



BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

KFKI-Projekt

Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee

Abschlussbericht





BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

KFKI-Projekt

Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee (FKZ 03KIS008)

Abschlussbericht

Projektleitung: K. Figge, M. Zeiler Projektbearbeitung: K. Griewatsch, M. Zeiler

unter Mitwirkung von E. Mittelstaedt, H. Klein, K. Schwarzer, M. Diesing

Hamburg, Mai 2002

UB/TIB Hannover 89 125 195 540

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK HANNOVER TECHNISCHE INFORMATIONSBIBLIOTHEK

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg und Rostock 2002 www.bsh.de

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des BSH reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

.

.

.

•

.

.

.

.

F

Inhalt

•

.

•

.

.

٠

.

.

1. EINFÜHRUNG
2. ZIELSETZUNG
3. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE
4. METHODEN10
4.1 Positionierung und Vermessung10
4.2 Seitensichtsonar
4.3 Flachseismik
4.4 Hydrographie10
4.5 Sedimentbeprobung11
4.6 Tracersande11
4.7 Korngrößenanalyse
4.8 Analyse von organischen Schadstoffen, Karbonat und organischem Kohlenstoff 12
4.9 Datenauswertung13
5. ENTNAHMEGEBIET "WESTERLAND II"
5.1 Einleitung14
5.2 Datenbestand
5.3 Ergebnisse und Diskussion
Sedimente 26
Organisches Schadstoffspektrum als Hinweis auf den Ursprung des Schlicks
Hydrographie
Saisonale Prozesse bei der Verfüllung
5.4 Zusammenfassung "Westerland II"

6. ENTNAHMEGEBIET "HOHES WATT BEI PELLWORM"
6.1 Einführung34
6.2 Datenbestand
6.3 Ergebnisse und Diskussion
Morphologie
Sedimentologische Zusammensetzung des Füllmaterials
6.4 Zusammenfassung Hohes Watt bei Pellworm41
7. ENTNAHMEGEBIET "GRAAL-MÜRITZ 1"42
7.1 Einleitung
7.2 Datenbestand
7.3 Ergebnisse und Diskussion
Morphologie
Sedimentologie
Hydrographie
7.4 Zusammenfassung "Graal-Müritz 1"53
8. ENTNAHMEGEBIET "TROMPER WIEK"55
8.1 Einleitung
8.2 Datenbestand
8.3 Ergebnisse und Diskussion
Morphologie
Veränderungen in der Sedimentverteilung57
Sedimentationsprozesse in den Entnahmetrichtern62
Sedimentationsraten
Sedimentologische Variabilität außerhalb der Lagerstätten
Strömungs- und Seegangsmessungen: 1. Kampagne, 20. März - 7. Juni 2000
Strömungs- und Seegangsmessungen: 2. Kampagne, 29. August - 22. November 200076
Strömungs- und Seegangsmessungen: 3. Kampagne, 7. März - 30 Mai 2001
8.4.7usammenfassung Tromper Wiek"

9. DISKUSSION	80
9.1 Regenerierungsprozesse	
9.2 Zeiträume der Regenerierung	
9.3 Einfluss auf Sedimenttransportsysteme	
10. ZUSAMMENFASSUNG	
11. LITERATUR	
DANKSAGUNG	
ANHANG A1: METHODEN	90
ANHANG A2: POSITIONEN DER PROBEN- UND MESSSTATIONEN	

.

•

•

•

•

.

•

-

.

4

1. Einführung

Sand und Kies sind begehrte Rohstoffe für Küstenschutzmaßnahmen und die Bauindustrie. Seit den 1960er Jahren werden diese Rohstoffe in größerem Umfang vom Meeresboden entnommen, und die Nachfrage in Europa ist seit den 1980er Jahren gestiegen. In Deutschland wurden während der letzten 10 Jahre in Nord- und Ostsee jährlich rund 1 Mio. m³ Sand und Kies gefördert. Aktuelle Karten zu den Bewilligungsfeldern auf dem deutschen Festlandsockel aus CONTIS-Datenbank finden sich auf der Homepage des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (www.bsh.de/Dienstleistungen).

Der Abbau von Kieslagerstätten im marinen Bereich führt zu Konflikten mit anderen Nutzungsarten. Die Sedimententnahme ist ein direkter Eingriff in die benthischen Lebensgemeinschaften und damit in die marine Nahrungskette. Änderungen der Bodentopographie, Sedimentzusammensetzung und Hydrodynamik können eine Wiederbesiedlung erschweren oder sogar unterbinden (z.B. DESPREZ, 1992; KRAUSE et al., 1996). Befindet sich die Entnahmestelle zu nahe an der Küste, kann die Stabilität von Festland- oder Inselsockel beeinträchtigt werden, so dass sich langfristig eine Verstärkung des Küstenschutzproblems ergeben kann. Erfolgt die Entnahme in einem Gebiet, in dem durch Seegang und Strömungen Sediment umgelagert wird, können diese natürlichen Sedimentbewegungsprozesse unter Umständen auch großräumig gestört werden.

Die Änderungen des Meeresbodens bei einer Gewinnungsmaßnahme sind abhängig vom Lagerstättentyp und den jeweils benutzten Abbaumethoden (Abb. 1). Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei einer flächenhaften Gewinnung im Schleppkopfverfahren größere Flächen zerstört werden können und bei zu geringer Entfernung von der Küste deren Stabilität gefährdet ist. Bei einem mehr vertikal ausgerichteten Abbau mit Stechrohrbaggern entstehen tiefe Entnahmetrichter, die als Sedimentfallen wirken. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass als Sekundäreffekte flächenhafte Änderungen des Meeresbodens auftreten können.

Zum Schutz der Küste sollen die Entnahmen in der Regel auf relativ eng begrenzte Zonen im Bereich der Schorre beschränkt werden (EISMA et al., 1979). In der niederländischen Wirtschaftszone dürfen Nordseesande daher ausschließend aus Wassertiefen über 20 m gefördert werden. Dabei sind Abbautiefen von 2 m nicht zu überschreiten (ICES, 1998).



Abb. 1: Unterschiedliche Entnahmemethoden der marinen Materialentnahme. A-Stechrohrbagger und B - Schleppkopfbagger.

Für die Entnahme von Sand und Kies kommen im Wesentlichen zwei Methoden in Frage: Stechrohrbaggern ("anchor hopper dredging") und Schleppkopfbaggern ("trailor suction hopper dredging"). Beim Stechrohrbaggern wird das Schiff über der Lagerstätte verankert. Über ein Saugrohr wird das Material von einer eng begrenzten Stelle gefördert, so dass Trichter entstehen, die oft mehrere Meter tief sind. Beim Schleppkopfbaggern wird dagegen während der Fahrt durch ein geschlepptes Saugrohr gefördert. Dabei entstehen Furchen von einigen Dezimeter Tiefe und einigen hundert Meter Länge. Zwischen den Furchen bleiben Rippen stehen, die eine rasche Wiederbesiedlung des betroffenen Gebietes ermöglichen sollen, da die Fauna in den Rippen unangetastet bleibt.

Der Begriff "Regenerierung" trifft vor allem auf die Wiederbesiedlung der gestörten Flächen zu. Die sedimentologische Entwicklung nach einer Entnahme wird im Allgemeinen eine mehr oder weniger vollständige Wiederverfüllung ausmachen. Dabei wird der Ausgangszustand nicht wieder erreicht, denn das Material, das sich in den Strukturen ansammelt, wird in der Regel feiner sein als das entnommene Sediment (ICES, 1992). Aus sedimentologischer Sicht handelt es sich eher um eine Veränderung nach der Materialentnahme als um eine Regenerierung.

2. Zielsetzung

Die Auswirkungen des Abbaus mariner Sande und Kiese und die Prozesse bei einer möglichen Regenerierung der Materialentnahmestellen sind nicht hinreichend bekannt. Im Rahmen des auf drei Jahre befristeten Forschungsvorhabens "Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee" sollten sedimentologische Prozesse bei der natürlichen Wiederverfüllung von Materialentnahmestellen in von der Tide beeinflussten und nicht beeinflussten Meeresgebieten (Nord- und Ostsee) vergleichend untersucht werden. Den möglichen Wechselwirkungen zwischen Hydro-, Sediment- und Morphodynamik sollte in diesem Rahmen besondere Beachtung beigemessen werden. Dabei standen folgende Fragestellungen standen im Mittelpunkt des Interesses:

- Wie laufen mögliche Wiederverfüllungs- und Regenerierungsprozesse ab?
- Welche Zeiträume sind für die Regenerierung anzusetzen?
- Welche räumliche Ausdehnung haben die durch die Materialentnahme beeinflussten Flächen?
- Welcher Einfluss der Materialentnahme besteht auf natürliche Sedimenttransportsysteme?

3. Allgemeine Beschreibung der Untersuchungsgebiete

In der Nordsee wurden die Untersuchungsgebiete "Westerland II" und im Hohen Watt bei Pellworm ausgewählt, in der Ostsee die Entnahmegebiete "Graal-Müritz 1" und in der Tromper Wiek, um die Auswirkungen der Entnahme unter verschiedenen geologischen und hydrographischen Bedingungen sowie die Entnahme mit unterschiedlichen Methoden vergleichend beurteilen zu können (Abb. 2). Alle Gebiete liegen relativ küstennah zwischen 0,5 und 7 km von der Küste entfernt. Eine detaillierte Beschreibung ist in Tab. 1 zusammengestellt.

Im Feld "Westerland II", im Hohen Watt bei Pellworm und im Kiesentnahmegebiet "Tromper Wiek I" wurde mit Stechrohrbaggern gefördert. Dabei entstanden Trichter bis 13 m Tiefe unter Meeresboden. In den Gebieten "Tromper Wiek I" und "Tromper Wiek II" werden Kiessande gefördert. Das Material wird an Bord der Baggerschiffe sofort nach der Entnahme gesiebt, und die Fraktion <2 mm (Sand, Schluff, Ton) wird an Ort und Stelle wieder verklappt.



Abb. 2: Lage der Untersuchungsgebiete

Tabelle 1: Übersicht über die charakteristischen Parameter der einzelnen Untersuchungsgebiete

•

.

.

	Westerland II	Pellworm	Graal-Müritz	
Entnahmemethode	Stechrohrbagger	Stechrohrbagger	Schleppkopfbagger	
Art der Entnahmespuren Tiefe und Durchmesser	Trichter bis 10 m, 100 - 800 m	Trichter 13 m, 200 x 300 m	Rinnen 0,5 - 1 m	
Gesamtfläche	14,5 km ²	ca. 0,5 km ²	8,2 km ²	
Von Entnahme betroffene Fläche (2001)	3,9 km²	54300 m ²	1,6 km²	
Material	Kaolinsand	Wattsand	Subrezenter Sand	
mittlere Mächtigkeit mobiler Sande	ca. 1 m (ZEILER et al., 2000)	10 - 15 m (Noммеnsen, 1982)	1,5 m (diese Arbeit)	
Bewuchs	keiner	keiner	keiner bzw. Algen (Seegras?)	
Tidenhub	ca. 1,8 m	ca. 2,9 m	Wind kontrolliert Wasserstand	
Windwirkstrecke	mind. 600 km	max. 17 km	max. 160 km	
Wassertiefe	13,5 - 15 m	0,85 -2 m unter NN	7 - 12 m unter NN	
Entfernung von der Küste (Richtung)	7 km (WSW)	500 m (E)	2,8 km (NW)	
Exposition	N-W-S	N-E-S	NNE-W-SSW	
Hauptströmungsrichtung	S-N	S/N	SW-NE	
Indizien für Sedimenttransport	(geringe) Verfüllung	Verfüllung	Einebnung der Furchen	

	Tromper Wiek 1	Tromper Wiek 3	Tromper Wiek Ost
Entnahmemethode	Stechrohrbagger	Stechrohrbagger	Schleppkopfbagger
Art der Entnahmespuren Tiefe und Durchmesser	Trichter bis 6 m, 5 - 50 m	Furchen	Rinnen bis 10 m breit
Gesamtfläche	ca. 2,5 km²	ca. 1,5 km ²	ca. 2,8 km ²
Von Entnahme betroffene Fläche (2001)	ca. 0,4 km ²	ca. 0,4 km ²	-
Material	spätglazialer Kiessand	spätglazialer Kiessand	Spätglazialer Sand
mittlere Mächtigkeit mobiler Sande	nur verklappter Sand	nur verklappter Sand	bis 15 m Lемке (1998)
Bewuchs	Mytilus, Seegras	Mytilus, Seegras	-
Tidenhub	Wind kontrolliert Wasserstand	Wind kontrolliert Wasserstand	Wind kontrolliert Wasserstand
Windwirkstrecke	ca. 90 km (Mohrholz, 1998)	ca. 90 km (Mohrholz, 1998)	ca. 90 km (Mohrholz, 1998)
Wassertiefe	9-15 m unter NN	flacher als 10 m u. NN	14 - 21 m unter NN
Entfernung von der Küste (Richtung)	1,4 – 2,8 km (SE-E)	1,3 - 3 (SE-E)	2,2 - 3,8 km (SE-E)
Exposition	NE-E-ESE	NE-E-ESE	NE-E-ESE
Hauptströmungsrichtung		-	-
Indizien für Sedimenttransport	Tracerversuche, Sortierung	Tracerversuche, Sortierung	-

4. Methoden

Eine detaillierte Zusammenstellung der verwendeten Methoden und Geräte findet sich im Anhang A1. Die Positionen der Probe- und Messstationen sind in Anhang A2 zusammengestellt.

4.1 Positionierung und Vermessung

Die Positionen für die Echolotvermessung, Seitensichtsonar, Seismik und Sedimentbeprobung wurden mit Hilfe eines DGPS (Differential Global Positioning System) bestimmt, als Referenzstationen wurden Helgoland bzw. Wustrow genutzt. Der maximale Positionierungsfehler beträgt ca. 5 m. Die Beschickung auf NN erfolgte mit Daten vom jeweils nächstgelegen Pegel.

4.2 Seitensichtsonar

Zur flächendeckenden Aufnahme des Meeresbodens im Bereich der Entnahmestellen sowie zur Identifikation von möglichen Veränderungen der Sedimentverteilungsmuster wurden hochauflösende Seitensichtsonar-Geräte eingesetzt. Zur digitalen Aufzeichnung und Weiterverarbeitung der Daten wurde die Software ISIS SONAR und DELPH MAP (Triton Elics) benutzt.

4.3 Flachseismik

Mit flachseismischen Methoden wurde der geologische Aufbau und die Lagerungsverhältnisse der Meeresbodensedimente auf Profilen im Bereich der Lagerstätten untersucht. Die Rohdaten wurden digital und graphisch aufgezeichnet. Die Lithologie der einzelnen Schichten aus den seismischen Daten wurde anhand von Sedimentkernen überprüft.

4.4 Hydrographie

Für die Strömungsmessungen wurden akustische (RCM9, ADCP) und mechanische (RCM7) Strömungsmesser eingesetzt. Die Genauigkeit der Strömungsmessungen liegt im Bereich von 1 cm/s. Neben der Strömung wurden von den Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) auch die Intensität der reflektierten Signale (Echointensitäten, EI). In Oberflächennähe wird eine Zunahme der EI primär durch vom Seegang induzierte Luftblasen verursacht, im bodennahen Bereich durch die Mobilisation und/oder Advektion von suspendiertem partikulären Material.

Im Rahmen der zweiten Messkampagne (August bis November 2000) wurde ein S4ADW-Strömungs- und Seegangsmessgerät ausgebracht, das auch die Seegangsrichtung erfasst. Der S4ADW registrierte die mittlere die Strömung mit einem Messintervall von 10 Minuten. Zusätzlich führte er alle 4 Stunden ein 10-minütiges burst-sampling mit einer Frequenz von 2 Hz zur Erfassung des Seegangs durch. Für Pegel- und Seegangsmessungen wurden WTR9 Wave (2 Hz) and Tide Recorder eingesetzt. Die Genauigkeit der Druckmessungen liegt im Bereich von 1 cm. Das Messintervall betrug für alle Strömungsmessungen 10 Minuten und für die WTR9-Seegangsmesungen 30 Minuten.

In der Tromper Wiek wurde von März 2000 bis Ende Juni 2001 eine direktionale WAVEC Seegangsboje ausgelegt, um das von der offenen See in die Tromper Wiek einlaufende Seegangsfeld zu erfassen. Die Boje führte einmal pro Stunde eine 20-minütige Messung durch und übertrug die Daten anschließend per Funk an eine Empfangsstation auf Kap Arkona.

Sämtliche hydrographische Messdaten sind als BSH-Datenreport publiziert (KLEIN & MITTELSTAEDT, 2001).

4.5 Sedimentbeprobung

Die Oberflächensedimente wurden vom BSH jeweils im Frühjahr und Herbst, vom Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel (IfG) im Sommer und Winter beprobt, so dass sich eine vierteljährliche Probennahme ergab. Das BSH verwandte einen Kastengreifer und das IfG einem HELCOM-Backengreifer (Anhang A1). Gezielte Entnahme von Kurzkernen (Plexiglasrohre mit 8 cm Durchmesser und 1 m Länge) wurden von Forschungstauschern des IfG durchgeführt. Für die Gewinnung von bis zu 6 m langen Sedimentkerne wurden Vibrohammer-Kerngeräte eingesetzt.

4.6 Tracersande

Drei unterschiedliche fluoreszierende Tracersande wurden von Tauchern ausgebracht, um Transportwege und -richtungen im Bereich der Entnahmetrichter zu ermitteln. Zusätzlich wurde in den Entnahmetrichtern eine Lage Tracersand ausgebracht, um bei nachfolgenden Kernentnahmen anhand des Tracerhorizonts auf die Sedimentation seit dem Ausbringen der Farbsande zu schließen.

Proben aus den Kurzkernen wurden nach der Trockensiebung fraktionsweise auf den Gehalt an Tracersanden unter UV-Licht untersucht. Die Kornzahlen der unterschiedlich gefärbten Tracersande wurden ermittelt und jeweils auf 100 g Siebeinwaage (0.63 mm < Korndurchmesser d < 1,7 mm) bezogen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

4.7 Korngrößenanalyse

Die Sedimente wurden einer Trockensiebanalyse unterzogen. Die Siebung erfolgte in 0,25 ϕ° -Intervallen zwischen 63 bis max. 19.000 μ m.

Am BSH wurden Unterproben von ca. 40 bis 50 g Feuchtgewicht mit 1%er H₂O₂-Lösung versetzt, 5 min im Ultraschallbad dispergiert und über Nacht stehen gelassen. Am nächsten Tag wurde die Fraktion <63 μ m durch Nass-Sieben abgetrennt und zentrifugiert. Beide Fraktionen wurden anschließend in Porzellanschalen bei 105°C über Nacht getrocknet. Nach dem Wiegen beider Proben wurde die Fraktion >63 μ m 10 min lang mechanisch mit dem Siebsatz gesiebt.

Am IfG wurden die vom Feinkornanteil (<63 μ m) getrennten, entsalzenen und getrockneten Proben zunächst von Hand bis zu einer Maschenweite von 1,7 mm gesiebt. Die verbliebene Probe wurde mit einem Probenteiler nach Möglichkeit auf eine Siebeinwaage zwischen 80 g und 120 g reduziert. Die weitere Siebung erfolgte mechanisch. Die Siebdauer betrug für jeden Siebturm 10 min.

Trotz der unterschiedlichen Probenaufbereitung ist die Vergleichbarkeit der Siebergebnisse gewährleistet.

4.8 Analyse von organischen Schadstoffen, Karbonat und organischem Kohlenstoff

An Sedimentproben aus dem Gebiet "Westerland II" wurden die schwerflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) mittels Kappillar-Gaschromatographie mit folgender Elektroneneinfangdetektion (GC-ECD) analysiert. Die Konzentrationen Verbindungen wurden bestimmt: p,p'-DDD (DDDpp), p,p'-DDE (DDEpp), p,p'-DDT (DDTpp), Dieldrin (DIELD), Hexachlorbenzol (HCB), Alpha-Hexachlorcyclohexan (HCHA), Gamma-Hexachlorcyclohexan (HCHG), trans-Nonachlor (Nonci-tr), Oktachlorstyrol (OCS), 2,4,4'-Trichlorbiphenyl (CB28), 2,4',5-Trichlorbiphenyl (CB31), 2,2',5,5'-Trichlorbiphenyl (CB52), 2,2',4,5,5'-Pentachlorbiphenyl (CB101), 2,3,3',4,4'-Pentachlorbiphenyl (CB105), 2,3',4,4',5-Pentachlorbiphenyl (CB118), 2,2',3,4,4',5'-Hexachlorbiphenyl (CB138), 2,2',4,4',5,5'-12

Hexachlorbiphenyl (CB153), 2,3',3,4,4',5-Hexachlorbiphenyl (CB156),), 2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorbiphenyl (CB180).

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) wurden mit einem sog. Ion-Trap-GC-MS (Ionenfallen-Gaschromatograph-Massenpektrometer) gemessen. Es handelt sich um Acenaphten (Ace), Acenaphtylen (Acy), Benz-a-anthracen (BaA), Benz-a-pyren, Benz-bfluoranthen (Bbf), Bez-ghi-perylen (BghiP), Berz-k-fluoranthen (BkF), Chrysen (Chr), Dibenzah-anthracen (DbahA), Fluoranthen (Flu), Fluoren (Fl), Indeno-[1,2,3-cd]-pyren (I123P), Naphtalin (Naph), Phenanthren (Phen) und Pyren (Pyr).

Messungen des Karbonatgehaltes wurden an Kern- und Oberflächensedimenten aus der Tromper Wiek durchgeführt. Die Analysen erfolgten mittels der sog. "Karbonatbombe" (MÜLLER & GASTNER, 1971). Organischer Kohlenstoff wurde mit einem Elementaranalysator vario EL der Firma Elementar gemessen. Der anorganische Kohlenstoff, der im Sediment als Karbonat vorliegt, wurde vor der Analyse mit Hilfe von Salzsäure entfernt.

4.9 Datenauswertung

Tiefen- und Differenzkarten

Für die Vermessungsdaten wurden in SURFER experimentelle Variogramme berechnet und daran Variogrammfunktionen angepasst. Diese dienten der Kriging-Interpolation auf ein Raster mit 10 m Auflösung. Diese Tiefenkarten dienten als Grundlage für verschiedene Berechnungen in einem geographischen Informationssystem ("ArcView"), vor allem bei der Untersuchung der zeitlichen Tiefenveränderungen. Analog zu den Tiefenkarten wurden die Mächtigkeitskarten für Graal-Müritz erstellt.

Seismische Profile

Auf den seismischen Profilen vor Fischland-Darß wurden alle markanten Reflektoren mit Hilfe der Auswerte-Software des Messsystems angerissen. Zunächst ergibt sich dabei die Tiefe unter dem Meeresboden von ausgewählten Punkten auf den jeweiligen Reflektoren. Aus den beschickten Tiefendaten wurden die jeweils nächstgelegenen Punktpaare gemittelt und zur Tiefe des Reflektors unter dem Meeresboden addiert, wobei eine Schallgeschwindigkeit von 1600 m/s im Sediment zugrunde gelegt wurde.

5. Entnahmegebiet "Westerland II"

5.1 Einleitung

Das Entnahmegebiet "Westerland II" liegt 7 km westlich von Sylt und hat eine Fläche von 14,5 km² (Abb. 3). Die natürlichen Wassertiefen liegen zwischen 14 und 15 m unter NN, und der Meeresboden fällt nach W leicht ab. Im Gebiet "Westerland II" wird seit 1984 Sand gefördert, der an der Küste von Sylt vorgespült wird. Es handelt sich um jungpliozänen Kaolinsand, der relativ grobkörnig und deshalb gut für Vorspülungen geeignet ist. In Bohrungen wurde Kaolinsand bis zu einer Teufe von etwa 30 m unter einer geringmächtigen Auflage nachgewiesen. Diese besteht aus einer pleistozänen Wechsellagerung von grobem und überwiegend mittelsandigem Sediment, überlagert von marinen Feinsanden (THEILEN et al., 1994). Die Mächtigkeit dieser "Nordseesande" wurde von ZEILER et al. (2000) im Rahmen des KFKI-Projektes "Materialinventur an der deutschen Nordseeküste" auskartiert. Sie liegt im Untersuchungsgebiet in der Größenordnung von einem Meter.

Der Kaolinsand wird mit Stechkopfbaggern gefördert, wobei im nördlichen Teil eine große Vertiefung mit mehreren Becken entstand, die in W-E Richtung eine Breite von 1,6 km und in N-S eine maximale Breite von 1,8 km erreicht. Die Becken sind bis zu 10 m tiefer als der umliegende Meeresboden. Direkt nach der Entnahme 1991 war ein Trichter im nördlichen Becken lokal sogar bis zu 20 m tiefer (THIEL & REGIER, 1999).

Das großräumige Strömungsfeld westlich von Sylt wird besonders in Bodennähe von nordgerichteten Strömungen dominiert. Gezeitenströme alternieren zwischen südgerichteten Strömungen bei auflaufendem Wasser und nordgerichteten Strömungen bei ablaufendem Wasser (MITTELSTAEDT et al., 1983). Auch der Brandungsstrom von Sylt wechselt zwischen nördlichen und südlichen Richtungen (VOLLBRECHT & WÜNSCHE, 1979). An der Westküste von Sylt wurde bei der Aufspülung am Strand bei List beobachtet, dass bereits während der Spülarbeiten ein Teil der Sedimente küstenparallel nach Norden transportiert wurde (THIEL & REGIER, 1999). TINIAKOS (1978) gibt jedoch auch Hinweise auf küstennormalen Sedimenttransport in einem Arbeitsgebiet 8-14 km westlich von Sylt.



Abb. 3: Lage des Entnahmegebiets "Westerland II" mit Probenstation und Vermessungsprofilen (März 2001).

5.2 Datenbestand

Aus dem Entnahmegebiet "Westerland II" liegen Vermessungsdaten seit dem Beginn der Entnahme Ende der 1980er Jahre vor. Daher steht die Betrachtung langfristiger Veränderungen im Vordergrund dieses Untersuchungsgebiets. Seit dem Herbst 1998 fanden im halbjährlichen Abstand Wiederholungsvermessungen statt, so dass auch saisonale Effekte berücksichtigt werden können. Strömungsmessungen im größten Trichter wurden einmalig im Jahr 1993 durchgeführt.

Die Verteilung der Oberflächensedimente und die Morphologie des Meeresbodens wurde durch eine einmalige Seitensichtsonaraufzeichnung dokumentiert.

Zur sedimentologischen Charakterisierung des Sediments in einem Trichter ("Testtrichter") im mittleren Bereich des Untersuchungsgebietes wurde ein 3 m langer Kern abgeteuft; auf einem N-S und E-W-Profil wurden Oberflächenproben für Korngrößenanalysen genommen (Abb. 3). Zusätzlich wurden organische Schadstoffe in einer Schlickprobe aus einem Trichter analysiert, um Aussagen über die Herkunft des Materials zu erhalten.

Die Vermessungsdaten stammen größtenteils vom Amt für ländliche Räume (AIR) Husum. Sie wurden mit einem Vermessungslot bei 100 kHz aufgenommen. Die Beschickung erfolgte auf NN bezogen auf den Pegel "Messpfahl Westerland" ca. 2 km westlich von Sylt. Ausnahmen sind die Datensätze von 1993 und vom November 1998. 1993 wurde das Gebiet vom BSH mit einem Fächerlot (50 kHz) vermessen und auf SKN beschickt. Eine Umrechnung in NN wurde durch Addition von 1,15 m vorgenommen. Die Daten aus dem November wurden mit Pegeldaten der Druckdose W6 zwischen dem Messpfahl und dem Land beschickt, da der Pegel "Messpfahl" ausgefallen war.

5.3 Ergebnisse und Diskussion

Fehlerbetrachtung

Eindringtiefe der Vermessungslote

Die Daten sind mit verschiedenen Lottypen aufgenommen worden, die wegen unterschiedlicher Frequenzen nicht dieselbe Eindringung haben. Ein 100 oder 200 kHz-Lot ist empfindlicher, d.h. es registriert schon wässrige Schlickschichten, die vom 50 kHz-Lot nicht wahrgenommen werden. Deshalb könnten sich vor allem in Gebieten mit Schlickbedeckung beim 50 kHz-Lot um einige dm größere Wassertiefen ergeben. Dies betrifft jedoch nur den Datensatz vom Mai 1993.

• Beschickung

Das Untersuchungsgebiet liegt ca. 5 km vom nächsten Pegel (Messpfahl Westerland) entfernt. Abb. 4 zeigt, dass die Wassertiefen außerhalb der beckenartigen Entnahmetrichter systematisch um einen Mittelwert von 0,3 m streuen, der den Beschickungsfehler in diesem Seegebiet entspricht. Aus diesem grund wurden die Vermessungsdaten auf diese systematische Abweichung korrigiert.



Abb. 4: Abweichungen der beschickten Wassertiefen an ausgewählten Punkten außerhalb des Trichters ("Westerland II") vom Mittelwert (Zeitraum April 1999 - September 2001). Aus den Abweichungen wurde eine Korrektur abgeleitet, die den systematischen Beschickungsfehler minimiert

Morphologie

In Abb. 5 sind die Entnahmemengen und Zeitpunkte der Vermessungskampagnen dargestellt. Die Entnahme im Gebiet "Westerland II" begann Anfang der 1980er Jahre vor allem im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Die intensive Nutzung des südlichen Teils setzte ca. 10 Jahre später (Abb. 6). Die Vermessungsdaten zeigen deutliche Spuren der Entnahme in Form von Trichtern.

Nördlicher Entnahmetrichter

Die mittlere Wassertiefe im Bereich der nördlichen Trichter nimmt in Folge der Entnahme von 8,5 Mio. m³ im gesamten Gebiet von Oktober 1988 bis Mai 1993 um 2 m zu (Abb. 7a, b). Eine Zunahme der Wassertiefe von 1993 bis 1997 um 0,5 m wird von einer Periode gleichbleibender Tiefe bis 2001 abgelöst. Die schwächere Zunahme der Wassertiefe nach 1993 stimmt mit den geringeren Entnahmemengen im Zeitraum von 1993 bis 1997 (4 Mio. m³, davon ein unbekannter Anteil in Süden) und nach 1997 (2,4 Mio. m³, vermutlich der größte Teil im Süden) überein. Ein Hinweis auf eine selektive Verfüllung der Trichter von 1998 bis 1999 ist die signifikant abnehmende Maximaltiefe bei gleichzeitig fast konstant bleibender Minimaltiefe.

Südliche Entnahmetrichter

Die mittlere Wassertiefe im Bereich der südlichen Trichter (Abb. 7c, d) bleibt von 1987 bis 1999 im Fehlerbereich konstant, zeigt aber eine schwach zunehmende Tendenz. Der Datensatz von 1987 zeigt die Spuren einer flächenhaften Entnahme, während in den folgenden Jahren wie im nördlichen Gebiet Trichter entstanden. Deshalb nimmt die maximale Wassertiefe zwischen 1987 und 1995 um ca. 5 m und bis 1997 um einen weiteren Meter zu. Danach nimmt sie bis 1999 etwas ab. Im Winter 1998/1999 zeigt sich ein leichter Ausgleich des Reliefs in Form einer Zunahme der Minimaltiefe bei gleichzeitiger Abnahme der Maximaltiefe. Im Jahr 2000 wurde wieder verstärkt im südlichen Teil des Entnahmegebietes Sediment entnommen, was sich in der Zunahme der Maximaltiefe um fast 4 m äußert.



Abb. 5: Fördermengen (blaue Balken) und Vermessungsdatensätze (graue Linien) im Gebiet "Westerland II".

Im mittleren Bereich des Untersuchungsgebietes wurde für eine vergleichende Untersuchung der maximalen Wassertiefen ein einzelner Trichter ausgewählt, aus dem nach seiner Entstehung im August 1995 bis 2000 wahrscheinlich kein Material entnommen wurde. Der Trichter misst 260 m x 350 m und war im Jahr 2001 ca. 6 m tief. Im Jahr 2001 war die maximale Wassertiefe im Trichter etwa 0,5 m größer als im Jahr davor, weshalb eine erneute Entnahme nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Darum werden im Folgenden nur die knapp 5 Jahre von August 1995 bis Mai 2000 betrachtet. Der Trichter entstand im Juni oder Juli 1995 und hatte Anfang August 1995 eine maximale Tiefe von ca. 12,5 m unter dem umgebenden Meeresboden, der bei 15,5 m unter NN liegt. Seit dem September 1997 liegen Daten in digitaler Form vor. Zu diesem Zeitpunkt war der Trichter an seiner tiefsten Stelle noch ca. 7 m tief, im Mai 2000 etwa 5,5 m.



Abb. 6: Tiefenkarten aus dem Entnahmegebiet "Westerland II". Die Farbskala ist in Abb. 3 dargestellt.

.



Abb. 7: Minimale, mittlere und maximale Wassertiefe in m unter NN in ausgewählten Entnahmebecken, a) nördliches Gebiet, b) nördliches Gebiet korrigiert ab 04/99, c) südliches Gebiet, d) südliches Gebiet korrigiert ab 04/99.



Abb. 8: Sedimentationsraten im tiefsten Teil des Testtrichters auf der Basis der Vermessungsdaten. Zur Korrektur siehe Abb. 5.



Abb. 9: W-E-Profile von Mai 1993 bis 2000 durch den Testtrichter. Gestrichelte Linie zwischen 14 und 15 m = ursprünglicher Meeresboden (Mai 1993).

Um die Akkumulation während unterschiedlich langer Zeiträume miteinander vergleichen zu können, wurde die Akkumulation auf ein Jahr bezogen (Abb. 8 und Tab. 2). Diese Akkumulationsraten sind das Mittel über die Zeiträume zwischen den jeweiligen Vermessungen. Sie zeigen eine abnehmende Tendenz. Für die ersten beiden Jahre nach der Entnahme liegt die mittlere Akkumulationsrate im tiefsten Bereich des Trichters bei 2,5 m/Jahr und nimmt mit deutlichen Schwankungen auf wenige Dezimeter pro Jahr im Winter 1999/2000 ab. Die Verfüllung verlangsamt sich also prinzipiell, verläuft aber nicht kontinuierlich (Abb. 9). Der Winter 1998/99 zeichnet sich vermutlich infolge von Rutschungen durch eine markant erhöhte Sedimentationsrate aus, die auf den Einfluss der Winterstürme zurückgeführt wird. Die Sedimentationsrate wird in Zukunft aufgrund des größeren Durchmessers der Trichter abnehmen, so dass eine ungestörte natürliche Wiederverfüllung deutlich längere Zeiträume als ursprünglich angenommen in Anspruch nehmen. Sollte die kurzfristige Vertiefung des "Testtrichters" im Jahr 2001 natürliche Ursachen haben, könnte das auf noch längere Verfüllungszeiträume hindeuten.

Zeitraum	m	m/Jahr	m (korrigiert)	m/Jahr (korrigiert)	
08/95-09/97	5.4	2.6			
09/97-11/98	0.6	0.5			
11/98-04/99	0.9	2.2	1.0	2.5	
04/99-09/99	0.1	0.1	-0.3	-0.7	
09/99-05/00	0.0	0.0	0.2	0.3	
05/00-04/01	-0.8	-0.9	-0.5	-0.6	
04/01-09/01	0.3	0.8	-0.2	-0.4	

Tab. 2: Akkumulation im tiefsten Bereich des Testtrichters. Zur Korrektur siehe Abb. 5.

Eine Vermessung der Meeresbodenoberfläche aus dem Jahr 1988 zeigt im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes E-W streichende Sandrücken. Sie haben Kammabstände von 100 bis 200 m und sind ca. 1 m hoch. Ihre Lage stimmt mit den Ergebnissen aus Seitensichtsonar-Vermessungen überein. In diesem Gebiet entstanden später die größten Trichter. Während zwischen den Trichtern in den folgenden Jahren nur noch Reste dieser Sandrücken erhalten blieben, sind sie südlich davon auch später noch vorhanden (Abb. 10). Ihre Lage ist im gesamten Untersuchungszeitraum so gut wie stabil (Tab. 3). Die berechneten Änderungen liegen in derselben Größenordnung wie der Messfehler. Die Einzelwerte streuen sehr stark, wie die Standardabweichungen und die relative Standardabweichungen in Tab. 3 zeigen. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind die Strukturen komplizierter, erkennbar an sich kreuzenden Sandrücken (E-W bzw. NW-SE). Auch diese streichen 1987 E-W.1995 ist eine Drehung nach NW-SE zu beobachten, die sich 1998 und 1999 fortsetzt. Im Laufe des Jahres 1999 stellen sich die ursprünglichen Verhältnisse wieder ein, die auch im April 2000 noch vorherrschen. Auch diese Sandrücken weisen einen Abstand von ca. 200 m auf.



Abb. 10. Umlagerung der Sandrücken im Sommer 1999 im Entnahmegebiet "Westerland II" abgeleitet aus der Summe der Expositionskarten von März und September 1999.



Abb. 11: Differenzkarten über das Entnahmegebiet "Westerland II" für die Winter 1998/99 und 1999/2000. Blau = Erosion, rot = Akkumulation. Zur Korrektur siehe Abb. 5.



Abb. 12: Differenzkarten über das Entnahmegebiet "Westerland II" für die Sommer 1999 und 2001. Blau = Erosion, rot = Akkumulation. Zur Korrektur siehe Abb. 5.

Verfüllungsprozesse sind in erster Linie im Winter zu erwarten, weil das Entnahmegebiet in dieser Zeit nicht genutzt wird und in dieser Zeit häufiger Stürme auftreten, die Umlagerungsprozesse bewirken können. In Abb. 11 ist die Differenz der Wassertiefen vor und nach den Wintern 1998/99 und 1999/2000 dargestellt. Es zeigt sich prinzipiell Erosion an Trichterrändern und eine Akkumulation in den Trichtern, d.h. ein Ausgleich des Reliefs. Die Erosion der Trichterränder liegt im nördlichen Bereich für das Winterhalbjahr meist zwischen 0,5 und 1 m. Bei einer konstanten Sedimentationsrate entspräche das 1 bis 2 m im Jahr. Die Akkumulation in den Trichtern liegt in derselben Größenordnung. Im südlichen Teil des Gebietes ist sowohl Akkumulation als auch Erosion etwas stärker, sie liegt bei 0,5 bis 1,5 m für ein Winterhalbjahr (1 bis 3,5 m/Jahr) bei einem Fehler von max. 0,6 m in den Differenzkarten. Für den Winter 1998/1999 beträgt die Korrektur -0,1 m, so dass sich keine signifikante Veränderung gegenüber den unkorrigierten Daten ergibt. Bei der korrigierten Differenzkarte für den Winter 1999/2000 ist die Differenz durch die Korrektur um 0,2 m zur Akkumulation hin verschoben. Diese Karte zeigt deutlich Erosion an den östlichen Trichterrändern und Akkumulation sowohl in den Trichterzentren als auch in den westlichen und nördlichen Randbereichen. Bei den korrigierten Karten liegen Erosion und Akkumulation im Bereich von 0,5 - 1 m (1 bis 2 m/Jahr).

Tab. 3: Vei	rlagerung de	r Sandrücken	abgeleitet	aus der	Umlagerung	der von	292,5°	bis 22,5°
		(NW-	NE) expon	ierten H	änge.			

Zeitraum	Richtung	Anmerkung	Verlagerung (m)	Anzahl	Sigma	StdAbw (%)
09/97-11/98	S	nur N-Teil	24 ± 10	83	10	42
11/98-04/99	keine	nur N-Teil				
04/99-09/99	N		17 ± 10	95	10	61
11/98-09/99	N	nur N-Teil	14 ± 10	63	9	64
09/99-05/00	S		19 ± 10	98	8	43

In den Sommern 1999 und 2001 wurde im Süden des Untersuchungsgebietes Sand entnommen, was die Zunahme der Wassertiefe um bis zu 6 m in Abb. 12 deutlich macht. Ansonsten dominiert laut Originaldaten im gesamten Gebiet Akkumulation, besonders in den Trichtern, im Sommer 1999 vor allem an ihrem östlichen Rand. In den unkorrigierten Karten beträgt die maximale Akkumulation im Sommerhalbjahr 1999 um 1,5 m. Das entspricht bei konstanter Sedimentationsrate 3 bis 4 m im Jahr. Ein großer Teil der Akkumulation im Sommer ist auf den systematischen Beschickungsfehler zurückzuführen.

In beiden Sommern sind die Wassertiefen im Frühjahr zu hoch und im Herbst zu niedrig (Abb. 5), so dass sich eine scheinbare Akkumulation ergibt. Führt man eine Korrektur von 0,4 m im Sommer 1999 und 0,5 m im Sommer 2001 durch, zeigt sich außer der Entnahme nur noch eine Akkumulation von bis zu 3 m im Jahr. Im Sommer 1999 ist diese auf die östlichen Trichterränder konzentriert, nimmt sie im Sommer 2001 ab. Die größte Akkumulation findet im Sommer 2001 direkt neben den neu entstandenen Trichtern im Süden statt, die vermutlich auf Prozesse im Zusammenhang mit der Entnahme und durch Rutschungen oder Umlagerungsprozesse an den steilen Trichterrändern zurückzuführen sind.

Sedimente

An der westlichen Flanke des Testtrichters wurde im November 2000 ein 3 m langer Sedimentkern (VC 2050) entnommen (Abb. 3 und 13). Zum Zeitpunkt der Probennahme bestand der Trichter seit über fünf Jahren. Ein bis zwei Monate nach der Entnahme (August 1995) hatte die Wassertiefe an der Kernposition ca. 23 m unter NN betragen, im April 2001 lag sie bei etwa 20,5 m unter NN. Bei einem Kerngewinn von 3 m ist mithin davon auszugehen, dass das gesamte seit 1995 abgelagerte Füllmaterial enthalten ist.

Es handelt sich um eine Wechsellagerung von schlickigem und (fein-) sandigem Füllmaterial. In den unteren zwei Metern dominiert der Sandanteil, im oberen Meter der Schlick. Der Sand ist größtenteils Kaolinsand oder mariner Sand mit einem Anteil von Kaolinsand und weist dieselbe sedimentologische Zusammensetzung wie die Trichterflanken auf. Die Schlicklagen der unteren zwei Meter sind fest und dunkelgrau bis schwarz. Der scharfe Korngrößenwechsel ist ein eindeutiger Hinweis darauf, dass neben einer kontinuierlichen Schlicksedimentation bei ruhigeren Wetterlagen ereignisbezogener Eintrag von Sand stattfindet. Der schluffige Ton in der unteren Hälfte des Kern ist deutlich fester als im oberen Teil des Kerns.

Auffällig ist die feste Konsistenz der Schlicklagen. Es gibt zwei Möglichkeiten der Erklärung: Entweder ist der Schlick sehr schnell entwässert und kompaktiert worden, oder er wurde schon in festem Zustand als Klasten in den Trichter eingetragen. Im Falle einer *in situ-*Ablagerung sollte die Lagerung der Tonschichten weitgehend horizontal sein. Die auflagernden Sande sind so grob, dass eine Entwässerung durch ihren Porenraum möglich ist. Für einen allochthonen Ursprung der Tonlagen sprechen unebene Schichtflächen und eine Verzahnung ohne Vermischung mit den umgebenden Sanden. Ein mögliches Liefergebiet für Tonklasten ist bisher in diesem Seegebiet unbekannt. Die mineralogische und geochemische Zusammensetzung der Tone könnte Hinweise auf seine Herkunft geben. Es war im Rahmen des Projektes jedoch nicht möglich, diese Fragestellung vertiefend zu behandeln.



Abb. 13: Sedimentkern VC 2050 (November 2000). Die Position ist in Abb. 3 dargestellt.



Abb. 14: Kastengreiferproben (März 1999) im Entnahmegebiet "Westerland II". Für die Charakterisierung der Korngrößen wurde die Fraktion <63 μm herangezogen.

Die Verteilung der Oberflächensedimente wurde im April 2000 mit Hilfe von Kastengreiferproben an 30 Stationen dokumentiert. Die Stationen sind auf einem E-W- und auf einem N-S-Profil angeordnet (Abb. 14, 15). Die Kastengreiferproben enthielten meist Schlick oder Sand, im unteren Teil auch Kaolinsand. Wenn ein Kern unterschiedliche Sedimenteinheiten enthielt, wurde die Korngröße nur für die obere Einheit bestimmt.

Die Proben wurden in Wassertiefen von 15 bis 22,5 m entnommen. Das Niveau des ungestörten Meeresbodens liegt zwischen 14 m im Osten und 15,5 m im Westen. Die maximale Wassertiefe von 22,5 m wurde im nördlichsten Trichter erreicht. Abb. 16 zeigt, dass in den tieferen Bereichen der Trichter nicht nur Schlick akkumuliert, sondern auch sandiges Material angetroffen wird. Umgekehrt stammen jedoch alle Schlickproben aus Wassertiefen unter 18 m, 8 von 12 sogar unter 20 m.



Abb. 15: Tiefenlage der Oberflächenproben, die auf einem N-S und W-E-Profil angeordnet sind (vgl. Abb. 14). 100-fache Überhöhung.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die saisonalen Abbrüche im Bereich der Trichterränder eine Quelle für sandiges Füllmaterial bilden. Die Frage, inwieweit sandiges Füllmaterial aus dem weiterem Umfeld in die Trichter eingetragen werden, lässt sich nicht abschließend klären. Die Resultate liefern jedoch eine Reihe von Hinweisen, dass dieser Bereich kaum das Hauptliefergebiet darstellen kann. Die pendelförmigen Umlagerungen der Sandrücken sind Anzeichen dafür, dass in diesen Wassertiefen zumindest über den betrachteten Zeitraum kein nennenswerter Nettotransport aus morphologischer Sicht stattfindet. Die Sandrücken aus nordseezeitlichen Feinsanden pendeln als isolierte Sandkörper über gröbere ältere Sande (teilweise Kaolinsande) und sind eher ein Indikator für Sandbewegung bei zu geringem Sedimentangebot. Daraus ergibt sich der Schluss, dass der Sandeintrag aus einem lokal sehr eng begrenzten Bereich um die Trichter stammt, wobei in Abhängigkeit der hydrodynamischen Einflüsse im wesentlichen sandiges Material aus den östlichen Hangbereich durch Verflachung der Flanken eingetragen wird. Sandeintrag aus dem weiteren Umfeld tritt in den Hintergrund, was im wesentlichen zu niedrigen Verfüllungsraten führt.

Organisches Schadstoffspektrum als Hinweis auf den Ursprung des Schlicks

Um die Hypothese zu testen, dass der Schlick in den Trichtern aus der nordwärts strömenden Elbe-Schlickfahne gespeist wird, wurden geochemische Analysen von Schlick aus einem kurzen Kern durchgeführt. Der Kern wurde im April 2000 bei 22 m Wassertiefe im größten Trichter entnommen, und die untersuchte Schlickprobe stammt aus einer Sedimenttiefe von 30 bis 35 cm. Im Kern wird schwarzer Schlick von Mittelsand überlagert. Der Schlick hat eine TOC-Konzentration von 4,9 mg/g.

Das Sediment wurde auf insgesamt 34 Verbindungen analysiert. Es handelt sich dabei um schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Zum Vergleich wird in Abb. 16 die Zusammensetzung von Proben aus der Elbmündung und aus dem Watt ca. 120 km westlich von Sylt dargestellt. Die Verhältnisse der einzelnen Verbindungen zueinander spiegeln sich in der Darstellung durch verschiedene Muster wider. Vor allem nach der Normierung kann man erkennen, dass das Muster des Schlicks aus dem Trichter dem des Elbschlicks ähnelt, besonders für die PAKs. ein ähnliches Muster zeigen die schlickigen Sedimente aus dem Watt (THEOBALD, mündl. Mitt.). Daher kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob der Schlick auf Umwegen über die Watten in die Trichter gelangt ist oder direkt aus der Elbschlickfahne stammt. Es steht jedoch fest, dass die Elbe die ursprüngliche Quelle des Schlicks ist.

Die Vorstellung eines "Schlicksees" (REGIER & THIEL, 1999) muss insofern aufgegeben werden, weil es im oberflächennahen Bereich sehr wohl um weiche Sedimente handelt, die jedoch mit zunehmender Tiefe eine erstaunlich feste Konsistenz aufweisen.



Abb. 16: Spektrum der organischen Schadstoffe im Schlick aus dem Entnahmegebiet "Westerland II". Zum Vergleich sind die Verhältnisse im Schlick von der Station KS11 in der Elbmündung dargestellt. Die Kernposition im Trichter ist in Abb. 3 dargestellt.

Hydrographie

Strömungsmessungen aus dem Jahr 1993, deren Position in Abb. 3 dargestellt ist, ergaben keine signifikanten Unterschiede in der Richtung des Gezeitenstroms zwischen den einzelnen Positionen und Tiefen bzw. zwischen Spring- und Nipptide für den Messzeitraum von Mitte April bis Anfang Mai 1993. Flut- und Ebbstrom waren innerhalb des Trichters deutlich geringer als außerhalb. Der Geschwindigkeitsbetrag der Strömung beträgt in 1 m Bodenabstand bis zu 37 cm/s. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Morphologie im ehemaligen hydrographischen Messfeld durch die fortgeschrittenen Entnahmetätigkeit verändert hat.

Saisonale Prozesse bei der Verfüllung

Im November 1998 waren die Trichterränder nach der Entnahme relativ steil mit Neigungen bis zu 9%. Die Zunahme der Wassertiefe an den Trichterrändern im Winter ist deshalb eine Folge von Rutschungen. Die Abnahme der Wassertiefe im Sommer kann als Akkumulation bei ruhigen Verhältnissen interpretiert werden.

Daraus ergibt sich die Frage, in welchem Maße das Nachbrechen von steilen Trichterrändern und die Akkumulation von feinem Material unter ruhigen Verhältnissen für die Verfüllung der Trichter verantwortlich ist. Eine Abschätzung der Materialbilanzen in ausgewählten Trichtern und die Auswertung von Sedimentkernen kann Hinweise geben. Allerdings muss bei der Auswertung von Materialbilanzen der Beschickungs- und Positionsfehler berücksichtigt werden.

Für den Testtrichter und für die beiden nördlichen Trichter ist die Materialbilanz ausgeglichen. Das Gebiet für die Berechnung wurde begrenzt auf den Bereich, der deutliche Tiefenunterschiede zeigt. Bei beiden ergibt sich ein Mittelwert von 0,1 m/Jahr Erosion bzw. 0,1 m/Jahr Akkumulation bei Verwendung der korrigierten Daten. Die Werte maximaler Erosion und Akkumulation in und nordöstlich eines großen Trichters liegen in der gleichen Größenordnung, was auch auf eine ausgeglichene Materialbilanz hinweist. Für das Trichterfeld im Süden des Untersuchungsgebietes ist die Materialbilanz für den Winter 1998/99 leicht negativ (0,8 m/Jahr bzw. 0,6 m/Jahr Erosion).

Erosion findet vor allem entlang der östlichen Trichterränder statt. An den westlichen Trichterrändern herrscht größtenteils Akkumulation vor. Die höchsten Akkumulationsraten finden sich erwartungsgemäß in den Zentren der Trichter. Sie sind am höchsten in den Zentren derjenigen Trichter, die südwestlich oder westlich von Gebieten mit starker Erosion liegen. Dies deutet auf eine Materialumlagerung von den östlichen Trichterrändern in die Zentren der Trichter hin bei der ein Teil des Füllmaterials durch Rutschungen der Trichterränder geliefert wird. Für den südlichen Bereicht heißt dies, dass nicht alles abgetragene Material von den Trichtern aufgefangen wird.

Alternativ könnte die Vertiefung und Verflachung der Trichterränder im Winter und Sommer um jeweils 0,3 bis 1 m (zumindest teilweise) mit einem seitlichen Versatz der Datensätze durch den Positionierungsfehler von 5 m erklärt werden. Bei Steigungen zwischen 5 und 9% ergäbe sich dann durch einen seitlichen Versatz von 5 m eine Tiefenänderung zwischen ca. 0,5 und 1 m. Die Tatsache, dass die Berechnungen für beide Winter und Sommer ähnliche Veränderungen ergeben, spricht allerdings dagegen. Die Vermessungsdaten zeigen, dass die Trichter über Jahrzehnte stabil bleiben. Sie sind lagekonstant und verfüllen sich nur langsam. Die maximale Wassertiefe des Testtrichters, der nach vorliegender Datengrundlage fünf Jahre lang ungestört blieb, nahm innerhalb von fünf Jahren um ca. 7 m ab. Das entspricht einer durchschnittlichen Sedimentationsrate von 1,5 m/Jahr. Im sechsten Jahr vertiefte sich der Trichter wieder. Es ist unklar, ob dies ein natürlicher Vorgang oder durch erneute Entnahme bedingt ist. Bei ungestörten Verhältnissen ergäbe sich eine Akkumulationsrate von 1 m/Jahr. An den Trichterflanken sind die Akkumulationsraten geringer, wie sich an der Position des Kerns VC2050 zeigt. Dort beträgt sie ca. 0,3 m/Jahr, wobei die Akkumulationsrate jedoch nicht konstant ist. Sie ist direkt nach der Entnahme am stärksten und nimmt danach tendenziell ab. Im Untersuchungszeitraum war die Rate im Zentrum des Trichters im Winter 1998/1999 mit 2,5 m/Jahr besonders hoch.

5.4 Zusammenfassung "Westerland II"

Die Entnahmetrichter im Gebiet "Westerland II" haben über Jahrzehnte ihre Lage nicht verändert und verfüllen sich nur langsam. Vermessungsdaten erlauben quantitative Abschätzungen, die jedoch wegen der vielfältigen Fehlerquellen nur als Größenordnung verstanden werden sollten. Akkumulationsraten in einem ausgewählten Trichter schwanken zwischen 0,1 und maximal 2,6 m/Jahr, und der Mittelwert über die fünf Jahre nach der Entnahme liegt bei 1,5 m/Jahr. Die räumliche Verteilung von Akkumulation und Erosion liefert Hinweise auf Hangabtrag vor allem im Winter und Akkumulation in den Trichtern und an deren Hängen, letzteres vor allem im Sommer. Die Sandrücken, die in Vermessungsdaten und Seitensichtsonar dokumentiert wurden, scheinen nicht wesentlich zur Verfüllung der Trichter beizutragen, da sie zumindest im Untersuchungszeitraum nur unwesentlich umgelagert worden sind.

Die Annahme, dass das Füllmaterial in den Trichtern sich bei ruhigen Bedingungen kontinuierlich ablagert und bei stärkerem Energieeintrag auch von den Trichterrändern eingetragen wird, stimmt gut mit der beobachteten Wechsellagerung von Schlick und Sand überein. Im unteren Teil des Sedimentkerns aus dem Trichter ist der Schlick fester als im oberen Teil. Der Schlick im oberen Teil des Kerns stammt direkt oder indirekt aus der Elbe und ist belastet mit organischen Schadstoffen. Die Trichter wirken als Schlickfallen, da sie eine Verringerung der Strömung bewirken. Der Sand, zum großen Teil Kaolinsand, stammt vor allem aus dem direkten Trichterumfeld.
6. Entnahmegebiet "Hohes Watt bei Pellworm"

6.1 Einführung

Bei Pellworm wurde im Jahr 1994 als einmalige Maßnahme Sand für eine Deichverstärkung entnommen. Das Untersuchungsgebiet liegt 350 m östlich von Pellworm und hat eine Fläche von 0,34 km² (Abb. 17). Die natürlichen Wassertiefen im Gebiet liegen zwischen 0,85 und 2 m unter NN. Der mittlere Hochwasserstand (1994-1999) liegt bei 1,5 m über NN, der mittlere Niedrigwasserstand bei 0,45 m unter NN. Die Sedimententnahme erfolgte zwischen April und Juli 1994, insgesamt wurde ein Volumen von ca. 280.000 m³ entnommen.



Abb. 17: Lage des Entnahmegebietes im Hohen Watt bei Pellworm.

6.2 Datenbestand

Aus dem Entnahmegebiet Pellworm liegen fünf Vermessungsdatensätze vor (Anhang A2). Im November 1998 wurde ein größeres Gebiet mit geringerer Datendichte vermessen (Profilabstand 90 statt 50 m). Im November 2000 wurden von einem Ponton 5 Vibrokerne im Untersuchungsgebiet gewonnen (Abb. 18).

6.3 Ergebnisse und Diskussion

Morphologie

Vor der Materialentnahme zeigt sich in der Vermessung vom April 1994 in der Mitte des betrachteten Gebietes eine flache Mulde, die ca. 40 cm tiefer liegt als das umgebende Watt. Nach Osten nimmt die Wassertiefe zur Norderhever zu. Durch die Sedimententnahme im Sommer 1994 entstand ein Trichter mit einer maximalen Tiefe von 13,4 m unter dem ursprünglichen Meeresboden und einer Größe von ca. 200 m x 300 m. Dieser Trichter wies in seinem westlichen und nördlichen Teil die größten Tiefen auf. Dort betrug die Steigung der Trichterränder bis zu 30%. Bei einem mittleren Niedrigwasserstand von 1,45 m unter NN hatte der Trichter im gesamten Untersuchungszeitraum Wasserzufuhr über die Norderhever.

Ein Jahr nach der Entnahme war der Trichter noch 9 m tief, vier Jahre nach der Entnahme 1,7 m, und sechs Jahre später nur noch 0,9 m. Dabei spielt sicher die Tatsache eine Rolle, dass bei Niedrigwasser im Trichter nur eine schmale Verbindung nach Osten zur Norderhever bestand, so dass suspendiertes Material effektiv abgelagert werden konnte.



Abb. 18: Tiefenkarte des Entnahmetrichters östlich von Pellworm mit den Probenstationen.

In den Differenzkarten (Abb. 19) zeigt sich, dass bei der Entnahme an den Trichterrändern vor allem im Süden und Osten Sediment aufgehäuft wurde. Im folgenden Jahr entstand am steilen südlichen Rand des Trichters ein Materialdefizit, das auf eine Rutschung hindeutet. Außerdem wurden die Sedimentanhäufungen am Rand des Trichters in diesem Jahr teilweise abgetragen. Im Nordosten hat vermutlich zusätzlich eine Rutschung stattgefunden, die zu einem flacheren Hang führte. Im folgenden Zeitraum von mehr als drei Jahren (Mai 1995 - November 1998) zeigt sich rund um den Trichter bis auf den Nordosten ein Materialdefizit, d.h. das Relief glich sich weiter aus (Abb. 18). Vermutlich haben dazu mehrere kleinere Rutschungen beigetragen, ähnlich wie im ersten Jahr nach der Entnahme, nur dass sie hier nicht zeitlich aufgelöst werden können. In den letzten zwei Jahren (November 1998 bis 2000) dominiert die Akkumulation in der verbleibenden, jetzt relativ flachen Mulde, die zum Schluss fast völlig aufgefüllt ist (November 2000).



Abb. 19: Differenzkarten berechnet aus den Tiefenkarten in Abb. 18.

Es stellt sich die Frage, wie groß die Bedeutung der Rutschungen volumenmäßig ist. Um dies abzuschätzen, wurden Volumenbilanzen für den Bereich des Untersuchungsgebietes berechnet. Die randlichen Anhäufungen, die bei der Entnahme entstanden, machen etwa 5% des entnommenen Volumens aus. Das Materialdefizit im Randbereich des Trichters, das

wahrscheinlich größtenteils auf Rutschungen zurückzuführen ist, hat eine Größenordnung von 10% des Auffüllvolumens (Tab. 4).

Pellworm. Defizite in den Jahren nach der Entname entstanden durch Hangrutschunger	n.
eitraum Defizit Akkumulation Aufhäufung Rutschung Bilanz	

Tab. 4: Volumenänderungen berechnet aus den Vermessungsdaten im Entnahmegebiet

Zeitraum	Defizit	Akkumulation	Aufhäufung	Rutschung	Bilanz
	m	m ³	%	%	m³
04/94-07/94	-290263	14535	-5		-275728
07/94-07/95	-8283	119960		7	111677
07/95-11/98	-17817	159597		11	141779
11/98-11/00	-1322	16739		8	15417
insgesamt					-6855

Der größte Teil des Füllmaterials (innerhalb von 6 Jahren zu 98 Vol.-%) wurde aus entfernteren Bereichen in den Trichter eingetragen. Deshalb zeigt sich in den Profilen in Abb. 20 eine räumlich gleichmäßige Verfüllung des Trichters.

Im ersten Jahr nach der Entnahme herrscht im gesamten Vermessungsgebiet, das einen Umkreis von ca. 200 m um den Trichter abdeckt, Akkumulation von einigen Dezimetern vor. Nur im Randbereich (ca. 50 m) entstand das oben erwähnte Materialdefizit durch Rutschungen und Abtrag der entnahmebedingten Erhebungen. Vergleicht man die Vermessungen von 1995 und 1998, erkennt man Erosion in derselben Größenordnung. Im letzten Vermessungsjahr änderten sich die Wassertiefen außerhalb des Trichters kaum. Im Mittel ergibt sich zwischen 1994 und 2000 in einem Umkreis von ca. 200 m um den Entnahmetrichter nur in zwei Bereichen eine signifikante Änderung der Wassertiefe: Im Bereich des Trichters bestand bereits vor der Entnahme eine E-W-verlaufende Rinne. Im November 2000 war diese bis zu 0,5 m tiefer als vor der Entnahme. Außerdem zeigt sich nördlich des Trichters, am Rande des Ausläufers der Norderhever, eine Verflachung um ca. 0,4 m. Innerhalb von 6 Jahren hat sich also ein Relief eingestellt, das dem Ausgangszustand ähnlich ist.

Vermutlich wird das Akkumulationsgeschehen im Untersuchungsgebiet durch einen Wechsel von Erosion und Akkumulation abhängig von Gezeiten und Strömungen bestimmt. Bei Niedrigwasser hatte der Wasserkörper im Trichter nur eine schmale Verbindung, so dass unter ruhigen Bedingungen suspendiertes Material effektiv abgelagert werden konnte. Dabei spielt sicher die nähere Umgebung des Trichters eine Rolle als kurzfristige Sedimentquelle, die selbst wiederum aus weiter entfernt liegenden Gebieten genährt wird. Die ausgeglichene Materialbilanz in der näheren Umgebung des Trichters über den Untersuchungszeitraum zeigt, dass das Material im Trichter langfristig aus entfernteren (>200 m) Bereichen angeliefert wurde.



Abb. 20: Wassertiefen vor und nach der Entnahme auf einem N-S- und W-E-Profil durch den Trichter. Die Profile schneiden sich an der Kernstation 45.

Sedimentologische Zusammensetzung des Füllmaterials

Die Untersuchung der Sedimentkerne aus dem Gebiet können zur Klärung der Frage beitragen, woher das Material im Trichter stammt, und wie es eingetragen wurde. Allerdings war es bei der Probennahme nicht möglich, die gesamte, bis zu 12 m mächtige Verfüllung zu beproben, sondern nur die obersten 2 bis 4 m (Abb. 21).

Es wurden 5 Stationen zur Sedimentbeprobung ausgewählt, eine im Zentrum des Trichters (45), eine am östlichen Rand (44), zwei westlich außerhalb des Trichters (46, 48) und eine Referenzstation 200 m westlich vom Rand des Trichters (47) (Abb. 19). An Station 45 fand danach in allen Zeitintervallen Verfüllung statt, während die Tiefe an Station 44 relativ unverändert blieb. Letzteres gilt auch für die Stationen 46 und 48, die von der Entnahme nicht betroffen waren.

An der Referenzstation 47 wurden 4 m Feinsand und Schluff abgeteuft. Die obersten 0,35 m sind homogen feinsandig, während darunter bis 3,57 m eine Wechsellagerung aus Feinsand 38

und Schluff vorherrscht. Ab ca. 3 m unter der Sedimentoberfläche zeigen sich Ansätze von polyedrischem Gefüge, welches in den untersten 43 cm besonders deutlich ausgeprägt ist. *Abb. 21: Schematische Darstellung der Sedimentkerne aus dem Entnahmegebiet Hohes*



Watt bei Pellworm . Die Lage der Stationen ist in Abb. 18 dargestellt.

Station 48

Hier wurde ein Sedimentkern 1,8 m abgeteuft. Die obersten 0,73 m sind geschichtet (Sand -Schlick - Wechsellagerung im cm - mm Bereich, Muschel- und Hydrobienlagen). Darunter findet sich homogener, schluffiger Feinsand mit einer Schilllage bei 1,1 m.

Station 45 (Trichtermitte)

Im Trichter wurde ein 3,1 m langer Sedimentkern gewonnen. Bis 2,4 m herrscht eine Schluff - Feinsand - Wechsellagerung im mm - cm - Bereich (Flaserschichtung) vor, bis auf das weniger geschichtete Intervall von 1 bis 1,26 m. Unter 2,1 m beginnt das Gefüge polyedrisch zu werden. Ab 2,4 m zeigt sich ein stark polyedrisches Gefüge, und das Sediment hat teilweise extrem hohe Feinanteile.

Station 44 (Trichterrand)

Hier herrscht bioturbater, homogener Feinsand vor. Bei 1,05 m findet sich eine Schill- und bei 1,2 m eine Hydrobienlage. Darunter sind 30 cm im mm-Bereich geschichtet.

Stationen 48 und 44

In beiden Sedimentkernen lassen sich die Schilllagen korrelieren. Möglicherweise wurden sie durch das gleiche Ereignis hervorgerufen.

Im Referenzkern und im Bereich der Trichtermitte ist an der Basis ein nahezu polyedrisches Gefüge erkennbar. Beides spiegelt natürlich aufgewachsenes Watt wider. Während das bei dem Referenzkern 47 zu erwarten war, überrascht es bei Kern 45, da in der Trichtermitte das polyedrische Gefüge nur 3 m unter der Sedimentoberfläche angetroffen wird. Es muss zu einem Zeitpunkt entstanden oder eingetragen worden sein, als der Trichter schon zum größten Teil aufgefüllt war. Es ist unwahrscheinlich, dass dieses Gefüge in so kurzer Zeit und bei diesen Wassertiefen entstehen konnte. Vermutlich wurde dieses Material durch Rutschung eingetragen. Auch wenn Rutschungsmaterial nur einen kleinen Teil des aufgefüllten Volumens ausmacht, sind die Mächtigkeiten von solchem Material lokal groß, da die Verteilung des Rutschungsmaterials nicht gleichmäßig ist. Die oberen Schichten stellen frisch sedimentiertes Füllmaterial dar. Die wenig geschichteten Bereiche deuten eine rasche Verfüllung an. Nachdem das Relief nahezu vollständig ausgeglichen war, setzte eine langsamere Sedimentation ein, so dass es im oberen Bereich der Kerne wieder zu Schichtung kam.

Tab. 5. Änderung der Wassertiefe (m) an den Probestationen. Änderungen mit einem Betrag unter 0,4 m sind nicht signifikant. Die Werte für Station 44 haben einen höheren Fehler, da die Station am steilen Trichterrand liegt.

	44	45	46	48
Entnahme	-0,7	-13,4	0,1	0,1
94-95	0,1	4,5	0,2	0,2
95-98	0,1	8,1	-0,2	-0,3
98-00	-0,1	0,4	-0,1	0,0

Aus den Vermessungsdaten kann man schließen, dass das Sediment im Kern 45 etwa der Akkumulation der letzten drei Jahre vor der Beprobung entspricht, wovon allein die obersten 30 cm die letzten zwei Jahre ausmachen. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Sedimentationsrate von 15 cm/Jahr. An der Station 44 lassen die Vermessungsdaten keine klaren Aussagen über den Ablauf der Verfüllung zu. Der nächstgelegene Punkt auf den vermessenen Profilen liegt zwischen 5 und 20 m entfernt von der Station. Da der Hang hier einen Steigung von 19% bzw. 11° hat, entspricht das einer Tiefendifferenz von 1 bis 4 m. Die hier verwendeten Werte der Tiefendifferenz zwischen Vermessungsdatensätzen (Tab. 5) sind Mittelwerte von Punktdaten und interpolierten Werten und sollten als grobe Schätzwerte betrachtet werden. An dieser Station kam es nach der Entnahme einiger Dezimeter Sediment zu keiner signifikanten Änderung in der Wassertiefe. Dazu passt auch, dass sich eine Schillage mit einer ähnlichen Lage im Kern 48 westlich des Trichters korrelieren lässt. Dieser Kern enthält also wahrscheinlich kaum Füllmaterial.

6.4 Zusammenfassung Hohes Watt bei Pellworm

Das 13 m tiefe Loch, das bei einer einmaligen Entnahme von Sand 350 m östlich der Küste von Pellworm entstand, wurde innerhalb von 6 Jahren zu 98 Vol.-% verfüllt. Es gibt Hinweise auf Rutschungen von den Randbereichen, der größte Teil des Materials wurde jedoch von außen (>200 m Umkreis) in den Trichter eingetragen. Die Vermessungsdaten zeigen eine räumlich gleichmäßige Verfüllung mit sinkenden Akkumulationsraten.

7. Entnahmegebiet "Graal-Müritz 1"

7.1 Einleitung

Das Entnahmegebiet Graal-Müritz liegt ca. 3 km nordwestlich der Küste von Fischland-Darß bei Rostock in Wassertiefen von 7 bis 12 m (Abb. 22). Hier wird für Küstenschutzmaßnahmen Sand entnommen. Die Küste ist in dieser Gegend von Erosion betroffen, besonders deutlich am Heide- und Fischlandkliff südlich und nördlich des Entnahmegebietes. Die Sedimentverteilungskarte von TAUBER & LEMKE (1995) zeigt, dass am Meeresboden westlich von Fischland-Darß unterschiedliche Sedimente anstehen (Abb. 23). Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Geschiebernergel und spätglaziale bis frühholozäne limnische Sedimente, die größtenteils von marinen Sanden überlagert werden. Das Entnahmegebiet liegt in einem Bereich mit einer durchgehenden Sanddecke, der im Süden und Norden von zwei Geschiebernergelrücken im Anschluss an die Kliffs begrenzt wird.



Abb. 22: Lage des Entnahmegebiet Graal-Müritz 1 (schwarz) vor der Küste von Darß-Fischland mit Probestationen und Vermessungsprofilen.

Das Untersuchungsgebiet i.e.S. umfasst das Entnahmegebiet und seine direkte Umgebung (8,2 km²). Um die Veränderungen direkt im Entnahmegebiet im Zusammenhang mit dem langfristigen Sedimenttransport an der Küste von Fischland-Darß betrachten zu können, wurden die seismischen Messungen auf die gesamte Küste von Fischland-Darß bis in die Kadetrinne ausgedehnt.



Abb. 23: Sedimentverteilungskarte von TAUBER & LEMKE (1995) und Mächtigkeit der mobilen Sande auf den seismischen Profilen aus diesem Projekt.

Eine entscheidende Rolle als Transportkörper spielt das Riffsystem auf der Schorre, d.h. dem an den Strand grenzenden Küstensaum (UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN, 1997), der im Bereich vom Heidekliff ca. 500 m breit ist (TIEPOLT, 1998). Nach DETTE et al. (1999) reicht die aktive Zone in diesem Bereich bis in etwa 5 m Wassertiefe. Sedimenttransport in diesem Bereich erfolgt durch windinduzierte Brandungsströme, bei W- bis SW-Winden in nordöstlicher Richtung, bei N- bis NE-Winden nach SE. Im Zeitraum 1935-1985 lag die prozentuelle Häufigkeit des Windsektors 270°- 212.5° für Windgeschwindigkeiten >10 m/s bezogen auf die Summe maßgebender Windsektoren (67,5° bis 270°) bei 63%, es herrschte also eine NE-gerichtete Strömung vor (TIEPOLT, 1998). Für den Sedimenttransport und Kliffrückgang sind aber neben den mittleren Bedingungen auch Starkwindereignisse wichtig, die auch andere Richtungen aufweisen können (TIEPOLT & SCHUMANN, 1999).

Das Entnahmegebiet Graal-Müritz 1 wird seit 1988 genutzt (Abb. 24 und 25). Es muss von einer Gesamtmenge von mindestens 476.000 m³ bis einschließlich 1993 ausgegangen werden (Abb. 25). Seit 1994 erfolgt die Entnahme 1994 jedes Jahr in einem anderen Teilbereich des genehmigten Gebietes mit einem Saugbagger mit Schleppkopf. Dabei bilden sich ca. 1 m tiefe Rinnen, zwischen denen Rücken stehen bleiben. Die Teilbereiche werden möglichst mehrere Jahre nach einer Entnahme nicht mehr genutzt (STEPHAN, Fugro Consult, mündliche Mitteilung).

7.2 Datenbestand

Eine Übersicht des Datenbestandes ist in im Anhang A1 zusammengestellt. Abb. 25 zeigt die jährlichen Fördermengen (m³) von 1989 bis 200. In Abb. 25 sind die Teilgebiete im Entnahmegebiet "Graal-Müritz 1" zusammen mit einer Auflistung der verfügbaren Entnahmemengen dargestellt.



Abb. 24: Fördermengen (blaue Balken), Vermessungs- (graue Linien) und Seitensichtsonarbefahrungen (rot gestrichelte Linien) im Gebiet Graal-Müritz 1.



Abb. 25: Lage der Teilgebiete von Graal-Müritz 1, in denen von 1994 bis 2000 Sand gefördert wurde.

7.3 Ergebnisse und Diskussion

Morphologie

Drei Profile, die quer zur Küste durch das Entnahmegebiet im September 1999 und im September 2001 in Wassertiefen zwischen 7 und 13,5 m vermessen wurden, zeigen, dass das Relief in diesem Bereich sehr stabil ist. Die einzigen signifikanten Änderungen der Wassertiefe treten im Bereich der Sandentnahmen im Entnahmegebiet auf.



Abb. 26: Tiefenkarten (-m NN) aus dem Entnahmegebiet Graal-Müritz 1 von dem Zeitraum März 1999 bis September 2001.

Vier hochauflösende Vermessungen des Entnahmegebietes wurden von März 1999 bis September 2001 durchgeführt (Abb. 26). Die beiden Datensätze von 1999 (Frühjahr und Herbst) zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Wassertiefe. Das Entnahmegebiet liegt in Wassertiefen zwischen 6,4 und 12,4 m unter NN. Die Tiefe nimmt nach NW leicht zu. In der nordwestlichen Ecke des Gebietes befindet sich ein Absatz, an dem die Wassertiefe auf einer Strecke von 160 m von 8 auf 11,5 m abfällt. In der Mitte des Gebietes sind drei Vertiefungen zu erkennen, bei denen es sich dabei um natürlichen Schlformen handelt. Das Gebiet wird von großräumigen, E-W-streichenden Rücken durchzogen, die von N-Sgerichteten Sandrücken überlagert werden. Parallel zur südlichen Begrenzung des Entnahmegebietes verläuft eine Rinne.



Abb. 27: Differenzkarten aus dem Entnahmegebiet Graal-Müritz 1.

Die Entnahmen im Dezember 1999 und 2000 sind in den interpolierten Differenzkarten deutlich sichtbar. (Abb. 27). Im Dezember 1999 war das betroffenene Gebiet bis zu 0,9 m und im Mittel 0,37 m tiefer als bei der Vermessung vor der Entnahme im September 1999. Bei der Entnahme im Dezember 2000 waren im nördlichen Teilgebiet Vertiefungen bis zu 0,85 m (Mittel 0,35 m) und im südlichen Teilgebiet bis zu 0,9 m (Mittel 0,4 m) erkennbar. In diesen Karten mit 10 m Auflösung werden die einzelnen Entnahmerinnen, die etwa 1 m breit sind, nicht erfasst. Es können also nur großräumigere Unebenheiten erfasst werden, die durch unterschiedlich intensive Entnahme entstehen.

Die letzte Entnahme im Gebiet "Graal-Müritz 1" vor Beginn des Projektes wurde 1997 durchgeführt. Bei der ersten Seitensichtsonaraufnahme des gesamten Entnahmegebietes im März 1999 ließen sich nirgends deutliche Furchen von früheren Entnahmen erkennen. Im Süden des Gebietes, in dem 1994 bis 1996 Sand entnommen worden war, zeigten sich keine auffälligen Strukturen bis auf N-S streichende Rippeln mit 10 bis 20 m Kammabständen im äußersten Süden. Es ist unwahrscheinlich, dass von der mehr als 3 Jahre zurückliegende Entnahme herrühren, da ähnliche Strukturen auch außerhalb des Entnahmegebietes vorkommen und bis 2001 erhalten bleiben.



Abb. 28: Seitensichtsonaraufnahmen vom Entnahmegebiet Graal-Müritz 1 direkt nach den Entnahmen 1999 und 2000 sowie jeweils einige Monate später. Die breiten Streifen sind die einzelnen Profile.

Im Dezember 1999 und 2000 wurden 66 bzw. 22 Tage nach dem Ende der Baggerkampagne die Gebiete mit Seitensichtsonar untersucht. In diesen beiden Seitensichtsonaraufnahmen zeigen die betroffenen Gebiete deutliche Entnahmespuren (Abb. 28). 1999 wurde auf einer 784.000 m² großen Fläche 292.000 m³ Sand entnommen (d.h. 0,37 m), im Jahr 2000 0,32 m bzw. 0,39 m. Diese Werte liegen in derselben Größenordnung wie die aus den Differenzen der Vermessungsdatensätze.

Die Spuren vom Dezember 1999 waren im Mai 2000 nicht mehr sichtbar. Die Spuren im größeren Teilgebiet vom Dezember 2000 waren im Juni 2001 weitgehend eingeebnet, wenn auch nicht vollständig, und die aus dem kleineren Teilgebiet sind nach 6 Monaten zwar undeutlich, aber besser erhalten. Dieser Zustand blieb bis zum September 2001 stabil. Dies hängt vermutlich mit einer etwas intensiveren Entnahme in diesem Teilgebiet zusammen.

Sedimentologie

Die in diesem Projekt verwandten Methoden erlauben keine Aussage über das Material, mit dem sich die Rinnen füllen. Die Seitensichtsonaraufnahmen haben nicht die dafür notwendige Auflösung, und die Kastengreiferproben konnten nicht gezielt in Rinnen genommen werden. Seit 1998 führt Fugro Consult begleitend zu den Entnahmen Seitensichtsonarmessungen und Videoaufnahmen des Meeresbodens durch. In ehemaligen Entnahmegebiete werden wieder Rippeln und die vor dem Eingriff beobachtete Besiedlung (Epifauna) festgestellt. Im Seitensichtsonar sind jedoch auch dann noch die Spuren des Eingriffs erkennbar, die visuell mit Unterwasserkamera nicht mehr beobachtet werden können (STEPHAN, Fugro Consult, persönliche Mitteilung). Da beim Seitensichtsonar die Rückstreuung auch von Lagerungsdichte und Sedimentstruktur bestimmt wird, gibt dieses Verfahren Aufschluss darüber, dass das Füllmaterial in den Entnahmerinnen andere sedimentologische Eigenschaften als das umgebende Sediment hat.

An 20 Stationen ca. wurden im Entnahmegebiet etwa vierteljährlich Oberflächensedimentproben genommen (Abb. 22). Es handelt sich vorwiegend um Fein- und Mittelsande, die im Mittel nur 0,6% Schluff und Ton enthalten (Fraktion <63 μ m). Man findet in diesen Sanden Schill von marinen Mollusken wie Mya arenaria, Cerastoderma und Donax vittatus. Eine Farbgrenze zwischen 1 und 10 cm unter der Sedimentoberfläche lässt meist auf die Oxidationstiefe schließen. Die Videoaufnahmen während der Probennahme zeigten. dass an den meisten Stationen Rippeln ausgebildet waren. Außerdem waren oft Wurmbauten zu erkennen, die Bioturbation anzeigen.

Die Sonographien im Entnahmegebiet zeigen N-S orientierte, geschwungene Streifen gröberen Materials. Hierbei handelt es sich um die Täler von Sandrücken, die bis zu 2,7 m hoch sind und Kammabstände bis ca. 180 m haben. Die Sandkörper selbst bestehen aus Mittel- bis Feinsand. Im Bereich der Täler, die auch in den Vermessungsdaten deutlich als Mulden zu erkennen sind, tritt das unterliegende, gröbere Restsediment aus. An den Hängen dieser Mulden treten häufig Rippelfelder auf. Die Rippeln haben Abstände zwischen 2 und 5 m. Ihr Querschnitt ist überwiegend asymmetrisch, wobei die Ausrichtung der Leeseite

49

zwischen W und E alterniert. Größere Rücken (>1 m) sind jedoch überwiegend nach E ausgerichtet. Meist weisen die Rücken abgerundete Kämme auf, was auf eine längere Phase der Inaktivität hindeutet (WERNER & NEWTON, 1975). Sedimenttransport kann allerdings auch dann erfolgen, wenn die Lage der Sandrücken unverändert bleibt.



Abb. 29: Mächtigkeit der mobilen Sande über Geschiebemergel im Entnahmegebiet Graal-Müritz 1 im März 1999.

Im März 1999, März und August 2000 und im September 2001 wurden mit dem Chirp-Sonar Wiederholungsvermessungen auf 27 Profilen im Entnahmegebiet vorgenommen. Die Verteilung der Sande ist unregelmäßig (Abb. 29), im mittleren Bereich des Entnahmegebietes herrschen Mächtigkeiten bis 1,5 m vor, die eine maximale Höhe von 4 m erreichen können.

Die seismischen Profile bestätigen die Sedimentverteilung von TAUBER & LEMKE (1995), da in der Verlängerung der beiden Kliffs südlich und nördlich des Entnahmegebietes Geschiebemergel ansteht. Es wird außerdem deutlich, dass in diesen Hochlagen der pleistozänen Unterlage auch die spätpleistozänen und frühholozänen Sande anstehen. Sie unterscheiden sich von den marinen Sanden durch einen höheren Schluff- und Tongehalt. Diese Sande wurden unter anderen Umweltbedingungen abgelagert und von anderen Quellen gespeist als die rezenten marinen Sande. Die Hauptquelle der marinen Sande ist der Geschiebemergel, der an den Kliffs und am Meeresboden erodiert wird, aber auch die Flächen, an denen die älteren Feinsande am Meeresboden anstehen. Diese Sedimentquelle hat ein breites Korngrößenspektrum, die marinen Sande sind jedoch besser sortiert, was auf Umlagerungsprozesse hindeutet.

Aus Abb. 23 wird deutlich, dass die mobilen Sande unterhalb von 5-10 m Wassertiefe unregelmäßig verteilt sind. Die küstennormalen Geschiebemergelrücken sind größtenteils nicht von Sand bedeckt. Anders als in Strandnähe handelt es sich hier um kein durchgehendes küstenparalleles Sandtransportband. Das Material im Küstenvorfeld stammt aus den Steiluferabbrüchen und Rippströmen von der Küste. Die Umlagerung dieser Sande erfolgt vermutlich bei ruhigeren Wetterlagen vor allem im Küstenvorfeld.

Hydrographie

Die mittlere Strömungsrichtung betrug von März bis 2000 303° (NW). Die Geschwindigkeiten lagen zu 87% unter 12 m/s, maximal bei 30 m/s. Die stärkeren Strömungen waren fast immer nach NW gerichtet.

Die signifikante Wellenhöhe lag im Mittel bei 0,2 m; das Maximum betrug 1,3 m, zeitgleich mit hohen NW-gerichteten Strömungsgeschwindigkeiten hoch (bis 27 m/s). Ausgelöst wurde dieses Ereignis durch starken NE-Wind (bis 15 m/s), der insgesamt eher selten auftritt. Während des Messzeitraums fallen starke Strömungen und starker Seegang nicht unbedingt zusammen. Der Seegang ist eher bei auflandigen Winden und die Strömung eher bei ablandigen Winden erhöht (DWD-Winddaten Warnemünde).

Die mobilen Sande in der Entnahmestelle Graal-Müritz 1 haben mittlere Korngrößen von 150 bis 700 µm. Für den Zeitraum vom Ende März bis Anfang Juni 2000 liegen Seegangsmessungen aus dem Untersuchungsgebiet aus denen vor. die Orbitalgeschwindigkeiten am Boden berechnet wurden. Die signifikante Wellenhöhe korreliert sehr gut mit der Orbitalgeschwindigkeit (r = 0,97). Es wurde die Regressionskurve um = 0.0056 + 0,18 h + 0,125 h² berechnet, wobei um die maximale Orbitalgeschwindigkeit am Boden und h die signifikante Wellenhöhe (m) bezeichnen. Als Ergänzung zu diesen Daten wurden Winddaten des DWD herangezogen, die für die gesamte Dauer des Projektes vorliegen (Abb. 30). Die Geschwindigkeit von Winden aus 270-45° (Exposition der Küste) korreliert ebenfalls gut mit der Wellenhöhe (r = 0,81). Hier gilt h = 0,095 - 0,0083 v + 0,0055V², mit ۷ = Windgeschwindigkeit (m/s). Um abzuschätzen. ab welchen

Windgeschwindigkeiten der Sand im Entnahmegebiet mobilisiert wird, wurde die Gleichung von DINGLER & INMAN (1977) herangezogen.

Danach beginnt die Mobilisierung der 150 μ m-Fraktion etwa bei einer Orbitalgeschwindigkeit von 0,13 m/s und einer Wellenperiode von 4 s. Das entspricht den Regressionskurven zufolge einer Wellenhöhe von 0,6 m, die bei 10 m/s erreicht wird, wie z.B. am 05. und 07.04.2000. In diesem Zeitraum herrschten Windgeschwindigkeiten von 10 bis 12 m/s aus nordwestlichen Richtungen. Derartige Windgeschwindigkeiten hatten im Projektzeitraum eine Häufigkeit von 6% und traten meist aus nordwestlicher Richtung auf.



■ Wind > 10 m/s ■ Wind > 13.5 m/s □ Wind > 15 m/s

Abb. 30: Anzahl der Stunden mit Windstärken über 10 m/s, 13,5 m/s und 15 m/s während des Projektzeitraumes 1999-2001. Die Zeiträume entsprechen denen zwischen den Seitensichtsonaraufnahmen.

Um alle Fraktionen der Sande in Bewegung zu setzen, werden Orbitalgeschwindigkeiten um 0,3 m/s benötigt, was einer Wellenhöhe von 1 m und einer Windstärke von 13,5 m/s entspricht. In den untersuchten 3 Monaten trat am 28.03.2000 ein solches Ereignis auf. An diesem Tagen herrschte eine Windgeschwindigkeit von 15 m/s aus 30°. In Einzelfällen können jedoch auch bei schwachem, ablandigem Wind hohe Orbitalgeschwindigkeiten am Boden erreicht werden, wenn der Seegang weiter draußen aufgebaut wird, wie z.B. während des Sturms "Ginger" am 29.05.2000. Trotzdem wurde für eine grobe Abschätzung angenommen, dass nur Windrichtungen von 270°-30° entscheidend sind, da die Küste in diese Richtung exponiert ist. Aus den Winddaten vom 01.03.1999 bis zum 01.09.2001 wurden die Ereignisse ermittelt, die Windgeschwindigkeiten über 13,5 m/s aus 270 bis 30°

aufweisen (ca. 3%). Dabei zeigte sich, dass Winde mit Geschwindigkeiten über 13,5 m/s in diesem Zeitraum immer aus diesen Richtungen kamen. Dieses Windfeld ist auch langfristig für Starkwinde typisch, wie der Vergleich mit einer längeren Zeitreihe von 1961 bis 1990 zeigt (BSH, 1996).

Bei auflandigen Winden ist der Seegang, bei ablandigen Winden die Strömung erhöht ist. Die stärksten Winde sind auflandig. Durch den Seegang wird Sediment aufgewirbelt, während ein lateraler Transport vor allem durch Strömungen erfolgt. Da die Entnahmerinnen nur etwa einen Meter breit sind, ist für deren Einebnung die Mobilisierung des direkt umgebenden Sedimentes durch Seegang ausreichend. Die Seitensichtsonarvermessungen haben gezeigt, dass die Entnahmestrukturen vom Dezember 1999 nach 5 Monaten vollständig eingeebnet waren, während die von Dezember 2000 nach 6 Monaten zwar undeutlicher, aber noch sichtbar waren. Das lässt sich mit dem verstärkten Auftreten von Starkwinden im Winter 1999/2000 und Frühjahr 2000 erklären (Abb. 30). Im übrigen Żeitraum herrschten durchschnittliche Windgeschwindigkeiten vor.

Die beobachteten Windstärken können als typisch angesehen die werden, da Windverhältnisse 1961 1990 vergleichbar von bis waren mit denen im Untersuchungszeitraum. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag in beiden Zeiträumen bei 4,7 m/s und es herrschten im Sommer westliche und im Winter südliche Windrichtungen vor (BSH, 1996). Die Einebnung der Rinnen vom Dezember 1999 erfolgte schneller als die vom Dezember 2000. Das lässt sich mit den mittleren Windgeschwindigkeiten im Winter 1999/2000 erklären, die höher liegen als das langjährige Mittel (5,4 bzw. 6,4 m/s). Auch im Sommer 2000 waren die Windgeschwindigkeiten höher (5,2 statt 4,6 m/s), nach der Entnahme im Dezember 2000 lagen sie jedoch unter dem Mittelwert (4,7 statt 5,5 m/s). Das zeigt, dass von einer Varianz der Windgeschwindigkeiten ausgegangen werden muss, die bewirkt, dass die Dauer der Einebnung zwischen einigen Monaten und etwa einem Jahr schwankt.

7.4 Zusammenfassung "Graal-Müritz 1"

Das Entnahmegebiet "Graal-Müritz 1" liegt seewärts der Tiefe, in der unter normalen Bedingungen Sedimentumlagerung stattfindet. Die natürliche Wassertiefe ist konstant. Die marinen Sande, die hier zu Küstenschutzzwecken gefördert werden, sind durchschnittlich etwa 1,5 m mächtig. Bei der Entnahme entstehen ca. 1 m breite und 0,5 m tiefe Rinnen, die abhängig vom Energieeintrag durch Wind, innerhalb eines halben bis einen Jahres

53

eingeebnet werden. Das Füllmaterial ist feinkörniger als das umgebende Sediment. Material, das dem Küstensedimenthaushalt entzogen wird, lagert sich vermutlich seewärts des Untersuchungsgebietes ab.

.

.

•

.

٠

8. Entnahmegebiet "Tromper Wiek"

8.1 Einleitung

Das Entnahmegebiet "Tromper Wiek Ost" befindet sich in Wassertiefen zwischen ca. 14 und 21 m unter NN (Abb. 31). Der Meeresboden ist in diesem Bereich relativ eben und fällt flach nach NE ab. Am Meeresboden streichen schluffige Feinsande des Baltischen Eisstausees aus. Das Entnahmegebiet "Tromper Wiek 1" befindet sich in Wassertiefen zwischen ca. 9 und 16 m unter NN. Es folgt in seinem Verlauf einer morphologischen Rückenstruktur, die vermutlich östlich von Kap Arkona ansetzt und bis dicht an die Küstenlinie der Schaabe heranzieht.



Abb. 31: Sedimentverteilungsmuster in der Tromper Wiek auf der Basis von Seitensichtsonar-Vermessungen.

Sedimentologisch ist diese Zone durch das Vorkommen von Kiesen gekennzeichnet (Abb. 31). Der geologische Aufbau der Tromper Wiek ist in SCHWARZER et al. (2000, 2002) und TRIESCHMANN (2000) eingehend beschrieben.

Anhand der ausgewerteten Seitensichtsonar-Aufnahmen konnten in der Tromper Wiek folgende Sedimenttypen unterschieden und ihre räumlichen Verteilungsmuster dargestellt werden:

Restsedimente,

die in Wassertiefen zwischen ca. 8 und 14 m unter NN großflächigen Kiesen vorgelagert sind.

Kiese,

die lokal auffällige morphologische Rücken bilden, welche Relikte des ehemaligen Strandwallsystems darstellen. Tauchbeobachtungen zeigen, dass diese z.T. von gut gerundeten Steinen bis 25 cm Durchmesser aufgebaut werden.

Feinsande,

die großflächig vor der Schaabe-Nehrung in Wassertiefen bis ca. 10 m unter NN und im zentralen Teil der Bucht in Wassertiefen unterhalb von 14 m unter NN treten auftreten und sich in zwei Typen differenzieren lassen:

- küstennaher Typ: bis zu über 90% aus Feinsand und nur geringe Beimengungen von Mittel- und Grobsand sowie Ton und Schluff,
- küstenferner Typ: mit zunehmender Küstenentfernung kontinuierlich steigenden Gehalt an Ton und Schluff.

Innerhalb der Feinsandflächen und in unmittelbarer Nähe zu den Kiesen treten in eng begrenzten Gebieten Grobsandstreifen auf. Die Streifen sind in der Regel einige Meter breit und mehrere Dekameter lang. Sie sind küstennormal orientiert und weisen Oszillationsrippeln auf, die meist senkrecht zur Längsrichtung der Grobsandstreifen streichen.

Wiederholte Vermessungen des Meeresbodens mit dem Seitensichtsonar im benachbarten Vorstrandbereich ergaben über den selben Untersuchungszeitraum eine hohe Stabilität der Sedimentverteilungsmuster im untersuchten Tiefenbereich zwischen 7 und 16 m (SCHWARZER et al., 1999).

Quantitative Untersuchungen zur Sedimentumlagerung im oberen Vorstrandbereich (2 bis 5 m unter NN) der Tromper Wiek seewärts der Sandriffzone zwischen März 1998 und März 1999 zeigen eine deutliche Zunahme der Umlagerungsintensität mit abnehmender Wassertiefe, die offensichtlich vom Prozess des Wellenbrechens kontrolliert wird, während

56

der Einfluss der bodennahen Orbitalgeschwindigkeiten von geringerer Bedeutung ist (SCHWARZER et al., 2002). Trotz relativ hoher Werte für den jährlichen Sedimentumsatz zwischen 18 cm und 55 cm blieb die geomorphologische Veränderung (charakterisiert durch die Sedimentbilanz) entlang des Profils über den Jahreszyklus gering: Integriert über die gesamte Wassertiefe von 2 bis 5 m unter NN war der Sedimentumsatz ca. zehnmal so hoch wie die Nettoänderungen (SCHWARZER & DIESING, 2001).

8.2 Datenbestand

Eine Übersicht des Datenbestandes ist in im Anhang A2 zusammengestellt. Abb. 32 zeigt die Lage der Vermessungsprofile sowie die Stationen für Sedimentbeprobung, Sedimentkerngewinnung und hydrographische Messungen.

8.3 Ergebnisse und Diskussion

Morphologie

Die deutlichsten Entnahmespuren zeigen sich im Süden von TW1. Hier findet man Trichter von 0,5 bis 5 m Tiefe, mit einer Ausdehnung von 15 bis 30 m. Im Entnahmegebiet TW3 zeigen sich Unebenheiten mit einer Tiefe von einigen Dezimetern und einer Breite bis ca. 10 m. Am westlichen Rand des Sandentnahmegebietes Tromper Wiek Ost ("TWO") zeigt sich eine ca. 3 m tiefe und 40 m breite Vertiefung bei 18 m Wassertiefe, die erst zwischen August 2000 und März 2001 entstanden ist.

Die Profillinien der Wiederholungsmessungen liegen im allgemeinen einige Meter (bis zu 15 m) voneinander entfernt. Deshalb wurden die Wassertiefen an den Kreuzungspunkten der Quer- und Längsprofilen verglichen, und sie stimmen im Rahmen des Vermessungsfehlers von ca. 10 cm gut überein.

Veränderungen in der Sedimentverteilung

Da für die kommerzielle Nutzung nur Korngrößen >2 mm Durchmesser von Interesse sind, werden die geförderten feineren Fraktionen nach dem sog. "Screening" als Spill wieder in die Wassersäule abgegeben. Die Feinfraktion <63 μ m (Ton und Schluff) kann dabei aufgrund ihrer geringen Sinkgeschwindigkeit je nach Strömungsverhältnissen lateral sehr weit transportiert werden. Dieser Prozess ist in Form von ausgeprägten Suspensionsfahnen hinter dem Baggerschiff sichtbar. Die Sandanteile des Spills sedimentieren dagegen sehr schnell, unterliegen aber auf dem Weg zum Meeresboden einer deutlichen Fraktionierung.



Abb. 32: Lage der Entnahmegebiete, Probe- und Messstationen sowie Vermessungsprofile in der Tromper Wiek.

Die gröbsten verklappten Fraktionen (Mittel- bis Grobsand) finden sich oft in eng umgrenzten Flächen am Seegrund wieder (Abb. 33). Dies deutet darauf hin, dass sie vom Ort der Eingabe in die Wassersäule sedimentieren, ohne sich weiter in der Fläche zu verbreiten. Feinsande bilden dagegen ausgedehntere Flächen auf dem Meeresboden. Aufgrund der geringeren Sinkgeschwindigkeit werden diese Partikel durch Strömungen weiter in der Umgebung verteilt. Die Feinsandflächen zeigen eine auffällige Konzentration am südöstlichen Rand des durch die Kiesentnahme beeinflussten Gebietes.



Abb. 33: Kiesentnahmestelle "Tromper Wiek 1": 1 - älterer Entnahmetrichter, 2 - jüngerer Entnahmetrichter. Helle Flächen = sandiges Substrat.

Alle Sandflächen weisen in den Sonographien Rippeln auf. Diese zeigen in der Regel lange, gerade Kämme mit Bifurkationen, was sie als Wellenrippeln ausweist. Die Kämme streichen durchschnittlich mit $146^{\circ} \pm 31^{\circ}$ bei Wassertiefen zwischen ca. 9,5 und 17 m unter NN. Unter Berücksichtigung der Küstenkonfiguration der Tromper Wiek impliziert dies eine Wellenanlaufrichtung von $56^{\circ} \pm 31^{\circ}$ (ENE). Das Vorhandensein von Wellenrippeln auf den Sandflächen zeigt, dass für alle vorhandenen Korngrößen mindestens einmal seit der Sedimentation als verklappter Sand die kritischen Bedingungen für den Bewegungsbeginn des vorhandenen Sedimentes durch Wellen oder Strömungen überschritten wurden.

Tromper Wiek 1

Die flächendeckende Sonographien zeigen zwei Bereiche der Kiesentnahme, die sich deutlich voneinander unterscheiden (Abb. 33). Im Südteil sind die Konturen sehr scharf und es treten klar definierte Flächen mit sedimentierten Spillsanden auf. Darüber hinaus zeigen die Entnahmetrichter oft einen V-förmigen Querschnitt. In der bathymetrischen Aufnahmen sind große Höhenunterschiede auf engem Raum zu erkennen.



Abb. 34: Veränderungen der Spillsandflächen zwischen Mai 2000 und Juni 2001.

Im Nordteil dagegen sind die Konturen weniger scharf, extreme Rückstreuungswerte treten weniger häufig auf und Flächen sedimentierter Spillsande sind undeutlich oder gar nicht vorhanden. Die Entnahmetrichter zeigen oftmals einen U-förmigen Querschnitt. Die Höhenunterschiede in den bathymetrischen Aufnahmen sind weniger ausgeprägt. All dies deutet darauf hin, dass die Entnahmespuren im Nordteil älter sind und aufgrund der wirkenden Wellen und Strömungen eine Umlagerung der Sedimente und teilweise Verfüllung der Entnahmetrichter eingesetzt hat.

Der Vergleich der zwischen August 1999 und Juni 2001 aufgenommenen Sonographien zeigt keine erkennbaren Veränderungen der Verfüllungsgrade der Entnahmetrichter im Gebiet der Kiesentnahme. Die Ursache liegt jedoch nicht allein in der fehlenden oder langsamen Verfüllung der Entnahmetrichter. Vielmehr können die tiefen Entnahmetrichter aufgrund von Abschattungseffekten mit der Seitensichtsonar-Technik oftmals nicht vollständig aufgenommen werden. Aus diesem Grunde sind detaillierte tauchergestützte Untersuchungen zur Sedimentation in den Entnahmetrichtern durchgeführt worden (s.u.).

Die Spillsandflächen zeigen hingegen auffällige Veränderungen (Abb. 34). Der Vergleich der Aufnahmen vom Mai 2000 und Juni 2001 lässt eine deutliche Abnahme der Flächengröße der verklappten Sande erkennen. Diese ist vor allem im N und im S der Spillsandfläche ausgeprägt. Während die Fläche im Mai 2000 ca. 81.000 m² betrug, war sie bis Juni 2001 um ein Drittel auf ca. 54.000 m² geschrumpft.

Tromper Wiek Ost

In diesen Sandentnahmegebiet waren die Entnahmespuren von 1989 (151.000 m³) zunächst auf den tiefsten Bereich im NE der ausgewiesenen Lagerstätte in Wassertiefen von ca. 20 m begrenzt (Abb. 35, 36). Die Abbautätigkeiten äußern sich durch gerade, langgestreckte Furchen am Meeresboden. Diese Furchen sind bis ca. 10 m breit und können eine Länge von einigen 100 m haben. Z.T. konnten in den Sonographien auffällige Kanten an den Furchenbegrenzungen beobachtet werden, meist sind die Furchen jedoch relativ flach. Die niedrigen Rückstreuungswerte innerhalb der Furchen, die in den Sonographien sichtbar sind, deuten auf eine teilweise Verfüllung mit relativ feinkörnigem Material (hohe Schluff-Ton-Gehalte) hin.

Die Spuren einer Entnahme vom Herbst 2000 (104.000 m³) sind im N der Lagerstätte entlang der westlichen Begrenzung erkennbar (Abb. 36). Es lassen sich mehrere dicht nebeneinander liegende, gerade, langgestreckte Furchen auf einer Länge von 1.200 m und einer Breite von 100 m ausmachen (Abb. 35).



Abb. 35: Sandentnahmestelle "Tromper Wiek Ost": Grobsande streichen entlang eines Unterwasserhanges in ca. 20 m Wassertiefe aus. 1 - Alte Entnahmespuren von 1989, 2 frische Entnahmespuren vom Herbst 2000.

Von der Sandlagerstätte "Tromper Wiek Ost" liegen vier Wiederholungsaufnahmen zwischen Dezember 1999 und Juni 2001 vor. Die durch die Abbautätigkeiten von 1989 verursachten Furchen reichen z.T. über das genehmigte Abbaugebiet nach N hinaus. Der Vergleich der sonographischen Mosaike von Dezember 1999 und Mai 2000 zeigt insbesondere im Zentralteil der Aufnahme einige Veränderungen (Abb. 37). Flächen mit feinem Sediment (niedrige Rückstreuung) zeigen an einigen Stellen ein laterales Wachstum auf Kosten von Flächen mit gröberen Sediment. Die vorhandenen Spuren der Sedimententnahme bleiben aber auch in der Aufnahme vom Mai 2000 deutlich erkennbar. In der Folgezeit sind bis Juni 2001 keine signifikanten Veränderungen an den durch die erste Sandentnahme verursachten Sedimentverteilungsmustern erkennbar.



Abb. 37: Sandentnahmestelle "Tromper Wiek Ost": 1 - Alte Entnahmespuren von 1989, 2 - frische Entnahmespuren vom Herbst 2000.

Sedimentationsprozesse in den Entnahmetrichtern

Da die Sedimentationsprozesse im Kiesentnahmegebiet "Tromper Wiek 1" und speziell in den Entnahmetrichtern mit den zur Verfügung stehenden hydroakustischen Methoden im Detail nicht auflösbar waren, erfolgten ab Dezember 2000 detaillierte tauchergestützte Untersuchungen. Diese umfassten zum einen die die Entnahmetrichter umgebenen Spillsande, die als potenzielles Ausgangsmaterial für die Verfüllung der Entnahmetrichter anzusehen sind, zum anderen wurde das Füllmaterial der Trichter untersucht. Insbesondere wurden im Juni 2001 in zwei ausgewählten Entnahmetrichtern jeweils drei Kurzkerne entnommen.



Abb. 37: Veränderungen der Sedimentverteilungsmuster zwischen Dezember 1999 und Mai 2000 im Bereich der Entnahmestelle "Tromper Wiek Ost".



Abb. 38: Lage der Beprobungsstationen und zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilungen im Bereich des älteren Entnahmetrichters.

Älterer Entnahmetrichter

Der Entnahmetrichter befindet sich bei ca. 54°38'16" N und 13°25'43" E in ca. 12 m Wassertiefe. Er ist ca. 30 m lang und 15 m breit, die Längsachse der Struktur ist NE-SWorientiert (Abb. 38). Der Entnahmetrichter befindet sich im Bereich der älteren Entnahmespuren und ist zwischen Dezember 1998 und August 1999 entstanden, so dass sein Alter zur Zeit der letzten Messkampagne im Juni 2001 zwischen 22 und 30 Monaten lag.

Tab. 6: Mittlere Karbonatgehalte in den Spillsanden und den natürlichenOberflächensedimenten (schluffige Feinsande) der Tromper Wiek.

	verklappter Sand jüngerer Trichter	verklappter Sand älterer Trichter	natürliche Oberflächen- sedimente
Probenanzahl	7	6	7
Mittelwert	16,2 Gew%	14,6 Gew%	1,4 Gew%
Standardabweichung	4,2 Gew%	3,9 Gew%	0,2 Gew%

Der Entnahmetrichter ist von Grobsanden (Spillmaterial) umgeben. Die Spillsande wurden von Tauchern an sieben Stationen (Station 9 - 15) dreimal zwischen Dezember 2000 und Juni 2001 beprobt. Anfang Februar 2001 wurden an drei Stationen unterschiedlich gefärbte Tracersande ausgebracht. Am Boden des Entnahmetrichters wurde eine Lage aus Tracersanden, die als Leithorizont für nachfolgende Kernentnahmen dienen sollte, flächendeckend ausgestreut.



Abb. 38: Zeitliche Veränderungen der durchschnittlichen Korngrößenverteilung der Spillsande im Bereich des älteren Entnahmetrichters.

An den Beprobungsstationen betrug die Mächtigkeit der Spillsande max. 20 cm. In Abb. 38 sind durchschnittliche Korngrößenverteilungskurven für die unterschiedlichen Beprobungszeitpunkte dargestellt. Es zeiat sich eine deutliche Tendenz zur Kornvergröberung über den 6-monatigen Untersuchungszeitraum. Diese Tendenz ist auch für die einzelnen Stationen erkennbar (Abb. 38). Auffällig ist weiterhin das fast völlige Fehlen von Fraktionen kleiner als 354 μ m (1,5 ϕ°). Der 1. Modus der Durchschnittskurven liegt bei ca. 758 μ m (0,4 ϕ °). Dies trifft auch für die überwiegende Zahl der Einzelkurven zu. Der Karbonatgehalt der Spillsande wurde an den Proben vom Juni 2001 gemessen und beträgt durchschnittlich 16.2 ± 4.2 Gew.-% (Tab. 6).



Abb. 39: Kern TW06/01-K1: A - Fotographie, B - Röntgenaufnahme, C - Karbonatgehalte, D -Korngrößenfraktionen, E – Korngrößenverteilungen (Zur Umrechnung von φ-Werten in μm siehe Abb.38).

Beim Füllmaterial im Trichter handelt es sich um einige Dezimeter von Grobsanden und Feinkies über Mittel- und Feinsand Die Korngrößenverteilungskurven zeigen eine ausgeprägte Polymodalität und ein breites Kornspektrum (geringe Sortierung, Abb. 39). Auffällig ist das ausgeprägte Vorkommen von zerriebenen Muschelschalen, die sich fein verteilt im Sediment finden. Dementsprechend sind die Karbonatgehalte mit ca. 20 Gew.-% relativ hoch. Es treten auch Horizonte mit starken Anreicherungen von ganzen Muschelschalen von Mytilus *sp.* auf. Auf den Spillsandflächen ausgebrachte Tracersande wurden nach 4,5 Monaten in geringer Zahl bis in ca. 30 cm Tiefe angetroffen. Dabei dominierten die grünen Sande, die südlich der Kernstationen ausgebracht worden waren.

Jüngerer Entnahmetrichter

Der Entnahmetrichter liegt bei ca. 54°37'45" N und 13°25'13" E in ca. 12 m Wassertiefe. Er hat einen Durchmesser von ca. 25 m und befindet sich im Bereich der jüngeren Entnahmespuren (Abb. 33). Entstanden ist diese Struktur zwischen August und Dezember 1999, so dass ihr Alter am Ende des Messzeitraums im Juni 2001 18 bis 22 Monate betrug.



Abb. 40: Lage der Beprobungsstationen und zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilungen im Bereich des jüngeren Entnahmetrichters. Zur Umrechnung von φ-Werten in μm siehe Abb.38.

Der Entnahmetrichter ist von Mittel- bis Feinsanden (Spillmaterial) umgeben. Die Spillsande wurden an acht Stationen dreimal zwischen Dezember 2000 und Juni 2001 beprobt (Abb. 40). Ende Januar 2001 wurden wie im älteren Trichter an drei Stationen unterschiedlich gefärbte Tracersande ausgebracht und zusätzlich dazu eine Schicht aus Tracersanden am 66

Boden des Entnahmetrichters, die als Leithorizont für nachfolgende Kernentnahmen dienen sollte.

An den Beprobungsstationen betrug die Mächtigkeit der Spillsande max. 22 cm. In Abb. 41 sind durchschnittliche Korngrößenverteilungskurven für die unterschiedlichen Beprobungszeitpunkte dargestellt. Eine deutliche Tendenz zur Kornvergröberung über den 6-monatigen Untersuchungszeitraum ist erkennbar. Während der Anteil der Korngrößen kleiner als 354 μ m (1,5 ϕ°) abnimmt, steigen die Anteile der Korngrößen von 420 μ m (1,25 ϕ°) bis 2 mm (-1 ϕ°) an.



Abb. 41: Zeitliche Veränderungen der durchschnittlichen Korngrößenverteilung der Spillsande im Bereich des jüngeren Entnahmetrichters.

Für die einzelnen Stationen zeigt sich derselbe Trend mit Ausnahme der Stationen 4 und 5. Diese beiden nordöstlich bzw. östlich der Entnahmetrichterstruktur gelegenen Stationen zeigen keine signifikanten Veränderungen. Der 1. Modus der Durchschnittskurven liegt bei ca. 379 μ m (1,4 ϕ°). Dies trifft auch für die meisten individuellen Verteilungskurven zu (Abb. 40). Die durchschnittlichen Karbonatgehalte, gemessen an den Proben vom Juni 2001, betragen 14,6 ± 3,9 Gew.-% (Tab. 6).

Drei Sedimentkerne aus dem jüngeren Trichter zeigen ähnliche Merkmale wie im älteren Trichter, nämlich schlechte Sortierung, Karbonatgehalte um 20 Gew.-% durch feinverteilte,

67

zerriebene Muschelschalen, Schillagen, und Tracersande bis ca. 30 bzw. 35 cm Sedimenttiefe. Auffällig ist jedoch ein fast völliges Fehlen von Fraktionen größer als 500 μ m (1 ϕ°). In einem Kern konnte bei 38 cm die im Januar 2001 am Grund des Entnahmetrichters ausgebrachte Tracerlage nachgewiesen werden. Vom Rande des Trichters sind rote und grüne Tracersande eingetragen worden, was auf Transport aus nördlichen bis östlichen Richtungen hindeutet.

Um die gesamte Abfolge des Füllmaterials zu dokumentieren, wurden im März 2000 und im September 2001 im jüngeren Trichter zwei lange Kerne abgeteuft. Die Kerne enthalten verschiedene Sandschichten über Geschiebemergel. Im älteren Kern VC2047 sind die Sandschichten insgesamt 270 cm mächtig, und im jüngeren Kern VC2060 364 cm (Abb. 42). Das unterste, 126 cm mächtige Sandpaket im Kern VC2047 weist von unten nach oben eine Kornverfeinerung auf. Darüber finden sich 53 cm Kiese und z.T. Steine in sandiger Matrix. Eine 69 cm mächtige Schicht von fein- und grobsandigem Mittelsand wird von 22 cm feinsandig-tonigem Schluff überlagert. Die sandigen und kiesigen Lagen weisen fein verteilte, zerriebene Muschelschalen auf. Im Kern VC2060, der 1,5 Jahre später genommen etwa an der gleichen Position genommen wurde (laut DGPS ca. 2 m neben VC2047), findet sich eine ähnliche Abfolge, die jedoch andere Mächtigkeitsverhältnisse aufweist (Abb. 43). Die unterste, 32 cm mächtige Schicht, besteht aus Mittel- bis Grobsanden. Darüber lagern 67 cm Fein- bis Mittelsande, an deren Obergrenze vereinzelt Kiese (bis 3 cm Durchmesser) auftreten. Mittel- bis Grobsande wiederum bilden darüber ein 118 cm mächtiges Paket. Die nachfolgende 17 cm mächtige Lage von tonigem Schluff lässt sich eventuell mit der obersten Schicht aus dem älteren Kern VC2047 korrelieren. Sie wird überlagert von 18 cm Mittelsand mit Kiesen bis 6 cm Durchmesser. Die oberste Schicht besteht aus 105 cm feinsandigen Mittelsande, die nach unten in schluffige Tone bzw. tonige Schluffe übergehen.

Sedimentationsraten

Kern VC2047 weist oberhalb des Tills 270 cm mächtige Verfüllungssedimente auf. Charakteristisch für das Material ist das Vorkommen von fein verteilten zerriebenen Muschelschalen. Der Kern wurde im März 2000, also nur 3 bis 7 Monate nach der Entstehung des jüngeren Entnahmetrichters entnommen. Das direkt über dem Till lagernde 126 cm mächtige Sedimentpaket mit gradierter Schichtung ist vermutlich auf die direkte Sedimentation von verklappten Material zurückzuführen.



Abb. 47: Sedimentkern VC2047 aus dem sog. "jüngeren" Entnahmetrichter kurz nach Entstehung der Struktur (März 2000).


Abb. 48: Sedimentkern VC2060 aus dem sog. "jüngeren" Entnahmetrichter 18 Monate nach der ersten Beprobung (September 2001) durch Vibrokern VC2047.

Es ist folglich unmittelbar nach der Entnahme im Trichter sedimentiert. Im selben Trichter wurde im September 2001 21 bis 25 Monate nach seiner Entstehung der Sedimentkern VC2060 entnommen, der Füllmaterial mit einer Mächtigkeit von 364 cm oberhalb des Tills aufweist.

Hieraus folgt, dass mehr als 1/4 der gesamten Verfüllung bis September 2001 bereits unmittelbar während des Entnahmevorgangs durch direkt in den Entnahmetrichter sedimentierten Spill zur Ablagerung kam. Bis März 2000 waren bereits ca. 2/3 der Mächtigkeit vom September 2001 erreicht. In den letzten 1,5 Jahren trug das sedimentierte Material nur noch etwa 1/3 zur Gesamtmächtigkeit bei. Geht man von einer natürlichen Sedimentation von 94 cm in 1,5 Jahren aus, ergibt sich eine mittlere Netto-Sedimentationsrate von ca. 60 cm/Jahr.

Anhand der Kurzkerne lassen sich weitere Angaben zur Geschwindigkeit der Sedimentation während des Untersuchungszeitraumes machen. Im Juni 2001 wurde die im Januar 2001 am Grund des Entnahmetrichters ausgebrachte Tracerlage bei 38 cm angetroffen. Diese Sedimentation erfolgte in einem Zeitraum von 136 Tagen, d.h. mit einer durchschnittlichen Rate von ca. 1 m/Jahr. In den anderen Kurzkernen konnte die Tracerlage zwar nicht identifiziert werden, doch lassen sich die auf den Spillsandflächen ausgebrachten Tracer bis in Tiefen von 31 bis 35 cm nachweisen. Somit ist von einer ähnlich hohen Sedimentationsrate auszugehen. Dabei lässt sich konstatieren, dass zwischen jüngerem und älterem Entnahmetrichter keine auffälligen Unterschiede in der Geschwindigkeit der Sedimentation vorhanden sind.

Es zeigt sich also zweierlei: eine Verlangsamung der Sedimentation und eine geringere Netto-Sedimentationsrate über längere Zeiträume. Die Verlangsamung hat vor allem zwei Gründe: Direkt nach der Entnahme werden Sande direkt im Trichter verklappt. Später nimmt aufgrund der trichterartigen Form der Entnahmestruktur die zu verfüllende Fläche nach oben hin zu. Somit erfolgt selbst bei konstanten zugeführten Sedimentvolumina eine Verlangsamung im Aufwachsgeschwindigkeit. Die geringere Netto-Sedimentationsrate über längere Zeiträume ist schwieriger zu erklären. Kompaktion spielt bei diesen sandigen Sedimenten vermutlich nur eine untergeordnete Rolle, deshalb muss die Möglichkeit von episodischem Sedimentverlust aus den Trichtern in Betracht gezogen werden. Die Echointensitätsmessungen in und über dem Testtrichter (s.u.) unterstützen diese These, allerdings ist unklar, ob nur Schlick oder auch Sand so weit aufgewirbelt wird, dass er aus dem Trichter herausgelangt.

71

Sedimentologische Variabilität außerhalb der Lagerstätten

Innerhalb der ausgewiesenen Entnahmegebiete "Tromper Wiek 1" und "Tromper Wiek Ost" sowie in einem Umkreis von ca. 2 km wurden Probestationen festgelegt, die im Verlauf des Projektes wiederholt beprobt wurden. Die Stationen wurden dabei so gewählt, dass aus dem Beprobungsbereich ebenfalls Sonographiedaten vorliegen. Dadurch kann beurteilt werden, ob die an einer Station ermittelten Unterschiede in den Korngrößenverteilungen möglicherweise auf kleinräumige Unterschiede im sedimentologischen Aufbau des Meeresbodens zurückzuführen sind, oder ob es sich um tatsächliche zeitliche Veränderungen in den Sedimentverteilungsmustern handelt.

Die zeitliche Variabilität der Korngrößenverteilungskurven für die untersuchten Stationen ist in Abb. 44 dargestellt. Die Stationen TW04, TW06, TW07, TW11 und TW12 weisen über den Juni 2001 Zeitraum Dezember 1999 bis nur geringe Variationen in den Korngrößenverteilungskurven auf. Eine Ausnahme bildet die letzte Beprobung an Station TW12. Die Probe vom Juni 2001 ist deutlich gröber als die vorherigen Proben. Hier wurde möglicherweise eine benachbarte Mittelsandfläche beprobt. Auch bei Station TW10 sind die relativ großen Unterschiede in den Sedimentverteilungen auf kleinräumige Unterschiede in den Sedimentverteilungsmustern zurückzuführen. Die Station liegt im Bereich des von der Sandentnahme im Jahr 1989 beeinflussten Meeresbodens, wo Mittel- bis Grobsande und mit feinkörnigen Material verfüllte Furchen auf engem Raum wechseln.

Bei Station TW03 muss dagegen von sedimentologischen Veränderungen ausgegangen werden. Dabei zeigt sich zwischen Dezember 1999 und Mai 2000 eine deutliche Vergröberung des Sediments, was sich in einem Anstieg des Modus bei ca. 268 μ m (1,9 ϕ°) und einer Abnahme der Modi bei ca. 129 μ m (2,95 ϕ°) und 82 μ m (3,6 ϕ°) äußert. Ein ähnlicher Trend zur Kornvergröberung zwischen Dezember 1999 und Mai 2000 ist auch bei allen anderen Stationen zu verzeichnen, wenn auch nicht mit dieser Deutlichkeit. In den darauffolgenden Monaten entwickelt sich die Korngrößenverteilung wieder in Richtung des Zustandes von Dezember 1999.



Abb. 44: Zeitliche Variabilität der Korngrößenverteilungen in der Umgebung der Entnahmestellen zwischen Dezember 1999 und Juni 2001. Die Positionen der Stationen sind in Abb. 45 dargestellt. Für die Korngrößenskala in µm siehe Abb. 41.



Abb. 45: Probestationen und Sonographie-Mosaik in der Tromper Wiek.

Strömungs- und Seegangsmessungen: 1. Kampagne, 20. März - 7. Juni 2000

In der Tromper Wiek wurden auf 6 Positionen Strömungs-, bzw. Seegangsmessungen durchgeführt: Mit den Stationen TW1 (WH-S, vertikale Auflösung 2 m), TW2 (RCM9) und TW3 (RCM9) sollte das generelle, windabhängige Zirkulationsmuster in der Tromper Wiek erfasst werden. Im Zentrum des jüngeren Entnahmetrichters (s.u.) wurde auf der Position TW4 ein Wattkorb mit einem RCM9 und einem WTR9 ausgebracht. Am oberen westlichen und östlichem Rand des Trichters wurde je eine Verankerung mit einem RCM7 ausgebracht (TW5, TW6). Der horizontale Abstand zwischen den drei Positionen betrug etwa 30 m.

Die Messungen zeigen, dass das Strömungsfeld in der Tromper Wiek zeitlich und räumlich sehr variabel ist. Es gibt keine typischen Strömungsmuster, die bestimmten Windlagen zugeordnet werden können. Die Messungen deuten häufig auf die Existenz von mesoskaligen Wirbeln, z.B. Leewirbel bei Kap Arkona, und auf Strömungsdivergenzen im Inneren der Tromper Wiek hin. Für eine eindeutige Auflösung der raum-zeitlichen Strukturen ist die Positionsdichte jedoch zu gering. Ein wesentliche Rolle spielt der durch Windstau beeinflusste Wasserstand in der Wiek, der zu bodennahen Kompensationsströmungen führen kann.

Der auf Position TW1 am äußeren Rand der Bucht eingesetzte ADCP erfasste die Strömungen in einem Bereich vom 3 bis 21 m über dem Boden. Hier wurden vertikale Richtungsscherungen von bis zu 180° beobachtet. Die mittleren Geschwindigkeitsbeträge nehmen mit zunehmender Tiefe vom 19 auf 7 cm/s ab.

Die Strömungsgeschwindigkeiten im UntersuchungsTrichter (TW4) erreichten selten Werte über 2 cm/s, der Maximalwert betrug 7,7 cm/s. Am Rande des Trichters, je 30 m vom Zentrum des Trichters entfernt (TW5 und TW6), betrugen die mittleren Geschwindigkeiten etwa 4 cm/s und die Maximalwerte 17 -18 cm/s. Auf allen drei Trichterstationen war die Strömungsrichtung sehr variabel mit einem nach Norden gerichteten Nettotransport.

Die signifikanten Wellenhöhen lagen im Messzeitraum im Mittel bei 0,33 m. Bei einem Sturm mit Wind bis zu 23 m/s aus östlicher Richtung am 28.03.2000 wurden Wellenhöhen bis 4,4 m erreicht.

Als der Wattkorb mit den Messinstrumenten nach 85 Tagen geborgen wurde, war er von einer festen Wechsellagerung von Schill und Sand bedeckt (Abb. 46). Bedenkt man, dass der Wattkorb beim Aussetzen maximal 20 cm einsinkt, ergibt sich eine Sedimentakkumulation von ca. 100 cm.



Abb. 46: Rekonstruierte Sedimentoberfläche ("bottom") zum Zeitpunkt des Aussetzens und bei der Bergung des Wattkorbes nach 85 Tagen.

Aus den geologischen Untersuchungen wurde deutlich, dass die Sedimentverteilung und Morphologie in der Bucht großräumig sehr stabil ist. Veränderungen konnten nur im Bereich der Entnahmetrichter beobachtet werden. Deshalb konzentrierten sich sowohl die sedimentologischen als auch die hydrographischen Untersuchungen in den folgenden Monaten auf zwei bzw. einen ausgewählten Trichter.

Strömungs- und Seegangsmessungen: 2. Kampagne, 29. August - 22. November 2000

Im Rahmen einer zweiten Messkampagne wurde am nordöstlichen oberen Trichterrand auf der Position TW7 ein Wattkorb mit einem S4ADW Strömungs- und Seegangsmessgerät (s.o.) abgesetzt. Die mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten entsprachen den im Frühjahr bei TW5 und TW6 gemessenen Werten. Die signifikante Wellenhöhe betrug im Mittel 0,43 m mit einer Standardabweichung von 0,35. Die maximale Wellenhöhe von 3 m wurde am 07.11.2000 erreicht.

Strömungs- und Seegangsmessungen: 3. Kampagne, 7. März - 30 Mai 2001

Für die dritte Messkampagne wurde im Inneren des Trichters (TW8) ein Wattkorb mit einem ADCP, einem akustischen RCM9-Strommesser und einem WTR9-Seegangspegel abgesetzt. Auf Grund von Batterieproblemen lief der RCM9 im Trichter nur bis zum 19. Mai. Um die bodennahe Strömung direkt am oberen Trichterrand zu erfassen, wurde dort ein auf einer Gehwegplatte monierter RCM9 mit Hilfe von Tauchern platziert (TW9). Dieses Gerät kippte am 19. März während eines Sturms mit Wellenhöhen von bis zu 4 m in den Trichter und konnte keine weiteren Daten aufzeichnen. Am Ende dieser Messkampagne (84 Tage) war der Wattkorb wieder mit 70 - 80 cm festem Sediment bedeckt, so dass der WTR9 letztlich völlig zusedimentiert wurde. Deshalb wurde etwa ab dem 13.05.2001 der Seegang nicht mehr korrekt registriert.

Im Frühjahr 2001 traten die stärksten Winde in der zweiten Märzhälfte auf. Am 20. März entstanden bei Ostwinden von bis zu 22 m/s Wellenhöhen bis zu 4,5 m, ähnlich wie im vorhergehenden Jahr. Die maximale Orbitalgeschwindigkeit am Boden betrug an diesem Tag 41 cm/s. Eine Woche später wurden bei ähnlichen Windgeschwindigkeiten 31 cm/s erreicht.



Abb. 47: Windstärke und -richtung, signifikante Wellenhöhe, Orbitalgeschwindigkeit am Boden, Echointensität und Strömungsgeschwindigkeit im Testtrichter während des Sturmes im Frühjahr 2001.

Im Inneren des Trichters waren die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich geringer und variabler in der Richtung als in der darüber liegenden Wassersäule (Abb. 51). Dies gilt insbesondere für die vektoriell gemittelten Geschwindigkeiten, die ein Maß für den Nettotransport darstellen. Die mittleren und maximalen Geschwindigkeitsbeträge erreichten 7,2 und 39 cm/s in 4 m Wassertiefe und 2,8 und 16 cm/s in 13 m Tiefe (ca. 4 m über Grund). Der direkt über dem Boden messende RCM9 (Bodenabstand < 0,5 m) erreicht wieder einen Mittelwert von 4,2 cm/s und Maximalgeschwindigkeiten von 32 cm/s, d.h., hier ist im Mittel eine deutliche Bodenintensivierung der Strömung zu beobachten.

Die drei Sturmereignisse zwischen dem 18. und 31. März 2001 führten zu einer erhöhten bodennahen Echointensität im Inneren des Trichters, die sich jedoch anschließend auf die gesamte Wassersäule ausdehnte (Abb. 47). Gleichzeitig nahm die El infolge des starken Seegangs durch den Eintrag von Luftblasen von der Oberfläche her nach unten hin zu. Die Zunahme der bodennahen El beruht auf der starken, seegangsinduzierten Orbitalbewegung, die lokales Sediment remobilisiert. Dieses Material wird durch bodennahe Turbulenz in Suspension gehalten und in höhere Wasserschichten transportiert. Oberhalb des Trichters konnte das suspendierte Material mit der Strömung lateral verfrachtet werden, während es im Trichter bei langsam abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten noch einige Tage in Suspension gehalten wurde. Zwischen dem 17. und 30. März 2001 betrug die vorherrschende Strömungsrichtung oberhalb des Trichters 120° bis 210° mit Geschwindigkeiten bis zu 21 cm/s. Es ist also anzunehmen, dass ein Teil des aufgewirbelten Sediments in südliche Richtungen transportiert wurde.

Die Echointensitäten korrelieren am besten mit der lokal gemessenen signifikanten Wellenhöhe (r bis 0,78). Korreliert man die Windgeschwindigkeit mit den Echointensitäten, so nimmt von 0,77 oben auf 0,50 unten ab. Beschränkt man sich auf Winddaten aus dem Sektor zwischen 0 und 90° (Nord- bis Ostwind von der offenen See), verbessert sich die Korrelation deutlich auf Werte zwischen 0,77 und 0,85. Die Windgeschwindigkeit aus diesem Sektor korreliert sehr gut mit der signifikanten Wellenhöhe (r= 0,90). Da der Seegang die Orbitalgeschwindigkeit am Boden und damit die Resuspension bestimmt, ist starker Wind aus nördlichen bis östlichen Richtungen die beste Voraussetzung für Sedimenttransport. Im Projektzeitraum wurden zwei Mal derartige Wetterlagen mit hydrographischen Messungen dokumentiert, im März 2000 und im März 2001. Im langjährigen Mittel beschränken sich starke östliche Winde auf den Zeitraum zwischen Februar und Mai (BSH 1996).

8.4 Zusammenfassung "Tromper Wiek"

Die Tromper Wiek ist eine in nordöstliche bis östliche Richtungen exponierte Bucht mit Wassertiefen bis zu 20 m unter SKN. Natürliche Sedimenterteilungsmuster sind über Jahre stabil. Bei der Entnahme von Kies werden durch die Verklappung der Fraktion <2 mm Spillsandflächen gebildet. Der Spillsand kann sich direkt in den Trichtern oder in deren Umgebung ablagern. Sortierungsprozesse, Tracerversuche und die Zusammensetzung des Füllmaterials, besonders der hohe Karbonatgehalt, zeigen, dass die Spillsande von diesen Flächen in die Trichter transportiert werden. Der Verfüllungsprozess ist nicht kontinuierlich und verlangsamt sich mit der Zeit. Da das Volumen der Spillsande begrenzt ist, ist keine vollständige Verfüllung zu erwarten. Es wird sich eine neues Gleichgewischt einstellen, wie in einem älteren Teil des Entnahmegebietes beobachtet. In den Resttrichtern sammelt sich Schlick. Da dieser Schlick Schadstoffe effektiv bindet, bilden die verbleibenden Strukturen potentielle Schadstofffallen.

9. Diskussion

9.1 Regenerierungsprozesse

Zunächst zeigen die Ergebnisse, dass die Entnahmestrukturen eine relativ deutliche Stabilität aufweisen, was die Lage und Morphologie von Trichtern, aber auch die flacheren Rinnenstrukturen in den Sandentnahmegebieten "Tromper Wiek Ost" und vor Graal-Müritz anbelangt. Dafür gibt es unterschiedliche Ursachen, die im Folgenden diskutiert werden sollen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich das Füllmaterial zum Teil sehr in seiner sedimentologischen Zusammensetzung und Eigenschaft vom Ausgangsmaterial unterscheidet. Offensichtlich ist dies im Fall der Kiessand-Lagerstätten, wo nur das kiesige Fördermaterial von Interesse ist und die Spillsande vor Ort wiederverklappt werden. Aber auch die Sedimentkerndaten aus einem Trichter im Feld "Westerland II" demonstrieren, dass nicht ausschließlich Sand als Füllmaterial vorgefunden wird, sondern dieser in Wechsellagerung mit unterschiedlich festen Tonen und Schluffen zur teilweisen Verfüllung beiträgt. Ebenso können Entnahmespuren bei flächenhaften Abbau wie bei "Graal-Müritz 1" oder "Tromper Wiek Ost" mit hydroakustischen Verfahren identifiziert werden, die aufgrund der Erfassung von Impedanzunterschieden anzeigen, dass sich das Füllmaterial in seiner Lagerungsdichte und Korngrößenzusammensetzung vom ungestörten Meeresboden unterscheidet.

Der Grad der Wiederverfüllung ist im Wesentlichen von der Sedimentverfügbarkeit und den hydrodynamischen Randbedingungen abhängig. In dieser Hinsicht können die untersuchten Entnahmefelder drei charakteristischen Gebieten zugeordnet werden:

Küstenmeere mit ausreichender Sedimentverfügbarkeit und hoher Hydrodynamik

Das Beispiel des Entnahmegebiets bei Pellworm verdeutlicht, dass unter den sedimentologisch-hydrographischen Rahmenbedingungen des Wattenmeeres selbst mehrere Meter tiefe Entnahmetrichter wieder nahezu vollständig verfüllt werden, da auf Grund der flächenhaften Mobilisierung im weiteren Umfeld der Struktur genügend feinsandiges Füllmaterial zur Verfügung steht und im Trichter zur Ablagerung kommt. Im Küstenvorfeld vor Fischland war für die nahezu vollständige Verfüllung entscheidend, dass auf die Fläche betrachtet das Entnahmevolumen deutlich kleiner ist als die Menge an verfügbaren, mobilem Sediment und dm-tiefe Furchen wieder mit mobilem Sand verfüllt werden können.

• Tide-unbeeinflusstes Küstenmeer mit mangelnder Sedimentverfügbarkeit

Im Fall der Kiessandlagerstätten in der Tromper Wiek muss zunächst ein Sedimentdefizit entstehen, da die Kiesfraktion dem System vollständig entzogen wird und unter den rezenten Bedingungen nicht nachgeliefert werden kann. Die Frage, die sich stellt, ist, wie reagiert das System darauf? Die Verfüllung der entstandenen Trichterstrukturen wird durch das Volumen an Spillsanden in der unmittelbaren Nachbarschaft des Saugbaggers begrenzt. Die gradierte Schichtung im Sedimentkern VC2047 belegt zusammen mit der räumlichen Verteilung der Spillsande um die Entnahmetrichter, dass diese größtenteils am Ort ihrer Verklappung entsprechend ihrer Korngrößenzusammensetzung aus der Trübefahne sedimentieren und für einen signifikanten Akkumulationsschub in den frischen Trichter sorgen. Danach findet ein kontinuierlicher Sandeintrag aus den umliegenden Spillsandflächen in die Trichter statt, wie mit den Tracerversuchen von gefärbten Sanden nachzuweisen war. Ein Teil des Spillsands bleibt in den Restsedimentflächen und trägt zu einer Kornverfeinerung des Substrats bei. Die Ergebnisse ergaben keine Hinweise darauf, dass aus flacheren Wassertiefen sandiges Material in den Bereich der Entnahmetrichter eingetragen wurde oder die Spillsande seewärts in größere Wassertiefen exportiert wurden, wo sie einen positiven Effekt auf die Materialbilanz der Sandlagerstätte "Tromper Wiek Ost" ausüben könnten.

Tide-beeinflusstes Küstenmeer mit mangelnder Sedimentverfügbarkeit

Am Beispiel der tiefen Entnahmetrichter von "Westerland II" lässt sich belegen, dass die Verfüllung mit sandigem Material lokal sehr eng begrenzt ist und über Abbrüche an den Trichterflanken während der Winterstürme stattfindet, bis sich bezüglich der Hangneigung Gleichgewicht eingestellt hat. Es gibt keine morphologische oder ein neues sedimentologische Hinweise für einen Nettotransport, so dass es zu keinem signifikanten Sandeintrag aus dem weiteren Umfeld kommen kann. Anhand des gewonnenen Kernmaterials kann der Anteil von Sand am Füllmaterial auf etwa 30% geschätzt werden. Hinsichtlich einer Wiederverfüllung ist die Bildung von tiefen Entnahmetrichtern in diesen Meeresbereichen problematisch, da wiederum auf die Fläche betrachtet auf einem eng begrenzten Raum deutlich mehr Sediment entnommen wird als durch natürliche Umlagerung mobilisiert wird und als potenzielles Füllmaterial zur Verfügung steht, um die Materialbilanz auszugleichen.

Zwei Drittel des akkumulierten Material in "Westerland II" ist Schlick wie auch in den Entnahmetrichter der Tromper Wiek. Wird Sand überwiegend ereignis-gesteuert in die Trichter eingetragen, findet die Schlickakkumulation unter ruhigen meteorologischen Bedingungen statt. Kann einerseits für "Westerland II" die Elbfahne als Quelle identifiziert werden, sind andere Liefergebiete nicht völlig auszuschließen. Ähnliches gilt für die Trichter der Tromper Wiek. Dort könnte das Material aus durch Remobilisierung und Eintrag von feinkörnigem Material aus größeren Wassertiefen stammen. Ebenso sind Quellen innerhalb der Bucht vorstellbar. In allen Fällen bildet die morphologische Ausprägung der Trichterstrukturen mit ihrem verhältnismäßig steilen Flanken effiziente Sedimentfallen, unabhängig vom Ausmaß des Tide-Einflusses. Neben der Kompaktion spielt auch der zwischenzeitliche Export von feinkörnigem Sediment aus den Trichter in Nord- und Ostsee, der sich in den vorgestellten Vermessungsdaten und Echointensitäten andeutet, eine Rolle und trägt zu einer allgemeinen Abnahme der Akkumulationsraten mit der Zeit bei.

9.2 Zeiträume der Regenerierung

Die Diskussion um die Prozesse einer teilweisen oder vollständigen Wiederfüllung verdeutlicht die unterschiedlichen zeitlichen Skalen einer "Regenerierung". Im Falle ausreichender Sediment- und Hydrodynamik führt insbesondere der hohe kontinuierlichen Anteil zu einer relativ raschen Verfüllung innerhalb von wenigen Monaten bis einigen Jahren. Dagegen tritt in Gebieten mit niedrigen Sedimentdynamik ein kontinuierlicher Eintrag soweit in den Hintergrund, dass nach einem anfänglichen ereignisgesteuerten Eintrag von Sand im Wesentlich die mehr oder weniger kontinuierliche Schlicksedimentation zur Verfüllung beiträgt. Dies hat zur Folge, dass die Entnahmetrichter nicht nur hinsichtlich ihrer Lage stabil sind, sondern auch morphologisch mindestens über Jahrzehnte erhalten bleiben. Die älteren Trichterstrukturen in der Tromper Wiek zeigen, dass eine vollständige Wiederverfüllung sogar ausgeschlossen werden muss. Ihre Teilverfüllung war dagegen innerhalb weniger abgeschlossen, so dass sich in diesem Bereich der Bucht ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

9.3 Einfluss auf Sedimenttransportsysteme

Die großräumigen Betrachtungen der einzelnen Untersuchungsgebiete liefern eine Reihe von Anzeichen dafür. dass die Entnahmegebiete unabhängig ihres Wiederverfüllungspotenzials außerhalb der küstenparallelen Transportbänder liegen. "Westerland II" liegt im Bereich mit geringer mobiler Sandbedeckung ("Zone 2"), die als Durchgangszone für einen küstennormalen Transport von nordseezeitlichen Sanden aus der küstennahen, sandreichen Zone 1 (0 bis 10 m Wassertiefe) in Wassertiefen über 15 m wirkt (ZEILER et al., 2000). Obwohl keine Angaben zu küstennormalen Transportraten bekannt sind, muss aufgrund der Mächtigkeitsverteilung vor der Nordseeküste von relativ niedrigen Mengen ausgegangen werden, die dem küstenparallelen Sandtransportband verloren gehen. Dies ist auch ursächlich für den geringen Anteil an kontinuierlichen Sandeintrag in die Entnahmetrichter von "Westerland II" verantwortlich.

82

Im Küstenvorfeld von Fischland bis Darß deuten die Ergebnisse aus der seismischen Aufnahme der mobilen Sanddecke vergleichbare Verhältnisse an: anstehender Geschiebemergel in Form von Restsedimentflächen spricht gegen einen breiten, durchgehenden Sandtransport nach Nordosten Richtung Darß und Zingst, so dass der küstenparallele Sandtransport in der Tat entlang eines schmalen Saums im Brandungsbereich stattfindet. Das Entnahmegebiet "Graal-Müritz1" liegt vielmehr in einer Zone ähnlich wie "Westerland II", wobei auch eher küstennormaler Transport bzw. Umlagerungsprozesse innerhalb des Küstenvorfelds dominieren werden.

Die Tromper Wiek stellt ein Beispiel für eine weitgehend in sich abgeschlossene Bucht dar mit eigener Sedimentdynamik. Charakteristisch ist die geringe Sedimentdynamik (SCHWARZER et al., 2001), die nach den Projektergebnissen auf den strandwärtigen Flachwasserbereich beschränkt ist, da sich innerhalb der Entnahmegebiete keine signifikanten Sandtransportpfade identifizieren ließen. Die Vermutung, dass die verklappten Spillsande durch küstennormalen Sedimenttransport in größere Wassertiefen transportiert werden könnten, konnte nicht bestätigt werden. Stattdessen bleibt die indirekte Anreicherung der mobilen Fraktion am Ort ihrer Verklappung und ohne signifikanten Einfluss auf das interne Sandtransportsystem.

10. Zusammenfassung

Im KFKI-Projekt "Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee" wurden die sedimentologischen Auswirkungen des Abbaus mariner Sande und Kiese in vier Gebieten mit unterschiedlichen Tideverhältnissen untersucht und vergleichend bewertet. Im Blickpunkt standen sowohl Entnahmetrichter als auch wenige dm-tiefe Strukturen aus flächenhaftem Abbau. Die Ergebnisse wurden in Hinsicht auf Verfüllungsprozesse, zeiträume und regionale Auswirkungen auf die Meeresbodenmorphologie und (küstenparallele) Sedimenttransportsysteme ausgewertet.

In beiden Meeresgebieten wirken trichterartige Entnahmestrukturen als Sedimentfallen. Das Füllmaterial weist eine feinere Kornzusammensetzung und einen lockereren Kornverband als der ursprüngliche Meeresboden auf. Für das Untersuchungsgebiet "Westerland II" konnte anhand des organischen Schadstoffspektrums Schwebstoff aus der Elbefahne als Quelle identifiziert werden. Sandiges Füllmaterial stammt aus der unmittelbaren Nachbarschaft, wobei Sediment entweder durch Abbruch steiler Trichterflanken oder Umlagerung verklappter Sande in die Entnahmestrukturen eingetragen wird.

Eine nahezu vollständige Wiederverfüllung wird nur im Fall des Entnahmetrichters im Hohen Watt bei Pellworm und den flachen Entnahmerinnen vor der relativ sandreichen Küste von Darß-Fischland erreicht. In allen anderen Fällen bleiben unabhängig von den hydrodynamischen Rahmenbedingungen die Entnahmestrukturen weitgehend erhalten, da die geringe Sedimentverfügbarkeit eine vollständige Verfüllung nicht oder nur über sehr lange Zeiträume zulässt. Es gibt vereinzelte Hinweise darauf, dass Füllmaterial sogar aus den Entnahmetrichtern exportiert werden kann.

Da die trichterartigen Strukturen ebenso wie die flächenhafte Entnahme in Gebieten geringer Sedimentdynamik liegen, ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse von keiner substantiellen Beeinträchtigung des küstenparallelen Sedimenttransports auszugehen. Dagegen trägt im Wattenmeer überwiegend Material aus diesem Transportband zur Wiederverfüllung bei.

11. Literatur

AHRENDT, K. u. TABAT, W., 1994. Ein Vierteljahrhundert sedimentologische Forschung vor der Küste Sylts/Deutsche Bucht. Meyniana 46, 11-36.

BSH, 1996. Naturverhältnisse in der Ostsee. Teil B zu den Ostsee-Handbüchern. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Nr. 20032, 294 S.

DESPREZ, M., 1992. Recent Research at a Marine Gravel Extraction Site off Dieppe, Eastern English Channel. ICES Cooperative Research Report 182, 75-76

DETTE, H.H., RAUDKIVI, A.J., STELLJES, K. u. BITTNER, R., 1999. Bewirtschaftung der Küste im Raum Fiscjland, Darß und Zingst. Leichtweiss-Institut für Wasserbau -Hydromechanik und Ingenieurwesen. Bericht Nr. 851, 198 S.

DINGLER, J.R. u. INMAN, D.L., 1977. Wave-formed ripples in nearshore sands. Proceedings of the 15th Conference on Coastal Engeneering, Honolulu, Hawaii: 2109-2126.

EISMA D., VAN HORN H. u. DE JONG A.J., 1979. Concepts for Sea-Use Planning in the North Sea. Ocean Management 5, 295-307.

GAO, S. u. COLLINS, M., 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". Sedimentary Geology 80, 47-60.

GAO, S., 1996. A Fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. Computers & Geosciences 22(4), 449-452.

HERRMANN, C., KRAUSE, J.C., TSOUPIKOVA, N. u. HANSEN, K., 1998. Marine Sediment Extraction in the Baltic Sea. Background document for EC NATURE 7, 1997, revised version 3/1998.

ICES, 2001. Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem. ICES Coop. Res. Rep. 247. International Council for the Exploration of the Sea.

KLEIN, H. u. MITTELSTAEDT, E., 2001. Strömungen und Seegang vor Graal-Müritz und in der Tromper Wiek. Datenreport März 2000 bis Mai 2001. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, Nr. 26, 161 S.

KRAUSE, J.C., VON NORDHEIM, H. u. GOSSELCK, F., 1996. Auswirkungen submariner Kiesgewinnung auf die benthische Makrofauna in der Ostsee vor Mecklenburg-Vorpommern. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Supplement 6, 189-199.

LANESKY, D.E., LOGAN, B., BROWN, R.G. u. HINE, E., 1979. A new approach to portable vibrocoring under water and on land. – Journel of Sedimentary Petrology, 49: 654 - 657.

LEMKE, W., 1998. Sedimentation und paläogeographische Entwicklung im westlichen Ostseeraum (Mecklenburger Bucht bis Arkonabecken) vom Ende der Weichselvereisung bis zur Litorinatransgression. Meereswissenschaftliche Berichte Nr. 31, Institut für Ostseeforschung Warnemünde, 156 S.

MITTELSTAEDT, E., LANGE, W, BROCKMANN, C. u. SOETJE, K.C., 1983. Die Strömungen in der Deutschen Bucht. Deutsches Hydrographisches Institut, Nr. 2347.

MOHRHOLZ, V., 1998. Transport- und Vermischungsprozesse in der Pommerschen Bucht. -Meereswissenschaftliche Berichte 33: 106 S.

MÜLLER, G. u. GASTNER, M., 1971. The "Karbonat-Bombe", a simple device for the determination of the carbonate content in sediments, soils and other materials. - Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte 10: 466-469.

NOMMENSEN, 1982. Die Sedimente des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht) : Ergebnisse geologisch-sedimentologischer Untersuchungen an pleistozänen und holozänen Sedimenten und an Schwebstoffen der Gezeitenströme. Dissertation, Universität Kiel. 268 S.

SCHWARZER, K., DIESING, M. u. SCHROTTKE, K., 1999. BASYS Final Scientific Report, SG4 Nearshore and Coastline Dynamics. Unveröff. Abschlussbericht des Instituts für Geowissenschaften.

SCHWARZER, K., DIESING, M. u. TRIESCHMANN, B., 2000. Nearshore facies of the southern shore of the Baltic Ice Lake - Example from Tromper Wiek (Rügen Island). Baltica 13, 69-76.

SCHWARZER, K. u. DIESING, M., 2001. Sediment redeposition in nearshore areas - examples from the Baltic Sea. - Coastal Dynamics '01, ASCE: 808 - 817.

SCHWARZER, K., DIESING, M, LARSON, M., NIEDERMEYER, R.-O., SCHUMACHER, W. u. FURMANCZYK, K., 2002. Coastline evolution at different time scales - examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. Marine Geology (eingereicht).

TAUBER, F. u. LEMKE, W., 1995. Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee. Blatt Darß. Institut für Ostseeforschung, Warnemünde.

THEILEN, F., KALLERHOFF, W. u. POSEWANG, J., 1994. Untersuchungen zur optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Phase II: Kartierung des Kaolinsandes vor Sylt. Unveröff. Abschlußbericht, Institut für Geophysik der Universität Kiel.

THIEL, H. u. REGIER, M., 1999. Meeresbiologische Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Unveröff. Abschlussbericht des Instituts für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universität Hamburg.

TIEPOLT, L., 1998. CD des "Coastal Zone Management - Morphogenese der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern". Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock.

TIEPOLT, L. u. SCHUMACHER, L., 1999. Historische bis rezente Küstenveränderungen im Raum Fischland-Darß-Zingst-Hiddensee anhand von Karten-, Luft- und Satellitenbildern. Die Küste 61, 21-46.

TINIAKOS, L., 1978. Sedimentpetrographische Untersuchungen zur Ermittlung von Transportrichtungen im Küstenbereich westlich von Sylt, Nordsee. Meyniana 30, 89-97.

TRIESCHMANN, B., 2000, Untersuchungen zum geologischen Bau der Tromper Wiek/Rügen mit flachseismischen Methoden. Unveröff. Dipl.-Arbeit Universität Kiel: 75 S.

87

UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN, 1997. Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Naturräumliche Verhältnisse im Ostseeküstengebiet zwischen Trave und Swine. Online-Broschüre.

VOLLBRECHT, K., u. WÜNSCHE, B., 1979. Dynamik der Sandbewegung vor Sylt -Suspensionstransport in der Brandungszone. In DFG-Forschungsbericht "Sandbewegung im Küstenraum. Rückschau, Ergebnisse und Ausblick".

WERNER, F. u. NEWTON, R.S., 1975. The pattern of large-scale bed forms in the Langeland Belt (Baltic Sea). Marine Geology 19, 29-59.

ZEILER, M., SCHULZ-OHLBERG, J. u. FIGGE, K., 2000. Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). Marine Geology 170, 363-380.

Danksagung

Zunächst gilt unser Dank dem Amt für ländliche Räume Husum und dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock, die uns in großzügiger Weise Vermessungsdaten bzw. Daten aus dem GIS Küste von Mecklenburg-Vorpommern zur Verfügung gestellt haben.

Für die engagierte Arbeiten auf See sind wir R. Kunze, Y. Arik, M. Baden, H. Klein (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) sowie den Kapitänen U. Ziemer, W. Fietz, W. Ohl und den Besatzungen des VWFS "DENEB", FS "GAUSS" und FK "LITTORINA" zu besonderem Dank verpflichtet.

Dr. E. Mittelstaedt und seinen Mitarbeitern (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) danken wir für die umfangreichen hydrographischen Messungen.

Dr. K. Schwarzer, M. Diesing (Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel) und Dr. K. Ricklefs (Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Büsum) danken wir die Unterstützung im Rahmen des geleisteten Forschungsauftrages.

Unser herzlicher Dank gebührt der Projektgruppe, in der Dr. N. Blum (PT Jülich/BEO), Dr. B. Gurwell (StAUN Rostock), M. Palm (AlR Husum), Dr. A. Plüß (BAW Hamburg), Dr. L. Tiepolt (StAUN Rostock) sowie zeitweise Dr. R. Riethmüller (GKSS Geesthacht) vertreten waren. Ihre kritische Begleitung hat wesentlich zum erfolgreichen Abschluss des Projekts beigetragen.

Schließlich danken wir dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das dieses Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03KIS008 finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren unterstützt hat.

Anhang A1: Methoden

Methode	Westerland II	Pellworm	Graal-Müritz	Tromper Wiek
vermessung				
Lottyp	Single Beam	Single Beam	Single Beam	Single Beam
Ausführender, Schiff	AIR Husum, Oland	AIR Husum, Habel	BSH, Deneb	BSH, Deneb
Geråt	Fahrentholz CPV 100	Fahrentholz CPV 100	Fahrentholz CTH-	Fahrentholz CTH-Hydrograph
Frequenz des Lotes	100 kHz	100 kHz	200	200
Beschickungsmethode	NN	NN	NN (MSL)	NN (MSL)
Pegel	Westerland	Pellworm,	Warnemünde	Saßnitz
		Rungholt-Sand,		
Lottyp	Fächerlot			Fächerlot
Ausführender, Schiff	BSH, Kornet & Wega			BSH, Deneb
Gerät	STN Atlas FanSweep 20			STN Atlas Hydrosweep MD-1
Frequenz des Lotes	200 kHz			50 kHz
Beschickungsmethode	WEK, SKN			MSL (ca. NN)
Beschickungsfehler	ca. +/- 30 cm	ca. +/- 20 cm	ca. +/- 15 cm	ca. +/- 15 cm
Positionierung	4	······································		
Methode	DGPS	DGPS	DGPS	DGPS
Referenzstation	Helgoland	Helgoland	Wustrow	Wustrow
Positionierungsfehler	ca. +/- 5 m	ca. +/- 3 m	ca. +/- 5 m	ca. +/- 5 m
Koordinatensystem	Gauß-Krüger (PD)	Gauß-Krüger (PD)	Gauß-Krüger (S42/83)	Gauß-Krüger (S42/83)
Seitensichtsonar				
Lottyp	geschleppter Fischt		am Schiff montierter Fisch	am Schiff montierter Fisch
Ausführender, Schiff	BSH, Kornet	and the second	BSH, Deneb	BSH, Deneb
Gerät	EG&G DF 1000		Klein Mod. 595	Klein Mod. 595
Messbereich	75 m		75 m	75 m
Frequenz	384 kHz		375 kHz	375 kHz
Lottyp			geschleppter Fisch	geschleppter Fisch
Ausführender, Schiff			IfG Kiel, Littorina	IfG Kiel, Littorina
Gerät			Klein Mod. 595	Klein Mod. 595
Messbereich			75 m	75 m
Frequenz			375 kHz	375 kHz
Seismik				
Тур			Chirp Sonar	Chirp Sonar
Ausführender, Schiff	2. South and the latent of the state of t		BSH, Deneb	BSH, Deneb
Gerät			EdgeTech X-Star	EdgeTech X-Star
Schallwandler (Sound		and a second	EdgeTech SB-512	EdgeTech SB-512
Frequenz			2 bis 10 kHz / 20 ms	2 bis 10 kHz / 20 ms
Energie (output Power)			2 kW	2 kW
Eindringtiefe (ab			bis ca. 30 m	bis ca. 30 m
Meerespoden) vertikale Auflösung			ca. 20 cm	ca. 20 cm
Online-Registrierung			Seismic-Recorder EPC	Seismic-Recorder EPC 8300
			8300	
Тур			Boomer	Boomer
Austührender, Schiff			BSH, Deneb	BSH, Deneb
Energiequelle	Constant and Constant		CEA, Pulsar 2002	CEA, Pulsar 2002
Energie/Ladung			150 J / 3800 V	150 J / 3800 V
Schusstolge (Pulse Repetition Rate)	Markey		4 Schuss/sec	4 Schuss/sec
Schallwandler (Sound			Geoacoustics Mod. 5813B	Geoacoustics Mod. 5813B
Source)				

.

.

*

Methode	Westerland II	Pellworm	Graal-Müritz	Tromper Wiek
Hydrophon mit Vorverstärker Vorverstärker			Benthos MESH 15/10P	Benthos MESH 15/10P 0.4 bis 10 kHz
Frequenzbereich				
vertikale Auflösung			ca. 1 m	ca. 1 m
Software, Betriebssystem			DelphSeismic, Windows NT	DelphSeismic, Windows NI
Online-Registrierung			Seismic-Recorder, EPC1086	Seismic-Recorder, EPC1086
Тур			Boomer	Boomer
Austührender, Schiff			ITG KIEI, LITTORINA	IG Kiel, Lillonna
Energiequelle			den i	VEA, Fuisar 2002
Energie			4000 V	4000 V
Voltage) Schussfolge (Pulse Renetition Rate)			2,6 Schuss/sec	2,6 Schuss/sec
Schallwandler (Sound Source)			EG&G, Mod. 230-1	EG&G, Mod. 230-1
Energie			300 J	300 J
Hydrophon mit Vonverstärker		 A state of the sta	EG&G, 8 Piezoelemente	EG&G, 8 Piezoelemente
Vorverstärker,			0,4 bis ca. 20 kHz	0,4 bis ca. 20 kHz
Frequenzbereich			bis ca. 90 m	bis ca 90 m
Meeresboden)			bis ca. 50 m	Dis ca. 30 m
vertikale Auflösung			> 1m	> 1m
Hydrographie				
Ausführender, Schiff	BSH, Gauss		BSH, Deneb	BSH, Deneb
Тур			akustischer Strommesser	akustischer Strommesser
Gerät	and the restrict property		Aanderaa, RCM9	Aanderaa, RCM9
Frequenz			2 MHz	2 MHz
messbare Entfernung			0.5-2 m	0.5-2 m
Bodenabstand			1 m 10 min	0.5 min
Gobauigkoit				1 cm/s
	Strommesser-Verankerung			Strommesser (Botor)
Gerät	Aanderaa BCM7/8			Aanderaa, BCM7
Bodenabstand	1 m 8 bzw 16 m			2 m
Messintervall	10 min			10 min
Genauickeit	1 cm/s	$1 \leq j \leq 1 \leq j \leq 1$		1 cm/s
Tvp			Wave and Tide Recorder	Wave and Tide Recorder
Gerät		and a state of the second s	Aanderaa, WTR9	Aanderaa, WTR9
Frequenz			36-40 kHz, 2 Hz (burst-	36-40 kHz, 2 Hz (burst-
Redenshetend			sampling)	sampling)
Messintervalle			30 min	0.57 min
Internation über			40 s	40 s
Genauigkeit			2 cm Wellenh +Druck 0.025	2 cm Wellenh.+Druck. 0.025
			Periode	Periode
Тур				direktionale Seegangsboje
Gerät				Datawell, WAVEC
Frequenz				0.01-0.6 Hz
Bodenabstand				25 m (wasseropernache)
Genauickoit				
Datenübertragung				Funk
Typ	Akustischer			Akustischer Strömungeprofiler
אנין	Strömungsprofiler			Lungende Skolligingeholige
Gerät	RD Instruments, NB-ADCP			RD Instruments, WH-S
Frequenz	300 kHz		States and States	300 kHz

.

ø

.

.

.

Methode	Westerland II	Pellworm	Graal-Müritz	Tromper Wiek
Binhöhe	2 m	endente anno services de la company		1-2 m
Messtiefen	2-15 bzw. 20 m (2 m über Grund)			unterschiedlich
Messintervall	15 min			10 min
Genauigkeit	1 cm/s			1 cm/s
Тур	a second second and a second			Strom- und Seegangsmesser
Gerät				InterOcean, S4ADW
Frequenz		 I a sector of the sector of the		2 Hz (burst sampling)
Bodenabstand				1 m
Messintervall				10 min
				alle 4 h 10 min burst-sampling
Genauigkeit				1 cm/s, 4 mm (Druck)
Sedimentbeprobung				
Тур	Kastengreifer		Kastengreifer	Kastengreifer
Ausführender, Schiff	BSH, Gauss		BSH, Deneb	BSH, Deneb
Kastengrösse	100 x 170 mm		100 x 170 mm	100 x 170 mm
Eindringtiefe	max. 200 mm		max. 200 mm	max. 200 mm
Тур	Vibrocorer		Vibrocorer	Vibrocorer
Ausführender, Schiff	BSH, Gauss	and the beat set of the set of the	BSH, Deneb	BSH, Deneb
Kernmaße	L = 6 m, D = 100 mm		L = 6 m, D = 100 mm	L = 6 m, D = 100 mm
Linermaterial	PVC-Rohr		PVC-Rohr	PVC-Rohr
Тур			HELCOM-Backengreifer	HELCOM-Backengreifer
Ausführender, Schiff			IfG Kiel, Littorina	IfG Kiel, Littorina
Тур		Vibrocorer nach		
Ausführender		IfG Kiel		
Maße	and the second second	6 m		
Тур				Taucher
Ausführender, Schiff				IfG Kiel. Littorina
Маве				L = 1 m, D = 80 mm
Tracerstudie	- Page - Andrewski - Andrew			
Ausführender, Schiff				IfG Kiel. Littorina
Ausbringung des Tracers				Stifte / flächig
Farbstoff	 Burger and Annalysis and Annalysi Annalysis and Annalysis a	Although a start of the start of the		fluoreszierender Farbstoff
Unterwasservideo				
Тур			Kamera am Kastengreifer	Kamera am Kastengreifer
Farbe / schwarz-weiss			schwarz-weiss	schwarz-weiss
Speicherung			Beschreibung	Beschreibung
Тур				von Tauchern mitgeführt
Farbe / schwarz-weiss				Farbe
Speicherung				S-VHS/S-VHS-C
Korngrößenbestimmung				
Тур	Trockensiebung		Trockensiebung	Trockensiebung
Ausführender	BSH		BSH	BSH
Siebe			Retsch. 200 mm. Stahl	Betsch, 200 mm, Stabl
Fraktion	63-2000 (4000) µm		63-2000 (4000) μm	63-2000 (4000) <i>µ</i> m
Phi-Intervalle	0.25		0,25	0,25
Тур			Trockensiebuna	Trockensiebung
Ausführender	20.0		IfG Kiel	IfG Kiel
Siebe			Retsch, 200 mm. Stahl	Retsch, 200 mm. Stahl
Fraktion	an a		63-19000 um	63-19000 um
Phi-Intervalle			0.25	0.25
Тур			Laser	Laser
1.11		and the second		

.

.

.

•

Methode	Westerland II	Pellworm	Graal-Müritz	Tromper Wiek
Ausführender		a second second	BSH	BSH
Laser-Gerät			Galai Cis 100	Galai Cis 100
Liquid flow controller			Galai LFC 101	Galai LFC 101
Fraktion			0,5-150 μm	0,5-150 μm
μm-Intervalle			0,. (0,5-1),1 (1-10),10 (10- 150)	0,5 (0.5-1),1 (1-10),10 (10- 150)
Röntgenaufnahmen				
Тур				Kernfotos (Taucherkerne)
Ausführender				IfG Kiel
Chemische Analysen				
Тур	СКЖ	and the second second second		
Ausführender	BSH			
Methode	GC-ECD			
Тур	PAK			
Ausführender	BSH	and the second sec		
Methode	Ion-Trap-GC-MS			
Тур		and the second		Karbonatgehalt
Ausführender				IfG Kiel
Methode				Karbonatbombe
Тур	тос			and the second
Ausführender	BSH			
Methode	Elementaranalysator varia	0		
Bestimmungsgrenze	0,1%			

Anhang A2: Positionen der Proben- und Messstationen

Westerland			
Kern	Breite	Länge	Lottiefe
VC2042	54,9212	8,1711	24,0
VC2043	54,9149	8,1838	21.0
VC2044	54,9092	8,1868	16.0
VC2045	54.9211	8.1710	22.6
SL2049	54,9143	8,1682	21.5
VC2050	54 9080	8 1588	21.8
Probe	Breite	Länge	Lottiefe
KG1	54 9268	8 1729	15.3
KG2	54 9199	8 1703	22.5
KG3	5/ 0157	8 1685	21.0
KGA	54 0116	9 1672	10
KG 4	54,9110	0,1072	13
KGE	54,9045 EA 904E	0,1037	14,0
	34,0343	0,1002	17,4
	54,9105	8,1627	17,2
KGB	54,9165	8,1731	19,5
KG 9	54,9169	8,1735	19,2
KG 10	54,9164	8,1756	21,9
KG 11	54,9165	8,1828	18
KG 12	54,9165	8,1865	18,1
KG 13	54,9246	8,1719	15,8
KG 14	54,9225	8,1714	17,9
KG 15	54,9193	8,1699	17,8
KG 16	54,9182	8,1697	16,4
KG 17	54,9130	8,1671	22
KG 18	54,9103	8,1666	17,4
KG 19	54,9076	8,1678	16,2
KG 20	54,8996	8,1619	16
KG 21	54,9165	8,1590	16
KG 22	54,9165	8,1695	22,4
KG 23	54,9166	8,1806	19,7
KG 24	54.8855	8,1567	16
KG 25	54.8908	8,1735	19.2
KG 26	54.8972	8,1770	20
KG 27	54,9116	8,1680	21.6
KG 28	54 9211	8 1893	217
KG 29	54 9150	8 1836	22 4
KG 30	54 9108	8 1723	21.6
hvdr. Stat.	Breite	Länge	Lottiefe
BN	54 9200	8 1667	17
BI	54 9150	8 1667	25
BS	54 9117	8 1667	17
ADCP-1	54 9200	8 1700	17
ADCP-2	54 0133	8 1683	22
	04,0100	0,1000	2-1-1-
Peliworm			
Kern	Breite	Länge	Lottiefe
44	54.3200	8,4326	1.8
45	54.3201	8,4311	1.8
47	54 3202	8 4282	12
48	54 3202	8 4300	1.8
	07,0202	0,4000	10

Graal-Müritz	2		
Kern	Breite	Länge	Lottlefe
VC2051	54,5102	12,4591	13,7
VC2052	54,4933	12,4050	13,6
VC2053	54,4693	12,4597	13,7
VC2054	54,3955	12,3500	12,2
VC2055	54,4092	12,2323	18,0
VC2056	54,4202	12,2442	19,0
VC2057	54,4458	12,2282	20,0
VC2058	54,3464	12,1580	18,4
VC2059	54,3655	12,3505	9,8
em01	Dreile	Lange	
gm01	04,2000 54.0005	12,2149	8,1
gm02	04,2920 54 0047	12,2304	0,0
gm03	54 3033	12,2400	0,2 8 0
am05	54 3106	12 2843	0,0
gm06	54 3191	12 2904	10.9
gm07	54 3258	12,2004	94
gm08	54.3249	12,2365	11.6
am09	54.3167	12.2474	10.0
gm10	54,3098	12.2559	9.5
gm11	54,2958	12,2734	8.2
gm13	54,3015	12,2374	7,7
gm14	54,3172	12,2746	8,0
gm15	54,3321	12,2554	12,6
gm16	54,3247	12,2652	12,1
gm17	54,3037	12,2931	9,8
gm19	54,3165	12,2182	12,8
gm20	54,3085	12,2286	10,1
gm21	54,2875	12,2545	8,5
hydr. Stat.	Breite	Länge	Lottiefe
			70
GIMT	54,3002	12,2502	7,2
GMI Tromper Wi	54,3002	12,2502	7,2
Tromper Wi	54,3002 ek Breite	12,2502	∕,∠
Tromper Wi	54,3002 ek Breite 54,6481	Länge	Lottiefe
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047	54,3002 ek Breite 54,6481 54 6292	Länge 13,4413 13,4205	Lottiefe 13,0
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060	54,3002 ek 54,6481 54,6292 54,6294	Länge 13,4413 13,4205 13,4206	Lottiefe 13,0 17,6 12,3
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe	54,3002 ek 54,6481 54,6292 54,6294 Breite	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11.4
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6164	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6164 54,6432	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5
Tromper Wi Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6164 54,6336	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw05 tw06 tw07	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6357 54,6165 54,6164 54,6336 54,6335	Länge 13,4413 13,4205 13,4205 13,4205 13,4205 13,4205 13,4051 13,4255 13,4255 13,4355 13,4548 13,4355 13,4454 13,4589	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw05 tw06 tw07 tw08	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6357 54,6165 54,6164 54,6336 54,6335	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4589 13,4589 13,4790	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6357 54,6165 54,6164 54,6336 54,6335 54,6334	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4589 13,4451	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09 tw10	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6165 54,6165 54,6164 54,6336 54,6335 54,6334 54,6523 54,6513	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4589 13,4589 13,4589 13,4451 13,4602	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09 tw10 tw11	54,3002 Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6075 54,6165 54,6165 54,6132 54,6336 54,6335 54,6334 54,6513 54,6513	Länge 13,4413 13,4205 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4589 13,4589 13,4589 13,4589 13,4451 13,4602 13,4721	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09 tw10 tw11 tw12	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6165 54,6336 54,6336 54,6336 54,6337 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6514	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4549 13,4589 13,4454 13,4589 13,4451 13,4602 13,4721 13,4872 13,4872 13,4872	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw09 tw10 tw11 tw12 tw13	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6336 54,6336 54,6336 54,6336 54,6337 54,6338 54,6335 54,6334 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6601	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4549 13,4549 13,4454 13,4589 13,4451 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4721 13,4720 13,4720 13,4720 13,4721 13,47200 13,47200 13,47200 13,4	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 20,2
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09 tw11 tw12 tw13 tw14 bwbr Stat	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6357 54,6165 54,6165 54,6336 54,6336 54,6336 54,6335 54,6336 54,6337 54,6338 54,6334 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6600 Breite	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4548 13,4454 13,4454 13,4454 13,4451 13,4451 13,4602 13,4721 13,4872 13,4632 13,4749	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw09 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6336 54,6336 54,6336 54,6336 54,6513 54,6513 54,6601 54,6600 Breite 54,6635	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4549 13,4454 13,4589 13,4454 13,4589 13,4790 13,4451 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4632 13,4632 13,4749 Länge 13,4997	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw09 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1	s4,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6164 54,6432 54,6336 54,6335 54,6513 54,6513 54,6600 Breite 54,66435 54,6634	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4454 13,4454 13,4454 13,4454 13,4451 13,4451 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4068	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw09 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW2	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6357 54,6165 54,6165 54,6164 54,6336 54,6336 54,6337 54,618 54,6336 54,6335 54,6334 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6601 54,6635 54,6435 54,6435 54,6435 54,685 54,6885	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4454 13,4454 13,4454 13,4454 13,4451 13,4451 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4632 13,4729 Länge 13,4997 13,4068 13,5504	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw09 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4	54,3002 ek 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6164 54,6335 54,6336 54,6335 54,6334 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6603 54,6603 54,6335 54,6034 54,6335 54,6034 54,6292	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4454 13,4454 13,4451 13,4602 13,4720 13,4451 13,4602 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4997 13,4068 13,5504 13,4205	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6165 54,6164 54,6335 54,6335 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6600 Breite 54,6635 54,6034 54,6635 54,6034 54,6292 54,6292	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4548 13,4335 13,4454 13,4589 13,4454 13,4589 13,4720 13,4451 13,4602 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4997 13,4068 13,5504 13,4205 13,4200	Lottiefe 13,0 17,6 12,3 Lottiefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18 11
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4 TW5 TW6	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6357 54,6165 54,6165 54,6165 54,6165 54,6336 54,6335 54,6335 54,6513 54,6523 54,6513 54,6523 54,6513 54,6523 5	Länge 13,4413 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4589 13,4454 13,4589 13,4451 13,4602 13,4721 13,4602 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4997 13,4068 13,5504 13,4205 13,4209	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18 11 12
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4 TW5 TW6 TW7	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6165 54,6165 54,6164 54,6432 54,6335 54,6336 54,6335 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6601 54,6600 Breite 54,6435 54,6034 54,6292 54,6292 54,6292 54,6294	Länge 13,4413 13,4205 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4548 13,4335 13,4454 13,4335 13,4454 13,4589 13,4790 13,4451 13,4632 13,4721 13,4632 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4997 13,4088 13,5504 13,4205 13,4209 13,4208	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18 11 12
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4 TW7 TW8	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6075 54,6165 54,6164 54,6432 54,6336 54,6335 54,6334 54,6513 54,6513 54,6513 54,6513 54,6601 54,6601 54,6600 Breite 54,6435 54,6034 54,6292 54,6292 54,6292 54,6292 54,6292	Länge 13,4413 13,4205 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4335 13,4454 13,4589 13,4790 13,4451 13,4632 13,4721 13,4632 13,4721 13,4632 13,4749 Länge 13,4997 13,4088 13,5504 13,4205 13,4208 13,4208 13,4205	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18 11 12 12 17
Tromper Wil Kern VC2046 VC2047 VC2060 Probe tw01 tw02 tw03 tw04 tw05 tw06 tw07 tw08 tw10 tw11 tw12 tw13 tw14 hydr. Stat. TW1 TW2 TW3 TW4 TW7 TW8 TW9	54,3002 ek Breite 54,6481 54,6292 54,6294 Breite 54,6294 Breite 54,6075 54,6155 54,6164 54,6336 54,6336 54,6336 54,6336 54,6337 54,6338 54,6513 54,6513 54,6601 54,6601 54,6601 54,6603 54,6604 54,6605 54,6607 54,6608 54,6609 54,6292 54,6292 54,6292 54,6292 54,6292 54,6292 54,6293	Länge 13,4413 13,4205 13,4205 13,4206 Länge 13,4051 13,4225 13,4192 13,4548 13,4335 13,4454 13,4589 13,4454 13,4589 13,4790 13,4451 13,4602 13,4790 13,4632 13,4799 Länge 13,4997 13,4088 13,5504 13,4205 13,4208 13,4205 13,4203	Lottlefe 13,0 17,6 12,3 Lottlefe 11,4 10,7 12,5 18,1 12,5 18,7 20,9 23,2 13,0 21,6 22,3 24,1 16,5 23,3 Lottlefe 25 11 19 18 11 12 17 12

٠

÷

.

.