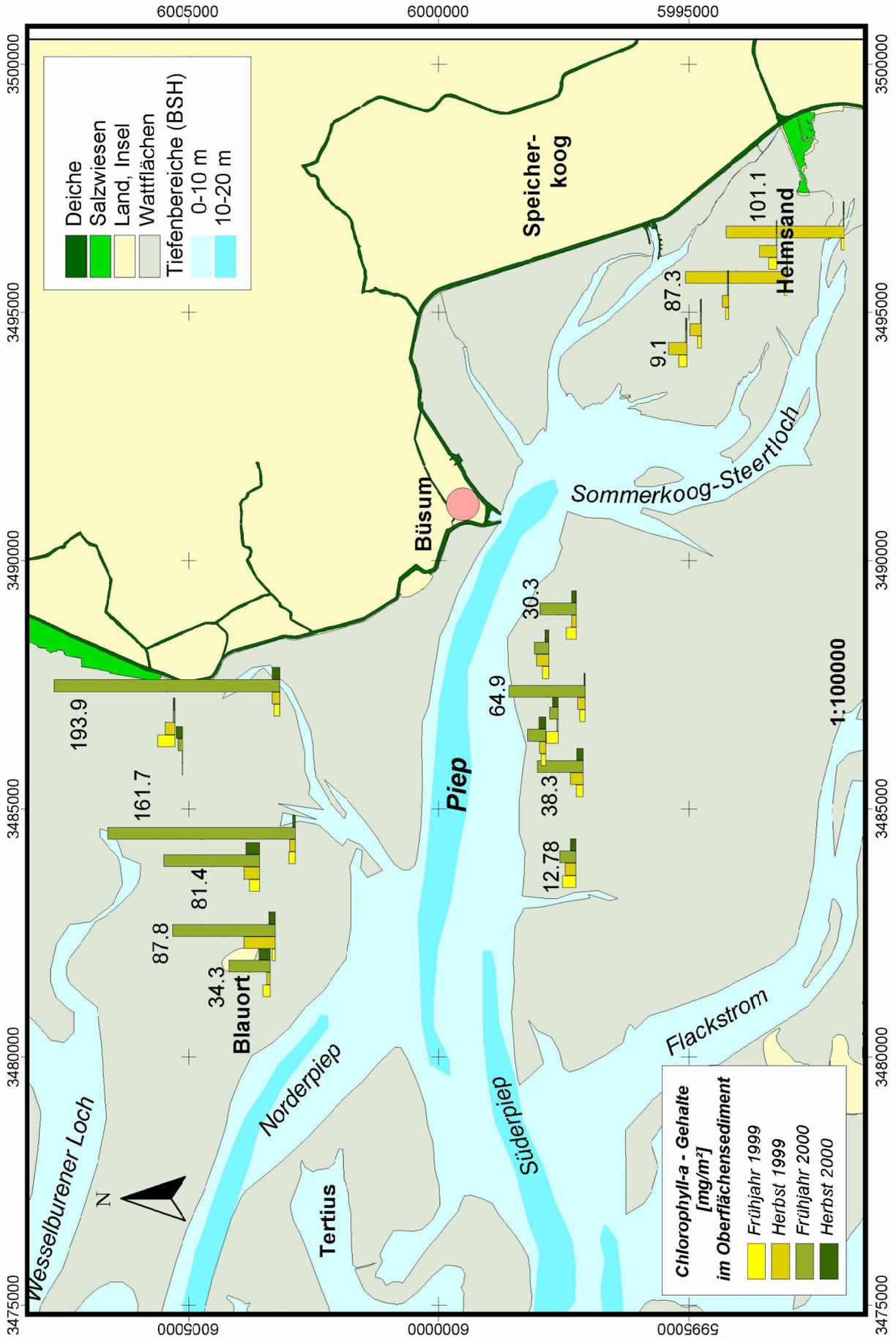


Abb. 18: Karte der Chlorophyll-a - Gehalte im Oberflächensediment 1999/2000.