

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

**Zeiler, Manfred; Figge, Klaus; Griewatsch, Karin; Diesing, Markus;
Scharzer, Klaus**

Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101510>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zeiler, Manfred; Figge, Klaus; Griewatsch, Karin; Diesing, Markus; Scharzer, Klaus (2004):
Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee. In: Die Küste 68. Heide,
Holstein: Boyens. S. 67-98.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee

Von MANFRED ZEILER, KLAUS FIGGE, KARIN GRIEWATSCH, MARKUS DIESING
u. KLAUS SCHWARZER

Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens sollte die physikalische Regenerierung von vier Entnahmegebieten in Nord- und Ostsee untersucht werden. Abhängig von der Gewinnungsart, nämlich Stech- oder Saugkopfverfahren, waren durch den Abbau Trichter, Mulden und Rinnen entstanden. Zielsetzung des Projektes war, die Prozesse der Regenerierung sowie ihre Zeiträume und räumliche Ausdehnung näher zu beleuchten. Dabei wird in dieser Arbeit unter dem Begriff „Regenerierung“ die Einstellung eines neuen sedimentologisch-hydrographischen Gleichgewichts nach der Entnahme verstanden. Die Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit von Sedimentangebot, hydrodynamischen Kräften und Entnahmeverfahren Unterschiede in der Regenerierung festzustellen sind. Während die mehrere Meter tiefen Entnahmetrichter vor Sylt und in der Tromper Wiek nur teilverfüllt werden, ist der über 10 m tiefe Entnahmetrichter im nordfriesischen Wattenmeer innerhalb weniger Jahre nahezu vollständig wieder verfüllt. Ursächlich wird dies auf den ständigen Eintrag von Material zurückgeführt, der selbst bei Niedrigwasser über eine Verbindung zur Norderhever stattfand. Dabei unterscheidet sich das Füllmaterial kaum vom umgebenden Wattsediment, im Gegensatz zu den Trichtern vor Sylt und in der Tromper Wiek, die anfänglich durch mehr oder weniger episodischen Sandeintrag aus Hangabbrüchen und der unmittelbaren Umgebung verfüllt werden. Im weiteren Verlauf wirken die Trichter aufgrund ihrer relativ steilen Flanken als Schlickfänger. Ein Teil des Füllmaterials kann aus den trichter- und muldenförmigen Strukturen wieder exportiert werden. Die Auswirkungen der (Teil-)Verfüllung können aufgrund der relativ großen Fehlerbreite der Tiefendaten, die aus dem Beschickungs- und Interpolationsfehler herrührt, nicht erfasst werden. Insgesamt ist aber festzustellen, dass alle Entnahmestrukturen außerhalb des küstenparallelen Sandtransportbandes liegen, welches in beiden Seegebieten auf eine schmale Zone seewärts des Strandes beschränkt ist.

Summary

The Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) conducted in cooperation with the Institute of Geosciences (University of Kiel) a 3-year study to assess the physical refilling processes of 4 different extraction sites in the North and Baltic Sea. The study was funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) and promoted by the Coastal Engineering Research Council (KFKI). The objectives were to investigate the physical processes of refilling, their time scales and the spatial extension of the affected seabed. Depending on the extraction technique used the sites comprise several metre deep pits, appr. 1 m deep depressions and 0.5 m deep furrows which are located between 0.3 to 7 km off the coastline. The results confirm differences in refilling processes of extraction sites depending on sediment availability, hydrodynamic forces and type of extraction (anchor or trailing suction). While more than 10 m deep pits in the offshore area of the North Sea and appr. 5 m deep pits in the bight of Tromper Wiek (Baltic Sea) only partly refilled, a nearly complete refilling could be observed in the 10 m deep pit in the North Frisian Wadden Sea. The latter is caused by the permanent import of particulate matter via a trough which had connection to the tidal inlet even during low water levels. The refilling material is more or less identical to the local Wadden Sea sediment. In contrast, the pits in the open North Sea and Tromper Wiek are refilled by episodic input of sand material from slope instabilities and to some extent from the nearby seabed surface as well as from sand spills (Tromper Wiek). Due to their steep slopes the pits act as efficient mud traps. The long-term refilling processes of the pits of Trom-

per Wiek and the shallow depressions off Fischland-Darss (Baltic Sea) are interrupted by erosion of the infill material. The effects of refilling on the seabed topography in the vicinity of the extraction sites cannot be assessed because of the error of bathymetric data resulting from correction to chart datum and kriging interpolation. Despite their close distance to the shore all sites are located outside the longshore sediment transport belts which are restricted in both sea areas to a relatively small zone seaward the coastline.

Keywords

Sand- und Kiesgewinnung, Wiederverfüllung, Sedimentdynamik, Sedimentation/Erosion, Meeressedimente

Sand and gravel extraction, refilling, sediment dynamics, sedimentation/erosion, marine sediments

Inhalt

1. Einführung	69
2. Datenbestand	70
3. Untersuchungsmethoden	71
3.1 Positionierung und Vermessung	71
3.2 Seitensichtsonar (SSS)	71
3.3 Hydrographische Messungen	71
3.4 Sedimentbeprobung	72
3.5 Korngrößenanalysen	72
3.6 Chemische Analysen	72
3.7 Datenauswertung	72
4. Ergebnisse	73
4.1 Hohes Watt bei Pellworm	73
4.1.1 Morphologische Verhältnisse	73
4.1.2 Sedimentologische Befunde	75
4.2 Gewinnungsfeld „Westerland II“	75
4.2.1 Morphologische Verhältnisse	75
4.2.2 Sedimentologische Befunde	79
4.2.3 Hydrographische Ergebnisse	81
4.3 Gewinnungsfeld „Graal-Müritz 1“	81
4.3.1 Morphologische Verhältnisse	81
4.3.2 Sedimentologische Befunde	82
4.4 Tromper Wiek	84
4.4.1 Morphologische Verhältnisse	85
4.4.2 Sedimentologische Befunde	86
4.4.3 Hydrographische Ergebnisse	91
5. Diskussion	92
5.1 Hohes Watt bei Pellworm	92
5.2 Westerland II	93
5.3 Graal-Müritz 1	95
5.4 Tromper Wiek	95
6. Schlussfolgerungen	96
7. Danksagung	97
8. Schriftenverzeichnis	98

1. Einführung

Sand und Kies sind begehrte Rohstoffe für Küstenschutzmaßnahmen und Bauindustrie. Seit den 1960er Jahren werden diese Rohstoffe in größerem Umfang vom Meeresboden entnommen. Europaweit ist der Bedarf an marinen Sanden und Kiesen seit den 1980er Jahren stark gestiegen (International Council for the Exploration of the Sea [ICES], 1992, 2001). In Deutschland wurden während der letzten 10 Jahre in Nord- und Ostsee durchschnittlich rund 1 Mio. m³ pro Jahr Sand und Kies gefördert¹.

Im Gegensatz zum Festland lassen sich im Meer die Umweltauswirkungen des Sand- und Kiesabbaus nicht auf einen engen, genau definierten Bereich eingrenzen; vielmehr werden die komplexen Zusammenhänge im System Hydrodynamik – Sediment – Biologie über das eigentliche Gewinnungsgebiet hinaus gestört. Das Ausmaß dieser Störung ist abhängig von den Naturverhältnissen im Entnahmegebiet und seiner Umgebung, dem Lagerstättentyp, der Besiedlung durch benthisch lebende Organismen und den Abbaumethoden wie flächenhafte Gewinnung im Schleppkopfverfahren oder die Entstehung tiefer Entnahmetrichter durch den Einsatz von Stechrohrraggern. Dementsprechend ist bei der Planung eines Gewinnungsvorhabens zu berücksichtigen, mit welchen Auswirkungen im jeweiligen Fall zu rechnen ist und welche Maßnahmen zur Minimierung unerwünschter Folgen zu ergreifen sind.

Hier bestehen jedoch noch Kenntnislücken. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee“ des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) sollten deshalb die sedimentologischen Prozesse an bestehenden und gut dokumentierten Entnahmestellen von Sand und Kies untersucht werden. Besonderer Wert wurde auf die Frage gelegt, ob und ggf. in welchem Umfang eine physikalische Regenerierung stattfindet.

Im Einzelnen standen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Wie laufen mögliche 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?

In diesem Zusammenhang bedarf der Begriff „Regenerierung“ einer Erläuterung. Unmittelbar nach einer Materialentnahme wird ein neues Gleichgewicht zwischen Sediment, Morphologie und Hydrographie angestrebt, wobei der Ausgangszustand im Allgemeinen nicht wieder erreicht wird. Weil das Füllmaterial meist feiner als das entnommene Sediment ist (ICES, 1992, 2001), handelt es sich aus sedimentologischer Sicht eher um eine Veränderung als um eine Regenerierung. Als Regenerierung wird daher in dieser Arbeit die Entstehung eines neuen sedimentologisch-hydrographischen Gleichgewichts verstanden.

Als Untersuchungsobjekte wurden vier Gewinnungsgebiete in Nord- und Ostsee ausgewählt, die jeweils einen bestimmten Küstentyp repräsentieren und mit unterschiedlichen Methoden abgebaut werden bzw. wurden (Tab. 1). Von allen Gebieten, die zwischen 0,3 und

¹ Aktuelle Karten aus dem CONTIS-Informationssystem zu den Bewilligungsfeldern auf dem deutschen Festlandsockel sind auf der Internet-Seite des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) unter <http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp> zu finden.

7 km vor der Küste liegen, ist in unterschiedlichem Umfang Datenmaterial vorhanden, auf das aufgebaut werden konnte.

Tab. 1: Jährliche Entnahmemengen (Mio. m³) der untersuchten Gewinnungsfelder zwischen 1990 und 2000.

Feld	Pellworm (Watt)	„Westerland II“ (Nordsee)	„Graal- Müritz 1“ (Ostsee)	„Tromper Wiek 1“ (Ostsee)	„Tromper Wiek Ost“ (Ostsee)
Fördergut- Verfahren	Sand Stechkopf	Sand Stechkopf	Sand Saugkopf	Kiessand Stechkopf	Sand Saugkopf
Jahr					
1990		2,456	0,273		
1991		2,017	0,163		
1992		2,082			
1993		1,370	0,203		
1994	0,290		0,059	0,003	
1995		1,013	0,062	0,007	
1996		1,111	0,140	0,008	
1997		0,581	0,259	0,075	
1998				0,026	
1999		0,706	0,292	0,034	
2000		1,674	0,341		0,104
1990 – 2000	0,290	13,010	1,179	0,153	0,104

2. Datenbestand

Für die einmalige Entnahmestelle „Hohes Watt bei Pellworm“ liegt ein bathymetrischer Datensatz des Amtes für ländliche Räume (ALR) Husum vor, der unmittelbar vor und nach der Sedimententnahme im Sommer 1994 sowie ein, viereinhalb und sechseinhalb Jahre nach dem Eingriff aufgenommen wurde. Die Beschickung der Lottiefen erfolgte auf die Pegel „Pellworm“, „Rungholt-Sand“ und „Rummeloch-Ost“; der Beschickungsfehler liegt bei $\pm 0,2$ m. In Ergänzung wurden während der Projektlaufzeit im November 2000 Kernbohrungen im Bereich der ehemaligen Entnahmestelle durch das Institut für Geowissenschaften (IfG) in Zusammenarbeit mit dem Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) Westküste der Universität Kiel niedergebracht.

Im Fall des Entnahmegebiets „Westerland II“ existiert eine lange Zeitreihe bathymetrischer Datensätze des ALR Husum und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg, die bis 1984 zurückreicht. Während bis 1995 einmal jährlich entnahmebezogen der Nord- oder Südteil des Feldes vermessen wurde, wird seit 1997 für das gesamte Feld vor und nach der Entnahme eine Peilung durchgeführt. Die Lottiefen werden auf den Pegel „Westerland“ beschickt, wobei der Beschickungsfehler bei $\pm 0,3$ m liegt. Zusätzliche Informationen zur Korngrößenverteilung liegen aus dem Abschlussbericht „Meeresbiologische Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ des Instituts für Hydro- und Fischereibiologie (IHF) der Universität Hamburg vor (THIEL u. REGIER, 1999). Im Rahmen des Projekts wurde eine Aufnahme der Meeresbodenoberfläche mit Seitensichtsonar (SSS) durchgeführt sowie eine Reihe von Boden- und Kernproben entnommen.

Im Gewinnungsfeld „Graal-Müritz 1“ fanden in der Zeit zwischen März 1999 bis September 2001 vier Vermessungen durch das BSH statt. Die Lottiefen wurden auf den Pegel „Warnemünde“ beschickt; der Beschickungsfehler liegt bei $\pm 0,15$ m. Zusammen mit dem IfG wurden 10 SSS-Aufnahmen und begleitende Sedimentbeprobungen unter zusätzlichem Einsatz einer Videokamera auf einem festen Stationsnetz durchgeführt. Das Staatliche Amt für Umwelt und Natur (StAUN) Rostock stellte Daten aus dem „GIS Küste Mecklenburg-Vorpommern“ zur Verfügung.

In der Tromper Wiek konnte auf umfangreichem Datenmaterial des IfG aufgebaut werden, das im Rahmen des EU-Teilprojekts „BASYS – Nearshore and Coastline Dynamics“ erhoben wurde (SCHWARZER et al., 1999). Daneben konnte auf einige Datenbestände am Institut für Ostseeforschung (IOW) in Warnemünde zurückgegriffen werden. Ergänzende Projektarbeiten umfassten regelmäßige SSS-Aufnahmen, Echolotvermessung, Sedimentbeprobung mit Forschungstauchern des IfG, Greifern und Vibrocorer sowie hydrographische Messungen (Strömungen und Seegang).

3. Untersuchungsmethoden

3.1 Positionierung und Vermessung

Die Positionen für die im Projekt durchgeführten Echolotvermessungen, Seitensichtsonar-Aufnahmen und Sedimentbeprobungen wurden mit Hilfe des Differential Global Positioning Systems (DGPS) bestimmt. Als Referenzstationen dienten Helgoland bzw. Wustrow. Der Positionsfehler liegt in Abhängigkeit von Signalqualität und Entfernung zur Referenzstation im Bereich von 3 bis 10 m. Die Beschickung der Lottiefen erfolgte mit Daten des jeweils nächst gelegenen Pegels.

3.2 Seitensichtsonar (SSS)

Zur flächendeckenden Aufnahme des Meeresbodens im Bereich der Entnahmestellen sowie zur Identifikation von möglichen Veränderungen der Sedimentverteilungsmuster wurden Sonogramme mit hochauflösenden Seitensichtsonar-Geräten (EG&G DF 1000 und Klein Model 595) erstellt. Die digitale Aufzeichnung und Weiterverarbeitung der Rohdaten erfolgte mit den Software-Produkten ISIS SONAR und DELPH MAP.

3.3 Hydrographische Messungen

Für die Erfassung der Strömungen wurden akustische (RCM9, ADCP) und mechanische (RCM7) Strömungsmesser eingesetzt, deren Genauigkeit im Bereich von 1 cm s^{-1} liegt. Der Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) wurde u.a. dazu genutzt, um in einem Entnahmetrichter der Tromper Wiek die Intensität der reflektierten Signale (Echointensitäten) als qualitatives Maß des suspendierten Materials in der Wassersäule zu erfassen. Neben einer WAVEC-Seegangsboje wurde in einer weiteren Messkampagne ein S4ADW-Strömungs- und Seegangsmessgerät ausgebracht, das zusätzlich die Seegangrichtung in dieser Bucht erfasste. Für Pegel- und Seegangsmessungen wurden Wave and Tide Recorder (WTR9) eingesetzt. Sämtliche hydrographische Messreihen sind als Datenbericht erschienen (KLEIN u. MITTELSTAEDT, 2001).

3.4 Sedimentbeprobung

Die Oberflächensedimente wurden mit einem Kastengreifer (BSH) und HELCOM-Backengreifer (IfG) gewonnen und an Bord makroskopisch beschrieben. Eine Videokamera lieferte zusätzliche Informationen über die Beschaffenheit der Sedimentoberfläche zum Zeitpunkt der Beprobung. Für die Gewinnung von 3 bis 6 m langen Sedimentkernen wurden Vibrohammer-Kerngeräte eingesetzt. Eine gezielte Entnahme von Kurzkernen mit Plexiglasrohren, die einen Durchmesser von 8 cm und eine Länge von 1 m hatten, erfolgte in den Entnahmetrichtern der Tromper Wiek durch Forschungstaucher des IfG.

3.5 Korngrößenanalysen

Die Sedimentproben wurden nach Nassabtrennung der Fraktion $<0,063$ mm einer Trockensiebanalyse unterzogen. Die Siebabstufung betrug $0,25 \phi$. Vergleichsanalysen der Ergebnisse des BSH-Labors mit denen des IfG zeigten Übereinstimmung im Rahmen der Fehlertoleranzen.

3.6 Chemische Analysen

Die Bestimmung des Karbonatgehalts wurde mit der „Karbonatbombe“ von MÜLLER und GASTNER (1979) durchgeführt. Die Analyse der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) erfolgte mit einem Ionenfallen-Gaschromatograph-Massenspektrometer (Ion-Trap-GC-MS) und die der schwerflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) mittels Kapillar-Gaschromatographie mit Elektroneneinfangdetektion (GC-ECD).

3.7 Datenauswertung

Die hydrographische Vermessung wird in der Regel entlang äquidistanter Profillinien durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass auf den Profilen eine große Datendichte vorliegt, während zwischen den Profilen eine größere Datenlücke vorliegt. Für eine derartige Datenverteilung bieten sich geostatistische Verfahren (Kriging mit vorgeschalteter Variographie) zur Interpolation der Tiefenwerte an. Die experimentellen Variogramme und angepassten Modellfunktionen wurden mit Surfer (Version 7) berechnet und stellen die Grundlage für die Kriging-Interpolation auf ein Raster mit 10 m Auflösung dar. Auf der Basis dieser Tiefenkarten erfolgte die quantitative Analyse mit dem Geographischen Informationssystem ArcView GIS 3.2a.

Für die Fehlerbetrachtung spielen der Beschickungs- sowie der Schätzfehler der Kriging-Interpolation eine Rolle. Während der Beschickungsfehler für die jeweiligen Seegebiete unterschiedlich sein kann, liegt der Kriging-Schätzfehler bei 0,15 bis 0,2 m. Bei der Bewertung von Sedimentations-/Erosionsverteilungen, die aus den Differenzen von bathymetrischen Datensätzen berechnet wurden, ist der Fortpflanzungsfehler zu berücksichtigen, der sich aus der Summe des jeweiligen Beschickungsfehlers und Kriging-Schätzfehlers zusammensetzt.

Morphologische Transportraten ($\text{m}^3 \text{d}^{-1} \text{m}^{-1}$) wurden nach dem Ansatz von VAN RIJN u. WALSTRA (2002) ermittelt. Anhand der Entnahmetrichter und -mulden können die Füllvolumina pro Zeit berechnet und auf eine Wegstrecke anhand des Durchmesser der Strukturen normiert werden.

4. Ergebnisse

4.1 Hohes Watt bei Pellworm

Im Hohen Watt bei Pellworm wurde im Juli 1994 als einmalige Maßnahme ein Volumen von 290.263 m³ Sand für eine Deichverstärkung entnommen. Der Abbau erfolgte im Stechkopfverfahren. Die Entnahmestelle liegt 350 m östlich der Insel Pellworm im nordfriesischen Watt und nimmt eine Fläche von 0,34 km² ein. Die Wassertiefen liegen im Gewinnungsgebiet zwischen 0,8 und 2 m unter NN (Abb. 1).

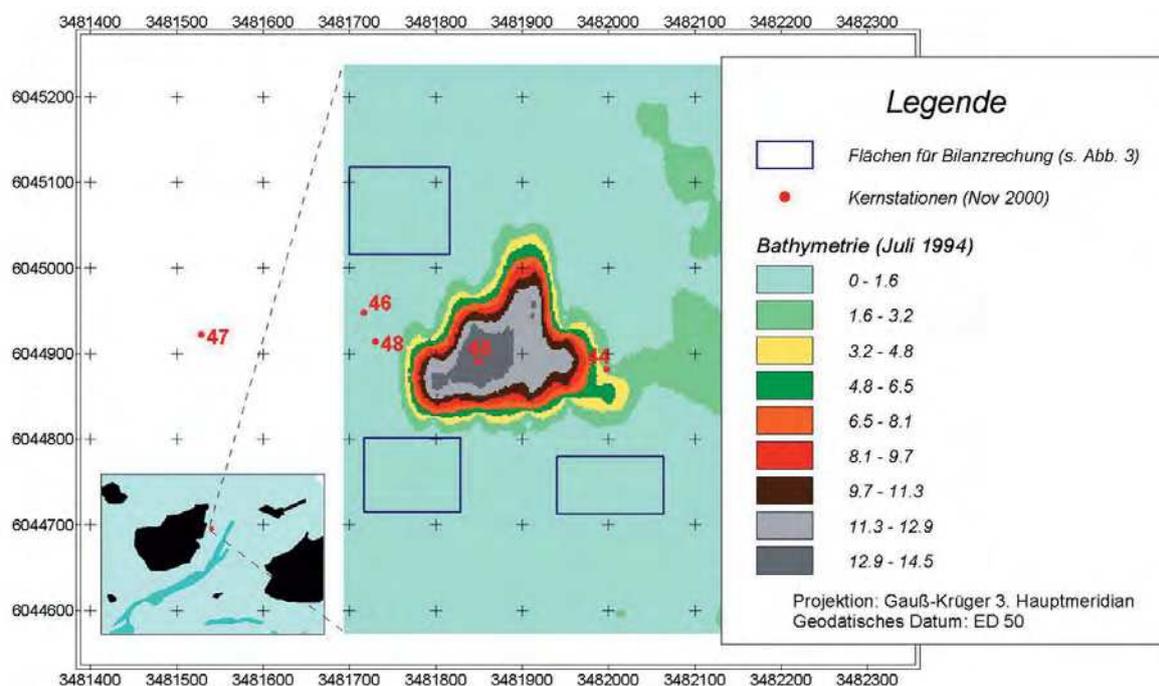


Abb. 1: Lage der Entnahmestelle im Hohen Watt bei Pellworm und Darstellung der bathymetrischen Verhältnisse unmittelbar nach der Entnahme (Juli 1994). Zusätzlich sind die Kernstationen (November 2000) sowie die Flächen zur Analyse der Tiefenänderungen des umliegenden Wattbodens (Polygone) abgebildet

4.1.1 Morphologische Verhältnisse

Lokale Morphologie (Trichter)

Durch die Sedimententnahme entstand ein Trichter mit einer maximalen Tiefe von 13,5 m unter dem ursprünglichen Wattboden. Die größten Tiefen traten im westlichen und nördlichen Trichterbereich auf; die größten Hangneigungen von 20 bis 21,5° wurden im südlichen Randbereich erreicht. An den Rändern war vor allem im S und E ein Sedimentwall entstanden, der bereits im ersten Jahr nach der Entnahme größtenteils wieder eingeebnet war. Zu diesem Zeitpunkt betrug die maximale Tiefe 9 m. Der Trichter wurde in den Folgejahren kontinuierlich wieder verfüllt (Abb. 2). Nach einem Zeitraum von 6,5 Jahren waren 95 % des ehemaligen Trichtervolumens aufgefüllt. Die maximale Hangneigung von 21,5° im Juli 1994 nahm bis zum darauf folgenden Sommer auf 15° ab und liegt seit 1998 unter 2°. Der Trichter hatte während des gesamten Zeitraums (1994 bis 2000) auch bei Niedrigwasser Verbindung zur Norderhever über eine 0,5 m tiefe Rinne, die seit November 2000 auf ca. 1 m vertieft ist.

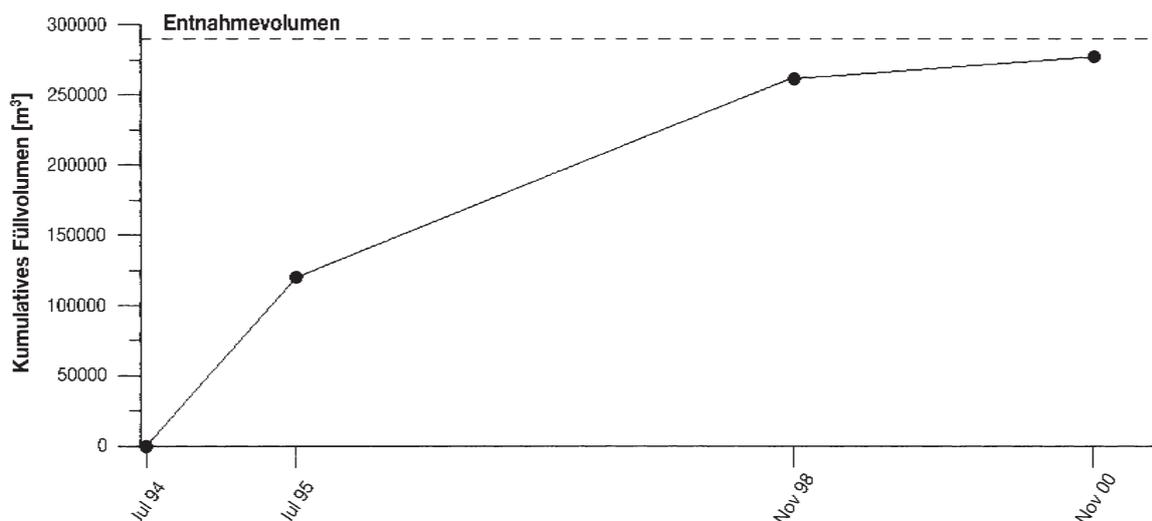


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der Auffüllung des Entnahmetrichters im Hohen Watt bei Pellworm. Die gestrichelte Linie markiert das Entnahmevolumen von 290.263 m³, die Punkte symbolisieren das kumulative Füllvolumen zum jeweiligen Vermessungszeitraum

Regionale Morphologie (umliegender Wattboden)

Eine vor der Materialentnahme durchgeführte Vermessung im April 1994 zeigt eine schwach nach E geneigte Wattfläche. Abb. 3 zeigt das Verhalten des ungestörten Wattbodens im näheren Umfeld, in der die Sedimentations-/Erosionsbilanz, bezogen auf den April 1994, dargestellt ist. Zwischen Juli 1994 und Juli 1995 deutet sich zwar eine Sedimentationsphase an, die aber wie alle anderen Werte innerhalb des Fehlerbereichs liegt. Die topographischen Änderungen der umliegenden Wattoberfläche von Juli 1994 bis November 2000 liegen bei $-0,01 \pm 0,08$ m, die Minimum- und Maximumwerte streuen mit $\pm 0,15$ cm deutlich innerhalb des Fortpflanzungsfehlers.

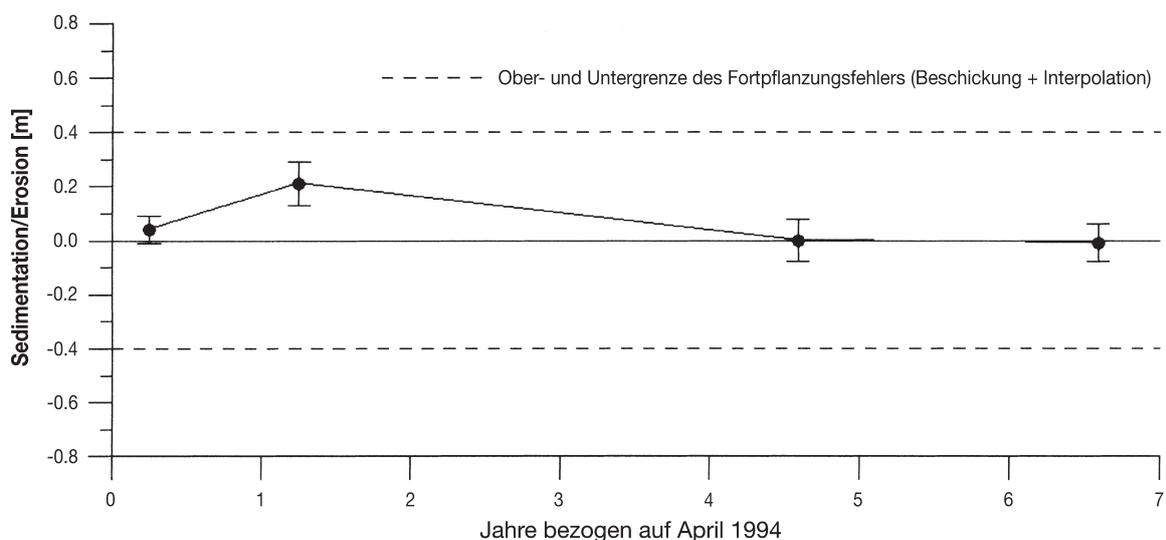


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Sedimentation/Erosion des ungestörten Wattbodens in der Umgebung des Entnahmetrichters. Zur Lage der Flächen, die in die Berechnung gingen, s. Abb. 1

4.1.2 Sedimentologische Befunde

Im Bereich der ehemaligen Sedimentnahme wurden 5 Sedimentkerne im November 2000 entnommen (Abb. 1), wobei es aus technischen Gründen nicht möglich war, die gesamte, bis zu 12 m mächtige Verfüllung zu beproben, sondern nur die ersten 2 bis 4 Meter des Füllmaterials.

Im ehemaligen Trichterzentrum (Kern 45) steht an der Oberfläche bis in 2,40 m Teufe eine mm- bis cm-mächtige Wechsellagerung aus Schluff und Feinsand mit meist charakteristischer Flaserschichtung an. Bereits ab 2,10 m beginnt das Sedimentgefüge eine polyedrische Ausbildung aufzuweisen, die ab 2,40 m bis 3,10 m (Endteufe) in einem stark schluffhaltigen Füllmaterial sehr gut ausgeprägt ist. Im Bereich des Trichterrands (Kern 44) dominiert über den Kerngewinn von ca. 2 m weitgehend ungeschichteter Feinsand als Füllmaterial, der in den ersten 0,5 m bioturbate Strukturen aufweist und zwischen 0,60 und 1,20 m von cm-mächtigen Hydrobienlagen unterbrochen ist. Der Referenzkern 47 im Westen des Untersuchungsgebiets zeichnet sich durch eine ca. 3 m mächtige Wechsellagerung von Feinsand und Schluff mit Flaserschichtung aus, die von einer 0,35 m mächtigen Feinsandaufgabe bedeckt ist. Es handelt sich dabei um ein typisches Wattsediment, das auch in den oben beschriebenen Kernen aus dem Trichterbereich wieder gefunden wurde. Ab einer Teufe von 3,11 m sind Ansätze eines polyedrischen Gefüges zu erkennen, das im schluffigen Füllmaterial ab 3,57 bis 4,00 m (Endteufe) wesentlich ausgeprägter in Erscheinung tritt.

4.2 Gewinnungsfeld „Westerland II“

Das Entnahmefeld „Westerland II“ liegt 7 km westlich von Sylt und hat eine Fläche von 14,5 km² (Abb. 4). Dort wird seit 1984 regelmäßig Material für Küstenschutzmaßnahmen vor Sylt abgebaut. Die Gesamtmenge des bisher geförderten Materials beläuft sich auf ca. 20 Mio. m³. Es werden nicht die rezenten Nordseesande gefördert, sondern der darunter liegende ältere Kaolinsand, der ein gröberes Kornspektrum aufweist und daher für den Verwendungszweck besser geeignet ist. Die Gewinnung erfolgt mit Stechkopfsaugern.

Die Sandentnahme im Entnahmegebiet „Westerland II“ begann im nördlichen Bereich und setzte 10 Jahre später auf der südlichen Teilfläche ein. Dabei entstanden bis heute zwei große Trichterbecken im Norden und Süden mit einer West-Ost-Erstreckung von 2 bzw. 1,5 km und einer Nord-Süd-Erstreckung von 2 bzw. 1 km. Die Entnahmetrichter sind bis zu 10 m tiefer als der umliegende Meeresboden, der im Osten von -14 mNN gleichförmig nach Westen auf -15 mNN abfällt. Im August 1991 wurde in einem der nördlichen Trichter nach der jährlichen Entnahme eine maximale Tiefe von -32 mNN erreicht, die im folgenden Frühjahr bis auf ca. -25 mNN wieder verfüllt war.

4.2.1 Morphologische Verhältnisse

Bei der Auswertung der Daten ist zu berücksichtigen, dass Echolote mit verschiedenen Frequenzen zum Einsatz kamen. Die hochfrequenten, 100 und 200 kHz-Lote erfassen die stark wasserhaltige Schlickoberfläche in den Trichtern, die vom 50 kHz-Lot dagegen durchdrungen wird. Selbst in Bereichen mit ungestörtem Meeresboden streuen die Werte unterschiedlich stark um ihren Mittelwert (Abb. 5). Bei der Beurteilung der Differenzen ist der Fortpflanzungsfehler zu berücksichtigen, der sich aus der Summe von Beschickungsfehler

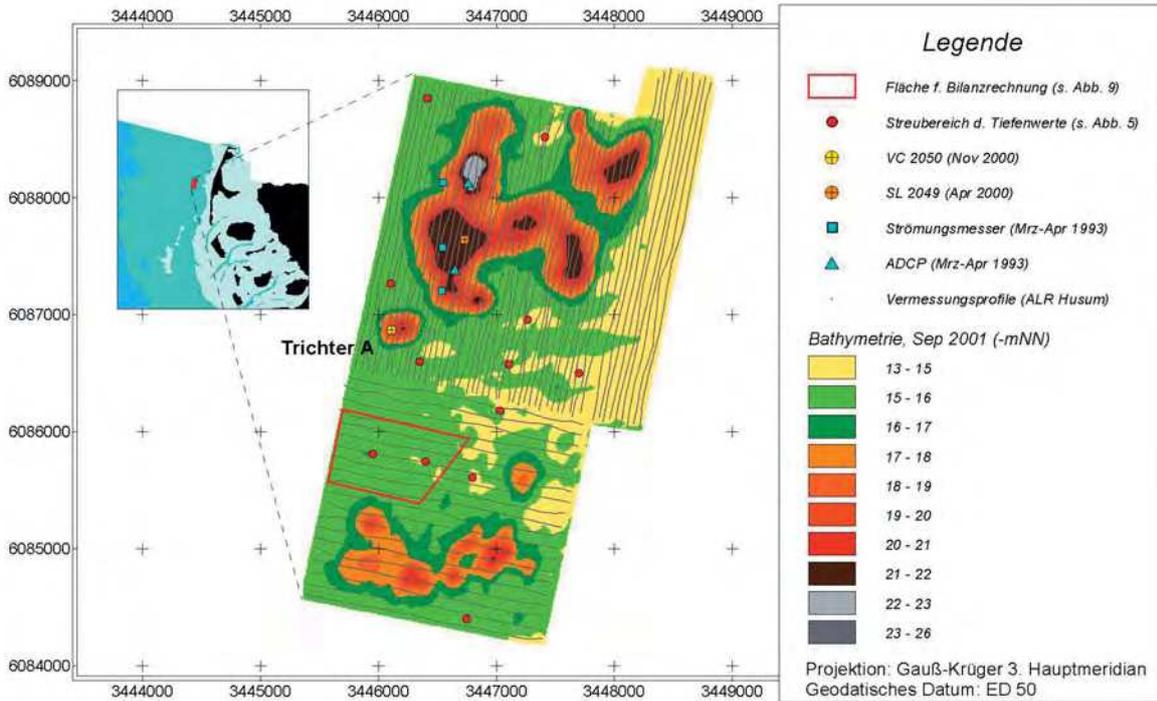


Abb. 4: Lage des Entnahmefeldes „Westerland II“ und Darstellung der bathymetrischen Verhältnisse vom September 2001. Zusätzlich sind die Bohrpunkte des Vibrokerns VC 2050 und Schwerelots SL 2049, die Stationen der Strömungsmessungen aus dem Jahr 1993 und die Lage der aktuellen Vermessungsprofile des ALR Husum abgebildet. Die roten Punkte symbolisieren die Positionen, an denen die Streuung der Wassertiefen für Abb. 5 ermittelt wurde. Die Tiefendaten innerhalb des roten Polygonzugs wurden für die Berechnungen von Sedimentation/Erosion des umliegenden Meeresbodens herangezogen (s. Abb. 9)

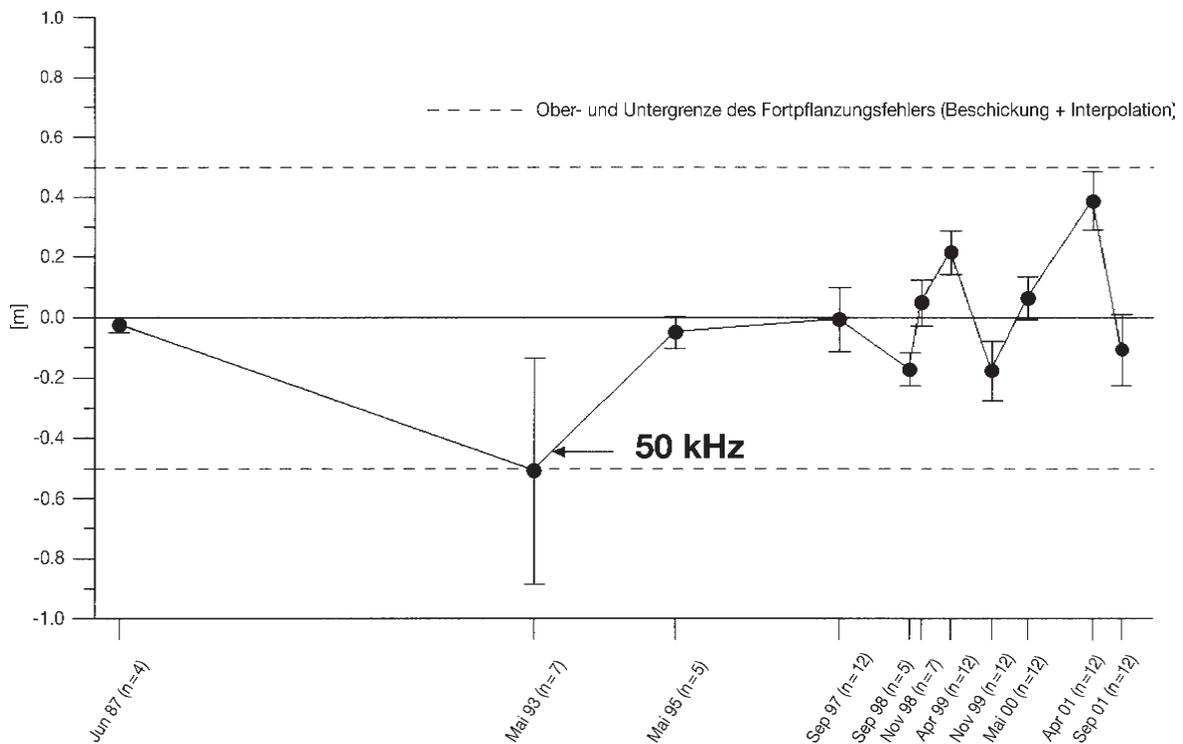


Abb. 5: Absolute Abweichungen von der mittleren Wassertiefe an ausgewählten Stationen im Entnahmefeld „Westerland II“ (Lage s. Abb. 4)

($\pm 0,3$ m) und Kriging-Schätzfehler ($\pm 0,2$ m) zusammensetzt. Dadurch sind Tiefenänderungen des Meeresbodens vor Sylt im Bereich von 1,0 m auf der Basis der verfügbaren Datensätze nicht zu interpretieren.

Lokale Morphologie (Trichter)

In den Jahren 1984 bis 2000 wurden 21,3 Mio. m³ Sediment entnommen, denen 2,3 Mio. m³ Füllmaterial und Material aus Hangrutschungen gegenüberstehen. Damit steht einer durchschnittlichen Entnahme von 1.250.000 m³ pro Jahr eine jährliche Verfüllungsrate von 135.000 m³ gegenüber, d.h. es wird etwa zehnmal mehr Material entnommen als durch natürliche Prozesse in den Trichtern sedimentiert.

Am Beispiel des Trichters A (Lage siehe Abb. 4) im mittleren Bereich des Entnahmefeldes konnte die durch weitere Abbauaktivitäten ungestörte Teilverfüllung untersucht werden (Abb. 6). Das Entnahmevolumen betrug ca. 340.000 m³, jedoch erreicht das kumulative Füllvolumen nur 49.000 m³; ab November 1999 ist sogar eine kontinuierliche Abnahme im Füllvolumen auf 27.000 m³ zu beobachten.

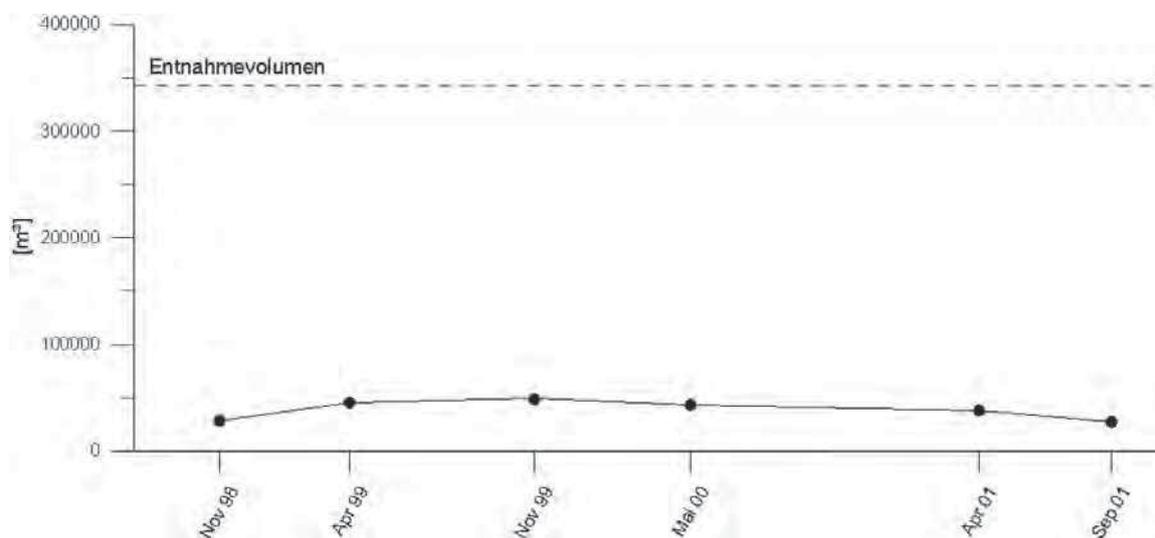


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Teilverfüllung eines singulären Entnahmefunnels (Trichter A in Abb. 4). Die gestrichelte Linie markiert das Entnahmevolumen von 340.000 m³, die Punkte symbolisieren das kumulative Füllvolumen zum jeweiligen Vermessungszeitpunkt

In Abb. 7 sind beispielhaft die 20-m-Isobathen verschiedener Jahrgänge aus dem nördlichen Trichterbecken dargestellt, die die Konstanz der morphologischen Formen bestätigen. Die Teilverfüllung zeichnet sich neben abnehmenden Wassertiefen im zentralen Bereich durch eine Verflachung der Trichterflanken aus, die in der flächenhaften Sedimentations-/Erosionsbilanz erkennbar ist (Abb. 8). Dabei herrscht an den (nord)westlichen Trichterrändern überwiegend Sedimentation vor, während die östlichen Hänge durch Erosion leicht abflachen. Die Hangneigungen weisen nach einer Entnahme Werte zwischen 5° (1 : 11) bis 10° (1 : 6) auf, pendeln sich im Verlauf des Winters auf 3° (1 : 20) bis 5° ein.

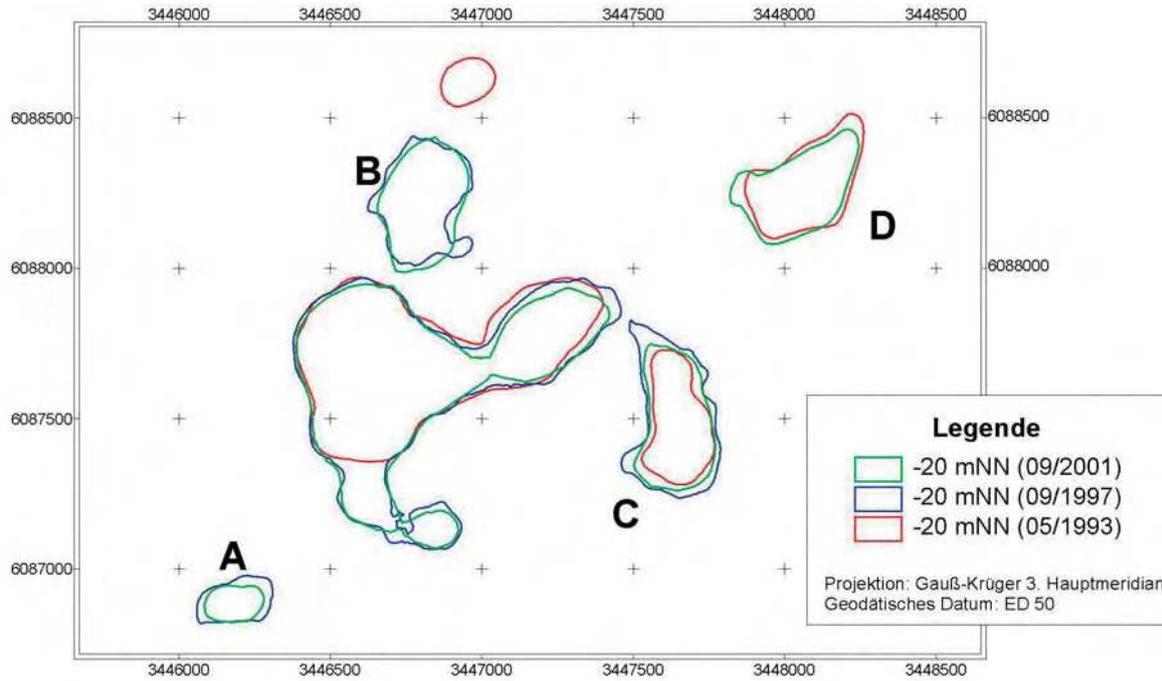


Abb. 7: Lage der -20 mNN-Isobathe im nördlichen Bereich des Entnahmefeldes „Westerland II“ in den Jahren 1993, 1997 und 2001. Der Datensatz vom Mai 1993 wurde mit einem 50-kHz-Echolot erhoben und für die Vergleichbarkeit auf der Basis von Abb. 5 korrigiert

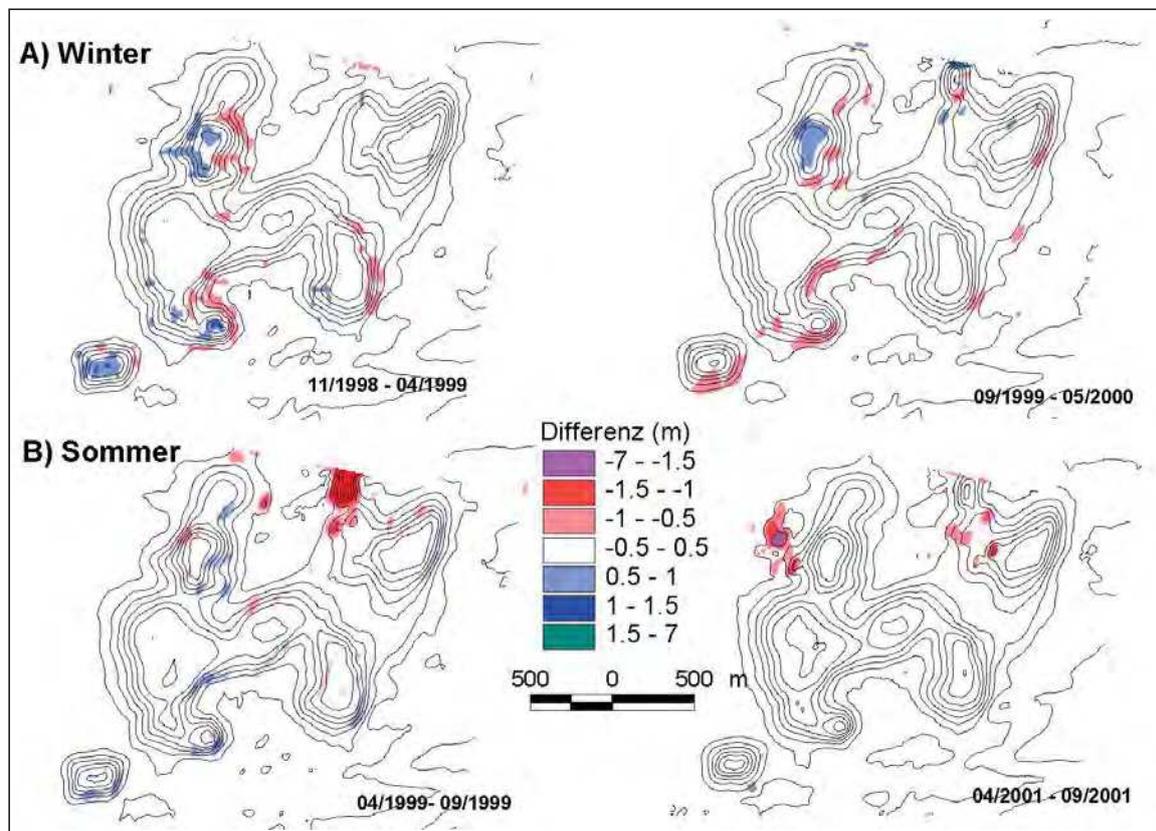


Abb. 8: Saisonale Sedimentations-/Erosionsverteilung im Entnahmegebiet „Westerland II“ (nördliches Trichterbecken). Rote Flächen = Erosion, blaue Flächen = Sedimentation

Regionale Morphologie (umliegender Meeresboden)

Abb. 9 illustriert die Entwicklung des umliegenden Meeresbodens über einen Zeitraum von 14 Jahren. Die Tiefenwerte stammen aus einem von den Entnahmeaktivitäten weitgehend ungestörten Bereich zwischen den beiden Trichterbecken (Lage siehe Abb. 4) und streuen im systematischen Fehlerbereich der Beschickung und Kriging-Schätzung, so dass für den Untersuchungszeitraum keine großräumigen topographischen Änderungen infolge der Sedimententnahme festzustellen sind.

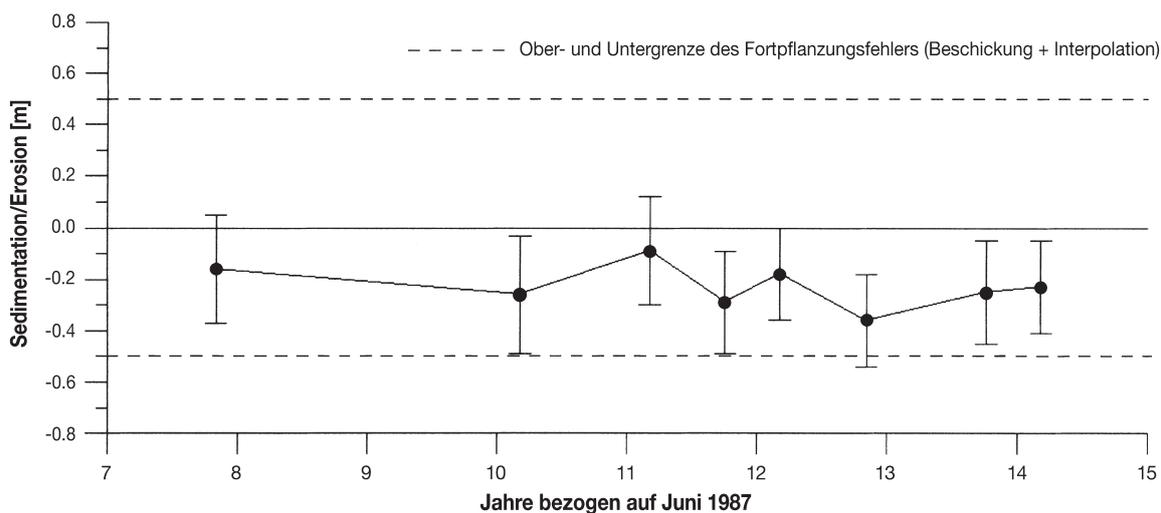


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der Sedimentations-/Erosionsbilanz des ungestörten Meeresbodens im Umfeld der Entnahmebecken

Aus den flächendeckenden Sonogrammen der Jahre 1993 und 1999 sind im Umfeld der Trichter W-E verlaufende flache Sandrücken bekannt, die sich etwa 0,5 m über den umliegenden Meeresboden erheben und einen Kammabstand von ca. 200 m aufweisen. Auf der Basis der horizontalen Lageveränderungen ihrer nach NW bis NE exponierten Flanken wurden aus den jüngeren bathymetrischen Datensätzen mögliche Transportrichtungen für diese morphologischen Strukturen ermittelt. Dabei konnte für den Zeitraum von 1997 bis 2000 nachgewiesen werden, dass die Sandrücken 20 bis 25 m um ihren Kern oszillieren.

4.2.2 Sedimentologische Befunde

Die morphologischen Befunde spiegeln sich auch in den Korngrößenspektren der Oberflächenproben aus dem Bereich zwischen den Entnahmebecken wider. Sie entsprechen denen, die bei früheren Untersuchungen des BSH und des IHF gefunden wurden, d.h. die Korngrößenassoziationen sind außerhalb der Trichter gleich geblieben.

In den Entnahmetrichtern findet man dagegen eine Wechsellagerung von Schlick und Sanden. Ein typisches Profil zeigt ein 3 m langer Vibrokern (VC 2050), der an der westlichen Flanke des singulären Trichters A (Lage siehe Abb. 7) im November 2000 entnommen wurde. Die einmalige Sandentnahme hatte hier vor dem August 1995 stattgefunden. Die Wassertiefe betrug nach dem Eingriff ca. -23 mNN; im April 2001 lag sie bei -20,5 mNN. Bei einem Kerngewinn von 3 m ist daher das gesamte, seit 1995 abgelagerte Füllmaterial enthalten.

Die Kernabfolge besteht aus Schlick, schluffigem Feinsand und mittel- bis grobkörnigem Sand. In den unteren zwei Metern dominiert der Sandanteil, im oberen Meter Schlick. Die sandige Komponente stammt aus der unmittelbaren Umgebung und besteht überwiegend aus Kaolinsand, untergeordnet aus dem rezenten Meeressand, der am Meeresboden ansteht. Es handelt sich um Material, das durch Rutschungen und Abbruch der Trichterränder in den tieferen Teil geraten ist.

Der Schlick ist dunkelgrau bis schwarz. Auffällig ist die feste Konsistenz besonders der unteren Lagen, die auf eine außerordentlich schnelle Entwässerung und Kompaktion hinweist. Ein abrupter Korngrößenwechsel zwischen Schlick und Sand ist ein Hinweis darauf, dass neben kontinuierlicher Schlicksedimentation ereignisbezogene Einträge von Sand stattgefunden haben.

Schadstoffspektrum des Schlicks

Eine 35 cm mächtige Oberflächenprobe aus dem nördlichen Trichterbecken wurde einer geochemischen Analyse unterzogen, um anhand ihres organischen Schadstoffspektrums Hinweise auf die Herkunft des Materials zu erhalten. Insgesamt wurden 34 organische Verbindungen analysiert, die der Gruppe der schwer flüchtigen Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) und der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) angehören. Zum Vergleich ist in Abb. 10 das jeweilige Schadstoffspektrum von Schlickproben in der Elbmündung dargestellt. Die CKW- und PAK-Spektren der Trichter-Schlickprobe sind nahezu identisch mit denen der Elbmündung, jedoch liegen ihre Konzentrationen etwa das 6,5-fache darunter. Das bedeutet, dass die Elbe-Schlickfahne als Quelle für das schlackige Füllmaterial im Entnahmefeld „Westerland II“ eindeutig identifiziert ist.

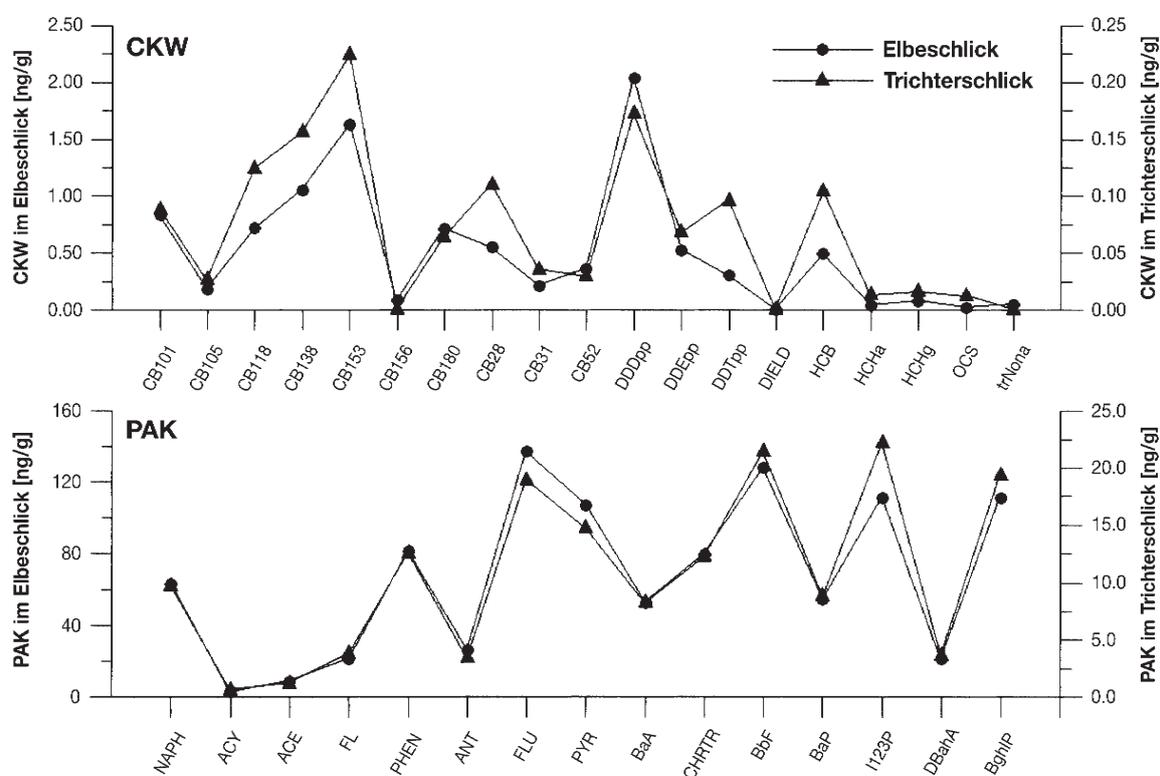


Abb. 10: Geochemisches Spektrum der organischen Schadstoffgruppen CKW und PAK in Schlickproben aus dem nördlichen Entnahmebecken und der Elbe. Man beachte die unterschiedlichen Konzentrationsbereiche von CKW und PAK für beide Proben!

4.2.3 Hydrographische Ergebnisse

Über das Strömungs- und Seegangsfeld vor Sylt liegen zahlreiche Publikationen wie z.B. aus dem JONSWAP-Projekt vor (HASSELMANN et al., 1973). Zusätzlich wurden im Rahmen eines BMBF-Projektes zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt 1993 Strömungsmessungen im nördlichen Trichterbecken durchgeführt (KLEIN, 1993).

Strömung (14.4.–7.5.1993)

Im Bereich des nördlichen Trichterbeckens wurden 3 Verankerungen mit akustischen Strömungsmessern (RCM9) am nördlichen und südlichen Rand und im Trichterzentrum ausgebracht (Abb. 4). Die oberen Strommesser befanden sich in 9 m Wassertiefe, die bodennahen 1 m über dem Meeresgrund, wobei nur im Randbereich bei 16 m Wassertiefe Daten kontinuierlich aufgezeichnet werden konnten, da der bodennahe Strommesser der Trichterstation in 24 m Wassertiefe im Lauf der Messkampagne im weichen Schlick einsank.

In 9 m Wassertiefe lag die Strömungsgeschwindigkeit außerhalb des Trichters im Mittel bei $0,21 \text{ m s}^{-1}$; die bodennahen Werte waren mit $0,22 \text{ m s}^{-1}$ nahezu identisch. Dagegen war die mittlere Strömung innerhalb des Trichters in 9 m Wassertiefe deutlich geringer ($0,004 \text{ m s}^{-1}$) als in 24 m Wassertiefe von $0,14 \text{ m s}^{-1}$. Die bodennahen Restströme, die durch Eliminierung der Gezeitenströme mit einem Gauß'schen Tiefpassfilter über 48 h ermittelt wurden, sind an den Randstationen mit $0,024 \text{ m s}^{-1}$ mehr als doppelt so hoch wie im Trichter ($0,01 \text{ m s}^{-1}$). Während sich die Strömungsrichtung in Bodennähe kaum ändert (155° bzw. 161°), sind Richtungsänderungen in 9 m Wassertiefe dagegen erheblich. Von N nach S ändern sich die Richtungen von 190° über 97° auf 151° . Der Reststrom ändert folglich in der oberen Wassersäule seine Richtung alle 6 bis 7 m um 1° .

4.3 Gewinnungsfeld „Gaal-Müritz 1“

Das $8,2 \text{ km}^2$ große Gewinnungsfeld „Gaal-Müritz 1“ liegt ca. 3 km westlich der Erosionsküste von Marktgrafenheide/Fischland in Wassertiefen von 7 bis 12 m (Abb. 11). Die Sedimentverteilungskarte der westlichen Ostsee (Blatt Fischland-Darß) zeigt im Süden und Norden des Gebietes zwei Geschiebemergelrücken, die landwärts in die Kliffs übergehen (TAUBER u. LEMKE, 1995). Das Entnahmegebiet liegt zwischen beiden Rücken in einem Bereich mit einer 2 bis 4 m mächtigen, weitgehend durchgehenden Decke aus marinen Sanden. Bei der Gewinnung wird die oberste Schicht dieser Sandauflage mit einem Schleppkopfsauger abgetragen, wobei Furchen bis 1 m Tiefe entstehen, zwischen denen Rippen stehen bleiben können. Das Entnahmegebiet wird seit 1988 genutzt; bis 1999 wurden insgesamt $1,1 \text{ Mio. m}^3$ Sand entnommen. Während der Projektphase wurden 292.000 m^3 im November/Dezember 1999 bzw. 341.000 m^3 im Zeitraum von September bis November 2000 für Küstenschutzmaßnahmen gewonnen.

4.3.1 Morphologische Verhältnisse

Das Entnahmegebiet ist morphologisch mäßig strukturiert, die Wassertiefe nimmt vom SE-Rand von 7 bis 9 m seewärts bis auf 12,5 m zu. Im Entnahmefeld treten bis 2,7 m hohe \pm W-E verlaufende Sandrücken mit Kammabständen bis 180 m auf. An ihren Flanken werden häufig Sandrippel mit Abständen von 2 bis 5 m beobachtet. Die Sandrücken weisen ei-

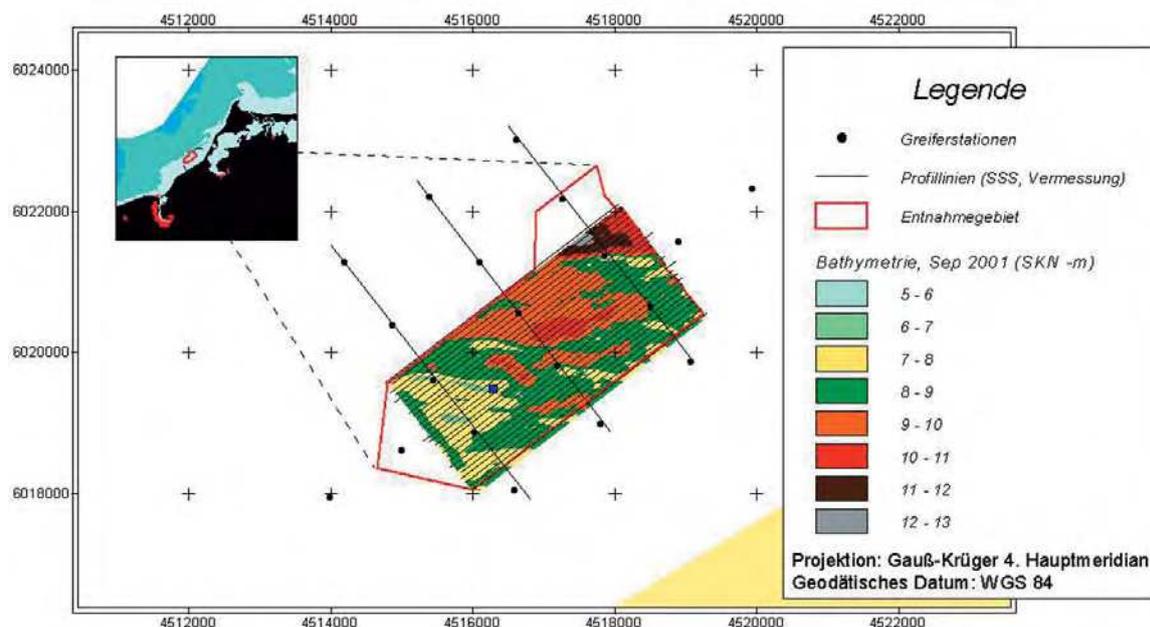


Abb. 11: Lage und bathymetrische Verhältnisse vom September 2001 des Gewinnungsfeldes „Graal-Müritz 1“. Die Punkte symbolisieren die Greiferstationen. Außerdem sind die Profillinien der standardmäßigen SSS-Befahrung eingetragen

nen asymmetrischen Querschnitt auf; der Steilhang liegt auf der Nordseite, so dass von einer N- bis NE gerichteten Verlagerung der Strukturen auszugehen ist. Durch die intensive Entnahme auf kleineren Teilfeldern entstanden muldenförmige Strukturen am Seegrund mit einer max. Tiefendifferenz von 1 m zum ursprünglichen Meeresboden (Abb. 12).

Bei der SSS-Befahrung im März 1999 waren mit Ausnahme einer Entnahmerinne im Südwesten keine Spuren der letzten Entnahme vom Mai/Juni 1997 zu erkennen. Nach erneuten Sandentnahmen im Herbst 1999 und Herbst/Winter 2000 zeichneten sich die Entnahmespuren als scharfe Konturen deutlich in den Sonogrammen ab, wobei der Schleppkopf pro Durchgang eine ca. 0,5 m tiefe und etwa 2 m breite Entnahmerinne hinterließ. Im Mai 2000 bzw. Juni 2001 waren diese Entnahmerinnen weitgehend „verwischt“, aber noch erkennbar; insbesondere tiefere Stellen traten in Form eines stärkeren Rückstreusignals markant in Erscheinung.

Außerhalb der Teilfelder waren keine substantiellen topographischen Änderung des Meeresbodens unter Berücksichtigung des Fortpflanzungsfehlers von 0,3 m erkennbar (Abb. 12). Ein Vergleich von Entnahmemenge (291.000 m³) und Füllvolumina in den Monaten März (137.000 m³) bzw. März 2001 (76.000 m³) verdeutlicht, dass zwar zunächst die Entnahmemulde zu etwa 50 % teilverfüllt wurde, im darauf folgenden Jahr jedoch 50 % des Füllvolumens wieder aus der Struktur exportiert worden waren und somit kein linearer Auffüllungsvorgang stattfindet.

4.3.2 Sedimentologische Befunde

Das Material am Meeresboden besteht aus Fein- bis Mittelsand mit nur geringen Ton- und Schluffanteilen sowie Schill verschiedener Molluskenarten. In den Vermessungen wie auch in den Sonogrammen sind bis zu 2,7 m hohe Rücken mit Kammabständen bis ca. 180 m

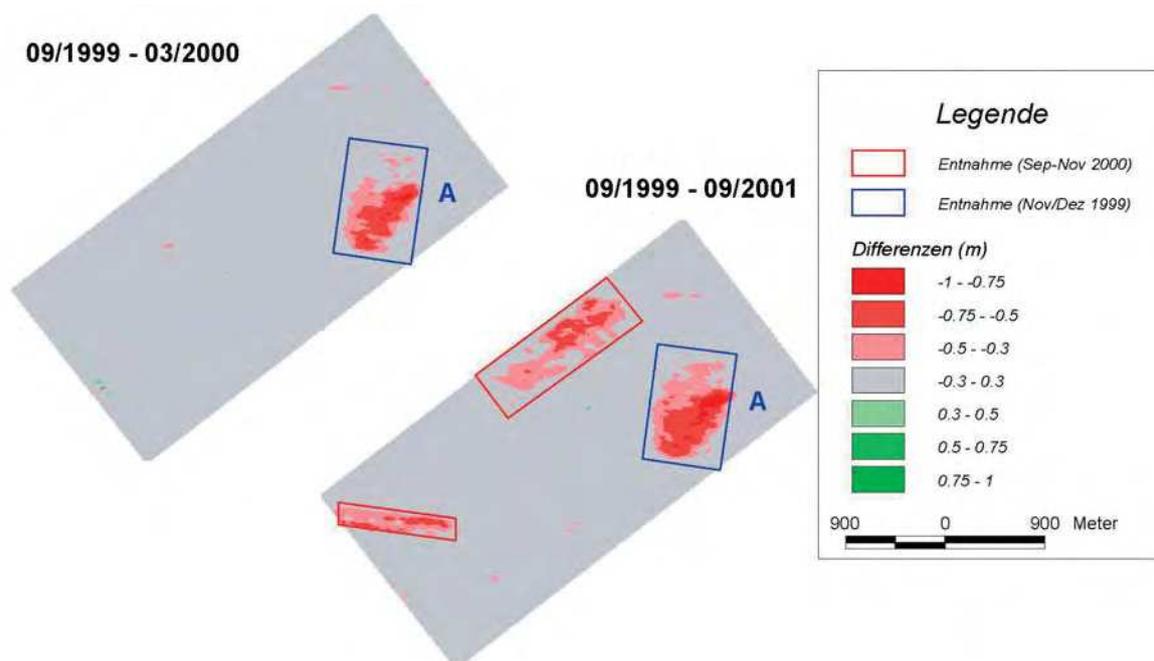


Abb. 12: Sedimentations-/Erosionsverteilungen aus den Jahren 1999–2000 und 1999–2001 im Entnahmegebiet „Graal-Müritz 1“. Rote Flächen = Erosion, grüne Flächen = Sedimentation

zu erkennen, an deren Hängen häufig Rippeln mit Abständen zwischen 2 und 5 m auftreten. Im Bereich der Täler zwischen den Sandrücken findet sich zum Teil sehr grobes Material. Es ist häufig das unter dem Sand liegende Restsediment, das aus der Aufarbeitung des Geschiebemergels hervorging.

Die marinen Sande sind im Wesentlichen Abtragungsprodukte des Geschiebemergels und stammen aus der Kliffzone, der Erosion der pleistozänen Unterlage oder aus dem Transport von den benachbarten Gebieten im Norden und Süden, in denen der Geschiebemergel ohne Sandbedeckung am Meeresboden ansteht. Den damit verbundenen Transport- und Umlagerungsprozessen verdanken sie ihre gute Sortierung. Untergeordnet finden sich vorwiegend im Bereich der Hochlagen spätpleistozäne und frühholozäne Sande, die sich von den marinen Sanden durch einen höheren Schluff- und Tongehalt unterscheiden.

Das ursprüngliche Sedimentverteilungsmuster hat sich nach den Entnahmen im Wesentlichen erhalten, da nur die oberste Sedimentschicht abgetragen wurde und das Material der tieferen Schichten granulometrisch dem an der Meeresbodenoberfläche entspricht. In den Video-Aufnahmen der früheren Entnahmebereiche wurde auch die vor dem Eingriff vorhandene Besiedlung durch Epifauna beobachtet. Lediglich das Füllmaterial der frischen Baggerspuren scheint etwas feinkörniger als das der stehen gebliebenen Rippen zu sein. Diese Vermutung basiert auf Unterschieden bei der Rückstreuung in den Sonogrammen; der Effekt könnte aber auch durch eine andere Lagerungsdichte hervorgerufen sein. Die Video-Aufzeichnungen lassen keine Materialunterschiede erkennen; eine gezielte Probennahme war mit den im Projekt angewandten Methoden nicht möglich.

4.4 Tromper Wiek

Die Tromper Wiek ist eine breite, nach NE offene Bucht zwischen Kap Arkona und Jasmund (Rügen) mit Wassertiefen bis etwa 20 m (Abb. 13). Die Isobathen verlaufen weitgehend parallel zur Küstenlinie. Anhand von Sonogrammen und begleitender Sedimentbeprobung können verschiedene Sedimenttypen kartiert und ihre räumlichen Verteilungsmuster dargestellt werden. Vor der Schaabe-Nehrung finden sich bis zu einer Tiefe von ca. –10 mNN Feinsande, an die sich im Norden und Süden Restsedimentflächen anschließen. Seewärts folgen bis ca. –14 mNN großräumige Kiessandflächen, die auffällige morphologische Rücken bilden und als Reste eines ehemaligen Strandwallsystems gedeutet werden (SCHWARZER et al., 1999). Den zentralen Teil der Bucht nehmen seewärts bis –14 mNN Feinsande ein, die im Gegensatz zum küstennahen Feinsandtyp mit zunehmender Küstenentfernung einen steigenden Gehalt an Schluff und Ton aufweisen. Insgesamt sind Sedimentverteilung und Morphologie großräumig stabil (SCHWARZER u. DIESING, 2001; DIESING, 2003).

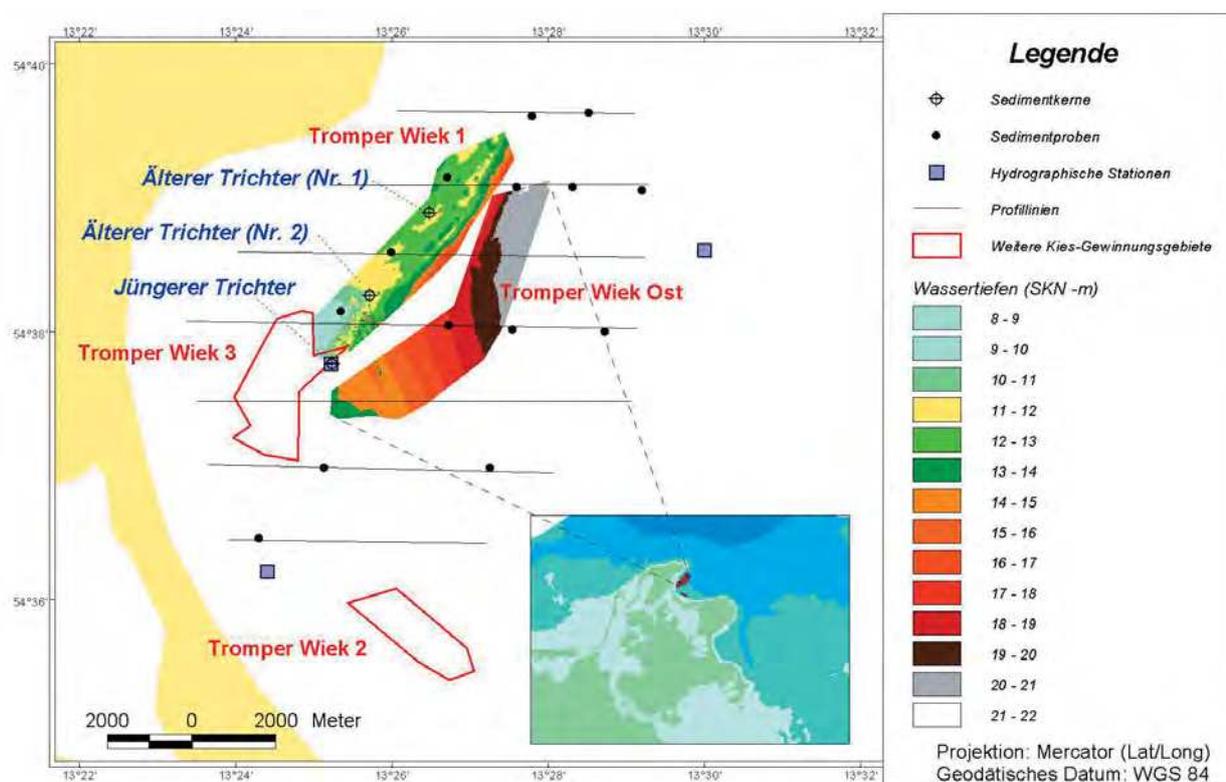


Abb. 13: Lage und bathymetrische Verhältnisse in den beiden Gewinnungsfeldern „Tromper Wiek 1“ und „Tromper Wiek Ost“. Zusätzlich sind die Greifer- und hydrographischen Messstationen sowie die Lage der Profillinien für die standardmäßigen SSS-Aufnahmen dargestellt

Aus dem Feld Tromper Wiek 1 wird Kiessand im Stechkopfverfahren entnommen. Das Entnahmefeld liegt im Hangbereich des ertrunkenen Strandwallsystems und erstreckt sich über Wassertiefen von –9 bis –14 mNN. Das Fördergut wird an Bord des Baggerschiffes gesiebt (sog. „Screening“) und die Fraktion <2 mm als Spill vor Ort wieder in die See zurückgegeben. Seewärts schließt sich die Sandlagerstätte „Tromper Wiek Ost“ an. Hier wird für Küstenschutzmaßnahmen Sand im Schleppkopfverfahren in Wassertiefen zwischen –14 und –21 mNN gefördert. Die Nutzung beider Lagerstätten findet seit den 1980er-Jahren statt, jedoch liegen keine bathymetrischen Datensätze zu den jeweiligen Entnahmeterminen vor.

4.4.1 Morphologische Verhältnisse

Lokale Morphologie – Trichterstrukturen

Im Feld „Tromper Wiek 1“ entstanden durch den intensiven Einsatz von Stechrohrbaggern zahlreiche Trichterstrukturen, die einen Durchmesser von 5 bis 50 m und eine maximale Tiefe von 6 bis 7 m aufweisen (Abb. 14). Der Abbau begann im NE der Lagerstätte; im südlichen Teilfeld fand der Abbau während der Projektlaufzeit statt und setzte sich ins benachbarte Feld „Tromper Wiek 3“ fort.

Die flächendeckenden Sonogramme des gesamten Bewilligungsfeldes zeigen zwei Bereiche, die sich deutlich voneinander unterscheiden. Im Südteil treten klar definierte Flächen mit sedimentierten Spillsanden und scharfen Konturen auf. Die Entnahmetrichter haben oft einen V-förmigen Querschnitt, und in den bathymetrischen Aufnahmen sind große Höhenunterschiede auf engem Raum zu erkennen. Im Nordteil sind dagegen die Konturen weniger scharf; in den Sonogrammen treten extreme Rückstreuwerte in den Hintergrund und Flächen sedimentierter Spillsande sind undeutlich zu erkennen oder fehlen. Die Querschnitte der Entnahmetrichter sind meistens U-förmig, und die Höhenunterschiede in den bathymetrischen Aufnahmen weniger ausgeprägt. Der Grund für diese Unterschiede liegt in dem höheren Alter der Trichter im Nordteil, wo eine Umlagerung der Sedimente und teilweise Verfüllung der Entnahmetrichter früher eingesetzt hat.

Ein Sonogramm-Vergleich einer Spillsandfläche im Südteil der Lagerstätte zeigt, dass ihre Größe im Mai 2000 ca. 81.000 m² betrug, im Juni 2001 dagegen nur noch 54.000 m² (Abb. 14). Es ergibt sich daher die Möglichkeit, die Entwicklung der Entnahmetrichter unter Einbeziehung der umgebenen Spillsande, die in erster Linie das Ausgangsmaterial für

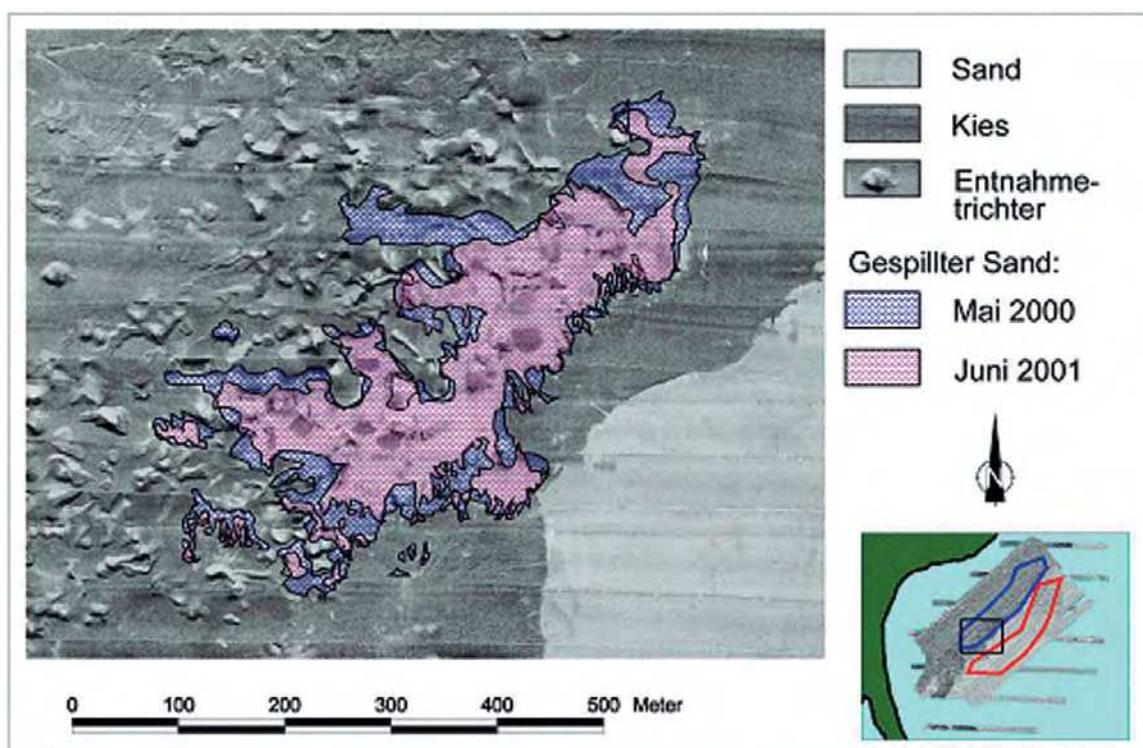


Abb. 14: Räumliche Veränderung von Spillflächen im südlichen Bereich des Gewinnungsfeldes „Tromper Wiek 1“ zwischen Mai 2000 und Juni 2001

die Verfüllung darstellen, zeitlich zu betrachten. Als Beispiel wurden zwei Trichter ausgewählt, die mit Unterstützung von Forschungstauchern ab Dezember 2000 genauer untersucht wurden.

4.4.2 Sedimentologische Befunde

Älterer Entnahmetrichter (Nr. 1)

Dieser Trichter befindet sich im nördlichen Teilfeld bei $54^{\circ}38'16''$ N und $13^{\circ}25'43''$ E (WGS 84) in ca. 12 m Wassertiefe. Er ist vermutlich zwischen Dezember 1998 und März 1999 entstanden. Unter der Annahme einer ursprünglichen Tiefe von ca. 6 m ist bei einer Fläche von $30 \times 15 \text{ m}^2$ ein Volumen von ca. 1.200 m^3 entnommen worden. Im September 2001 lag das Trichterzentrum 2 m tiefer als der umgebende Meeresboden, so dass sich 800 m^3 Füllmaterial in dieser Struktur angesammelt hatte.

Älterer Entnahmetrichter (Nr. 2)

Im Gegensatz dazu ist dieser Trichter, der auf der Position $54^{\circ}38'16''$ N und $13^{\circ}25'43''$ E liegt, schätzungsweise nur zu 10 % teilverfüllt. Er ist von Grobsanden (Spillmaterial) umge-

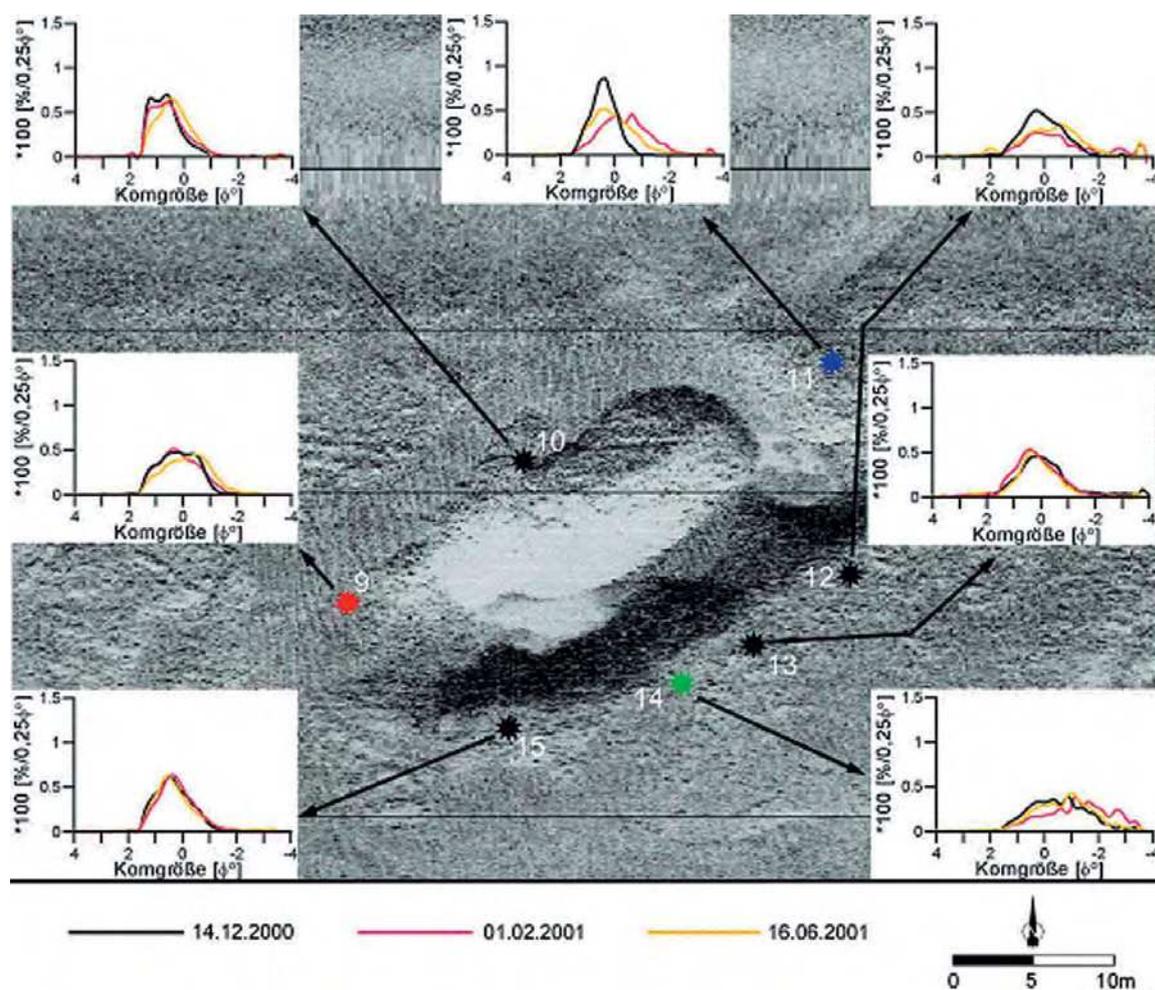


Abb. 15: Lage der Beprobungsstationen mit den unterschiedlich gefärbten Tracersanden und zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilung im Bereich des älteren Trichters Nr. 2 (Lage s. Abb. 13)

ben, die von Tauchern an sieben Stationen dreimal zwischen Dezember 2000 und Juni 2001 beprobt wurden (Abb. 15). 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.

Die durchschnittlichen Kornverteilungskurven der Spillsande um den Trichter zeigen über den 6-monatigen Untersuchungszeitraum eine deutliche Tendenz zur Kornvergrößerung (Abb. 15 und 16). Diese Tendenz ist auch an jeder einzelnen der beprobten Stationen erkennbar. Auffällig ist das fast völlige Fehlen von Fraktionen $< 354 \mu\text{m}$ ($1,5 \phi^\circ$).

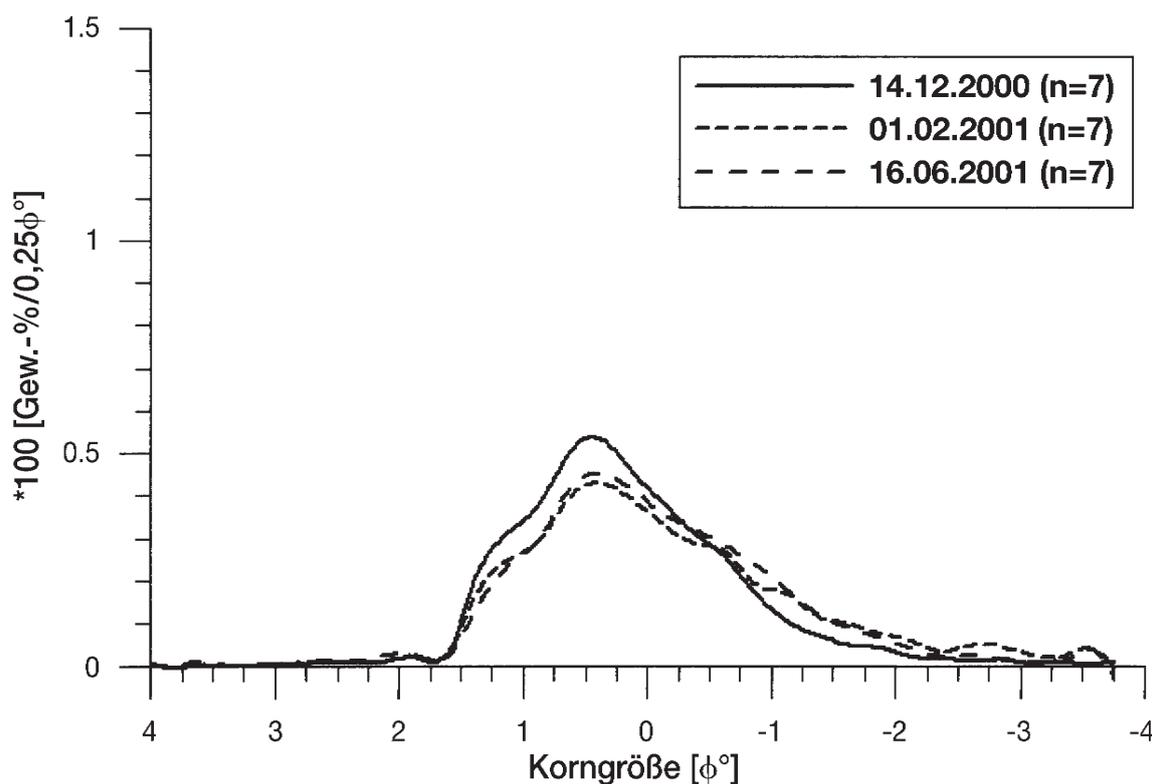


Abb. 16: Zeitliche Veränderung der durchschnittlichen Korngrößenverteilung der Spillsande im Bereich des älteren Entnahmetrichters Nr. 2 (Lage des Trichters s. Abb. 13)

Der Karbonatgehalt wurde an den Proben vom Juni 2001 gemessen und beträgt durchschnittlich $16,2 \pm 4,2$ Gew.-%.

Im Trichter zeigen die Korngrößenverteilungskurven des Füllmaterials eine ausgeprägte Polymodalität und ein breites Kornspektrum mit schlechter Sortierung. Die auf den Spillsandflächen ausgebrachten Tracersande wurden nach 4,5 Monaten in geringer Zahl bis in ca. 30 cm Tiefe angetroffen. Dabei dominierten die grün gefärbten Sande, die südlich der Kernstationen ausgebracht worden waren. Auffällig ist das ausgeprägte Vorkommen von zerriebenen Muschelschalen, die sich fein verteilt im Sediment finden.

Dementsprechend sind die Karbonatgehalte mit $14,6 \pm 3,9$ Gew.-% im Vergleich zu den natürlichen Oberflächensedimenten mit $1,4 \pm 0,2$ Gew.-% relativ hoch. Es treten auch Horizonte mit starken Anreicherungen von ganzen Muschelschalen von *Mytilus sp.* auf.

Im jüngeren Trichter und einem der beiden älteren (Nr. 1) im Norden des Gewin-

nungsgebiets wurden 6 m lange Sedimentkerne gezogen, um anhand des sedimentologischen Aufbaus des Füllmaterials Hinweise auf Verfüllungsprozesse zu erhalten. Im älteren Trichter bestehen die ersten 2,85 m des Sedimentkerns VC 2046 aus einer gradierten Fein- bis Grobsandlage (d.h. die Körnung nimmt nach unten stetig zu). Eine weitere gradierte Fein- bis Mittelsandlage befindet sich in einer Teufe von 3,95 bis 4,35 m. Dazwischen kommt bis in eine Endteufe von 5,30 m kiesiges bis steiniges Füllmaterial mit einer Sandmatrix vor.

Jüngerer Entnahmetrichter

Dieser Trichter liegt im südlichen Teilfeld bei $54^{\circ}37'45''$ N und $13^{\circ}25'13''$ E (WGS 84) in ca. 12 m Wassertiefe. Er ist zwischen August und Dezember 1999 entstanden und hat an der Meeresbodenoberfläche einen Durchmesser von 25 m. Bei einer ursprünglichen Tiefe von ca. 7 m steht einem Fördervolumen von etwa 1.100 m^3 nach 2 Jahren ein Füllvolumen von 820 m^3 gegenüber. Das heißt, dass der Trichter maximal zu zwei Drittel seines ursprünglichen Volumens verfüllt ist, wobei der Vergleich der beiden älteren Trichter verdeutlicht, dass eine deutliche lokale Schwankungsbreite vorhanden ist.

Das umgebende Spillmaterial besteht aus Mittel- bis Feinsanden, die an acht Stationen dreimal zwischen Dezember 2000 und Juni 2001 beprobt wurden (Abb. 17). Wie beim älte-

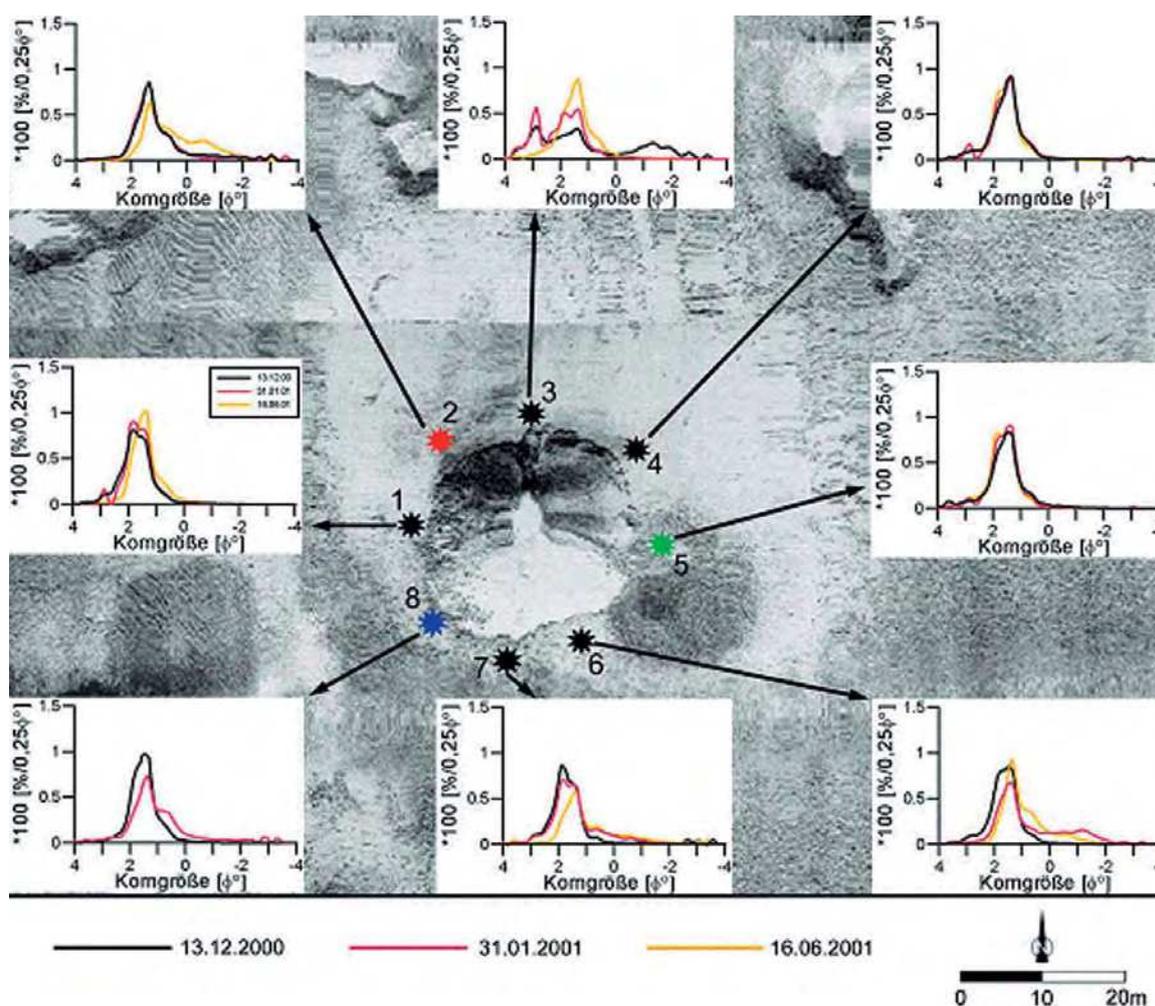


Abb. 17: Lage der Beprobungsstationen mit unterschiedlich gefärbten Tracersanden und zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilung im Bereich des jüngeren Trichters (Lage s. Abb. 13)

ren Trichter Nr. 2 wurden Ende Januar 2001 an drei Stationen um den Trichter unterschiedlich gefärbte Tracersande und zusätzlich eine Tracerschicht am Trichterboden als Leithorizont für nachfolgende Kernentnahmen ausgebracht. Auch in diesem Fall ist im Umfeld des Trichters über den 6-monatigen Untersuchungszeitraum eine deutliche Tendenz zur Kornvergrößerung der Spillsande um den Trichter erkennbar (Abb. 17 und 18). Während der Anteil der Korngrößen $<354 \mu\text{m}$ ($1,5 \phi^\circ$) abnimmt, steigen die Anteile der Korngrößen von $420 \mu\text{m}$ ($1,25 \phi^\circ$) bis 2 mm ($-1 \phi^\circ$) an.

Drei Kurzkerne aus dem jüngeren Trichter zeigen ähnliche Merkmale wie im älteren Trichter, nämlich schlechte Sortierung, hohe Karbonatgehalte durch feinverteilte, zerriebene Muschelschalen, Schilllagen und Tracersande bis ca. 30 bzw. 35 cm Sedimenttiefe. Auffällig ist jedoch ein fast völliges Fehlen von Fraktionen $>500 \mu\text{m}$ ($1 \phi^\circ$). 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 einen Transport aus nördlichen bis östlichen Richtungen anzeigt. Eine Angabe der Sedimentationsraten ist wegen des unbestimmbaren Anteils der direkt verklappten Spillsande nicht möglich.

Im jüngeren Trichter wurde im März 2000 (VC 2047) sowie im September 2001 (VC 2060) jeweils ein Sedimentkern entnommen, um unterschiedliche Verfüllungsstadien zu erfassen. Dabei konnte nicht exakt an derselben Position gekernt werden, so dass VC 2047 im Trichterzentrum, VC 2060 am unteren Hangfuß liegt. In beiden Sedimentkernen bildet weicher Schlick die Sedimentauflage. Im Trichterzentrum (März 2000) liegt über dem Geschiebemergel mit einer übrig gebliebenen Restsedimentbedeckung aus Kiesen und Steinen in 2,70 m Teufe ein ca. 1 m mächtiges Sandpaket mit gradiertem Schichtung. Zwischen der da-

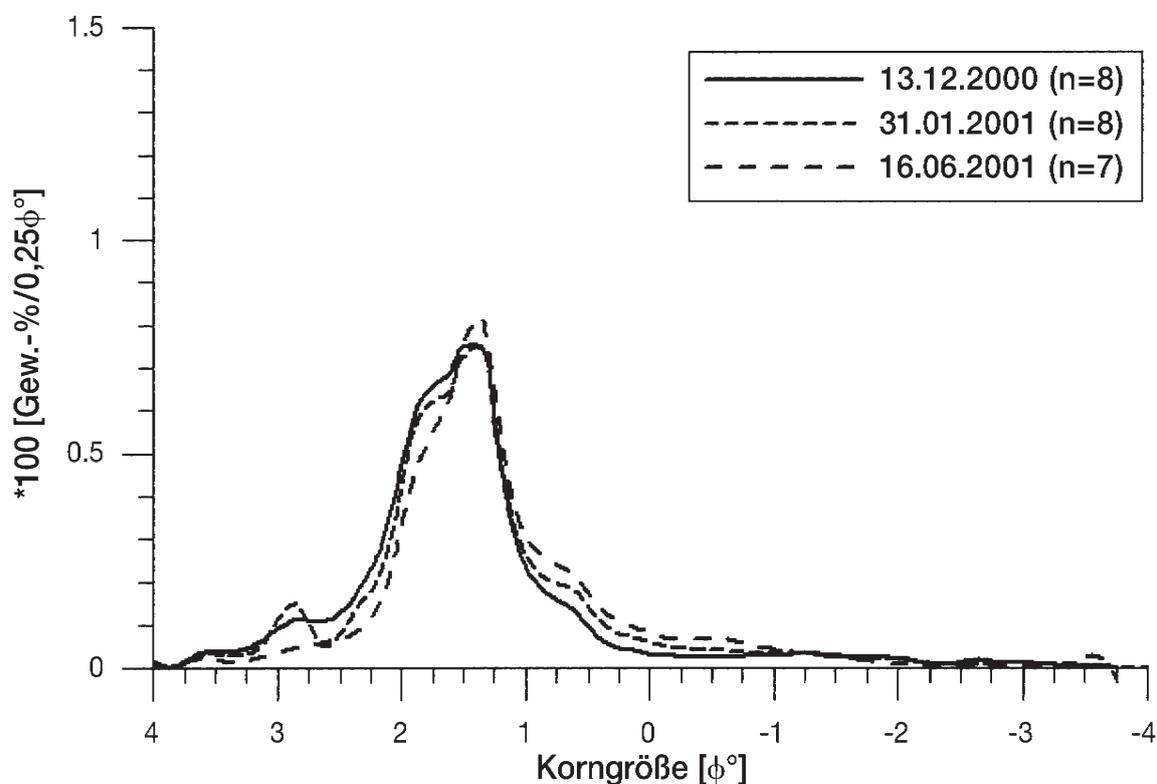


Abb. 18: Zeitliche Veränderung der durchschnittlichen Korngrößenverteilung der Spillsande im Bereich des jüngeren Entnahmetrichters (Lage des Trichters s. Abb. 13)

rüber liegenden 0,7 m mächtigen Fein- bis Grobsandschicht schiebt sich eine Sandlage mit Kiesen und einzelnen Steinen ein, die wahrscheinlich durch das Nachbrechen instabiler Trichterflanken im Trichter akkumulierte. Im Randbereich (vc 2060) steht der Geschiebemergel in 3,64 m Teufe an und ist von einem Sedimentpaket aus überwiegend feinsandigen Mittelsanden mit Schilllagen und cm-mächtigen Schluff-/Toneinschlüssen durchsetzt.

Entnahmerinnen

Im Sandentnahmegebiet „Tromper Wiek Ost“ sind auf einem flach nach NE abfallenden Meeresboden alte Entnahmerinnen erkennbar, die im NE der Lagerstätte aus dem Jahr 1989 stammen, als ein Volumen von 151.000 m³ für Küstenschutzmaßnahmen entnommen wurde, und relativ gut erhalten sind (Abb. 17). Die Entnahmespuren des Schleppkopfbaggers sind zu Beginn der Projektphase auf den tiefsten Bereich im NE der Lagerstätte bei ca. -20 mNN begrenzt. Die langgestreckten Furchen haben eine Breite von ca. 10 m und sind ca. 100 m lang. In den Sonographien zeigen sie z.T. auffällige Kanten; es überwiegen jedoch flache Rinnen mit niedrigen Rückstreuwerten, die auf Füllmaterial mit hohem Schluff-/Ton-gehalt hinweisen.

Im Herbst 2000 wurde im Norden der Lagerstätte auf einer Fläche 1.200 × 100 m² ein Sandvolumen von 104.000 m³ für Strandaufspülung bei Glowé gewonnen. Ein Vergleich der Sonographien vom Dezember 1999 und Mai 2000 verdeutlicht ein laterales Wachstum der Flächen mit feinkörnigem Sediment an einigen Stellen, das auf Kosten von Flächen mit größeren Sediment geht. Die Entnahmerinnen bleiben aber erkennbar und weisen wie die Entnahmestrukturen aus dem Jahr 1989 bis September 2001 keine signifikanten Änderungen auf (Abb. 18).

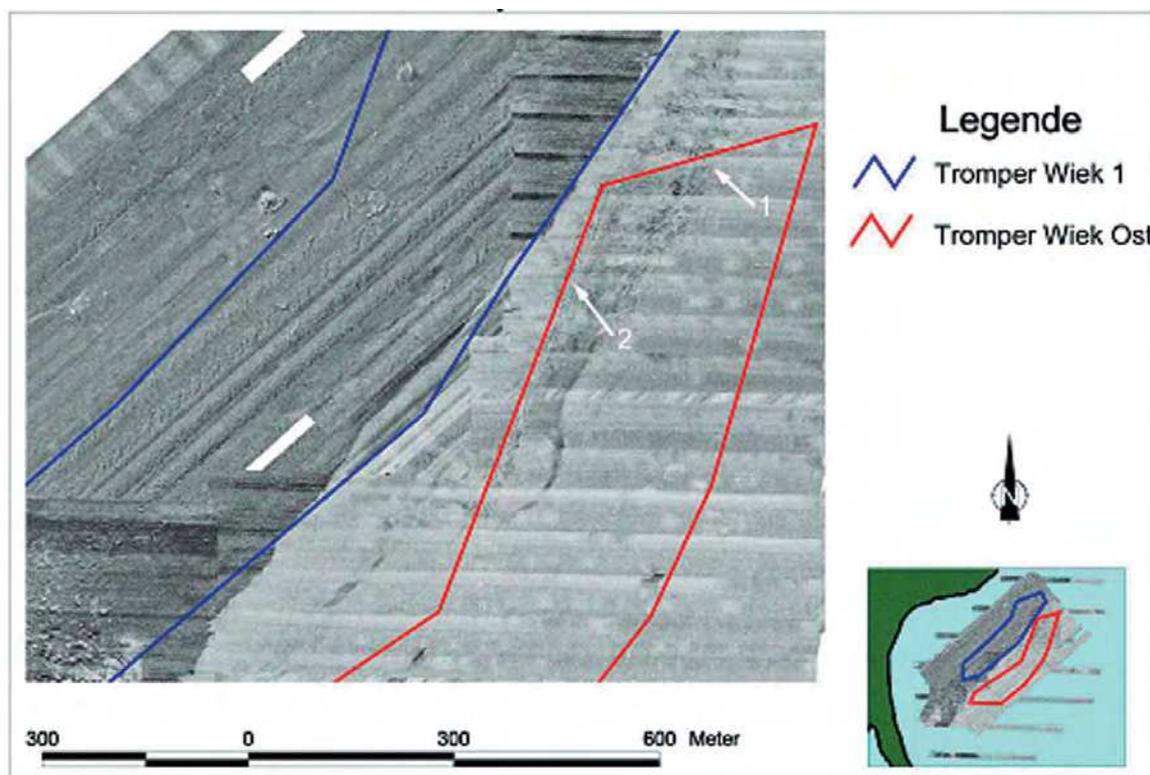


Abb. 19: Sandentnahmefeld „Tromper Wiek Ost“ mit Saugbaggerspuren. 1 – Alte Entnahmespuren aus dem Jahr 1989, 2 – neue Entnahmespuren vom Herbst 2000

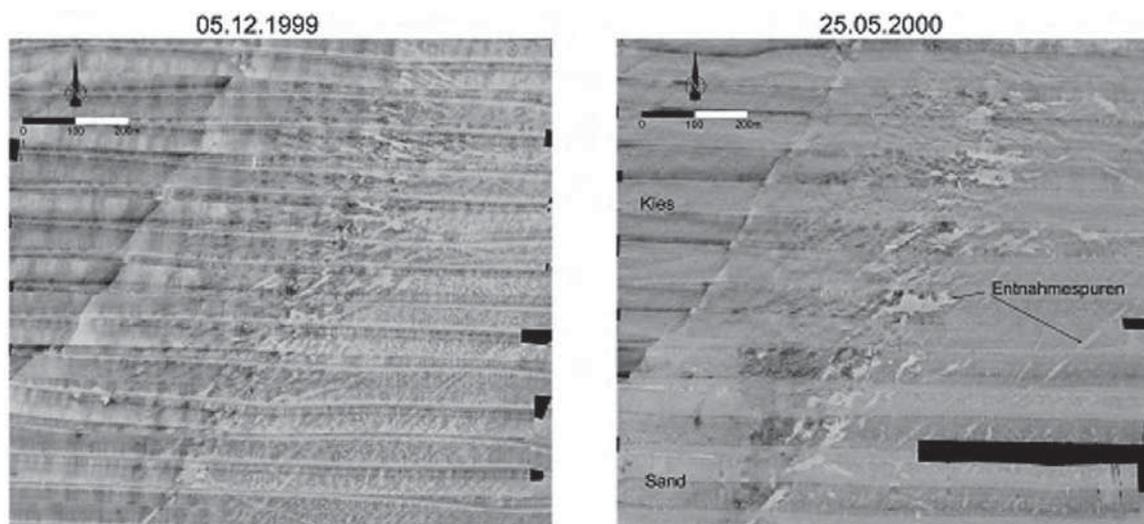


Abb. 20: Zeitliche Veränderungen der Saugspuren zwischen Dezember 1999 (links) und Mai 2000 (rechts) im Feld „Tromper Wiek Ost“. Näheres s. Text

4.4.3 Hydrographische Ergebnisse

Es fanden drei Messkampagnen zur Erfassung des Strömungs- und Seegangsfeldes statt, mit denen sowohl die hydrographischen Verhältnisse in der gesamten Bucht als auch in einem engeren Bereich des Abbaugebiets erfasst wurden (KLEIN u. MITTELSTAEDT, 2001).

1. Messzeitraum: 21.3. bis 7.6.2000

Im Vordergrund stand die Erfassung der regionalen Hydrodynamik innerhalb der Bucht. An 6 Stationen wurden Strömungsmessungen durchgeführt, im zentralen Bereich zusätzlich eine Seegangboje ausgelegt (Abb. 13). Das Strömungsfeld ist zeitlich und räumlich sehr variabel. Es gibt keine typischen Strömungsmuster, die bestimmten Windlagen zugeordnet werden können. Die Messungen deuten häufig auf die Existenz von mesoskaligen Wirbeln in Form von Leewirbeln südlich Kap Arkona und auf Strömungsdivergenzen in der inneren Bucht hin. Für eine eindeutige Auflösung der raum-zeitlichen Strukturen ist die Positionsichte nicht ausreichend. Besondere Bedeutung kommt dem durch den Windstau verursachten Wasserstand zu, der zu bodennahen Kompensationsströmungen führt.

Im jüngeren Trichter (18 m Wassertiefe) und an seinem Trichterrand (11 m Wassertiefe) wurde das kleinräumige Strömungsprofil im Umfeld einer Entnahme aufgenommen. Innerhalb des Trichters erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten selten Werte über $0,02 \text{ m/s}^{-1}$; jedoch erreichte der Maximalwert eine Geschwindigkeit von $0,08 \text{ m/s}^{-1}$. Am Trichterrand lag die mittlere Strömung bei $0,04 \text{ m/s}^{-1}$, der maximale Wert bei $0,18 \text{ m/s}^{-1}$. Die Strömungsrichtung ist an beiden Stationen sehr variabel, wobei ein nördlicher Nettotransport festzustellen ist. Bei der Bergung des Geräteträgers war dieser nach 85 Tagen von einer ca. 1 m mächtigen Wechsellagerung aus Schill und festem Sand bedeckt.

Die maximale signifikante Wellenhöhe erreichte 3,9 m, die maximale Wellenhöhe 4,4 m. Die größte Wellenperiode lag bei 6,6 s aus nordöstlicher Richtung (45°).

2. Messzeitraum: 29.8. bis 22.11.2000

In dieser Phase wurde eine Station am Rand des jüngeren Trichters in 12 m Wassertiefe nochmals mit einem WTR bestückt; die Strömungsgeschwindigkeiten lagen in der Größenordnung des 1. Messzeitraums. Die maximale Wellenhöhe erreichte in dieser Phase 3,01 m, die maximale Wellenperiode 5,38 s.

3. Messzeitraum: 7.3. bis 30.5.2001

Die letzte Messkampagne wurde für eine detaillierte Erfassung der Strömungsverhältnisse und Echointensitäten als qualitatives Maß des suspendierten Materials in der Wassersäule genutzt (KLEIN, 2003). Im Zentrum des jüngeren Trichters wurde ein Geräteträger (Wattkorb) mit einem ADCP und einem WTR positioniert. Taucher setzten am Trichtertrand einen auf einer Gehwegplatte montierten akustischen RCM ab, um das bodennahe Strömungsfeld aufzunehmen, jedoch wurde das Gerät am 19.3.2001 während eines Sturms mit bis zu 4 m hohen Wellen etwa 4 m tief in den Trichter verfrachtet und zeichnete danach keine weiteren Daten mehr auf. Nach 84 Tagen war der Geräteträger im Trichterzentrum beim Bergen erneut mit etwa 0,80 m Sediment bedeckt. Der eingesedimentierte WTR zeichnete ab dem 13.5.2001 keine Seegangsdaten mehr auf.

Die stärksten Winde traten in der zweiten Märzhälfte auf. Am 20.3.2001 wurden bei östlichen Winden Strömungsgeschwindigkeiten bis zu $0,22 \text{ m/s}^{-1}$ und maximale Wellenhöhen von 4,5 m registriert. Die maximale Orbitalgeschwindigkeit am Trichterboden betrug $0,41 \text{ m/s}^{-1}$. Eine Woche später wurden bei ähnlichen Windgeschwindigkeiten $0,31 \text{ m/s}^{-1}$ erreicht. Die drei Sturmereignisse zwischen dem 18. und 31.3.2001 führten zu einer erhöhten bodennahen Echointensität im Inneren des Trichters, die sich in der Folge auf die gesamte Wassersäule ausdehnte. Die Zunahme der bodennahen Echointensität 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 30.3.2001 betrug die vorherrschende Strömungsrichtung außerhalb des Trichters 120° bis 210° mit Geschwindigkeiten bis zu $0,21 \text{ m/s}^{-1}$.

Die Echointensitäten korrelieren am besten mit der lokal gemessenen signifikanten Wellenhöhe ($r = 0,78$); der Koeffizient bewegt sich für die Korrelation von Echointensität und Geschwindigkeit von Nord- bis Ostwinden zwischen 0,77 und 0,85. 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 Untersuchungszeitraum wurden im März 2000 und 2001 derartige Wetterlagen dokumentiert.

5. Diskussion

5.1 Hohes Watt bei Pellworm

Die einmalige Entnahme bei Pellworm ist als einzige untersuchte Trichterstruktur nahezu vollständig wieder verfüllt. Die Verfüllung erfolgte in einem Zeitraum von 6,5 Jahren und damit in etwa der Hälfte der Zeit, die für vergleichbare Eingriffe im Außengroden südwestlich von Nordstrand (12 Jahre) in ca. 2 m NN (UNSÖLD, 1974) oder bei Terschelling (>13 bis 16 Jahre) über der Niedrigwasserlinie (VAN DER VEER et al., 1985) beobachtet wurde. Die

Regenerierung folgt im nordfriesischen Wattenmeer einem exponentiellen Sättigungsverlauf und zwar in ähnlicher Weise, wie sie die Umsatzkurve der morphologischen Analyse der Nordseeküste „MORAN“ zeigt (z.B. SIEFERT, 1987; HOFSTEDE, 1989).

VAN DER VEER et al. (1985) untersuchten verschiedene Entnahmetrichter im westfriesischen Watt aus den Jahren zwischen 1962 bis 1977, die über der Niedrigwasserlinie, auf der Wattscheide und in Rinnen lagen und alle unabhängig vom Entnahmevermögen und der Wassertiefe eine lineare Verfüllungsrate aufweisen. Auffallend ist der deutlich kürzere (<4 Jahre) Zeitraum für diejenigen Strukturen, die einer ständigen Wasserbedeckung (Rinnen) unterlagen.

Die relativ rasche Verfüllung der Trichterstruktur vor Pellworm ist auf die ständige Wasserzufuhr selbst bei Niedrigwasser zurückzuführen, die für einen permanenten Eintrag an suspendiertem Material und Feinsand über den gesamten Tideverlauf sorgte. Die Füllraten liegen anfänglich bei $120.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ (1995), gehen auf $42.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ (1998) und schließlich auf $7.700 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ (2000) zurück. Sie liegen damit wesentlich höher als die Rate von 8.400 bis $10.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ bei Terschelling. Die Verfüllungsraten von 25 bis $400 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen deutlich über dem Wert aus dem Feld „Westerland II“ (s.u.) und drücken die hohe Sedimentdynamik im Wattenmeer aus.

Die sedimentologische Zusammensetzung und das Gefüge des Füllmaterials weisen in beiden Trichtern im nordfriesischen Wattenmeer die charakteristischen Eigenschaften von Wattsedimenten auf. Im oberen Randbereich dominiert Feinsand, der zum Trichterzentrum in eine flaserige Wechsellagerung mit Schluffen übergeht. Dies wird durch die laterale Korngrößendifferenzierung im Baggerloch vor Nordstrand bestätigt, wo UNSÖLD (1974) wesentlich höhere Sandgehalte im Eingangsbereich des Baggerlochs feststellt, die zum Zentrum der Struktur in feinkörnigeres Füllmaterial übergehen.

Bemerkenswert ist die Ausbildung eines polyedrischen Gefüges im oberen Bereich des Füllmaterials (2 bis 3 m Tiefe). Die Entstehung dieser Struktur ist unklar, weil dies einen hohen Grad an Entwässerung und Kompaktion voraussetzt, der sich in so kurzer Zeit und bei den bestehenden Wassertiefen kaum entwickelt haben kann. Man könnte ein vollständiges Trockenfallen im Trichter in Erwägung ziehen, was jedoch aufgrund der ständigen Verbindung zur Norderhever auszuschließen ist.

5.2 Westerland II

Die Entnahmetrichter haben ihre Form über viele Jahre behalten, sieht man von den Änderungen durch den fortschreitenden Abbau ab. Ihre Verfüllung verläuft wesentlich langsamer als ursprünglich angenommen (THIEL u. REGIER, 1999). Die Gesamtbilanz verdeutlicht, dass die Entnahmestrukturen nur zu 10 % wieder aufgefüllt werden, wobei auch Material aus Abbrüchen von übersteilten Hängen in die Bilanz eingeht. Selbst in solitären, kleineren Entnahmetrichtern werden die Materialdefizite nicht wieder ausgeglichen, wie die Detailuntersuchungen am Trichter A verdeutlichen. Das bedeutet, dass die natürlichen Prozesse nicht in der Lage sind, das Materialdefizit aufgrund der Entnahme auch nur annähernd auszugleichen.

An ausgewählten Stationen im Feld „Westerland II“, die nach unserem Kenntnisstand nicht vom anthropogenen Eingriff berührt sind, lässt sich nachweisen, dass die Tiefenänderungen innerhalb des Fehlerbereichs liegen, auch wenn bei kürzeren Vermessungsintervallen eine deutlichere Schwankungsbreite zu beobachten ist. Diese Beobachtungen widersprechen der gängigen Auffassung, dass im Seegebiet westlich von Sylt außerordentlich starke hydro-

dynamische Kräfte erhebliche Materialumlagerung verursachen und anzunehmen wäre, dass die großen Entnahmetrichter als Sedimentfallen wirken. Dies ist wegen fehlender Materialzufuhr jedoch nicht der Fall. Ein küstennormaler Transport, der das Vorspülmaterial wieder seewärts verfrachtet, findet nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maß statt. Vielmehr bewegt es sich auf einem relativ schmalen küstenparallelen Streifen, was die Ergebnisse des KFKI-Projekts „Materialbilanz an der deutschen Nordseeküste“ bestätigt (ZEILER et al., 2000a, 2000b). Die im Umfeld der Trichterbecken vorkommenden flachen, W-E verlaufenden Sandrücken oszillieren um ihren Kern, wobei das Kornverteilungsmuster erhalten bleibt, was auf die ausgeprägte Stabilität der sedimentologischen Verhältnisse hindeutet.

Am Beispiel einer einmaligen Entnahme (Trichter A) können Verfüllungsraten abgeschätzt werden: für einen (angenommenen) W-E gerichteten Transport liegt die Rate bei $80 \pm 55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$, für einen NW-SE gerichteten Transport bei $60 \pm 40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Diese Verfüllungsraten liegen zwar in der Größenordnung von ebenfalls morphologisch ermittelten Transportraten, die VAN RIJN u. WALSTRA (2002) für Sandentnahmetrichter in Wassertiefen zwischen 10 bis 20 m vor der holländischen Küste zwischen Hoek van Holland und Wijk aan Zee ermittelt haben. Die sedimentologische Zusammensetzung des Füllmaterials weist jedoch einen Schlickanteil von mindestens 50 % auf, so dass die Verfüllungsraten nicht mit Bodentransportraten gleichgesetzt werden können. Vielmehr deutet der Sedimentkern auf eine kontinuierliche Verfüllung der Trichter durch die Sedimentation von suspendiertem Feinmaterial aus der Elbefahne hin, das aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Trichter zum Absatz kommt. Daher liegt auch die Bodentransportrate deutlich unter den ermittelten Verfüllungsraten. Unter Berücksichtigung des Suspensionstransportes (Schlick) und eines Sandeintrages aus Hangabbrüchen dürfte der Transport für die reine Bodenfracht eine mittlere Rate von $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nicht überschreiten.

Der scharfe Korngrößenwechsel zwischen festem Schlick und grobem Sand ist ein Hinweis darauf, dass neben einer kontinuierlichen Schlicksedimentation ereignisbezogene Einträge von Sand stattgefunden haben. Kornspektrum, Dominanz sandiger Lagen im unteren Kernbereich und Sedimentations-/Erosionsverteilungsmuster sprechen dafür, dass ein Großteil des sandigen Füllmaterials aus den Hangabbrüchen während der Wintermonate stammt. Dabei spielt die Exposition der Trichterflanken zur Hauptangriffswirkung von Stürmen die entscheidende Rolle. Während im W und NW Material in die Trichter eingetragen wird, sorgen Erosionsprozesse an den E- und SE-Hängen für eine Abnahme der Hangneigung von max. 10° auf einen stabilen Gleichgewichtszustand von 3 bis 5° .

Die zeitliche Volumenentwicklung des Trichters A widerspricht der Vorstellung einer ständigen Aufhöhung des Trichterinneren und belegt eine mittelfristige Abnahme im Füllvolumen. Dafür kommen zwei Ursachen in Frage: einerseits Export von Füllmaterial bei entsprechenden Sturmlagen und Seegang, wobei Material in Suspension gebracht und lateral verfrachtet wird, andererseits Kompaktion des feinkörnigen Füllmaterials mit zunehmender Deposition. In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass die weiche Schlickauflage im Sedimentkern VC 2050 ab einer Teufe von 0,30 m deutlich verfestigt ist und eine plastische Konsistenz hat, jedoch in 2,09 bis 2,38 m Teufe eine wasserhaltige Schlickschicht angetroffen wurde, die keine sichtbare Verfestigung erfahren hat. Welche Prozesse hier einwirken, muss an dieser Stelle offen bleiben. Aufgrund der Lagerungsverhältnisse, der chemischen Zusammensetzung und eines fehlenden Liefergebiets ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Schlick bereits in verfestigtem Zustand eingetragen wird, auszuschließen.

5.3 Graal-Müritz 1

Die einzelnen Entnahmerinnen waren nach den SSS-Ergebnissen relativ rasch wieder eingeebnet, jedoch hinterließen die jeweiligen Materialentnahmen leichte Depressionen im Seegrund, die bis zum Ende der Messungen im September 2001 nachweisbar waren. Die fortschreitende Verfüllung verläuft nicht linear, weil zwischenzeitlich Material aus den Entnahmемulden exportiert wird.

Im Untersuchungszeitraum konnten die Entnahmemengen nicht durch natürliche Prozesse ausgeglichen werden. Es steht zwar ausreichend umlagerungsfähiges Lockermaterial zur Verfügung, um unter entsprechenden hydrodynamischen Bedingungen die Entnahmerinnen einzuebnen, jedoch reicht die Transportkapazität in diesem Gebiet nicht aus, um die beiden Eingriffe innerhalb von 1 bzw. 2 Jahren zu kompensieren. Die Vermessungsergebnisse geben klar zu erkennen, dass die muldenförmigen Entnahmestrukturen als Sandfänger wirken. Dies wird als Hinweis gewertet, dass langfristig die Tendenz zu einer Auffüllung der flachen Muldenstruktur besteht.

DETTE (2001) ermittelte aus bathymetrischen Datensätzen, die seit 1952 vorliegen, für den Vorstrandbereich Transportraten von $50.000 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Marktgrafenheide), $68.900 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Graal-Müritz) und $48.600 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Dierhagen), die um das 500- bis 600-fache über der mittleren Rate in 8 bis 12 m Wassertiefe aus dieser Arbeit liegen. Die Differenz von etwa $20.000 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwischen Graal-Müritz und Dierhagen führen DETTE et al. (2001) auf einen „Offshore-gerichteten“ Transport zurück. Unter Berücksichtigung des geringeren Transportpotenzials ist davon auszugehen, dass das Untersuchungsgebiet außerhalb des Haupttransportbandes entlang der Küste liegt und die Funktion eines „Zwischenlagers“ hat, wo Material mittelfristig zur Ablagerung kommt und bei entsprechenden hydrodynamischen Verhältnissen seewärts verfrachtet wird. Die Entnahmемulden wirken bei diesem Prozess als Sandfallen.

5.4 Tromper Wiek

Die Entnahmetrichter im Feld „Tromper Wiek 1“ werden maximal zu zwei Dritteln ihres Volumens teilverfüllt. Aus dem sedimentologischen Aufbau der Vibro- und Kurzkerne geht hervor, dass nicht das gesamte Füllmaterial aus der Verklappung des sandigen Restanteils stammt, sondern nachbrechendes Material, Fraktionierung und Umlagerung von Spillsanden in der unmittelbaren Umgebung und episodischer Eintrag von Schill und Schlick maßgeblich an der Verfüllung beteiligt sind.

Neben dem direkten Sandeintrag durch die Verklappung kommen im Umkreis des jüngeren Trichters 0,10 bis 0,20 m mächtige Spillsande zum Absatz, deren Volumen sich im März 1999 auf 8.000 bis 16.000 m^3 beläuft und bis September 2001 auf 5.000 bis 10.000 m^3 schrumpft. Nach den granulometrischen Untersuchungen wird dieses Material durch den hydrodynamischen Einfluss weiter sortiert und 3.000 bis 6.000 m^3 werden in die umliegenden Trichter bzw. seewärts in den südöstlichen Bereich des Entnahmefelds abgelagert. Der Vergleich zwischen älterem und jüngerem Trichter zeigt, dass auf den Spillsandflächen ein neuer Gleichgewichtszustand angestrebt wird, indem die Sedimentfraktion $< 350 \mu\text{m}$ aus den Spillflächen „ausgewaschen“ und lateral verfrachtet wird. Auf diese Weise wird Material teilweise im Trichter, teilweise seewärts im südöstlichen Bereich der Lagerstätte akkumuliert. Der Anteil $> 350 \mu\text{m}$ wird dagegen kaum mobilisiert und bleibt im Umfeld liegen.

Schill und Schlick unterliegen einer eigenen Dynamik. Der Schillanteil besteht überwie-

gend aus Muschelschalen der Gattung *Mytilus* und wird bereits bei geringen Bodenströmungen mobilisiert. Sein Anteil an der Verfüllung ist jedoch nicht bedeutend. Für die Herkunft des Schlicks kommen der Eintrag aus größeren Wassertiefen bei aufländiger Bodenströmung, Ausscheidungen der Miesmuschelkolonien (sog. „Fecal Pellets“) und küstennahe Abtrag des Geschiebemergels in Frage.

Die teilweise Wiederverfüllung beansprucht einen Zeitraum von etwa 2 Jahren, bis sich ein stabiler Zustand eingestellt hat. Hauptsächlich ist dies auf die Umlagerung der Spillsande zurückzuführen, die entweder in den Trichtern oder im näheren Umfeld sedimentieren, aber keinen nennenswerten Transportprozessen ausgesetzt sind, die das Material in größere Wassertiefen verfrachten würden. Folglich werden die Entnahmerinnen im Sandentnahmegebiet „Tromper Wiek Ost“ nicht durch Zufuhr von Spillsanden, sondern durch feinkörnigeres Material verfüllt. Material aus den Trübungswolken wird aufgrund des Verdünnungseffekts nur bedingt einen Anteil daran haben (BIRKLUND u. PETERSEN, 1998).

Neben Sedimentationsprozessen wird die Verfüllung der Trichter durch Erosion kontrolliert. Die ca. 1 m mächtige Sedimentbedeckung der Wattkörbe, die im Sedimentkern mit dieser Mächtigkeit nicht wieder gefunden werden konnte, sowie die hohen Echointensitäten über die gesamte Trichtertiefe sprechen für eine Aufwirbelung des Materials am Trichterboden, das durch das Strömungsfeld aus der Struktur exportiert wird.

Im Rahmen dieses Projektes wurden trotz der geringen Wassertiefe keine Hinweise auf eine Reaktion des Meeresbodens gefunden. Es erhärtet sich die Vorstellung, dass in der Tromper Wiek stabile Verhältnisse in der Sedimentverteilung und -verlagerung herrschen und selbst die eingebrachten Spillsände keinem größeren Transport unterworfen sind. Die Kornverfeinerung im Zuge des Abbaufahrens führt zu einer lokalen Substratveränderung im Bereich des Entnahmegebiets, hat aber keine nachweisbare Auswirkung auf die regionalen sedimentologischen Verhältnisse.

6. Schlussfolgerungen

Die Regenerierung der Materialentnahmestellen führt im Küstenvorfeld zu einer Substratveränderung, weil das Füllmaterial feinkörniger als das Ausgangsmaterial ist. Im Wattenmeer dagegen unterscheidet es sich nicht von ursprünglichen Wattsedimenten. Alle Hohlformen (Trichter, Mulden und Rinnen) wirken als Sedimentfänger. Die gebietsspezifischen Unterschiede in der Zusammensetzung des Füllmaterials rühren von der eingesetzten Entnahmemethode, dem Sedimentangebot und der Wassertiefe her. Während in den flachen Entnahmemulden vor Graal-Müritz sandiges Material eingetragen wird, nimmt in allen Trichtern sowie den Entnahmerinnen in 20 m Wassertiefe der Tromper Wiek schlickiges Füllmaterial einen substantziellen Anteil bei der Regenerierung ein. Dabei spielt neben dem Suspensionsangebot die Hangneigung der Trichterstrukturen eine wesentliche Rolle.

Der Regenerierungsprozess beginnt bereits während des Abbaus, wenn nachbrechendes Material und Spillsande in den Trichtern sedimentieren. Ein bis zwei Jahre nach dem Eingriff haben die Strukturen durch Einebnung der Trichterflanken ein morphologisches Gleichgewicht erreicht, das sich durch seine horizontale Lagestabilität auszeichnet. Danach kontrolliert vor allem kontinuierliche Schlicksedimentation mit ereignisbezogenem Sandeintrag die weitere Verfüllung, die jedoch durch den Materialeexport aus den Entnahmetrichtern unter entsprechenden hydrodynamischen Bedingungen bzw. Kompaktion und Setzungserscheinungen rückläufig sein kann.

Die Entnahmemulden vor Graal-Müritz verflachen zu Ungunsten des unmittelbar um-

liegenden Meeresbodens; sie wirken sich aber nicht nachweisbar auf die Morphologie des gesamten Entnahmegebiets aus, die dem Einfluss einer natürlichen Sedimentdynamik unterworfen ist. Längerfristig besteht die Tendenz zur Wiederverfüllung.

Die Verfüllungsraten bewegen sich im Küstenvorfeld im Bereich von 50 bis 100 m³ m⁻¹ a⁻¹. Eine Hochrechnung fällt aufgrund des unterschiedlichen Transportverhaltens von Schlick (Suspension) und Sand (Bodenfracht) schwer, vor allem vor dem Hintergrund der zwischenzeitlichen Erosion in den Hohlformen. Da die jährlichen Entnahmemengen deutlich über dem natürlichen Transportpotenzial liegen, bleiben Strukturen wie Trichter oder flache Mulden im Küstenvorfeld bei fortschreitender Abbauaktivität über Jahre hinaus erhalten. In Abhängigkeit des verfügbaren Lockermaterials ist wie im Fall von Westerland II oder Tromper Wiek 1 nicht auszuschließen, dass eine vollständige Wiederverfüllung aufgrund der geringen Sedimentdynamik nicht stattfindet. Im Wattenmeer sorgt dagegen die ausgeprägte Sedimentdynamik nach Abschluss des Eingriffs für eine nahezu vollständige Regenerierung innerhalb eines Jahrzehnts, wenn eine ständige Wasserzufuhr und der damit verbundene Materialeintrag gewährleistet werden.

Die räumliche Ausdehnung ist aufgrund der Fehlerbreite der bathymetrischen Datensätze nur sehr eingeschränkt abzuschätzen. Für Westerland II liegen Hinweise vor, dass die Änderungen auf natürliche Umlagerungsprozesse wie Oszillation von Sandrücken zurückzuführen sind. Im Fall der Tromper Wiek kommt es zwar zu einer Sortierung und weiteren Fraktionierung der Spillsande, insgesamt jedoch unterliegt das Gebiet keiner nachweisbaren Tieferlegung und zeichnet sich durch stabile morphologische und sedimentologische Verhältnisse aus. Im Fall von Graal-Müritz 1 belasten die Entnahmемulden den umliegenden Meeresboden im unmittelbaren Bereich der Hohlformen bis zu etwa 200 m.

Ein Einfluss auf die küstennahen Sandtransportsysteme kann nicht festgestellt werden. Die Entnahmegebiete im Küstenvorfeld liegen außerhalb der küstenparallelen Transportbänder. Im Fall von Graal-Müritz 1 deutet der Vergleich der Transportpotenziale im Küstenvorfeld mit denen der aktiven Zone im Vorstrandbereich an, dass das küstenparallele Transportband auf einen schmalen Bereich beschränkt ist.

Die bisherigen Entnahmen sind vergleichsweise gering. Bei signifikanter Zunahme ist nicht grundsätzlich auszuschließen, dass sich über längere Zeiträume die Verhältnisse im Küstenvorfeld ändern und in der Folge eine größere Materialzufuhr aus der Küstenzone induzieren. Diese Auswirkungen können erkannt werden, wenn im Zusammenhang mit künftigen Sedimententnahmen eine sedimentologisch-morphologische Überwachung (Monitoring) über einen längeren als den hier betrachteten Zeitraum hinaus etabliert wird.

7. D a n k s a g u n g

Die Autoren danken an dieser Stelle den Kapitänen und Besatzungen der FS „Gauß“, VWFS „Deneb“ und FK „Littorina“ sowie Rolf Kunze, Yücel Arik, Holger Klein, Volker Weigelt (alle BSH), Eric Steen und Helmut Beese (beide Universität Kiel) für ihre tatkräftige Unterstützung. Das Amt für ländliche Räume in Husum stellte dankenswerter Weise Peildatensätze für die beiden Untersuchungsgebiete in der Nordsee zur Verfügung. Dank gilt auch dem Staatlichem Amt für Umwelt und Natur in Rostock, das Daten aus dem „GIS Küste Mecklenburg-Vorpommern“ in großzügiger Weise bereitstellte. Unser Dank gebührt der Projektgruppe des KFKI für ihre konstruktive Kritik und Anregungen. Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 3KIS008 finanziell über einen Zeitraum von 3 Jahren unterstützt.

8. Schriftenverzeichnis

- BIRKLUND, V. u. PETERSEN, S.: Sand Extraction at Kriegers Flak in 1997 and the Impact on the Benthic Fauna in 1996–1997. Øresundskonsortiet. Document No. 98/103/1E, 1998.
- DETTE, H. H.: Influence of Shoreline Alignment on Offshore Sediment Transport. *Coastal Dynamics* 2001: 938–947, 2001.
- DETTE, H. H.; RAUDKIVI, A. J. u. OUMERACI, H.: Morphologische Änderungen des Unterwasserstrandes an der Westküste des Fischlandes. *Die Küste*, H. 64: 201–234, 2001.
- DIESING, M.: Die Regeneration von Materialentnahmestellen in der südwestlichen Ostsee unter besonderer Berücksichtigung der rezenten Sedimentdynamik. Unveröff. Dissertation, Universität Kiel, 158 S., 2003.
- HASELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; GIENAPP, H. u. RICHTER, K.: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungsheft* Nr. 12, 1973.
- HOFSTEDE, J.: Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik eines Wattgebietes. *Die Küste*, H. 50: 197–212, 1989.
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES): Effects of Extraction of Marine Sediments on Fisheries. ICES Cooperative Research Report No. 182, 1992.
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES): Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem. ICES Cooperative Research Report No. 247, 2001.
- KLEIN, H.: Strömungsmessungen an einem Baggerloch westlich der Insel Sylt (54°55'N, 8°10'E). Interner Bericht des BSH, 12 S., 1993.
- KLEIN, H.: On the Investigations of Sediment Mobilisation in the Tromper Wiek (Western Baltic Sea) due to Waves and Currents by Means of ADCP Echo Intensity Data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 467–474, 2003.
- KLEIN, H. u. MITTELSTAEDT, E.: Strömungen und Seegangsverhältnisse vor Graal-Müritz und in der Tromper Wiek. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, Nr. 26, 2001.
- MÜLLER, G. u. GASTNER, M.: The „Karbonat-Bombe“, a Simple Device for the Determination of the Carbonate Content in Sediments, Soils and Other Materials. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatsheft* 10: 466–469, 1979.
- RIJN, L.C., VAN u. WALSTRA, D. J. R.: Morphology of Pits, Channels and Trenches. Part I: Literature Review and Suggested Study Approach. WL Delft Hydraulics Report (unveröffentl.), 2002.
- SCHWARZER, K. u. DIESING, M.: Sediment Redeposition in Nearshore Areas – Examples from the Baltic Sea. *Coastal Dynamics* 2001: 808–817, 2001.
- SCHWARZER, K.; DIESING, M. u. SCHROTTKE, K.: BASYS Final Scientific Report, SG4 Nearshore and Coastline Dynamics. Abschlussbericht des Instituts für Geowissenschaften der Universität Kiel (unveröffentl.), 1999.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht; Grundlagen und erste Anwendungen (Teil 1 der Ergebnisse eines KFKI-Projekts). *Die Küste*, H. 45, 1987.
- TAUBER, F. u. LEMKE, W.: Karte der Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee (1:1 000 000), Blatt Darß. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 47: 171–178, 1995.
- THIEL, H. u. REGIER, M.: Meeresbiologische Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Abschlussbericht des Instituts für Hydro- und Fischereibiologie der Universität Hamburg (unveröffentl.), 1999.
- UNSÖLD, G.: Jahreslagen und Aufwachsdaten in Schlicksedimenten eines künstlichen, gezeitenoffenen Sedimentationsbeckens (Wattgebiet südlich Nordstrand/Nordfriesland). *Meyniana*, 26: 103–111, 1974.
- VEER H. W., VAN DER; BERGMAN, M. J. N. u. BEUKEMA, J. J.: Dredging Activities in the Dutch Wadden Sea: Effects on Macrobenthic Infauna. *Netherlands Journal of Sea Research*, 19: 183–190, 1985.
- ZEILER, M.; FIGGE, K. u. SCHULZ-OHLBERG, J.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, H. 62: 53–86, 2000a.
- ZEILER, M.; FIGGE, K. u. SCHULZ-OHLBERG, J.: Mobile Sand Deposits and Shoreface Dynamics in the Inner German Bight (North Sea). *Marine Geology*, 170: 363–380, 2000b.