

Dienstbericht Forschungsstelle Küste

21/1999

Niedersächsisches Landesamt für Ökologie



Cornelius Meyer, Günther Ragutzki

KFKI Forschungsvorhaben Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse MTK 0591



Herausgeber:

Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste-

Bezug:

NLÖ-Forschungsstelle Küste An der Mühle 5, 26548 Norderney Tel.: 04932-916-0 Fax: 04932-1394 e-mail: info.crs @ t-online.de

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE - FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE -

Cornelius Meyer, Günther Ragutzki

KFKI FORSCHUNGSVORHABEN SEDIMENTVERTEILUNG ALS INDIKATOR FÜR MORPHODYNAMISCHE PROZESSE

MTK 0591

Norderney, im Juli 1999

Leiter der Forschungsstelle Küste

Va

Dr.- Ing. habil. H. Kunz, Ltd. Dir. u. Prof

Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse

Kurzfassung

Mit dem Ziel, über die jeweils charakteristische Sedimentverteilung und ihre zeitliche Variabilität die morphologische Entwicklung einer räumlichen Einheit aufzuzeigen, wurden Luftbilder des ostfriesischen und niedersächsischen Küstenraums aus den Jahren 1951, 1966, 1975 und 1997 ausgewertet und Sedimentverteilungskarten der Oberflächensedimente erstellt. Die sedimentologischen Veränderungen wurden unter Einsatz eines Geographischen Informationssystems nach Art, Lage und Umfang erfasst. Durch die Verknüpfung mit zuzuordnenden morphologischen Veränderungen wurde untersucht, ob auf diesem Wege Sedimentations- bzw. Erosionsgebiete erkannt und Entwicklungstendenzen aufgezeigt, gedeutet und vorhergesagt werden können. Während sich die Flächenanteile von Sand-, Misch- und Schlickwatt bis 1975 nicht wesentlich verändern, ist zwischen 1975 und 1997 eine Flächenzunahme der Sandwattgebiete um mehr als zehn Prozent festzustellen, die vor allem auf Kosten der Mischwattzonen geht. Grundsätzlich ist hier eine Übereinstimmung mit der großräumigen mittleren Abnahme des Wattniveaus erkennbar. Betrachtet man allerdings die einzelnen morphologischen Einheiten, so führt die Verknüpfung der Sedimentverteilung mit topographischen Karten zu der Erkenntnis, dass signifikante Zusammenhänge zwischen den Änderungen im Verteilungsmuster der Oberflächensedimente und den Veränderungen im Wattniveau nicht nachweisbar sind. Daraus folgt, dass über die festgestellten räumlichen Veränderungen der Sedimentverteilung weder lokal noch regional unmittelbar auf Änderungen der Watttopographie rückgeschlossen werden kann und somit auch keine Prognosen künftiger morphologischer Entwicklungen möglich sind.

Sediment distribution as signal for morphodynamical processes

Abstract

According to the aim of the investigation to characterize the morphological development of a spatial unit by its characteristic sediment distribution and temporal variability, aerial views along the East Frisian and Lower Saxonian coastal zone for the years 1951, 1966, 1975 and 1997 had been evaluated. The investigation made it possible to elaborate maps showing the distribution pattern of the surface sediments. The changes of sediment distribution – regarding position, extent and quality – were recorded and analyzed by the implementiation of a Geographic Information System (GIS). Whereas up until 1975 the extension of sand flats, muddy sand flats and mud flats had not substantially changed, the area covered by sand flats exhibited a growth of more than ten percent between 1975 und 1997, mainly to the disadvantage of muddy sand flats. A combined analysis of sediment distribution and topographical maps did not indicate any significant correlation between changes in the sediment distribution patterns and changes of the tidal flat elevation. Consequently, it is not possible to apply the ascertained spatial changes in sediment distribution in order to draw conclusions regarding changes within the tidal flat topography, respectively to use them to forecast future morphological developments, neither local nor regional.

Meyer, C. & G. Ragutzki (1999): KFKI-Forschungsvorhaben "Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse"

Dienstber. Forschungsstelle Küste 21/1999 Unveröff. 43 S., 4. Abb., 37 Anl. Norderney

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung	3
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Forschungsstand	
2	Untersuchungsraum	5
2.1	Lage	5
2.2	Holozäne Entwicklung	5
2.3	Naturräumliche Gliederung	7
2.4	Anthropogene Einflussnahme	7
3	Sedimentationsraum Wattenmeer	9
3.1	Hydrographische Einflussfaktoren	9
3.2	Biogene Faktoren	9
3.3	Witterungseinflüsse	10
3.4	Wattsedimente und ihre Klassifizierung	10
4	Methodik	12
4.1	Fernerkundungsmethoden	12
4.2 4.2.7 4.2.2	Luftbildgestützte Sedimentkartierung.IDigitale Luftbildauswertung.2Analoge Luftbildauswertung	12 12 13
4.3	Gelände- und Laboruntersuchungen	13
4.4	Datengrundlage	14
5	Verteilung und Eigenschaften der Sedimente	15
5.1	Ergebnisse der Sedimentanalysen	15
5.2	Verteilungsmuster der Oberflächensedimente 1997	
5.3 5.3.1 5.3.2	Ergebnisse der Luftbildkartierung älterer Aufnahmen 1 Sedimentverteilung 1951	
5.3.3	3 Sedimentverteilung 1966	20

6	Veränderungen im Verteilungsmuster der Oberflächensedimente	22
6.1	Änderungstendenzen zwischen 1951 und 1997	22
6.2	Vergleich mit der Sedimentverteilungskarte von RAGUTZKI (1982)	23
6.3 6.3.2 6.3.2 6.3.2 6.3.2	 Der Einfluss von Leyhörn: Sedimentverteilung in der Leybucht Verteilungsmuster 1983 vor dem Bau von Leyhörn Verteilungsmuster 1989 nach dem Bau von Leyhörn Verteilungsmuster 1997 Änderungen im Verteilungsmuster zwischen 1983 und 1989 Änderungen im Verteilungsmuster zwischen 1989 und 1997 	24 24 24 25 25 26
7	Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse	26
7 7.1	Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse	26 26
7 7.1 7.2	Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse Wattniveauänderungen Zusammenhang Wattniveauänderung und Sedimentverteilung	26 26 27
7 7.1 7.2 8	Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse Wattniveauänderungen Zusammenhang Wattniveauänderung und Sedimentverteilung Zusammenfassung	26 26 27 29
7 7.1 7.2 8 9	Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse Wattniveauänderungen Zusammenhang Wattniveauänderung und Sedimentverteilung Zusammenfassung Danksagung	

11	Anlagen:	Abbildungen	A 1	bis A3	37
11	Anagen.	Abbildungen	AI	DI2 M3)

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben " Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse" ist von Dezember 1995 bis Mai 1999 gefördert worden, zunächst vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter dem Titel " Verteilungsmuster und Mächtigkeit nordseezeitlicher Ablagerungen im Küstenbereich als Indikator für morphodynamische Prozesse" (MTK 0591 B 9), seit Februar 1998 dann unmittelbar über das Forschungszentrum Jülich, Projekträger " Biologie, Energie, Ökologie" (BEO) des BMBF unter dem Förderkennzeichen 03 KIS 317. Das Vorhaben ordnet sich dem Thema " Feststofftransport, Erosion, Sedimentation" des Forschungsprogramms des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) zu und erstreckt sich zudem in das Thema " Aspekte säkularer Entwicklungen". Primärer Forschungsbedarf besteht in den Bereichen " Erfassung und Beurteilung von Erosions- und Sedimentationsvorgängen im Küstengebiet" sowie " Prognose morphologischer Gestaltungsvorgänge bei geänderten Randbedingungen".

1.1 Problemstellung

Die südliche und teilweise auch die östliche Nordseeküste wird von Wattgebieten begrenzt. Mit einer Gesamtlänge von 450km zwischen Den Helder in Holland und Blavands Huk in Dänemark und einer durchschnittlichen Breite von 7km stellen sie den Übergangsbereich zwischen dem Meer und der Geest dar. Damit nehmen sie eine Fläche von etwa 8000km² ein (PEJRUP, 1988).

Bezüglich ihrer Wasserbedeckung lassen sich die Wattgebiete nach REINECK (1978a) in Sub-, Euund Supralitoral gliedern. Ursprünglich bis weit in die Marschen reichend, wird das Supralitoral inzwischen landseitig durch Deiche begrenzt. Damit ist der Begriff gleichbedeutend mit Außengroden, Salzwiesen oder Deichvorland. Da das Eulitoral – gemeinhin der Bereich, der als "Watt" bezeichnet wird – flächenmäßig mit 65% deutlich am weitesten verbreitet ist, stellen Prozesse, die das Gleichgewicht dieser Wattflächen aufrechterhalten, auch zentrale Mechanismen für die Stabilität des gesamten Wattgebietes dar (POSTMA, 1981).

Der Eintrag mariner Sedimente von der Nordsee in die Wattgebiete ist allgemein anerkannt (POSTMA, 1961, 1981; EISMA, 1981; BARTHOLDY & PHEIFFER-MADSEN, 1985). REINECK (1978b) weist jedoch darauf hin, dass Umlagerungen innerhalb der Wattgebiete die maßgeblichen Sedimentbewegungen darstellen, während neues Sediment nur wenig zugeführt wird. Nach OOST & DE BOER (1994) können die einzelnen Watteinzugsgebiete – bei den Inselwatten schließen diese das Seegat und Ebbdelta mit ein – hinsichtlich ihres Sedimenthaushaltes als jeweils unabhängige Einheiten, den sogenannten "sand-sharing-systems", betrachtet werden. Innerhalb eines Systems befinden sich die morphodynamischen Faktoren im Gleichgewicht, kurzfristige Schwankungen werden kompensiert.

Die Sedimente spiegeln in ihren horizontalen und vertikalen Verteilungsmustern und ihren Eigenschaften vor allem die hydrodynamischen, aber auch die biologischen Bedingungen zum Zeitpunkt ihrer Ablagerung wider. So finden sich im allgemeinen gröbere Sedimente als Ablagerungen in einem energiereicheren Milieu ("higher-energy environment"), während feinere Sedimente unter energetisch geringeren Bedingungen ("lower-energy environment") abgelagert werden (REINECK & SINGH, 1980). Da die Ablagerungsprozesse in den Wattgebieten durch einen in Richtung auf das Festland abnehmenden Energieeintrag charakterisiert sind, kommt es dabei tendenziell zu einer küstenparallelen Anordnung zunehmend schluff- und tonreicherer Sedimente (VAN STRAATEN & KUENEN, 1957; POSTMA, 1961; EVANS, 1965;. REINECK ET AL., 1986; FLEMMING & DAVIS, 1994; u.a.). Für die Nordseeküste, insbesondere auch für das Untersuchungsgebiet, sind die langfristigen morphologischen Änderungen gut dokumentiert – z.B. HOMEIER, 1962; STREIF; 1990. Es gibt Hinweise, dass sich Flachwasserbereiche (z.B. den Küsten vorgelagerte Rückseitenwatten) geringer aufhöhen als bisher, oder sogar grlßflächig vertiefen. Diese Hinweise gilt es zu überprüfen, die Änderungen zu quantifizieren und als temporär lokale Erscheinungen oder als großräumige, strukturelle Entwicklungen einzustufen.

1.2 Zielsetzung

In Zuordnung zu morphologischen Strukturen sind Erosions- und Sedimentationsbereiche durch charakteristische Sedimentverteilungen gekennzeichnet. Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente zeigen oftmals schon Veränderungen der Transport- und Umlagerungsprozesse an, bevor sie sich morphologisch auswirken. Während temporär auftretende, lokale Variabilitäten der Sedimentverteilung der sich ständig ändernden Dynamik von Strömung und Seegang Ausdruck verleihen, weisen großräumige und langfristige Umlagerungen auf grundlegende Änderungen im hydrodynamischen und morphologischen Umfeld hin.

Während eine Erfassung der aktiven Wirkungsabläufe bei wechselnden morphologischen Randbedingungen wegen des damit verbundenen Messaufwandes kaum erreichbar ist, und die Lebensgemeinschaften erheblichen, ursächlich häufig nicht nachvollziehbaren Schwankungen unterliegen, ist die Klassifizierung der Sedimente nach gesicherten Verfahren mit erheblich geringerem Aufwand möglich.

Untersuchungsgegenstand sind die nordseezeitlichen Ablagerungen im Küstenbereich zwischen Ems und Elbe (Niedersächsisches Wattenmeer, siehe Abb. 1). Ziele der Untersuchungen sind: Darstellung und Interpretation charakteristischer Sedimentverteilungen für räumliche Einheiten und deren zeitlicher Variabilität; Analyse temporärer und struktureller Entwicklungstendenzen; vergleichende Untersuchungen räumlich-zeitlich variabler Sediment- und Erosions-/ Sedimentations-Verteilungen; Analyse von Sedimentverteilungen hinsichtlich ihrer Verwendung als Indikator für morphologische Entwicklungen; Überprüfung, ob über charakteristische Sedimentverteilungen und deren zeitliche Variabilität die morphologische Entwicklung von räumlichen Einheiten aufzuzeigen ist, und ob diese in geeigneter Weise nach temporären und strukturellen Entwicklungstendenzen unterschieden werden können. Mit dem Erreichen des letztgenannten Zieles wäre eine Grundlage für Prognosen über künftige morphologische Entwicklungen geschaffen, die bei Planungen von Küstenschutzmaßnahmen als wichtige Entscheidungshilfe herangezogen werden könnte.

1.3 Forschungsstand

Untersuchungen zur Verteilung der Oberflächensedimente im Bereich der deutschen Nordseeküste sind zahlreich. Außer den flächendeckenden Karten der deutschen Bucht (DHI, 1981) und des deutschen (VAN BERNEM et al., 1994) sowie des niedersächsischen Küstenraumes (RAGUTZKI, 1982), beschränken sich die Untersuchungen aber in der Regel auf Teilgebiete. Vor allem ältere Untersuchungen stützen sich dabei ausschließlich auf die Ergebnisse von in-situ-Untersuchungen. Für die niedersächsische Küste sind hier u.a. die Arbeiten von LINKE (1939), KRAUSE (1951, 1952, 1954), MÜLLER (1957, 1958, 1962, 1963, 1964, 1966), DÖRJES et al. (1969); MICHAELIS (1968, 1970, 1973), RAGUTZKI (1983, 1984); GÖHREN (1975), HARENBERG (1983), REINECK et al. (1986), ZIEGLER (1989), GROTJAHN (1990), BROSINSKY (1991), MANN (1991), EITNER (1992),

Flemming (1992), Flemming & Davis (1994), Flemming & Ziegler (1995) und Nyandwi (1995) zu nennen.

Eine flächendeckende und synoptische Gesamterfassung ist mittels der Geländekartierung kaum möglich (WIECZOREK, 1982), so dass immer stärker die Methoden der Fernerkundung in den Vordergrund drängen, die zu einem festen Zeitpunkt unter einheitlichen Rahmenbedingungen eine Momentaufnahme ermöglichen. Während Luftbilder für die Erfassung der Wattsedimente kaum herangezogen werden (z.B. MICHAELIS, 1978; RAGUTZKI, 1983), finden sich eine ganze Reihe von Arbeiten, die die Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenaufnahmen für sedimentologische Fragestellungen untersuchen. Hier sind u.a. PRÖBER (1981), DENNERT-MÖLLER (1983), DOERFFER & MURPHY (1989), KLEEBERG (1993), DOERFFER ET AL. (1995) und STELZER (1998) zu nennen, die sich mit der Satellitenklassifikation von Wattsedimenten im deutschen Küstenraum beschäftigen.

2 Untersuchungsraum

2.1 Lage

Der Untersuchungsraum liegt in der südlichen Nordsee und entspricht der Ausdehnung der Wattflächen zwischen der Mündung der Ems im Westen und de Elbe im Osten. Seewärts folgt die Grenze in etwa dem Verlauf der mittleren Tideniedrigwasser-Linie, sofern nicht Inseln eine natürliche Begrenzung darstellen. Damit umfasst das Arbeitsgebiet mit etwa 1400km² den gesamten eulitoralen Bereich des niedersächsischen Wattenmeeres zwischen Borkum und Cuxhaven (Abb. 1).



Abb. 1: Übersicht des Untersuchungsgebietes

2.2 Holozäne Entwicklung

Einen detaillierten Überblick über die geologische Entwicklung der Deutschen Bucht und somit auch des niedersächsischen Küstenraumes finden sich bei SINDOWSKI (1973), STREIF & KÖSTER

(1978), EHLERS (1988) und STREIF (1990). Hier soll nur in Grundzügen die Entwicklung im Holozän wiedergegeben werden.

Mit einsetzendem Rückgang der Weichsel-Vereisung um 15000 J.v.h. ist im späten Pleistozän ein deutlicher Anstieg des Meeresspiegels zu verzeichnen. Ausgehend von einem Meeresspiegelstand von ca. NN-110m kann bis zur Wende Pleistozän-Holozän (10.000J.v.h.) von einem Anstieg auf NN-60m bis NN-50m ausgegangen werden (JELGERSMA, 1979). Diese Transgressionsphase setzt sich auch im frühen Holozän fort, so daß bereits um 8700J.v.h. der Meeresspiegel bei NN-45m gelegen haben dürfte §TREIF, 1990). Erste Brackwassereinflüsse bei NN-24m lassen sich um 7900J.v.h. im südlichen Küstengebiet 6km nördlich von Wangerooge nachweisen (HANISCH, 1980; zit. in HOFFMANN 1998). Der Meeresspiegel erreichte bei etwa NN-20m die seewärtigen Ausläufer des ostfriesischen Geestrückens. Damit wurde die Küstenentwicklung Ostfrieslands eingeleitet (ca. 7500J.v.h.). Eine Vorstellung vom ungefähren Verlauf der Küstenlinie seit dem Ende der Weichsel-Vereisung vermittelt Abb. 2.



Abb. 2: Vermuteter Verlauf nacheiszeitlicher Küstenlinien der Nordsee im Holozän (nach Jelgersma, 1979)

Der weitere Verlauf der Insel- und Küstengenese ist durch eine rasch abnehmende Anstiegsrate des Meeresspiegels einerseits und einer Zunahme des Tidehubs andererseits geprägt, so dass sich durch Sedimentakkumulation ein dauerhaftes Barrieresystem bilden konnte (STREIF, 1990). Im späten Atlantikum (ca. 5400J.v.h.) dürfte die Lage der Küstenlinie bereits in etwa dem heutigen Verlauf entsprechen. Zwischen 5400 und 3700J.v.h. steigt der Meeresspiegel nur noch von NN-7 auf NN-3m (SINDOWSKI, 1973)

Nach der heute zumeist akzeptierten Auffassung von BARCKHAUSEN (1969; zit. in STREIF, 1990) bilden periodisch überflutete Sandplaten die Initialphase der Inselgenese, die dann im Wirkungs-

bereich von Brandung und Strömung partiell über MThw gelegene Strandwälle bilden \$TREIF, 1986). Pioniervegetation und äolische Prozesse führten schließlich zur Dünenbildung. Daneben existieren aber auch andere Hypothesen, auf die hier nicht im einzelnen eingegangen werden soll. Eine Diskussion dieser Hypothesen findet sich bei FLEMMING (1992), der in der Arbeit seine eigene Auffassung von der Insel- und Küstenentstehung darlegt.

2.3 Naturräumliche Gliederung

Die Ausweisung von eindeutig umrissenen naturräumlichen Zonen muß in einem dynamischen System wie der Wattenmeerküste an ihre Grenzen stoßen. In topographischen Karten und auf Seekarten ist die Uferlinie als Grenze zwischen Meer und Festland bzw. Insel eingetragen. Ihre Höhenlage fällt mit der mittleren Tidehochwasser-Linie zusammen und trennt die mit dem Gezeitenwechsel periodisch trockenfallenden Flächen des Eulitorals von den episodisch waserbedeckten Zonen des Supralitorals. Als Epilitoral schließlich werden Gebiete bezeichnet, die vornehmlich terrestrischen Einflüssen ausgesetzt sind. Die Grenze zu den nahezu immer wasserbedeckten Bereichen des Sublitorals entspricht der Linie des mittleren Springtideniedrigwassers, die als Seekartennull (SKN) in Seekarten die Bezugshöhe für die Tiefenangaben bildet.

Im Übergangsbereich zwischen Geestrand und Meer haben sich im Zuge mariner, brackischer und fluviatiler Sedimentationsprozesse Marschländer entwickelt. Lediglich bei Dangast (Jadebusen) sowie bei Duhnen (nordwestlich von Cuxhaven) sind Geestbereiche direkt marinen Einflüssen ausgesetzt (LÜDERS & LUCK, 1976). Während die landwärtige Grenze der Marsch mit dem Geestrand zusammenfällt, entspricht die seeseitige Grenze in der Regel dem Verlauf der Hauptdeichlinie.

Den gut geschützten Wattflächen der Leybucht und des Jadebusens (Buchtenwatten) stehen die exponierten Wattenflächen zwischen Jademündung und Cuxhaven (Offene Watten) gegenüber. Im Schutz der ostfriesischen Inseln haben sich die Rückseitenwatten gebildet, die über die Seegats entwässert werden. Der Querschnitt eines Seegats wird durch die Größe des Watteinzugsgebietes bestimmt. Das Watteinzugsgebiet wird durch den veränderlichen Flutspeicherraum definiert, der den bei Flut durch das Gat einströmenden Wassermassen zur Verfügung steht. Die Grenze benachbarter Watteinzugsgebiete wird als Wattwasserscheide bezeichnet und tritt morphologisch als Watthöhenscheide in Erscheinung.

Die morphologische Gliederung der sieben ostfriesischen Inseln folgt der Zonierung in sub-, euund supralitoral. Die sich von der MSpTnw-Linie (Strandlinie) seewärts über den Inselabhang erstreckende sublitorale Zone wird als Vorstrand bezeichnet. Zwischen Strandlinie und MThw-Linie befindet sich die Zone des Nassen Strandes (Eulitoral). Die Zone des Trockenen Strandes (Supralitoral) erstreckt sich von der MThw-Linie bis an den Dünenfuß und geht hier in das Dünengebiet (Epilitoral) über. Landwärts schließen sich dann die Inselmarschflächen an und leiten zum Inselwatt über.

2.4 Anthropogene Einflussnahme

Erste Versuche, sich gegen die Überflutungen des Siedlungsraumes infolge des steigenden Meeresspiegels zu wehren, gehen bis kurz nach der Zeitenwende zurück, als die Häuser auf künstlichen Hügeln (Wurten) zum Schutz gegen die Sturmfluten errichtet wurden. Bis zum 11.Jahrhundert n.Chr. sind sie als einzige Küstenschutzwerke anzusehen. Danach ergänzten Deichbaumaßnahmen den Wurtenbau, der lokal bis ins 19. Jahrhundert andauerte (Halligen). Heute schützt die deutsche Nordseeküste eine Deichlinie mit einer Gesamtlänge von knapp 1000km, deren Verlauf ab dem 15. Jahrhundert nicht unerheblich durch Landgewinnungsmaßnahmen, Poldereindeichungen, Abdeichungen von Buchten und in jüngerer Zeit durch den Bau von Sperrwerken bestimmt wurde.

Die Sicherungsmaßnahmen auf den ostfriesischen Inseln sind vergleichsweise jungen Ursprungs. Als erste Schutzmaßnahme gelten die Anfang des 18. Jahrhunderts durchgeführte Dünensicherungen durch Helmpflanzungen und die Errichtung von Sandfangzäunen. Ab dem 19. Jahrhundert wurden dann exponierte Abschnitte der Inseln durch Buhnen und Dünendeckwerke festgelegt.

Die vom Menschen geschaffenen stationären Verhältnissen stehen in Wechselwirkung mit den natürlichen, dynamischen Prozessen. Zur Siedlungsgeschichte, den damit in Zusammenhang stehenden Küstenschutzmaßnahmen und den anthropogenen Einflüssen auf die natürlichen Naturprozesse des Untersuchungsgebietes gibt es ein umfangreiches Schrifttum. Beispielhaft werden hier die vom Institut für historische Küstenforschung in Wilhelmshaven (früher Institut für Marschenforschung) veröffentlichten Ergebnisse (), die von KRAMER und ROHDE herausgegebene Historie des Küstenschutzes () sowie die Schriftenreihe "Die Küste" und die Berichte der Forschungsstelle Küste (vormals Forschungsstelle Norderney), Zusammenstellung veröffentlicht in Heft 40 (1995), benannt.

3 Sedimentationsraum Wattenmeer

3.1 Hydrographische Einflussfaktoren

Im Bereich der niedersächsischen Küste sind die Gezeitenverhältnisse maßgeblich von der um den in der zentralen Nordsee gelegenen Amphidromienpunkt rotierenden Gezeitenwelle bestimmt, die sich von West nach Ost gegen den Uhrzeigersinn bewegt. Dadurch ergibt sich für den Eintrittszeitpunkt des Tidehochwassers am Pegel Borkum, Fischerbalje und Cuxhaven, Steubenhöft eine Zeitverschiebung von gut zwei Stunden. Der Küstenstreifen zwischen Borkum und Wangerooge ist mit Tidenhüben zwischen 2.3m und 2.8m noch dem mesotidalen Bereich zuzuordnen, während der Abschnitt zwischen Jade und Cuxhaven mit bis zu 3.9m Tidenhub (Wilhelmshaven, Alter Vorhafen) als makrotidal zu bezeichnen ist.

Infolge des Gezeitenwechsels treten Tideströmungen auf, die im Bereich der Seegaten Maximalwerte von 1.5m/s (Ebbstrom) bzw. 2.0m/s (Flutstrom) erreichen (KOCH & NIEMEYER, 1980). Das Strömungsmuster im Bereich der Watten wird durch die Prielverläufe bestimmt, kann aber bei Windeinfluss durch Triftströmungen erheblich modifiziert werden (GÖHREN, 1974).

Durch die Einwirkung von Wind auf die Wasseroberfläche entstehen Wellen, deren Höhe von der Intensität und Wirkungsdauer des Windes, vom Fetch sowie von der Wassertiefe abhängig ist. Die im Wattenmeer registrierten Wellenhöhen überschreiten in der Regel die Einmeter-Marke nicht. Obwohl sich infolge der starken Dämpfung im Riffbogenbereich auf den Rückseitenwatten keine Flachwasserbrandung ausbilden kann, ist aufgrund sich überlagernder Refraktions-, Diffraktions- und Shoalingprozessen doch eine Dämpfung des Seegangs zwischen Seegat und Festlandsküste festzustellen (NIEMEYER, 1979).

3.2 Biogene Faktoren

An das Leben im Watt angepasste Organismen beeinflussen Erosions- und Akkumulationsprozesse, bewirken durch Bioturbation die Umlagerungen von Sediment und verändern die Sedimentzusammensetzung (AUGUSTINUS, 1997).

Besonders augenfällig ist der Einfluss von Miesmuscheln auf die Substrateigenschaften. Sie siedeln auf hartem, sandigem Untergrund, indem sie sich mit Hilfe ihrer Bysusfäden verankern. Unter günstigen Standortbedingungen bilden sich ausgedehnte Muschelbänke, die sich deutlich von der Wattoberfläche abheben Durch Ausscheidung von Kotpillen verändern Muscheln die Sedimentbedeckung im Bereich der Bänke in einem solchen Maß, dass sich schlickige Oberflächensedimente bilden.

Im Übergangsbereich vom Eu- zum Supralitoral finden sich Schlickgräser (Schlickgraszone), die durch die Wurzelaktivität eine Boden- bzw. Sedimentstabilisierung hervorrufen und durch Herabsetzung der Strömungsgeschwindigkeiten die Sedimentakkumulation begünstigen (DÖRJES, 1978).

Eine wichtige Rolle spielt auch das Mikrophytobenthos bei der Bindung und Ablagerung von Sedimenten. In welchem Umfange insbesondere Diatomeen in der Lage sind, durch Exkretion von organischen Substanzen (Mucopolysaccharide) Sediment zu verkitten und damit einen stabilisierenden Effekt auf die Sedimentoberfläche auszuüben, ist in zahlreichen Arbeiten untersucht worden (RAGUTZKI, 1978; DE BOER, 1981; GRANT et al., 1986; FÜHRBÖTER & MANZENRIEDER, 1987; PATERSON, 1989; Röhring, 1995; u.a.).

Eine Übersicht der an das Watt angepassten Lebensgemeinschaften und deren Einfluss auf das Substrat findet sich bei Dörjes (1978).

3.3 Witterungseinflüsse

Winde aus westlichen Richtungen sind für den Bereich der ostfriesischen Küste charakteristisch. Im Mittel der Jahre 1965 – 1996 weht der Wind zu gut 50% aus westlichen Richtungen und nur zu etwas mehr als 30% aus östlichen. Nördliche und südliche Winde sind mit etwa knapp 10% deutlich weniger vertreten (Station Helgoland). ANTIA (1993) weist hinsichtlich der Einflüsse auf sedimentologische Prozesse darauf hin, daß 85% der Winde mit Geschwindigkeiten von mehr als 10 Beaufort in den Wintermonaten auftreten, wovon wiederum 30% allein auf den November fallen. Dabei kommt der Wind mit 47% vornehmlich aus nordwestlicher, weniger häufiger aus westlicher (30%) oder südwestlicher Richtung (19%).

Die mit dem Gezeitenwechsel trockenfallenden Wattflächen sind Witterungseinflüssen in besonderem Maße ausgesetzt. Bereits bei Temperaturen von –1.0°C kommt es im Wattenmeer infolge der fehlenden Durchmischung mit salzhaltigerem Tiefenwasser der Nordsee zur Eisbildung. Diese geht vor allem von den bei Niedrigwasser trockenfallenden und rasch auskühlenden Wattflächen aus. Die sich gebildete Eisschicht wird bei Flut zusammengeschoben und kann bei beständigem Frost meterhoch aufgetürmt werden. Durch die Auflast kommt es zur Kompaktion des Untergrundes. Sediment friert an den Eisschollen fest und wird bei erneuter Verdriftung erodiert (EHLERS, 1988). Schwimmen die Eisschollen nicht auf, so kann es zur Bildung tiefer Kolke kommen.

3.4 Wattsedimente und ihre Klassifizierung

Das mit dem Wasser transportierte Material setzt sich aus anorganischen und organischen, gelösten und ungelösten Bestandteilen zusammen. Der besonders in der deutschsprachigen Literatur häufig verwendete Begriff der Suspensionsfracht (Schwebstoff-Fracht) für alle in partikulärer Form transportierten Stoffe ist aus hydrodynamischer Sicht zu ungenau. Es ist zu unterscheiden zwischen der Suspensionsfracht (" suspended load"), bei der die Partikel durch aufwärts gerichtete Turbulenzen in Suspension gehalten werden und deren Fortschrittsgeschwindigkeit etwa dem lokalen Strömungsfeld entspricht (YALIN, 1977), und der Sohlfracht (" bed load"), die durch Turbulenzen nicht über längere Zeiträume in Suspension gehalten und aufgrund des häufigen Sohlenkontaktes deutlich langsamer transportiert wird (BAGNOLD, 1973). Eine Zusammenfassung unterschiedlicher Definitionen findet sich BRIDGE (1981), der darauf hinweist, dass keine scharfe Grenze zwischen beiden Transportformen besteht. Als Überbegriff für Suspensions- und Sohlfracht definiert YALIN (1977) die Gesamtfracht (" total load").

Mit abnehmendem Energieeintrag durch Strömung und Seegang lagern sich zunehmend feinere Sedimentpartikel ab. Insbesondere bei der Schluff- und Tonfraktion folgt die Sinkgeschwindigkeit aber nicht mehr allein dem Stokeschen Gesetz, sondern wird durch die Eigenschaft kohäsiver Sedimente zur Bildung von Flocken mitbestimmt (GIBBS, 1983; MCCAVE, 1984; KRANCK, 1984; u.a.). Durch diesen als Flokkulation (Agglomeration, Koagulation) bezeichneten Prozess werden die hydraulischen Eigenschaften der Schwebstoffe erheblich verändert (PULS & KÜHL, 1989).

Im Laufe der Zeit hat es eine Reihe von Versuchen gegeben, allgemeingültige Wattklassifikationen zu entwickeln. Die Klassifizierung richtet sich in der Regel nach dem Korngrößenspektrum und baut auf dem Verhältnis von Feinkornanteil (Schluff- und Tonanteil) zu Sandfraktion auf. Eine Übersicht der wichtigsten Klassifizierungsansätze findet sich in Tab.1.

Autor	Einteilung	Sediment-Typen	Wattart
SINDOWSKI (1973)	Tongehalt (%)		
	<u><</u> 5	Wattsand	
	<u><</u> 8	Schlicksand	
	> 8 - <u><</u> 17	stark sandiger Schlicksand	
		stark schluffiger Schlicksand	
	> 17 - <u><</u> 25	sandiger Wattschlick	
		schluffiger Wattschlick	
	> 25 - <u><</u> 35	schluffig-toniger Wattschlick	
	> 35 - <u>< 5</u> 0	toniger Wattschlick	
	> 50	stark toniger Wattschlick	
REINECK & SIEFERT	Sandgehalt (%)		
(1980)	<u>> 90</u>	Wattensand	Sandwatt
	< 90 - <u>></u> 50	schlickiger Sand	Mischwatt
	< 50 - <u>> </u> 15	(sandiger) Schlick	Schlickwatt
	< 15	fetter Schlick	fettes Schlickwatt
FIGGE ET AL. (1980)	<u>Anteil < 0.063 mm (%)</u>		
	<u><</u> 5	Wattsand i.e.S.	Sandwatt
	> 5 - <u><</u> 10	schwach schlickiger Wattsand	schwach schlickiges Sandwatt
	> 10 - <u>< 2</u> 5	sandiger Schlicksand	sandiges Mischwatt
	> 25 - <u><</u> 50	schlickiger Schlicksand	schlickiges Mischwatt
	> 50	Schlick	Schlickwatt
Ragutzki (1982)	<u>Anteil < 0.063 mm (%)</u>		
	<u><</u> 8	heller, mittelsandiger Feinsand	helles Sandwatt
	> 8 - <u><</u> 12	dunkler, schlickiger Feinsand	dunkles Sandwatt
	> 12 - <u><</u> 40	Schlicksand	Mischwatt
	> 40	Schlick	Schlickwatt

Tab. 1: Klassifikationsansätze für Wattsedimente verschiedener Autoren

4 Methodik

4.1 Fernerkundungsmethoden

Da konventionelle Kartierungsmethoden sehr zeit- und kostenintensiv sind, manche Gebiete nur per Schiff oder gar nicht erreicht werden können und dem Gezeiteneinfluss ein zeitlich limitierender sowie sicherheitsrelevanter Aspekt beizumessen ist, stützen sich neuere Untersuchungen verstärkt auf Fernerkundungsmethoden.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten fernerkundlichen Anwendungsgebiete findet sich bei MILLAT (1996). Eine Übersicht der Arbeiten, die sich speziell mit dem Einsatz von Satellitenaufnahmen für die Erfassung der Sedimentverteilung beschäftigen, gibt STELZER (1998). MILLAT (1996) stellt in seiner Arbeit zu operationellen Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung im niedersächsischen Wattenmeer fest, daß Satellitenbilder aufgrund ihrer räumlichen Auflösung zur Ausweisung von Großeinheiten eingesetzt werden können. Er weist aber darauf hin, "daß die Bearbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten, sowohl bei der digitalen Verarbeitung als auch bei der analogen Auswertung, immer die Erfahrung des Interpretierenden bzw. gute Kenntnisse des Anwenders über den Naturraum Wattenmeer erfordert." (MILLAT, 1996: S.116). Eine rein automatische Klassifizierung ist deshalb mit den heute zur Verfügung stehenden Fernerkundungsmethoden noch nicht zu leisten.

4.2 Luftbildgestützte Sedimentkartierung

Der Einsatz von Satellitendaten im Rahmen dieser Arbeit hätte methodische Fragestellungen in den Vordergrund gerückt, da die digitalisierte, teilweise automatisierte Auswertung von Satellitenbildern noch mit vielen Fehlern behaftet ist und für die Zielsetzung dieser Untersuchung zumeist noch keine hinreichende Auflösung ermöglicht.

Um den zeitlichen und personellen Aufwand für Geländearbeiten auf ein Minimum zu beschränken, wurden Luftbilder (Flugzeug) für die Sedimentkartierung herangezogen. Diese haben nicht nur den Vorteil, den Aufnahmemaßstab und das Filmmaterial den Bedürfnissen der Fragestellung anzupassen und damit eine entsprechend hohe räumliche Auflösung zu erzielen, sondern σ möglichen auch den direkten Vergleich mit älteren Luftbildern. So standen für die zeitliche Entwicklung der Sedimentverteilung im niedersächsischen Küstenraum, die wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist, qualitativ verwertbare Luftbilder aus dem Zeitraum 1951 bis 1997 zur Verfügung.

4.2.1 Digitale Luftbildauswertung

Für die digitale Bildverarbeitung wurde das rasterorientierte GIS "IDRISI" (Clark University, Massachusetts, USA) eingesetzt. Da die Programm-Module von IDRISI nicht mit 24Bit-Bildern arbeiten, mussten die als Echtfarbdarstellung (24Bit-Bilder) eingescannte Luftbilder (Color, Color-Infrarot) für den Import in drei 8Bit-Bänder zerlegt und anschließend wieder zusammengefügt werden. Die Klassifizierung der digital vorliegenden Bilddaten kann entweder überwacht oder unüberwacht erfolgen. Bei der unüberwachten Klassifizierung werden mittels Clusteranalyse Bereiche voneinander abgegrenzt, die sich im Farb- bzw. Grauwert unterscheiden. Da Informationen über das betrachtete Gebiet nicht erforderlich sind, eignet sich dieses Verfahren für eine erste allgemeine Differenzierung unbekannter Gebiete. In einem zweiten Arbeitsschritt werden den einzelnen (Werte-)Bereichen dann bestimmte Eigenschaften (hier: Sedimentart) zugeordnet. Bei der überwachten Klassifizierung hingegen erfolgt diese Zuordnung vor der eigentlichen Klassifizierung. Bei beiden Verfahren müssen die Flächen nachfolgend codiert und vektorisiert werden.

Trotz unterschiedlicher methodischer Ansätze konnten die Ergebnisse der digitalen Luftbildauswertung nicht befriedigen bzw. standen in keinem vertretbaren Verhältnis zum zeitlichen Aufwand. Grund dafür ist die Tatsache, dass die Sedimentklassifizierung allein auf der Grundlage von Graustufen bzw. Farbwerten erfolgt. Da der Farbton des Sediments aber in erheblichen Ma-Be durch Faktoren wie z.B. Wassergehalt, Struktur, Textur, organische Überzüge oder Sonnenstand beeinflusst wird, ist auch bei Luftbildern die rechnergestützte Auswertung mit einem hohen Fehler behaftet. Da sich eine zufriedenstellende Lösung zur Beseitigung der genannten Probleme nicht abzeichnete bzw. sich der inhaltliche Schwerpunkt der Arbeit auf methodische Verfahrensansätze verschoben hätte, wurde die digitale Auswertung von Luftbildern nicht weiter verfolgt.

4.2.2 Analoge Luftbildauswertung

Unter der analogen Bildauswertung ist die rein visuelle Interpretation der Luftbilder zu verstehen, bei der die Ergebnisse per Hand vom Luftbild auf eine Folie übertragen werden. Die so erstellte Sedimentverteilungskarte wird dann für die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) digitalisiert. Im Gegensatz zur digitalen Luftbildauswertung stützt sich die analoge Auswertung bei der Klassifizierung nicht allein auf Graustufen bzw. Farbwerte, sondern betrachtet neben der Struktur und Textur des Sediments auch die Ausprägung und Ausdehnung der Prielsysteme sowie die Art und Form der Rinnen- und Prielränder. Die Genauigkeit solcher Karten wird aber ebenfalls in erheblichen Maß durch persönliche Erfahrungen - wie Kenntnisse der örtlichen Gegebenheiten, Rückschlüsse aus Geländebeobachtungen vergleichbarer Gebiete - bestimmt.

Besondere Beachtung ist der Entzerrung und Georeferenzierung der Luftbilder zu schenken. Dies gilt insbesondere bei der Auswertung von Luftbildern vor 1996, bei denen die Koordinaten der Bildmittelpunkte bei der Aufnahme noch nicht mit eingeblendet werden konnten. Bei neueren Luftbildern werden die aufgrund der zentralperspektivischen Aufnahme weitgehend verzerrungsfreien Bildmittelpunkte in einem Koordinatensystem maßstabsgerecht übertragen und die Luftbilder daran ausgerichtet. Im Überlappungsbereich der Luftbilder ist dann durch Interpolation eine näherungsweise Entzerrung möglich. Deutlich schwieriger gestaltet sich die Entzerrung und Georeferenzierung bei den älteren Luftbildern. Hier müssen die Koordinaten ortsfester Punkte, die auch im Luftbild eindeutig zugeordnet werden können, ermittelt und auf die Folie übertragen werden. Nur an diesen definierten Punkten, die zumeist auf den Inseln und dem Festland liegen, können die Bilder orientiert und georeferenziert werden.

4.3 Gelände- und Laboruntersuchungen

Durch die Luftbildkartierung wird zwar der Aufwand für Felduntersuchungen erheblich reduziert, sie kann diese aber keineswegs vollständig ersetzen. Auch wenn bei der analogen Luftbildauswertung neben Grau- bzw. Farbwertdifferenzen weitere charakteristische Merkmale (vgl. Kap. 4.2.2) herangezogen werden, ist die Interpretation häufig nicht eindeutig. Eine Verifikation der Luftbildkartierung durch in-situ-Untersuchungen ist somit erforderlich. Schiffsgestützte Einsätze erfolgten insbesondere im Jadebusen, auf dem Lang Lütjen Sand und auf dem Randzelwatt (Borkum), aber auch in zentralen Bereichen der Rückseitenwatten von Juist, Langeoog und Spiekeroog (siehe Anhang: Abb. 5 u. 6). Hierfür wurde die "MS Buise" der Forschungsstelle Küste, Norderney (FSK) zur Verfügung gestellt.

Für die Orientierung im Gelände stand das Global Positioning System (GPS) "GPS 45 Personal Navigator[™]" der Firma GARMIN INTERNATIONAL zur Verfügung. Die Lagegenauigkeit solcher satellitengestützten Navigationssysteme liegt je nach Witterung und Anzahl der empfangenen Satelliten zwischen 30m und 100m (SCHULZ, 1997). Die Entnahme repräsentativer Bodenproben nach dem Stechzylinderverfahren diente der Absicherung der vorläufigen Sedimentansprache. Um kurzfristige Anomalien in den Ablagerungsbedingungen (Überschlickung, Sturmsandlagen, u.a.) infolge zumeist witterungsbedingter Extremereignisse aufzeigen zu können (EITNER & RAGUTZKI, 1994), wurden die Tiefenbereiche 0-6cm und 0-12cm gesondert beprobt.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung im Labor erfolgte nach DIN 18 123 (1983). Die Bodenproben wurden nass gesiebt, um eine Beeinflussung durch Salzkristallbildung zu vermeiden. Die organische Substanz wurde nicht entfernt, so dass die ermittelten Schluff- und Tongehalte entsprechend gewertet werden müssen. Der prozentuale Anteil an organischem Kohlenstoff wurde nach DIN 18128 (1990) als Glühverlust bestimmt. Die Ermittlung des Karbonatgehaltes erfolgte gasvolumetrisch nach SCHEIBLER gemäß DIN 18129 (1990). Die Ermittlung des Wassergehaltes beruht auf DIN 18121 (1976).

4.4 Datengrundlage

Luftbilder, die den qualitativen Anforderungen an eine Sedimentkartierung genügen und einen ausreichend großen Bereich des Untersuchungsraumes abdecken, liegen aus den Jahren 1951, 1966, 1975, 1996 und 1997 vor. Die Aufnahmeparameter der verschiedenen Befliegungen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Aufnahme- datum	erfasste Fläche	Maßstab	Bildmaterial	Entzerrung / Geo- referenzierung	Quelle	
10.9.51	Juist –Wangerooge, Hohe Weg, Wurster Küste	1:25.000	SW	ja / ja	Plan und Karte GmbH Münster	
29.5., 20.8.66	Ostfriesische Küste	1: 25.000	SW	ja / ja	Hansa Luftbild, Münster	
12.6., 20.6., 23.6., 14.8., 29.8.75	Niedersächsische Küste	1:25.000	SWIR	ja / nein	Vermessungsbüro Rüpke, Hamburg	
5.6., 6.6.96	Borkum – Hohe Weg	1:15.000	SW			
	Leybucht, Pilsumer Watt,	1:15.000				
17.9., 19.9.96	Lang Lütjen Sand, Wurster Küste	1:20.000	SWIR	nein / nein	flug GmbH, Bre-	
31.3., 17.4., 25.5., 4.6. 10.7.97	Niedersächsische Küste	chsische Küste 1:15.000 SWIR			mernaven	

Tab. 2: Aufnahmeparameter der Befliegungen

Für die Auswertung topographischer Karten und deren Verknüpfung mit den Sedimentverteilungskarten konnte auf Datenmaterial zurückgegriffen werden, das im Rahmen des Forschungsvorhabens "WADE" (NIEMEYER et al., 1995; KUNZ et al., 1998) erfasst wurde. Für den ostfriesischen Küstenraum stehen digitalisierte topographischen Karten aus den Jahren 1960 (topographische Wattkarten der FSK), 1975 (Küstenkarten des KFKI) und 1990 (WSD Nord-West, Aurich) zur Verfügung. In Teilbereichen können auch neuere, bereits digital vorliegende Wattkarten der Forschungsstelle Küste, Norderney herangezogen werden.

Die Einbindung von ATKIS-DLM25-Daten¹ (Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem) zur einheitlichen und exakten Abgrenzung der Insel- und Festlandsbereiche erlaubt die einfache Verknüpfung mit anderen Fachgeometrien.

5 Verteilung und Eigenschaften der Sedimente

5.1 Ergebnisse der Sedimentanalysen

Erwartungsgemäß zeigen die Sedimentproben aus den Tiefenhorizonten 0-6cm und 0-12cm (siehe Kap. 4.3) mit zunehmendem Feinkornanteil auch eine Zunahme des Wasser- und Kalkgehaltes sowie des als Glühverlust bestimmten Anteils an organischem Kohlenstoff. Unabhängig vom Beprobungshorizont weisen die mittelsandigen und schlickigen Feinsande (helles und dunkles Sandwatt; vgl. Tab. 1, Klassifikation nach RAGUTZKI, 1982) im Mittel eine sehr gute Sortierung und eine symmetrische Korngrößenverteilung auf. Die Schlicksande der Mischwattgebiete sind im Mittel bei ebenfalls symmetrischer Kornverteilung noch gut sortiert, während die Schlicksedimente bei stark grob schiefer Verteilung nur noch eine schlechte Sortierung zeigen. Für die Schlicksedimenten ist zudem der polymodale Charakter der Kornverteilung charakteristisch. Die stärkere Kompaktion der Proben aus dem Tiefenhorizont 0-12cm kommt in den deutlich höherem Dichtewerten zum Ausdruck. Eine statistische Zusammenfassung der Analyseergebnisse findet sich in Tabelle 3.

Einen Eindruck charakteristischer Korngrößenverteilungskurven (Summenkurven) für Sedimentproben aus dem Bereich der hellen und dunklen Sandwatten und aus den Misch- und Schlickwattzonen vermittelt Abbildung 3. Die Darstellung der Korngrößenverteilung für die Proben der Misch- und Schlickwattgebiete im Konzentrationsdreieck von SINDOWSKI (1973) bringt das Korngößenspektrum der Sedimente aus den Tiefenhorizonten 0-6cm und 0-12cm zum Ausdruck (Abb. 4). Die mittelsandigen und schlickigen Feinsande wurden in den Abbildungen nicht mit aufgenommen, da sie, dem Klassifikationsansatz von Ragutzki (1982) folgend, mit Feinkornanteilen von weniger als 12% als dichte Punktewolke erscheinen würden.

¹ Quelle: Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen

0_6cm	helles Sandwatt (n=144)			dunkles Sandwatt (n=85)			Mi	ischwat	Mischwatt (n=150)			Schlickwatt (n=26)				
0-00111	avg ²	std	min	max	avg	std	min	max	avg	std	min	max	avg	std	min	max
Wassergehalt [%]	23.7	4.6	17	70	25.4	2.8	16	33	31.9	6.1	21	55	64	19	38	113
Dichte [g/cm²]	1.43	0.12	1.26	2	1.39	0.14	1.18	2.06	1.3	0.13	0.92	2.25	1.05	0.16	0.85	1.69
Glühverlust [%]	1	0.4	0.4	2.9	1.4	0.4	0.4	2.8	2.4	0.7	0.6	3.9	6.5	1.9	4.1	11
Kalkgehalt [%]	1.7	1.4	0.1	11.3	3	2.7	0.1	21.2	4.2	2.1	0.3	18.3	7.9	2.6	3.9	14.7
D25 [µm]	117	23	83	194	103	31	80	354	74	23	5	182	28	29	0	102
D75 [µm]	169	37	114	304	165	111	113	850	129	42	87	454	107	33	35	172
D50 [µm]	140	29	87	221	128	59	96	627	100	24	63	233	71	30	5	125
Md [µm]	167	33	115	259	148	40	112	443	116	30	69	296	83	31	29	149
so(Trask) [phi]	0.26	0.07	0.15	0.55	0.3	0.15	0.15	1.47	0.43	0.29	0.15	2.44	1.56	1.12	0.3	4.65
sk(Trask)	0.01	0.02	-0.05	0.22	0.01	0.06	-0.12	0.55	-0.05	0.14	-1.11	0.28	-0.5	0.47	-1.8	0.11
0-12cm	helles	s Sandv	vatt (n=	148)	dunkl	es Sanc	dwatt (r	1=99)	Mi	ischwat	t (n=12	9)	Sc	hlickwa	att (n=2	9)
0-12cm	helles avg	s Sandv std	vatt (n= min	=148) max	dunkl avg	es Sano std	dwatt (r min	1=99) max	Mi avg	ischwat std	t (n=12 min	9) max	Sc avg	hlickwa std	att (n=2 min	9) max
0-12cm Wassergehalt [%]	helles avg 23.5	s Sandw std 2.4	vatt (n= min 17	148) max 36	dunkl avg 26	es Sanc std 4	dwatt (r min 13	n=99) max 56	Mi avg 32.2	ischwat std 6.9	t (n=12 min 23	9) max 28	Sc avg 59.1	hlickwa std 17.6	att (n=2 min 29	9) max 105
0-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²]	helles avg 23.5 1.93	s Sandv std 2.4 0.06	vatt (n= min 17 1.77	148) max 36 2.1	dunkl avg 26 1.89	es Sanc std 4 0.06	dwatt (r min 13 1.73	n=99) max 56 2.02	Mi avg 32.2 1.78	ischwat std 6.9 0.1	t (n=12 min 23 1.44	9) max 28 2.05	Sc avg 59.1 1.57	hlickwa std 17.6 0.15	ntt (n=2 min 29 1.35	9) max 105 1.87
0-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%]	helles avg 23.5 1.93 1	s Sandw std 2.4 0.06 0.3	vatt (n= min 17 1.77 0.4	148) max 36 2.1 2	dunkl avg 26 1.89 1.4	es Sand std 4 0.06 0.4	dwatt (r min 13 1.73 0.6	n=99) max 56 2.02 2.9	Mi avg 32.2 1.78 2.3	ischwat std 6.9 0.1 0.7	t (n=12 min 23 1.44 1.1	9) max 28 2.05 3.9	Sc avg 59.1 1.57 6	hlickwa std 17.6 0.15 1.8	att (n=2 min 29 1.35 3.6	9) max 105 1.87 9.5
0-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%] Kalkgehalt [%]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2	148) max 36 2.1 2 17.3	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9	es Sanc std 4 0.06 0.4 1.9	dwatt (r min 13 1.73 0.6 0.3	n=99) max 56 2.02 2.9 12.9	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3	9) max 28 2.05 3.9 22.5	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2	ntt (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9	9) max 105 1.87 9.5 12.6
0-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%] Kalkgehalt [%] D25 [µm]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9 1.9 1.11	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1 27	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2 65	148) max 36 2.1 2 17.3 268	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9 93	es Sand std 4 0.06 0.4 1.9 18	dwatt (r min 13 1.73 0.6 0.3 67	max 56 2.02 2.9 12.9 182	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7 69	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7 19	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3 7	9) max 2.05 3.9 22.5 139	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5 22	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2 23	ntt (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9 <2	9) max 105 1.87 9.5 12.6 65
0-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%] Glühverlust [%] Kalkgehalt [%] D25 [µm]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9 1.9 111 171	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1 27 65	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2 65 103	148) max 36 2.1 2 17.3 268 760	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9 93 148	es Sanc std 4 0.06 0.4 1.9 18 34	dwatt (r min 1.73 0.6 0.3 67 110	n=99) max 56 2.02 2.9 12.9 12.9 182 270	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7 69 128	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7 19 31	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3 7 7	9) max 28 2.05 3.9 22.5 139 242	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5 22 117	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2 23 106	att (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9 <2 17	9) max 105 1.87 9.5 12.6 65 647
D-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm²] Glühverlust [%] Glühverlust [%] Kalkgehalt [%] D25 [µm] D50 [µm]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9 1.9 111 171 134	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1 27 65 44	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2 65 103 69	148) max 36 2.1 2 17.3 268 760 531	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9 93 148 114	es Sanc std 4 0.06 0.4 1.9 18 34 27	dwatt (r min 13 1.73 0.6 0.3 67 110 92	n=99) max 56 2.02 2.9 12.9 182 270 204	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7 69 128 95	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7 19 31 24	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3 7 78 66	9) max 2.05 3.9 22.5 139 242 200	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5 22 117 62	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2 23 106 24	att (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9 <2 17 4	9) max 105 1.87 9.5 12.6 65 647 104
D-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%] Glühverlust [%] D25 [µm] D75 [µm] D50 [µm] Md [µm]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9 111 171 134 166	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1 27 65 44 40	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2 65 103 69 95	148) max 36 2.1 2 17.3 268 760 531 452	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9 93 148 114 144	es Sand std 4 0.06 0.4 1.9 18 34 27 29	dwatt (r min 1.73 1.73 0.6 0.3 67 110 92 108	n=99) max 56 2.02 2.9 12.9 182 270 204 253	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7 69 128 95 116	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7 19 31 24 28	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3 7 78 66 79	9) max 2.05 3.9 22.5 139 242 200 228	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5 22 117 62 78	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2 23 106 24 25	ntt (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9 <2 17 4 21	9) max 105 1.87 9.5 12.6 65 647 104 140
D-12cm Wassergehalt [%] Dichte [g/cm ²] Glühverlust [%] Kalkgehalt [%] D25 [µm] D25 [µm] D50 [µm] Md [µm] so(Trask) [phi]	helles avg 23.5 1.93 1 1.9 1.9 111 171 134 166 0.3	s Sandw std 2.4 0.06 0.3 2.1 27 65 44 40 0.11	vatt (n= min 17 1.77 0.4 0.2 65 103 69 95 0.17	148) max 36 2.1 2 17.3 268 760 531 452 1.11	dunkl avg 26 1.89 1.4 2.9 93 148 114 144 0.33	es Sanc std 4 0.06 0.4 1.9 18 34 27 29 0.09	dwatt (r min 1.73 0.6 0.3 67 110 92 108 0.17	n=99) max 56 2.02 2.9 12.9 12.9 182 270 204 253 0.62	Mi avg 32.2 1.78 2.3 4.7 69 128 95 116 0.46	ischwat std 6.9 0.1 0.7 2.7 19 31 24 28 0.23	t (n=12 min 23 1.44 1.1 0.3 7 7 78 66 79 0.18	9) max 28 2.05 3.9 22.5 139 242 200 228 2.14	Sc avg 59.1 1.57 6 7.5 22 117 62 78 1.85	hlickwa std 17.6 0.15 1.8 2.2 23 106 24 25 1.32	att (n=2 min 29 1.35 3.6 3.9 <2 17 4 21 0.38	9) max 105 1.87 9.5 12.6 65 647 104 140 4.76

Tab. 3: Übersicht statistischer bodenphysikalischer Parameter der Bodenproben aus den Tiefenhorizonten 0-6cm und 0-12cm

² avg: Mittelwert; std: Standardabweichung; min/max: Minimal- u. Maximalwert

Helles Sandwatt



Abb. 3: Charakteristische Sedimentverteilungskurven



Abb. 4: Verteilung der Misch- und Schlickwattproben im Körnungsdreieck nach SIN-DOWSKI (1973)

Flemming (1992) weist in seiner Arbeit zur holozänen Entwicklung, Morphologie und faziellen Gliederung von Spiekeroog darauf hin, dass die Kornfraktion von 0.088-0.125mm im Rückseitenwatt der Insel auffallend unterrepräsentiert ist. Neuere, ausführliche Analysen der Sedimentmuster im landseitigen Watt von Spiekeroog (Flemming & Bartholomä, 1997) bestätigen die ersten Ergebnisse. Die Tatsache, dass diese Entwicklung nicht bereits in älteren Untersuchungen beobachtet wurde, führt Flemming (1992) auf einen Kornformeffekt zurück, in dem sich nach Flemming eine methodische Schwäche der Siebanalyse gegenüber der von ihm durchgeführten Messung der Sinkgeschwindigkeitsverteilung und deren Äguivalentkorngrößen offenbart. Er kommt durch den Vergleich von Kornverteilungsmustern, die auf Sinkgeschwindigkeitsmessungen einerseits und Siebanalysen andererseits basieren, zu dem Schluss, dass die Ergebnisse der Siebanalysen "durchweg um etwa ein 0,5 Phi-Intervall feiner ausfallen und somit die Unterrepräsentation der feinsten Sandfraktion nicht registrieren" (Flemming, 1992: S.36). Aus methodischen Gründen - den Korngrößenspektrum der eigenen Proben liegen Siebanalysen zugrunde ist es nicht möglich, die Erkenntnisse von Flemming (1992) und Flemming & Bartholomä (1997) nachzuvollziehen. Die in der hier vorgestellten Untersuchung festgestellten Veränderungen im Verteilungsmuster der Oberflächensedimente deuten an, dass die Misch- und Schlickwattzonen, die sich infolge eines küstennormalen Energiegradienten normalerweise landwärts an die Sandwatten anschließen, immer kleinere Gebiete einnehmen. Stellenweise ist die Faziesabfolge Sandwatt - Mischwatt - Schlickwatt, die auf älteren Luftbildern noch zu erkennen ist, nicht mehr anzutreffen.

5.2 Verteilungsmuster der Oberflächensedimente 1997

Auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996 und 1997 wurde die räumliche Verteilung der Oberflächensedimente im Eulitoral zwischen Borkum und Cuxhaven flächendeckend erfasst. Dabei wurde das Rückseitenwatt von Wangerooge im Rahmen einer Diplomarbeit, die in das Forschungsprojekt eingebunden war und von der Forschungsstelle Küste betreut wurde, untersucht und umfassend abgehandelt (HOFFMANN, 1998).

Dem Klassifizierungsschema von RAGUTZKI (1982) folgend (s. Kap. 3.4), wurde bei der Luftbildkartierung zwischen hellen und dunklen Sandwatten, Misch- und Schlickwatten unterschieden. Ferner wurden Miesmuschelbänke gesondert gekennzeichnet, wobei vor allem Altbänke erfasst wurden. Diese sind im Luftbild durch ihre Strukturierung und morphologische Ausprägung räumlich meist gut abzugrenzen. Die Ergebnisse der durch Geländeuntersuchungen abgesicherten Luftbildkartierung sind in den Abbildungen A1 und A2 (Anhang) dargestellt. Erfasst wird eine Gesamtfläche von etwas mehr als 1400km². Flächenmäßig sind die hellen Sandwatten mit 48.4% am weitesten verbreitet und bedecken zusammen mit den dunklen Sandwatten (31.7%) etwa 80% der in den beiden Abbildungen dargestellten Wattflächen. Dagegen treten Mischwatten mit 12% deutlich zurück. Schlickwatten haben mit 89.2km² (6.3%) eine noch geringere Verbreitung; sie sind vor allem im Jadebusen (64%) und im Bereich Leybucht/Pilsumer Watt (18%) zu finden. Muschelbänke bedecken mit insgesamt 22.8km² etwa 1.6% der Wattflächen (siehe Tab. 4).

Die typische Abfolge von Sandwatt – Mischwatt – Schlickwatt in Richtung auf die Festlandsküste ist entlang der niedersächsischen Küste nur in der Leybucht sowie auf dem sich südlich anschließenden Pilsumer Watt (s. auch Kap.6.3), im Rückseitenwatt von Spiekeroog östlich von Neuharlingersiel, im Jadebusen und auf dem Lang Lütjen Sand deutlich ausgeprägt. Darüber hinaus zeichnet sich die küstenparallele Anordnung zunehmend feinerer Sedimente zwar fast überall ab, ohne dass aber die Dreigliederung vollständig ausgebildet ist. Besonders auffällig sind die Modifikationen auf den Rückseitenwatten. Hier finden sich bei vorherrschenden Westwinden (vgl. Kap. 3.3) im Schutz der ostfriesischen Inseln in den östlichen Wattbereichen größere Mischwattareale auch in größerer Entfernung von der Deichlinie. Hier sind auch verstärkt Miesmuschelbänke zu beobachten.

Die Geländeuntersuchungen bestätigen, daß die durch visuelle Luftbildinterpretation entstandenen Sedimentverteilungskarten zu durchaus zufriedenstellenden Ergebnissen führen. Nahezu zweifelsfrei lassen sich im Luftbild die hellen Sandwatten kartieren, so dass eine Überprüfung im Gelände nur noch in Einzelfällen notwendig wird. Bei der Auswertung der 96er Luftbilder traten einige Fehlinterpretationen bei der Unterscheidung "dunkles Sandwatt – Mischwatt" auf. Verursacht wurde dies hauptsächlich durch eine starke Überschlickung weiter Wattgebiete, die in der langanhaltend ruhigen Wetterlage im Winter 95/96 begründet sein dürfte. Generell recht problematisch bleibt die Abgrenzung "Mischwatt – Schlickwatt" im Luftbild und führt häufiger zu Fehlinterpretationen. Für diese Bereiche ist eine Verifizierung durch Geländeuntersuchungen meist erforderlich.

	19	51	19	66	19	75	1996/97		
	[km²]	[%]	[km²]	[%]	[km²]	[%]	[km²]	[%]	
Sandwatt helles dunkles	632.8	72.1	441.4	69.6	980.8	68.3	1130.9 634.1 446.9	80.1 48.4 31.7	
Mischwatt	194.8	22.2	129.9	20.5	292.0	20.3	168.9	12.0	
Schlickwatt	44.8	5.1	35.2	5.5	118.3	8.2	89.2	6.3	
Muschelbänke	5.9	0.7	28.0	4.4	45.3	3.1	22.8	1.6	
Gesamtfläche	878.3		634.4		1436.5		1411.8		

Tab. 4: Flächenanteil der Watt-Typen an der jeweiligen Gesamtfläche

5.3 Ergebnisse der Luftbildkartierung älterer Aufnahmen

Die Qualität und der Aufnahmemaßstab der älteren Luftbilder erlauben keine Differenzierung zwischen hellen und dunklen Sandwatten. So erfolgt bei der Luftbildkartierung nur eine Unter-

scheidung in Sand-, Misch- und Schlickwatt, wobei die in Kap. 5.2 erwähnten Probleme bei der Unterscheidung von Watt-Typen im Luftbild unverändert bestehen bleiben.

5.3.1 Sedimentverteilung 1951

Die georeferenzierten und auf der Basis der Radialschlitz-Triangulation entzerrten SW-Luftbilder decken etwa den Bereich zwischen der von Juist zum Festland verlaufenden Wattwasserscheide im Westen und der Elbe im Osten ein. Ebenfalls nicht von den Luftbildern abgedeckt werden in diesem Abschnitt der Jadebusen, der landnahe Bereich zwischen Neuharlingersiel und Schillig sowie das Neuwerker Watt.

Die Sandwatten nehmen mit gut 630km² etwas mehr als 70% der insgesamt erfassten Fläche von knapp 880km² ein (Tab. 4). Mischwattgebiete treten dagegen deutlich zurück, bedecken aber noch gut ein Fünftel der Fläche (194,8km²). Schlickwatten haben einen Flächenanteil von etwas über 5% (44.8km²). Allerdings ist in Anbetracht der Tatsache, dass gerade die schlickreichen Gebiete der Leybucht und des Jadebusens nicht erfasst wurden, ein erheblich höherer Anteil zu erwarten.

Der Übergang vom Sandwatt zum Mischwatt bis hin zum Schlickwatt in Richtung auf das Festland ist fast für den gesamten Küstenverlauf charakteristisch. Auch der auf die Sedimentverteilung in den Rückseitenwatten modifizierend wirkende Einfluss der ostfriesischen Inseln (vgl. Kap. 5.2) ist deutlich erkennbar (Anhang: Abb. A3 u. A4).

5.3.2 Sedimentverteilung 1966

Für das Gebiet zwischen Borkum und Wangerooge liegen georeferenzierte und entzerrte SW-Luftbilder vor, die eine Wattfläche von etwa 635km² erfassen.

Erwartungsgemäß nehmen die Sandwatten mit gut 440km² wieder den größten Bereich ein; das entspricht einem Flächenanteil von knapp 70%. Mischwattgebiete - zwischen Baltrum und Wangerooge als relativ auffällige, stellenweise sehr breite Zone - finden sich auf 20.5%, Schlickwatten auf 5.5% der Fläche (Anhang: Abb. A5). Mit 4.4% haben Muschelbänke 1966 wieder eine größere Ausdehnung (vgl. Tab. 4). Die küstenparallele Anordnung zunehmend feinerer Sedimente ist mit Ausnahme des Randzelwatts überall deutlich ausgeprägt.

5.3.3 Sedimentverteilung 1975

Von den älteren Aufnahmen liegen einzig von 1975 flächendeckend für den gesamten Untersuchungsraum Luftbilder vor. Da auf den bereits entzerrten Luftbildern eine Reihe mehr oder weniger markanter Festpunkte durch Signatur kenntlich gemacht war, konnten die Aufnahmen mit vergleichsweise geringem Aufwand georeferenziert werden.

Von den insgesamt 1436.5 Quadratkilometern (Tab. 4), die durch die Luftbildkartierung 1975 erfasst wurden, entfallen gut 980km² (68.3%) auf die Sandwatten. Diese nehmen wieder ausgedehnte Flächen auf dem Hohen-Weg-Watt, entlang der Wurster Küste, auf dem Randzelwatt und in den Abschnitten der Rückseitenwatten ein, die im unmittelbaren Einflussbereich der Seegaten verstärkt Strömung und Seegang ausgesetzt sind. Mischwattgebiete (20.3%) und Schlicksedimente (8.2%) sind vor allem als deutlich ausgebildete, küstenparallele Streifen den Salzwiesen vorgelagert (Anhang: Abb. A6 u. A7).

5.3.4 Sedimentverteilung nach RAGUTZKI (1982)

In seiner Arbeit über die Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächsischen Watten hat RAGUTZKI (1982) zahlreiche sedimentologischen Untersuchungen zwischen 1951 und 1981, die von ihm und anderen Autoren durchgeführt wurden, überarbeitet und vereinheitlicht zusammengefasst. Neben den drei Sedimenttypen Sand, Schlicksand und Schlick wurden Seegrasbestände sowie Miesmuschel- und Schillbänke gesondert ausgewiesen. Die Ergebnisse wurden auf fünf Einzelkarten dargestellt, die für den Vergleich mit den eigenen Untersuchungen digitalisiert wurden (Anhang: Abb. A8). Da von RAGUTZKI keine für den gesamten niedersächsischen Küstenraum gültigen Flächenanteile angegeben sind, liegen den nachfolgenden Prozentangaben eigene Berechnungen zugrunde (Tab. 5).

	[km²]	[%]
Sandwatt	901.9	70.6
Mischwatt	232.6	18.2
Schlickwatt	113.6	8.9
Muschelbänke	29.8	2.3
Gesamtfläche	1277.9	

Tab. 5: Verbreitung der Watt-Typen in der Darstellung von RAGUTZKI (1982)

RAGUTZKI (1982) stellt fest, dass in der Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächsischen Watten die Sandwatten bei weitem überwiegen (70.6%). Prädestiniert für die Ablagerung schlickreicherer Sedimente sind Bereiche, in denen der Energieeintrag über Tidehochwasser so gering ist, dass sich Schwebstoffe absetzen können. Dazu gehören vor allem die Lahnungsfelder, weitere landnahe Zonen unterschiedlicher Breite, die hochliegenden Bereiche der Wattwasserscheiden sowie durch Leitdämme und Bauwerke geschützten Gebiete. Diese Bereiche nehmen einen Flächenanteil von 27.1%, somit über ein Fünftel der Oberflächensedimente, ein. Davon entfallen 18.2% auf Schlicksande und 8.9% auf die reinen Schlicke.

6 Veränderungen im Verteilungsmuster der Oberflächensedimente

Durch eine als "Verschneidung" bezeichnete Rechenoperation, die mit dem GIS Arc/Info durchgeführt wurde, werden die Sedimentverteilungskarten zweier Jahre in der Weise kombiniert, dass sich neue Teilflächen mit den Eigenschaften aus den Ursprungsflächen beider Karten ergeben. Dabei werden nur deckungsgleiche Flächen erfasst, so dass das Ausmaß der Verschneidungsflächen nach der Rechenanalyse geringer ist. Erst durch diese Verschneidung zweier Karten ist es möglich, Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente nach Art, Umfang und Lage exakt zu erfassen und darzustellen.

Durch den Vergleich mit Verschneidungen, denen nur der Kartenausschnitt zugrunde liegt, der von allen vier Luftbildkartierungen erfasst wird –Ausdehnung der Wattflächen zwischen Ems und Jade 1951 – wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse der Verschneidungen unterschiedlich großer Wattflächen (vgl. Tab. 4) repräsentativ sind und auf den gesamten niedersächsischen Küstenraum übertragen werden können.

6.1 Änderungstendenzen zwischen 1951 und 1997

Die Ergebnisse der Verschneidungen der Sedimentverteilungskarten von 1951 bis 1997 sind in den Abbildungen A9 bis A12 im Anhang wiedergegeben. Allerdings werden aufgrund der Informationsvielfalt in diesen Darstellungen allgemeine Entwicklungstendenzen im Verteilungsmuster der Sedimente nur wenig offensichtlich. Um diese hervorzuheben, wurde eine Generalisierung in der Form vorgenommen, dass - unabhängig vom tatsächlichen Sedimenttyp – nur noch zwischen Flächen unterschieden wird, die sich entweder nicht verändert haben (grau) oder für die sich eine Zunahme (rot) oder Abnahme (blau) des Feinkornanteils nachweisen lässt. Die Farbsättigung ist ein Maß für die Intensität der Veränderungen (Anhang: Abb. A13 bis A16). Nicht dargestellt werden Flächenanteile, die in einer der beiden miteinander verschnittenen Karten von Muschelbänken bedeckt werden. Hier ist hinsichtlich der Entwicklungstendenz keine eindeutige Zuordnung möglich. Erfahrungsgemäß ist infolge biogen induzierter Sedimentation aber davon auszugehen, dass Schlicksedimente im Bereich der Muschelbänke akkumuliert werden.

Kennzeichnend für den niedersächsischen Küstenraum ist, dass in den Zeitabschnitten 1951-1966, 1966-1975 und 1975-1997 auffällige Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente nur auf maximal einem Viertel der Fläche zu beobachten sind. Für den übrigen, weitaus größeren Bereich ist keine so deutliche Veränderung in der Sedimentzusammensetzung festzustellen, als dass eine Neuklassifizierung erforderlich wäre (siehe Tab. 6).

Die Entwicklung eines Sandwattes zu einem Misch- oder gar Schlickwatt bzw. eines Mischwattes zu einem Schlickwatt durch die Zunahme des Feinkornanteils ist zwischen 1951 und 1966 mit 8.6% fast genauso häufig zu beobachten, wie die gegenläufige Entwicklung, also die Bildung eines Sand- oder Mischwattes durch starke Abnahme des Feinkornanteils (8.9%).

Zwischen 1966 und 1975 zeichnet sich insgesamt eine leichte Flächenzunahme der Misch- und Schlickwattgebiete ab, da sich für 9.5% der Gesamtfläche eine Zunahme, hingegen nur für 6% eine Abnahme des Feinkornanteils nachweisen lässt.

Eine auffällig andere Entwicklung ist für den Zeitraum zwischen 1975 und 1997 festzustellen. Trotz der zunehmenden Verschlickung der Leybucht und des Pilsumer Watts (vgl. Kap. 6.3) ist die deutliche Zunahme des Feinkornanteils, die zur Bildung von Misch- oder Schlickwatten führt, nur für 4.4% der Gesamtfläche charakteristisch. Neben den erwähnten Gebieten an der Ems scheint diese Entwicklung nur noch für die Rückseitenwatten von Spiekeroog und Langeoog charakteristisch. Die Entwicklung zu einem Sand- oder Mischwatt durch starke Abnahme des Feinkornanteils ist sehr viel weiter verbreitet und findet sich auf einer Fläche von knapp 200km² (15.9%).

	10	951 -	- 1966		1966 - 1975			1975 – 1996			5	
	[km²]		[%]		[km	²]	[%	6]	[km	²]	[%	6]
Sandwatt, unverändert	231		62.3		342		61		767		62	
Mischwatt, unverändert	44	28	11.9	76	71	44	13	32	90.4	92	7.4	75
Schlickwatt, unverändert	8.4	5	2.3	9.7	17	0.3	2.9	6.6	63.4	5.9	5.2	.4
Muschelbänke, unverändert	1.3		0.4		14		2.6		5.1		0.4	
Sand- zu Mischwatt	24.7		6.7		38		6.7		33.1		2.7	
Sand- zu Schlickwatt	0.9	31.8	0.3	8.6	2.2	53.4	0.4	9.5	4.6	54	0.4	4.4
Misch- zu Schlickwatt	6.2	00	1.7		13	-	2.4		16.3		1.3	
Misch- zu Sandwatt	27.8		7.5		25		4.4		159		13	
Schlick- zu Sandwatt	1.9	32.9	0.5	8.9	0.5	34	0.1	6	7.1	95.	0.6	15.9
Schlick- zu Mischwatt	3.2		0.9		8.4		1.5		29.7	6	2.4	
neue Muschelbänke	19.3	21	5.2	л	21	33	3.8	•	16.1	53	1.3	4.
verlorene Muschelbänke	2.3	.6	0.6	õ	12	ω.	2.2	0.	37.3	4	3.1	4

Tab. 6: Veränderungen	im Verteilungsmus	ter der Sedimente	zwischen 195	1 und 1997
	ini vertenangsmas	ter der Scumente		

6.2 Vergleich mit der Sedimentverteilungskarte von RAGUTZKI (1982)

Die Darstellung von RAGUTZKI (1982) basiert, wie bereits in Kap. 5.3.4 erwähnt, auf der Datenund Kartengrundlage diverser, zumeist durch Geländebegehungen verifizierter Einzeluntersuchungen verschiedener Autoren. Damit können die Ergebnisse zwar einerseits als gesichert angesehen werden, andererseits werden in der Darstellung aber sehr unterschiedliche Zeitzustände wiedergegeben.

Der Vergleich der aktuellen Darstellung der Sedimentverteilung (1996/97) mit der Darstellung von Ragutzki (1982) zeigt, dass erhebliche Änderungen im Verteilungsmuster, die zu einer Neueinstufung des Sedimentes geführt haben, sich nur auf knapp 30% der Fläche (Tab. 7) finden. Größenordnungsmäßig vergleichbar mit den Veränderungen zwischen 1975 und 1997 (Kap. 6.1), ist eine Ausdehnung der Sandwatten vor allem auf Kosten der Mischwatten festzustellen. Die deutliche Abnahme des Feinkornanteils - 17.5 % der Fläche sind von Entwicklung betroffen – ist insbesondere auf den landnahen Wattflächen und im Bereich der Wattwasserscheiden zu beobachten (Anhang: Abb. A17 u. A18). Dies ist allerdings kaum verwunderlich, da die feineren Sedimente ja nur in diesen beruhigten Zonen zur Ablagerung kommen.

Die Entwicklung zu einem Misch- oder Schlickwatt ist mit einem Flächenanteil von 5.9% erheblich seltener. Auch hier sind Parallelen zu den Veränderungen zwischen 1975-1997 feststellbar. Die Gebiete, für die eine auffällige Zunahme der Feinfraktion charakteristisch ist, sind näherungsweise deckungsgleich (Anhang: Abb. A19). Wenig verwunderlich ist diese Übereinstimmung im Bereich der Buchtenwatten, da diese durch die geschützte Lage bzw. den Bau von Leyhörn für die Ablagerung feiner Sedimente prädestiniert. Die Übereinstimmung im Bereich der Rückseitenwatten zwischen Langeoog und Wangerooge hingegen erlauben die Schlussfolgerung, dass durch die luftbildgestützte Sedimentkartierung grundlegende sedimentologische Entwicklungstendenzen aufgezeigt werden können.

Tab. 7: Übersicht der Veränderungen im Verteilungsmuster der Sedimente zwischen der aktuellen Darstellung (1996/97) und der Darstellung von RAGUTZKI (1982)

	[km²]]	[%]	
Sandwatt, unverändert	727.0		60.7	
Mischwatt, unverändert	69.2	68	5.6	71
Schlickwatt, unverändert	63.7	2.4	5.2	®
Muschelbänke, unverändert	3.0		0.3	
Sand- zu Mischwatt	51.7		4.2	
Sand- zu Schlickwatt	6.5	72.5	0.5	5.9
Misch- zu Schlickwatt	14.3		1.1	
Misch- zu Sandwatt	148	2	12.1	
Schlick- zu Sandwatt	28.3	13.	2.3	17.5
Schlick- zu Mischwatt	37.7	G	3.1	0.
neue Muschelbänke	18.1	60	1.4	4
verlorene Muschelbänke	42.6	.7	3.4	œ

6.3 Der Einfluss von Leyhörn: Sedimentverteilung in der Leybucht

Auf der Grundlage von Sedimentverteilungskarten aus den Jahren 1983 (RAGUTZKI 1984), 1989 (RAGUTZKI & OTTEN 1991) und 1997 (aktuelle Untersuchungen) werden Veränderungen im Verteilungsmuster der Leybuchtsedimente aufgezeigt. Damit wird ein Zeitraum abgedeckt, in dem es durch den Bau von Leyhörn zu Veränderungen in den hydrologischen und morphologischen Randbedingungen gekommen ist.

6.3.1 Verteilungsmuster 1983 vor dem Bau von Leyhörn

Auf das Pilsumer Watt_zeigt sich die typische Dreigliederung in Sand-, Misch- und Schlickwatt in Richtung auf die MThw-Linie. Diese Dreigliederung bleibt zwar auch auf dem Greetsieler Nacken erhalten, ist aber nur noch undeutlich erkennbar. Das Misch- und Schlickwatt dehnt sich nach Nordwesten aus. Auf dem Schweinsrücken treten Mischwatten flächenmäßig in den Vordergrund. Schlickablagerungen beschränken sich hier im wesentlichen auf die nähere Umgebung der Lahnungsfelder und auf den Randbereich des Norder Aussentiefs. Der Leysand wird trotz seines Namens weder von Sanden noch von schlickigen Sanden aufgebaut. Vielmehr kommen hier ausgeprägt schlickige Sedimente zur Ablagerung, die nur in einem kleinen Teilbereich dem Mischwatt zuzuordnen sind (Anhang: Abb. A20)

6.3.2 Verteilungsmuster 1989 nach dem Bau von Leyhörn

1989 wurde aufgrund der damaligen Fragestellung nicht die gesamte Leybucht kartiert. Dies betrifft den größeren Teil von Leysand und den Bereich östlich vom Schweinsrücken. Für das Pilsumer Watt ist Schlickwatt charakteristisch, das aber mit zunehmendem Abstand vom Deckwerk in Mischwatt übergeht. Die im Westen durch den Kartenrand abgeschnittenen kleinen Sandwattflächen lassen aber weiterhin für diesen Bereich die 1983 zu beobachtende Dreigliederung vermuten. Auf dem Greetsieler Nacken sind schlickige Ablagerungen weit verbreitet und werden nur im Norden von Sedimenten der Misch- und Sandwattzone verdrängt. Für den nur partiell erfaßten Bereich des Schweinsrückens ist die Gliederung in Sand-, Misch- und Schlickwatt charakteristisch, die durch die deutlichen Übergänge von hellen zu dunklen Sanden noch hervorgehoben wird. Abweichend davon treten Schlickwattsedimente auch im Randbereich des Norder Aussentiefs auf. Der erfasste Bereich des Leysandes wird von schlickigen Sedimente bedeckt (Anhang: Abb. A21).

6.3.3 Verteilungsmuster 1997

Die typische Dreigliederung in Schlick-, Misch- und Sandwatt ist im Pilsumer Watt deutlich ausgeprägt. Für den dargestellten Kartenausschnitt sind ausgedehnte Schlick- und Mischwattgebiete charakteristisch. Mit der Übergangszone in etwa auf Höhe der Spitze von Leyhörn baut sich der Greetsieler Nacken aus schlickigen Sedimenten im Süden und Schlicksanden im Norden auf. Helles und dunkles Sandwatt sowie Mischwatt bestimmen das Bild auf dem Schweinsrücken. Schlickwatt tritt in einem langgestreckten Streifen vor allem entlang des Norder Außentiefs auf. Der Leysand wird vollständig von Schlicksedimenten bedeckt (Anhang: Abb. A1).

6.3.4 Änderungen im Verteilungsmuster zwischen 1983 und 1989

Fast der gesamte Bereich des Pilsumer Watts ist durch eine Zunahme des Feinkornanteils gekennzeichnet. Im nördlichen Teil ist im Schutze des sich etwa vier Kilometer nach NNW erstreckenden Bauwerks die Zunahme feiner Korngrößen besonders ausgeprägt, während im südlichen Teil nur wenig Veränderung, teilweise sogar ein Rückgang des Feinkornanteils festzustellen ist (Anhang: Abb. A22 u. A23). Diese Entwicklung entspricht den Erwartungen über die langfristige Auswirkung der baulichen Eingriffe aufs das Pilsumer Watt. Demnach wurde hier die Entstehung eines kleinflächigen Buchtenwattes erwartet (RAGUTZKI 1984).

Erwartungsgemäß kommt es auf dem durch Leyhörn deutlich geschützteren Greetsieler Nacken verstärkt zur Ablagerung feiner Sedimente. Der Bereich zwischen Leyhörn und Bohrinseldamm wird unverändert von schlickigem Material aufgebaut. Auffällig ist der stellenweise deutliche Rückgang des Feinkornanteils im Norden des Greetsieler Nackens. Hier ist ein Zusammenhang mit der Zusammenlegung von Süder- und Norderley zu vermuten: Strömung und Seegang konzentrieren sich auf eine Rinne, woraus eine höhere hydrodynamische Belastung resultiert. Zudem weisen geodätisch-morphologische Untersuchungen darauf hin, dass sich zum einen infolge des veränderten Pilsumer Watteinzugsgebietes im Wurzelbereich der Ley verstärkt eine Flutstromrinne ausbildet, sich zum anderen die Greetsieler Legde vertieft hat und somit ein verstärkter Wasseraustausch der Leybucht zur Bantsbalje anzunehmen ist (RAGUTZKI & STEPHAN 1991).

Im Gegensatz zu den anderen morphologischen Einheiten der Leybucht ist für den Schweinsrükken der großflächige Verlust der Feinkornfraktion mit in Richtung auf den Deich abnehmender Intensität kennzeichnend. Als Ursache dürfte auch hier die bereits im vorherigen Absatz genannten Veränderungen der hydrodynamisch-morphologischen Bedingungen zu nennen sein. Der innere Bereich der Leybucht wird unverändert von Schlicksedimenten aufgebaut. Da 1989 nur ein kleiner Teil von Leysand kartiert wurde, kann für den 1983 noch verbliebenen Mischwattbereich der Übergang zum Schlickwatt nur angenommen werden.

6.3.5 Änderungen im Verteilungsmuster zwischen 1989 und 1997

Während sich nur für 33% der Leybuchtwatten eine so deutliche Veränderung in der Sedimentzusammensetzung zwischen 1989 und 1997 nachweisen läßt, dass eine Neuklassifizierung des Watttyps erforderlich wird, bleibt das Sedimentverteilungsmuster für den übrigen Bereich unverändert. Dies betrifft insbesondere den Leysand, den Greetsieler Nacken und das Pilsumer Watt. Auch wenn Abbildungen A24 und A25 (Anhang) den Eindruck vermitteln, dass sich nun mit der Ablagerung feinerer Sedimente auf dem Schweinsrücken und gröberer auf den übrigen von Veränderungen betroffenen Wattflächen der Entwicklungstrend zwischen 1983 und 1989 umkehrt, so darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass die zugrundeliegenden Sedimentverteilungskarten Momentaufnahmen darstellen und sich die Veränderungen auch durch temporäre Schwankungen im Ablagerungsmilieu erklären lassen.

7 Rückschlüsse auf morphodynamische Prozesse

7.1 Wattniveauänderungen

Um Sedimentations- und Erosionsgebiete räumlich abgrenzen zu können, ist eine flächenhafte Erfassung und Darstellung der Wattniveauänderungen – insbesondere in den landwärtigen Bereichen - erforderlich. Erst dann ist eine Überlagerung mit den Sedimentverteilungskarten sinnvoll, um Korrelationen zwischen Gebieten mit gleichzeitiger Abnahme der Watthöhen und des Feinkornanteils bzw. der Zunahme des Wattniveaus und des Feinkornanteils herausarbeiten zu können.

Die topographischen Karten aus den Jahren 1960, 1975 und 1990 wurden hinsichtlich Vollständigkeit, Lagegenauigkeit und eindeutiger Abgrenzung der Wattflächen gegen Deich/Vorland überprüft und ergänzt. Ferner wurde für Vergleichszwecke aus den neueren, teilweise digital vorliegenden Wattkarten der Forschungsstelle Küste, Norderney (vgl. Kap. 4.4) der Bereich zwischen Norddeich und Neßmersiel ausgewählt. Allerdings ist in dieser Karte der Übergang von Watt zu Festland bzw. Insel nicht definiert, so dass eine Hilfslinie eingefügt werden musste, die den AT-KIS-Karten entstammt und der Grenze "Grünland / Watt" entspricht.

Da sich die Untersuchungen auf den eulitoralen Bereich beschränken, wurden die topographischen Karten von allen Tiefenlinien unterhalb von NN-3.0m bereinigt. Damit wird der Rechenaufwand erheblich reduziert. Auf der Grundlage dieser modifizierten Karten wurden für ausgewählte Bereiche (Borkum, Norderney, Langeoog) und für den gesamten ostfriesischen Küstenraum mittels Triangulation digitale Geländemodelle (DGM) berechnet. Um Veränderungen im Wattniveau flächenhaft erfassen zu können, wurden aus den DGM Differenzenkarten erstellt. Voraussetzung dafür ist aber, dass den DGM ein Raster mit gleicher Maschenweite und identischen Rastermittelpunkten zugrunde liegt. So mussten die bestehenden DGM zunächst in ein Raster umgewandelt werden. Dabei wurde eine Maschenweite von 50m gewählt.

Da den topographischen Karten Wattvermessungen zugrunde liegen, die mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt wurden (terrestrische / nautische Vermessung, Luftbildauswertung, Was-

serlinienverfahren), ist auch mit unterschiedlich großen Ungenauigkeiten zu rechnen. Die Forschungsstelle Küste, Norderney gibt die Höhenabweichung bei der terrestrischer Vermessung mit weniger als einen halben Zentimeter an. Für die Seevermessungen haben Untersuchungen im Rahmen des KFKI-Projektes "Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der deutschen Bucht" gezeigt, dass von einem Beschickungsfehler von drei Dezimetern ausgegangen werden muss (HÜTTEMEYER et al., 1998). Beim Wasserlinienverfahren werden lokale Wasserstandsschwankungen nicht erfasst, so dass ein nicht zu quantifizierender Fehler zu erwarten ist.

Die Abbildungen A26 und A27 (Anhang) vermitteln einen Eindruck von den Wattniveauänderungen auf dem Randzelwatt zwischen 1960 und 1990. Durch die dreidimensionale Darstellung werden insbesondere die erheblichen Höhenveränderungen, die auf die Verlagerung von Prielen und Baljen zurückzuführen sind, hervorgehoben. Aber auch ohne diese räumliche Tiefe werden Art und Umfang der Änderungen im Wattniveau deutlich (Anhang: Abb. A28 u. A29).

7.2 Zusammenhang Wattniveauänderung und Sedimentverteilung

Um die Frage beantworten zu können, ob und in welchem Umfang die Zusammensetzung und das Verteilungsmuster von Sedimenten als Indikator für morphodynamische Prozesse genutzt werden kann, ist eine thematische Verknüpfung von Sediment- und Tiefendaten erforderlich. Dabei gilt es nachzuweisen, ob Wattflächen, auf denen eine auffällige Zunahme des Feinkornanteils festzustellen ist, auch durch eine deutliche Zunahme des Wattniveaus gekennzeichnet sind, bzw. ob die Abnahme des Feinkornanteils mit einer Abnahme des Wattniveaus korreliert. Ferner muss auch gezeigt werden, dass sich nicht das Wattniveau bei näherungsweise unveränderter Sedimentzusammensetzung erheblich verändert hat oder sich das Korngrößenspektrum trotz nur geringer Wattniveauschwankungen erheblich verschoben hat.

Zu diesem Zweck werden die Sedimentkarten, die die Veränderungen in den verschiedenen Zeitabschnitten dokumentieren (siehe Kap.6.2), mit den topographischen Differenzenkarten (siehe Kap. 7.1) verschnitten. Die Sedimentkarten wurden für die Rechenoperation ebenfalls in ein Raster umgewandelt werden. Die Ergebnisse der Verschneidungen für den ostfriesischen Küstenraum und für die drei Teilgebiete sind in den Abbildungen A30 bis A37 (Anhang) wiedergegeben. Die Farbgebung erfolgt in Anlehnung an die Darstellungen aus Kap. 6. Durch hohe Farbsättigung hervorgehoben sind die Gebiete, für die sich eine Übereinstimmung zwischen der Veränderung im Wattniveau und dem Feinkornanteil ergibt. Wie bereits die Abbildungen unmittelbar verdeutlichen, ist eine solche Übereinstimmung aber nicht der Regelfall.

Die prozentuale Wahrscheinlichkeit, dass sich Änderungen im Feinkornanteil und im Wattniveau gleichsinnig entwickeln, dass also eine Zu- und Abnahme des Feinkornanteils auch mit einer Zuund Abnahme des Wattniveaus einhergeht, beträgt im gesamten ostfriesischen Küstenraum 8.6% (1960-1975) bzw. 12% (1975-1997). Die gegenläufige Entwicklung von Wattniveau und Feinkornanteil liegt mit 10.4% und 8.9% allerdings ähnlich hoch. Etwa 75% der in diesen beiden Zeitabschnitten erfassten Fläche weisen keine grundlegenden Veränderungen im Verteilungsmuster der Sedimente auf. Allerdings entfallen davon nur 23.2% bzw. 15.8% auf Flächen, die gleichzeitig auch durch eine relativ stabile Lage des Wattniveaus gekennzeichnet sind. Für die anderen Flächenanteile ist entweder eine Zunahme (18.2% bzw. 25.2%) oder eine Abnahme des Wattniveaus (25.7% bzw. 39.8%) festzustellen. Insgesamt beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die Entwicklung des Wattniveaus und die sedimentologischen Änderungen auf den Watten entlang der ostfriesischen Küste gleichsinnig verlaufen, etwa 30%. Die exakten Prozentangaben für die ostrfrieische Küste, wie auch für die drei Teilgebiete, sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

wattinveat											
Feinkorn-		Bor	kum	٩	lorderne	у	Lang	eoog	Ostfr.	Küste	
anteil	Watthiveau	1960-75	1975-90	1960-75	1975-90	1975-95	1960-75	1975-90	1960-75	1975-90	
unverändert	unverändert	39.4	24.0	31.3	13.8	15.1	26.7	13.5	23.2	15.8	
unverändert	Zunahme	31.2 82	35.0	25.3	9.4 66.8	14.6 6.8	29.0 76	14.0 77.0	25.2	18.2 73.	
unverändert	Abnahme	11.5	24.5	24.6	43.6	37.1	20.4	49.5	25.7	39.8	
Zunahme	Zunahme	^{4.4}	1.5 4	^{4.1} ஏ	0.5	0.4 1	6.6 1	1.8 1 .8	4.8 œ	2.1 1	
Abnahme	Abnahme	0.8 ` 2	_{3.0} бл	9 .	17.3 œ	14.0 4	3.4 0	8.9 .7	3.8 6	9.9 0	
Zunahme	unverändert	4.1	^{0.9}	4.3 6	0.1	0.1	^{3.5} 6	^{0.9} ω	^{3.6} o	^{1.6}	
Abnahme	unverändert	نه _{3.2}	4.7 6	ت 2.2	7.7 ∞	7.0 1	نە _{2.7}	نى 2.4	3.3 `9	نە 3.7	
Abnahme	Zunahme	^{4.2} л	5.7 6	1.5	6.4	10.4	3.6	4.4	7.3 1	^{5.1} ∞	
Zunahme	Abnahme	1.2	0.7 4	ن 4.9	1.2 .6	1.3	4.1 .6	6.4 9	3.1 4	3.8 .9	
Prozentuale Ver	änderungen an der	eweiligen Ge	amtfläche		Für den f	Bereich Norde	nev standen i	eueres Karter	der FSK zur \	/erfügung	

Tab. 8: Tabellarische Übersicht der Zusammenhänge zwischen Sedimentverteilung und Wattniveau

Der Fall, dass bei unverändertem Watt-Typ eine deutliche Abnahme des Wattniveaus festzustellen ist, ist auffällig häufig zu beobachten. In Anbetracht der Tatsache, dass zwischen 70% und 80% der Wattflächen von Sandwatt bedeckt sind (vgl. Tab. 4) und sich auf diesen Flächen parallel auch bei einer Abnahme des Wattniveaus kein anderer Watt-Typ einstellt, mögen diese Prozentzahlen wenig überraschen. Wäre auf älteren Luftbildern eine Unterscheidung von hellen und dunklen Sandwatten möglich, so wäre zu erwarten, dass sich eine Abnahme des Wattniveaus auch in einer Verschiebung von dunklen hin zu hellen Sandwatten bemerkbar machte.

Obwohl für den gesamten Untersuchungsraum bei einem im Mittel abnehmenden Wattniveau auch eine Flächenzunahme der Sandwatten erkennbar ist, führen die vorliegenden Ergebnisse zu dem Schluss, dass das Verteilungsmuster der Oberflächensedimente und dessen Veränderung in Zeit und Raum keine sichere Prognose, weder lokal noch regional, für die zu erwartende Entwicklung des Wattniveaus zulässt.

8 Zusammenfassung

Marine Sedimente spiegeln in ihrer Zusammensetzung und räumlichen Verteilung neben den morphologischen, vor allem die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt ihrer Ablagerung wider. Neben den gestaltenden Kräften aus Seegang und Strömungen sind in den Sedimenten aber auch biologische Effekte eingeprägt.

In Zuordnung zu morphologischen Strukturen sind Erosions- und Sedimentationsbereiche durch charakteristische Sedimentverteilungen gekennzeichnet. Während temporär auftretende, lokale Variabilitäten der Sedimentverteilung der sich ständig ändernden Dynamik von Strömung und Seegang Ausdruck verleihen, werden großräumige und langfristige Veränderungen der Sedmentverteilung durch strukturelle Änderungen der hydrodynamischen und morphologischen Einflüsse bestimmt.

Mit diesem Forschungsvorhaben sollte überprüft werden, ob über die jeweils charakteristische Sedimentverteilung und ihre zeitliche Variabilität es gelingt, die morphologische Entwicklung einer räumlichen Einheit aufzuzeigen, und diese in geeigneter Weise nach temporären und strukturellen Entwicklungstendenzen zu unterscheiden. Dies wäre eine Grundlage für Prognosen über künftige morphologische Entwicklungen, die insbesondere für die Planung von Küstenschutzmaßnahmen benötigt wird.

Luftbilder haben sich in der Vergangenheit als wertvolle Hilfe bei Sedimentkartierungen erwiesen. Diese Methode bietet nicht nur den Vorteil der synoptischen und relativ schnellen Erfassung der Sedimentverteilung von ausgedehnten Untersuchungsflächen, sondern ermöglicht es auch, durch Auswertung älterer Luftbilder frühere Zustände im Verteilungsmuster aufzuzeigen.

Auf der Grundlage von Luftbildern aus den Jahren 1996/97 wurde das Verteilungsmuster der Oberflächensedimente im niedersächsischen Küstenraum durch analoge Luftbildauswertung erfasst und durch Geländeuntersuchungen verifiziert. Von der digitalen Luftbildauswertung wurde Abstand genommen, da die Ergebnisse nicht befriedigen konnten. Grund dafür ist die hohe Fehlerquote, die aus der Tatsache resultiert, dass sich die digitale Bildauswertung allein auf Unterschiede in den Graustufen bzw. Farbwerten stützt. Die Färbung des Sediments wird aber in erheblichen Maße durch Faktoren wie z.B. Wassergehalt, Struktur, Textur, organische Überzüge oder Sonnenstand beeinflusst.

Durch den Vergleich mit Luftbildern aus den Jahren 1951, 1966 und 1975 wurden Veränderungen im Verteilungsmuster aufgezeigt. Dabei wurde festgestellt, dass sich zwischen 1951 und 1975 die Flächenanteile von Sand-, Misch- und Schlickwatt nicht wesentlich verändert haben, dass es aber in den letzten 20 Jahren zu eine Zunahme der Sandwattgebiete um gut 10% vor allem auf Kosten der Mischwattflächen gekommen ist. Misch- und Schlickwattzonen sind charakteristisch für die geschützten Buchtenwatten der Leybucht und des Jadebusens.

Die Morphologie des ostfriesischen Wattenmeeres ist durch topographische Karten aus den Jahren 1960, 1975 und 1990 dokumentiert. Durch Differenzenberechnung wurden Veränderungen im Höhenniveau der Wattgebiete flächenhaft dargestellt und mit den Veränderungen im Verteilungsmuster der Sedimente verknüpft.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Sedimentations- bzw. Erosionsgebiete durch eine Zu- bzw. Abnahme des Feinkornanteils gekennzeichnet sind, liegt für die verschiedenen untersuchten Zeitabschnitte zumeist bei weniger als 10%. Ähnlich hoch ist allerdings auch die genau gegenläufige Entwicklung. Entlang des niedersächsischen Küstenraumes ist zwar grundsätzlich eine Abnahme der Feinkornanteils zu beobachten ist (Flächenzunahme der Sandwatten), die mit der Abnahme des mittleren Wattniveaus korreliert. Die vorliegenden Untersuchungen führen aber dennoch zu dem Ergebnis, dass das Verteilungsmuster der Oberflächensedimente und dessen Veränderung in Zeit und Raum nicht in einem hinreichend gesicherten Zusammenhang mit zeitlich nachfolgenden morphologischen Veränderungen steht, so dass keine Vorhersage für zu erwartende morphologische Entwicklung ist, weder lokal noch regional.

9 Danksagung

Die Förderung des Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) hat dieses Forschungsvorhaben ermöglicht. Hierfür und für das Interesse an dem Vorhaben wird dem BMBF und seinem Projektträger Forschungszentrum Jülich - "Biologie, Energie, Ökologie" (BEO) sei herzlichst gedankt.

Das Forschungsvorhaben konnte dankenswerterweise im Rahmen des "Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen" (KFKI) durchgeführt und von einer KFKI-Projektgruppe begleitet werden, der die Herrn Dr. K. Figge (Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie, Hamburg), Dr. J. Hofstede (Landesanstalt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Kiel) und Dipl.-Ing. J. Paul (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz) angehörten.

Herrn Dipl.-Ing. G. Ragutzki, der bis zu seinem Ausscheiden aus dem aktiven Dienst (Ende Mai 1998), sowie herrn Prof. Dr. H. Kunz, der nachfolgend als Projektleiter die Arbeit betreut hat, möchte ich für die bereitwillige Unterstützung, die ein freies und eigenständiges Arbeiten ermöglicht hat, danken.

Ohne die unersätzliche Hilfe von Frau Daniela Meißner, Frau Dörthe Liefke und Herrn Reno Taddigs wären die zahlreichen Geländeuntersuchungen, bei denen sie mich abwechselnd begleitet haben, nicht möglich gewesen. Ihnen gebührt nicht zuletzt auch für die sorgfältige und zeitintensive Analyse der Bodenproben mein ganz besonderer Dank.

Dank der Besatzung der "MS Buise", Herrn Eilhard Eilers und Herrn Arno Beckmann, ist ein reibungsloser Ablauf der Schiffeinsätze möglich gewesen.

10 Literatur

ANTIA, E.E. (1993): Sedimentology, morphodynamics and facies association of a mesotidal barrier island shoreface (Spiekeroog, southern North Sea). – Ber. Fachb. Geow. Univ. Bremen, 32: 370S.

AUGUSTINUS, P.G.E.F. (1997): Biochemical factors influencing deposition and erosion of finegrained sediment. – Ber. Forsch.zentrum Terramare, 2

BAGNOLD, R.A. (1973): The nature of saltation and of "bedload" transport in water. – Proc. Roy. Soc. London, 332A: 473-504

BARTHOLDY, J. & PFEIFFER-MADSEN, P. (1990): Accumulation of Fine Graines, Material in a Danish Tidal Area. – Mar. Geol., 67: 121-137

BERNEM VAN, K.-H.; GROTJAHN, M.; KNÜPLING, J.; KRASEMANN, H.L.; MÜLLER, A.; NEUGEBOHRN, L.; PATZIG, S.; RAMM, G.; RIETHMÜLLER, R.; SACH, G. & SUCHROW, S. (1994): Thematische Kartierung und Sensitivitätsraster im deutschen Wattenmeer, Juni 1987 -Juni 1993. - GKSS Forschungszentrum Geesthacht, 94/E/10: 164 S.; Geesthacht

BOER, P.L. DE (1981): Mechanical effects of micro-organisms on intertidal bedform migration. – Sedimentology, 28: 129-132

BRIDGE, J.S. (1981): Hydraulic interpretation of grain-size distributions using a physical model for bedload transport. – J. Sed. Petrol., 51 (4): 1109-1124

BROSINSKY, D. (1991): Morphodynamische Prozesse und Sedimentverteilung im Bereich der Muschelbalje (östliches Spiekerooger Watt). - unveröff. Dipl.-Arb. (Teil 1), Univ. Gießen

DENNERT-MÖLLER, E. (1983): Untersuchungen zur digitalen multispektralen Klassifizierung von Fernerkundungsaufnahmen mit Beispielen aus den Wattgebieten der deutschen Nordseeküste. – Wiss. Arbeiten. Vermess. Univ. Hannover, 127

DHI - Deutsches Hydrographisches Institut (1981): Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht.- DHI, Karte Nr. 2900, Begleitheft: 13S.

DIN 18121 (1976): Baugrund; Untersuchungen von Bodenproben; Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung, Blatt 1. – DIN Deutsches Inst. f. Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 18123 (1983): Baugrund; Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung. – DIN Deutsches Inst. f. Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 18128 (1990): Baugrund; Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung des Glühverlustes. – DIN Deutsches Inst. f. Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 18129 (1990): Baugrund; Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung des Kalkgehalts. – DIN Deutsches Inst. f. Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin

DOERFFER, R. & MURPHY, D. (1989): Factor analysis and classification of remotely sensed data for monitoring fidal flats. – Helgländer Meeresunters., 43: 275-293
DOERFFER, R.; BROCKMANN, C.; KLEEBERG, U. & MURPHY, D. (1995): Fernerkundung von Sediment und Benthos, Abschlußbericht Ökosystemforschung. – SWAP, TP 1.2a/1.3b: 41S.

DÖRJES, J. (1978): Das Watt als Lebensraum. – In: H.-E. REINECK (Hrsg), Das Watt - Ablagerungs und Lebensraum

DÖRJES, J.; GADOW, S.; REINECK, H.-E. & SINGH, I.B. (1969): Die Rinnen der Jade (Südliche Nordsee). Sedimente und Makrobenthos. – Senckenberg. marit., 50: 5-62

EHLERS, J. (1988): The Morphodynamics of the Wadden Sea. - Rotterdam

EISMA, D. (1981): Supply of suspended matter in the North Sea. – In: J. DRONKERS & W. VAN LEUSSEN (Hrsg.), Physical processes in estuaries: 295-310

EITNER, V. (1992): Untersuchungen zur Morphologie und Sedimentologie des Einzugsgebietes der Otzumer Balje. -.Umweltforschungsplan des BMU, Umweltplanung/ökologie, unveröff. Forschungsbericht 108 02 085/02, 88S.,

EITNER, V. & RAGUTZKI, G. (1994): Temporal an Spatial Variability of Tidal Flat Sediments: A Case Study. – Senckenberg. marit., 25 (1/3): 1-9

EVANS, G. (1965): Intertidal flat sediments and their depositional environments in the Wash. - Quart. J. Geol. Soc. London, 121: 209-241

FIGGE, K.; KÖSTER, R.; THIEL, H.& WIELAND, P. (1980): Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht - Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. – Die Küste, 35: 197-204

FLEMMING, B.W. (1992): Zur holozänen Entwicklung, Morphologie und faziellen Gliederung der ostfriesischen Insel Spiekeroog (südliche Nordsee). - Senckenberg am Meer, Bericht 91/3: 51 S.

FLEMMING, B.W. & BARTHOLOMÄ, A. (1997): Response of the Wadden Sea to a Rising Sea Level: a Predictive Empirical Model. – Dt.. Hydrogr. Z., 49 (2/3): 343-353

Flemming, B.W. & Davis, R.A. (1994): Holocene Evolution, Morphodynamics and Sedimentology of the Spiekeroog Barrier Island System (Southern North Sea). – Senckenberg. marit., 24 (1/6): 117-155

FLEMMING, B.W. & ZIEGLER, K. (1995): High resolution grain size distribution patterns and textural trends in the backbarrier environment of Spiekeroog island (southern North Sea). - Senckenberg. marit., 26: 1-24

FÜHRBÖTER, A. & MANZENRIEDER, H. (1987): Biostabilisierung von Sandwatten durch Mikroorganismen. – In: G. GERDES; W. KRUMBEIN & H.E. REINECK (Hrsg.), Mellum – Portrait einer Insel, Kramer, Frankfurt

GIBBS, R.J. (1983): Effect of natural organic coatings on the coagulation of particles. – Environ. Sci. Tech., 17: 237-240 GÖHREN; H (1974): Triftströmungen im Wattenmeer. – Mitt. Franzius Inst. TU Hannover, 25 GÖHREN; H (1975): Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen Elbe und Weser. – Hamburger Küstenforsch., 33: 29-58

GRANT, J.; BATHMANN, U.V. & MILLS, E.L. (1986): The interaction between benthic diatom films and sediment transport. – Estuar. Coast. Shelf Sci., 13: 225-238

GROTJAHN, M. (1990): Sedimente und Makrofauna der Watten bei der Insel Spiekeroog - Untersuchungen im Rahmen des Sensitivitätsraster Deutsche Nordseeküste. - Jber. FSK, 1987, 39: 97-119

HARENBERG, K.T. (1983): Kartierung und sedimentologische Untersuchung von Oberflächensedimenten im Wattgebiet zwischen der Insel Spiekeroog und dem Festland (nördlicher Teil). - unveröff. Dipl.-Arb TU Clausthal

HOFFMANN, J. (1998): Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse im Rückseitenwatt von Wangerooge. – unveröff. Dipl.Arb. Univ. Mainz

HÜTTEMEYER, P.; KOOPMANN, A.; KUNZ, H. & PUSCHMANN, M. (1998): KFKI Forschungsvorhaben "Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht", Zwischenbericht 1997. – Dienstber. Forschungsstelle Küste, 6: 22 S., Norderney

JELGERSMA, S. (1979): Sea-level changes in the North Sea basin. – In: E. Oele, R.T.E. Schüttenhelm & A.J. Wiggers (eds.), The Quarternary History of the North Sea, Acta Univ, Ups., 2: 233-248

KLEEBERG, U. (1993): Kartierungen der Sedimentverteilung im Wattenmeer durch integrierte Auswertung von Satellitenbildern und Daten aus der Wattenmeerdatenbank der GKSS. - unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Trier: 113S.

KOCH, M. & NIEMEYER, H.D. (1980): Strömungsmessungen im Bereich der Wattwasserscheiden von Norderney und Baltrum sowie im Seegat Wichter Ee. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 24: 69-75

KRANCK, K. (1984): Settling behavior of cohesive sediment. – In: A.J. MEHTA (Hrsg.), Estuarine Cohesive Sediment Dynamics: 151-169, Springer-Verlag, N.Y.

KRAUSE, H.R. (1951): Die biologische Kartierung des westlichen Juister Wattes im Sommer 1950. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1950, 2: (unveröffentlicht)

KRAUSE, H.R. (1952): Die Kartierung der Lebensgemeinschaften des östlichen Juister Watts und des Norderneyer Watts im Jahre 1951. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1951, 3: (unveröffentlicht)

KRAUSE, H.R. (1954):Die Kartierung der bodenbewohnenden Lebensgemeinschaften im Langeooger Watt. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1953, 5: (unveröffentlicht)

KUNZ, H.; NIEMEYER, H.D.; GOLDENBOGEN, R. & SCHROEDER, E. (1998): Forschungsvorhaben WADE, Abschlussbericht. – Forschungsvorhaben MTK 0508

LINKE, O. (1939): Die Biota der Jadebusenwatten. – Helgol. wiss. Meeresunters., 1:201-348

LÜDERS, K. & LUCK, G. (1976): Kleines Küstenlexikon. - Hildesheim

MANN, U. (1991): Morphologische Entwicklung, Sedimentverteilung und Faziesdifferenzierung im Bereich der Ostspitze von Spiekeroog. - unveröff. Dipl.-Arb. (Teil II), Univ. Gießen

McCAVE, I.N. (1984): Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean. – Deep-Sea Res., 31: 329-352

MICHAELIS, H. (1968): Biologisch-sedimentologische Untersuchungen des Wurster Wattes von Spieka bis Arensch. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1966, 18:

MICHAELIS, H. (1970): Biologische Untersuchungen der Watten und Landgewinnungsfelder bei Schillighörn. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1968, 20

MICHAELIS, H. (1973): Untersuchungen über das Makrobenthos der Wesermündung. – Jber. Forschungsstelle Norderney, 1972, 24

MICHAELIS, H. (1978): Ökologische Untersuchungen der Watten des Jadebusens in Verbindung mit einer Luftbild-Analyse. - unveröff. Arbeitsbericht FSK; Norderney

MILLAT, G. (1996): Entwicklung eines methodisch-inhaltlichen Konzeptes zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring im niedersächsischen Wattenmeer. – Schriftenr. Nationalparkverw. "Niedersächs. Wattenmeer", 1: 125S.

MÜLLER, C.D. (1957): Biologische und sedimentologische Untersuchung des Cappeler Wattes. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1957, 9

MÜLLER, C.D. (1958): Biologische und sedimentologische Wattuntersuchung zwischen Westeraccumersiel und Neuharlingersiel an der ostfriesischen Küste. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1958, 10

MÜLLER, C.D. (1962): Biologisch-sedimentologische Untersuchung der Wattveränderung 1955-1961 bei Wremen. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1961, 13

MÜLLER, C.D. (1963): Das Watt an der Butjadinger Küste von Langwarden bis Tossens. Untersuchung von Fauna und Sediment und Folgerungen für den Küstenschutz. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1962, 14

MÜLLER, C.D. (1964): Das ostfriesische Watt von Dornumersiel bis Norddeich. Eine biologischsedimentologische Untersuchung mit Folgerungen für den Küstenschutz. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1963, 15

MÜLLER, C.D. (1966): Das ostfriesische Watt von Neuharlingersiel bis Harlesiel. - Jber. Forschungsstelle Norderney, 1965, 17

NIEMEYER, H.D. (1979): Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. – Die Küste, 34: 53-70

NIEMEYER, H.D.; GOLDENBOGEN, R.; SCHROEDER, R. & KUNZ, H. (1995): Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. – Die Küste, 57 NYANDWI, N. (1995): The nature of the Sediment Distribution Pattern in the Spiekeroog Backbarrier Area, the East Frisian Islands. - Ber. aus FB5-Geowiss. Bremen, 66: 162S.; Bremen

OOST, A.P. & DE BOER, P.L. (1994): Sedimentology and Development of Barrier Islands, Ebb Tidal Deltas, Inlets and Backbarrier Areas of the Dutch Wadden Sea. – Senckenberg. marit., 24: 65-116

PATERSON, D.M. (1989): Short-term changes in the erodibility of intertidal cohesive sediments related to the migratory behavior of epipelic diatoms. – Limnol. Oceanogr., 34 (1): 223-234

PEJRUP, M. (1988): Suspended sediment transport across a tidal flat. – Mar. Geol., 82: 187-198

POSTMA, H. (1961): Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. – Neth. J. Sea Res., 1: 148-190

POSTMA, H. (1981): Exchange of materials between the North Sea and the Wadden Sea. – Mar. Geol., 40: 199-213

PRÖBER, C. (1981): Die Möglichkeiten der Fernerkundung in der Küstengeologie. Eine Untersuchung am Beispiel der nordfriesischen Wattsedimente und der Schwebfracht in der Nordsee – unveröff. Diss. Univ. Kiel, 177 S.

PULS, W. & KÜHL, H. (1989): Sie Sinkgeschwindigkeit von Elbeschwebstoff bei Lauenburg und Bunthaus, August 1989. – GKSS, 89/E/54: 43S., GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

RAGUTZKI, G. (1978): Zur Frage der biogenen Festigkeit von Wattsedimenten nach bodenphysikalischen Kriterien. – Jber. Forschungsstelle Insel- u. Küstenschutz Norderney, 30

RAGUTZKI, G. (1982): Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächsischen Watten. - Jber. Forschungsstelle Insel- u. Küstenschutz Norderney, 32: 55-67

RAGUTZKI, G. (1983): Verteilung und Eigenschaften der Wattsedimente des Jadebusens. - Jber. Forschungsstelle Insel- u. Küstenschutz Norderney, 34: 115-134

RAGUTZKI, G. (1984): Untersuchung zur Sedimentverteilung auf den Leybucht-Watten im Zusammenhang mit dem Bauvorhaben Leyhörn. - Jber. Forschungsstelle Küste Norderney, 1983, 35:

RAGUTZKI, G & OTTEN, O. . (1991): Sedimentologische Untersuchungen zu Auswirkungen von Baggergut-Verspülungen auf dem Pilsumer Watt. – unveröff. Ber. Forschungsstelle Küste Norderney

RAGUTZKI, G. & STEPHAN, H.-J. (1991): Baubegleitende geodätisch-morphologische Untersuchungen der Forschungsstelle Küste zum Vorhaben Leyhörn-Leybucht. - unveröff. Ber. Forschungsstelle Küste Norderney

REINECK, H.-E. (1978a): Das Watt, Ablagerungs- und Lebensraum. – Kramer-Verlag, Frankf./M.: 185S.

REINECK, H.-E. (1978b): Die Watten der deutschen Nordseeküste. – Die Küste, 32: 68-83

REINECK, H.-E.; CHEN, C.M. & WANG, S.S (1986): Die Rückseitenwatten zwischen Wangerooge und Festland, Nordsee. – Senckenberg. marit., 17: 241-252

REINECK, H.-E. & SIEFERT, W. (1980): Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. – Die Küste, 35: 26-51

REINECK, H.E. & SINGH, I.B. (1980): Depositional sedimentary environments. – Springer-Verlag, N.Y.

RÖHRING, T. (1995): Bestimmung der Erosionsfestigkeit und zugeordneter bodenphysikalischer Parameter im Bereich anoxischer und oxischer Sedimentoberflächen, Abschlussbericht. – Ökosystemforschung Wattenmeer, Teilvorhaben Niedersächsisches Wattenmeer

SCHULZ, U. (1997): Tourist an Orbit: "Wo bin ich?".- GeoBIT (4): 16-21

SINDOWSKI, K.H. (1973): Das ostfriesische Küstengebiet. Inseln, Watten und Marschen. – Samml. Geol. Führer, 57

STELZER, K. (1998): Erfassung der Sedimentverteilung des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres mit Hilfe multispektraler Fernerkundungsdaten - unter besonderer Berücksichtigung des Wassergehaltes. – unveröff. Dipl.Arb.. Fachb. VI Univ. Trier

STRAATEN VAN, L.M.J.U. & KUENEN, P.H. (1957): Tidal action as a cause of clay accumulation. – J. Sed. Petrol., 28 (4): 406-413

STREIF, H. (1986): Zur Altersstellung und Entwicklung der Ostfriesischen Inseln. – Offa, 43: 29-44

STREIF, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. – Samml. Geol. Führer, 57

STREIF, H. & KÖSTER, R. (1978): Zur Geologie der deutschen Nordseeküste. – Die Küste, 32: 30-49

WIECZOREK, U. (1982): Methodische Untersuchungen zur Analyse der Wattmorphologie aus Luftbildern mit Hilfe eines Verfahrens der digitalen Bildsturkturanalyse. – Münchener Geogr. Abh., 27

YALIN, M.S. (1977): Mechanics of sediment transport. – Pergamon Press, 298S.

ZIEGLER, K. (1989): Holozäne Entwicklung, Aktuogeologie und Sedimentdynamik des Spiekerooger Rückseitenwatts. - unveröff. Dipl.-Arb. TU Clausthal Anlagen

Anlagenverzeichnis

Abb. A1: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer, westl. Abschnitt: 1996/97 Abb. A2: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer, östl. Abschnitt: 1996/97 Abb. A3: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer zwischen Juist und Wangerooge: 1951 Abb. A4: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer, östl. Abschnitt: 1951 Abb. A5: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer zwischen Juist und Wangerooge: 1966 Abb. A6: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer zwischen Borkum und Wangerooge: 1975 Abb. A7: Sedimentverteilung im niedersächs. Wattenmeer, östl. Abschnitt: 1975 Abb. A8: Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächs. Watten nach RAGUTZKI 1982 Abb. A9: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente zwischen Juist und Langeoog: 1951-1966 Abb. A10: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente zwischen Borkum und Wangerooge: 1966-1975 Abb. A11: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente, westl. Abschnitt: 1975-1996 Abb. A12: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente, östl. Abschnitt: 1975-1996 Abb. A13: Änderungstendenzen in der Sedimentverteilung: 1951-1966 Abb. A14: Änderungstendenzen in der Sedimentverteilung: 1966-1975 Abb. A15: Änderungstendenzen in der Sedimentverteilung, westl. Abschnitt: 1975-1996 Abb. A16: Änderungstendenzen in der Sedimentverteilung, östl. Abschnitt: 1975-1996 Abb. A17: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente, westl. Abschnitt: vor 1980 (n. RAGUTZKI) - 1996 Abb. A18: Änderungen im Verteilungsmuster der Sedimente, östl. Abschnitt: vor 1980 (n. RAGUTZKI) - 1996 Abb. A19: Änderungstendenzen in der Sedimentverteilung: vor 1980 (n. RAGUTZKI) - 1996 Abb. A20: Sedimentverteilung in der Leybucht: 1983 Abb. A21: Sedimentverteilung in der Leybucht: 1989 Abb. A22: Veränderungen der Sedimentverteilung in der Leybucht: 1983 – 1989 Abb. A23: Änderungstendenzen in der Verteilung der Leybuchtsediment: 1983-1989 Abb. A24: Veränderungen der Sedimentverteilung in der Leybucht: 1989 – 1996 Abb. A25: Änderungstendenzen in der Verteilung der Leybuchtsediment: 1989-1996 Abb. A26: Wattniveauänderungen auf dem Randzelwatt, Borkum: 1960 - 1975 Abb. A27: Wattniveauänderungen auf dem Randzelwatt, Borkum: 1975 - 1990 Abb. A28: Wattniveauänderungen zwischen Borkum und Wangerooge: 1960 - 1975 Abb. A29: Wattniveauänderungen zwischen Borkum und Wangerooge: 1975 - 1990 Abb. A30: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Borkum, 1960 - 1975 Abb. A31: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Borkum, 1975 - 1996 Abb. A32: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Norderney, 1960 - 1975 Abb. A33: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Norderney, 1975 - 1990 Abb. A34: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Langeoog, 1960 - 1975 Abb. A35: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: Langeoog, 1975 - 1996 Abb. A36: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: ostfriesische Küste, 1960 - 1975 Abb. A37: Verknüpfung sedimentologisch-morphologischer Veränderungen: ostfriesische Küste, 1975 – 1990











Dienstber. Forschungsstelle Küste 21/1999

















































Dienstber. Forschungsstelle Küste 21/1999









Abb. 28












Abb. 32













Abb. 36



Abb. 37