Morphologische Untersuchungen zum Problem der tidebedingten Sandbewegung im Lister Tief

Von Johannes Ulrich und Horst Pasenau

1.	Vorbemerkung											 		96
2.	Einleitung											 		96
	2.1. Regionale V	ora	ussetz	unge	n							 		97
	2.2. Technische	Vora	ussetz	unge	en							 		99
3.	Meßmethoden u	nd C	Geräte									 		99
	3.1. Navigation											 		99
	3.2. Echolotung											 		100
	3.3. Pegelnetz											 		100
	3.4. Vermessung	des	Testf	eldes								 		101
4. Auswertung und Darstellung der Vermessungsergebnisse												104		
5.	Morphologische	Erge	ebnisse									 		104
	5.1. Morphometrische Analyse der Rippelformen										 		104	
	5.2. Strömung u	nd S	edime	entbe	wegu	ng						 		107
6.	Schlußbemerkun	g										 		110
7.	Zusammenfassur	ng										 		110

Summary

Since June 1971 systematic morphological investigations were carried out in the "Lister Tief" area (north of Sylt) by the survey vessel "Sturmmöwe" (WSA Kiel). The main result of this survey work will be to explore the intensity and direction of the sand transport within an appropriate test field.

First technical experiences could be gained, and the comparison of two cruises (September 1971 and June 1972) gives interesting results; the most important ones are the following:

- 1. The distribution of giant and mega ripples as represented in the mapping of ripple types (fig. 1) is generally confirmed.
- 2. Additionally installed tide gauges (positions s. fig. 2) indicate clear deviations from the theoretically calculated tidal curve (fig. 3).
- 3. Sounding profiles transverse to the main direction of the tidal current are not qualified for morphological investigations on tidal ripples (fig. 4).
- 4. In test fields which are characterized by an extremely strong tidal current, all deviations from the course must be recorded with the aid of an exact working navigation system (fig. 5). In this case hydrodist navigation system was used.
- 5. The comparison of seven sounding profiles obtained during two repetitive courses shows clearly the tendency of the sand movement in the northern part of the test field as well as the E-W migration of the giant and mega ripples which all are ebb-tide orientated (fig. 6).
- 6. The areas which are characterized by flood-tide or ebb-tide orientation of the giant ripples could be delimited (fig. 7). In the southern part of the test field most of the ripples have flood-tide orientated forms, in the northern part most of them are formed by ebb-tide action.
- 7. Drift current measurements (fig. 8) and analysis of the grain size (table 1) have confirmed the supposition of a prevailing transport of suspended material.
- 8. The comparison of the run ripples crest resulting from two surveys signifies the direction of the movement of the sediment bodies (fig. 9).
- 9. A series of sounding profiles of two survey cruises characterizes the result of the morphological variation during a period of 9 months (fig. 10 and 11).

10. The extent of the area of the westward moving forms seems to be smaller than of the eastward moving. At present this doesn't allow any quantitative conclusions.

1. Vorbemerkung

Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Sandbewegung im deutschen Küstenraum" der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurde im Juni 1971 mit speziellen morphologischen Vermessungs- und Kartierungsarbeiten im Testfeld "Lister Tief" nördlich Sylt begonnen. Diese Untersuchungen gehen auf eine in den Jahren 1968 bis 1971 durchgeführte generelle Bestandsaufnahme der für die Sandbewegung in der Deutschen Bucht als Indikatoren dienenden submarinen Bodenformen zurück, deren Ergebnisse nunmehr vorliegen (J. UL-RICH 1973). Auf Grund dieser großräumigen Kartierung lassen sich zahlreiche Riesenund Großrippelgebiete erkennen, die für ein Studium der morphologischen Veränderungen sowie der Intensität und Richtung des Sandtransportes besonders geeignet sind. Zehn dieser potentiellen Testgebiete seien im folgenden genannt:

Lister Tief, Hörnum-Tief, Norder- und Mittelhever, Norderpiep, Nordergründe (Tillmündung), Hohewegrinne, Innenjade, Wangerooger Fahrwasser, Norderneyer Seegat, Borkumriff-Grund.

In diesen Testgebieten dürfte es sich lohnen, die Bewegungsvorgänge durch regelmäßig zu wiederholende, engabständige Vermessungskurse zu untersuchen, um dadurch einen Überblick über die jeweils vorherrschenden lang- und kurzfristigen Sandtransporttendenzen zu erhalten. Eines dieser Testgebiete ist das zwischen den Inseln Sylt und Röm gelegene Lister Tief, das – wie aus o. a. Untersuchung bekannt wurde – extrem hohe zusammenhängende Riesenrippelfelder aufweist und dessen Sedimentdecke wahrscheinlich durch die im W von Sylt abgetragenen Sandmassen beeinflußt wird.

Diese langfristigen Bewegungsvorgänge in Verbindung mit der möglicherweise vorhandenen Umlagerung der Riesen- und Großrippeln zu erfassen und tidebedingte, kurzfristige Pendelbewegungen zu messen sowie die damit in Zusammenhang stehenden Suspensions- und Ablagerungsvorgänge zu untersuchen, ist das Hauptziel dieser Arbeiten. Als Fernziel soll angestrebt werden, auf der Grundlage einer möglichst exakten Massenbilanzrechnung die generelle Tendenz der Sedimentbewegung zu erfassen.

2. Einleitung

Als Folge des besonders intensiven Tidestromes und der dadurch bedingten – im großen und ganzen rhythmisch verlaufenden – Sedimentbewegung haben sich im Lister Tief extrem hohe Riesen- und Großrippeln in zusammenhängenden Feldern herausgebildet, deren Begrenzungen zwar inzwischen bekannt sind (vgl. Abb. 1), deren Formen, Ausdehnung, Neigungsverhältnisse und Veränderungen jedoch bisher noch nicht untersucht wurden. Es muß aber vermutet werden, daß es sich bei den submarinen Rippeln im Lister Tief um besonders instabile Teile der Sedimentdecke handelt, deren Erforschung repräsentative Erkenntnisse über Richtung und Intensität des Sandtransportes in stark tidedurchströmten Meeresbuchten bringt, so daß diese Untersuchungsergebnisse auch für andere Regionen mit ähnlicher Topographie des Meeresbodens und der ihn umgebenden Küsten Gültigkeit haben.

Bevor über die Meßmethoden und Geräte, mit denen die Untersuchungen durchgeführt wurden, berichtet wird, seien einige Angaben über die regionalen und technischen Voraussetzungen für die Vermessungsarbeiten gemacht.



Abb. 1. Verbreitung der Riesen- und Großrippeltypen im Lister Tief. Ausschnitt aus Karte 1 der Rippeltypenkartierung von J. ULRICH (1973) mit Lage des Testfeldes. Dargestellt sind die für Sandbewegungsvorgänge typischen Bodenformen, wie Riesen- und Großrippeln (> 0,5 m Höhe), Rippel-Kleinformen (< 0,5 m Höhe), Sandrücken (S) und unregelmäßige Formen (U), deren Identifizierung geologischer Hilfsmittel bedarf. Die stark umrandeten Bereiche stellen Gebiete mit Bodenrippeln dar, deren Klassifizierung nach Höhe und Neigung im Lotprofil erfolgte: Typ k: < 0,5 m; Typ 1: 0,5-1 m; Typ 2: 1-2 m; Typ 3: > 2 m; a: steil; b: mittel; c: flach geneigt; hierzu weitere Erläuterungen in o. a. Publikation

2.1. Regionale Voraussetzungen

Über die geologischen und hydrographischen Verhältnisse im Lister Tief hat vor allem C. HUNDT (1959) grundlegende Untersuchungen angestellt. Weiterhin ist in den Arbeiten von L. MEYN (1876), F. MAGER (1927), F. MÜLLER und O. FISCHER (1938), F. ZAUSIG (1939) und K. GRIPP (1944) diese Region im Rahmen einer Deutung der geologisch-sedimentologischen Vorgänge im Raum Sylt behandelt worden. Bisher fehlte jedoch eine detaillierte Kartierung der submarinen Bodenformen ebenso wie einigermaßen präzise Angaben über die den Sandtransport bewirkenden Bodenstromgeschwindigkeiten. Außerdem haben sich die topographischen und sedimentologischen Verhältnisse in den letzten 30 Jahren gerade in diesem Gebiet stark geändert, so daß auch zur Deutung der langfristigen Veränderungen eine exakte Vermessung der Gewässersohle notwendig wurde. Die hier im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Sandbewegung im deutschen Küstenraum" der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführten Grundlagen-Untersuchungen erstrecken sich sowohl auf die topographische Vermessung des Bodenreliefs und seiner Veränderungen als auch auf die gelegentliche Erfassung der Strömungsverhältnisse in Bodennähe. Die gegenwärtige Zusammensetzung der Sedimentdecke hinsichtlich Korn-

größenverteilung und Schichtung sowie deren Veränderungstendenzen werden – ebenfalls im Rahmen dieses Schwerpunktes – durch die Arbeitsgruppe Dr. Lüneburg (Institut für Meeresforschung Bremerhaven) untersucht.

Topographisch gesehen handelt es sich beim Lister Tief um eine rinnenförmige Vertiefung zwischen zwei Inseln, die dem Tidestrom einen Zugang zu den künstlich abgeschlossenen Wattgebieten ermöglicht. Die Wassertiefen betragen im Lister Tief im allgemeinen 20 m; sie erreichen in dem vor dem Lammeläger Sand gelegenen Kolk maximal z. Z. rund 40 m (Abb. 2).



Abb. 2. Tiefenkarte des Lister Tiefs mit Lage der Pegel P I bis P V, der Hydrodist-Remotestationen und der in Abb. 6 dargestellten Vergleichsprofile

Es sei darauf hingewiesen, daß ein wesentlicher Vorteil für die Durchführung dieser Untersuchungen in der Tatsache liegt, daß eine Oberwasserführung – wie sie die großen Flußästuare aufweisen – hier fehlt und daß auch in der Umgebung des Testfeldes keine Verzweigungen vorhanden sind, die durch zusätzliche Zu- und Abflüsse die Meßergebnisse entscheidend beeinflussen könnten. Es handelt sich also um ein abgeschlossenes Einzugsgebiet.

Schließlich kann es als Vorteil für die Vermessungsarbeiten angesehen werden, daß nur selten extreme Windwetterlagen zu entscheidenden Störungen führen. Auch Behinderungen durch ständigen Schiffsverkehr fehlen hier nahezu gänzlich. Die geographische Lage des Testfeldes wird durch die Verbreitung und Abgrenzung der im Lister Tief kartierten Riesen- und Großrippelfelder bestimmt (Abb. 1). Seine Längserstreckung in WNW/ESE-Richtung beträgt 3,6 km, seine Breitenausdehnung 1,6 km. Es handelt sich also – wie Abb. 2 zeigt – um ein rechteckiges Vermessungsgebiet von 5,76 km² Fläche, das zwischen den 6-m-Isobathen vor der Ellenbogenküste im S und dem Lammeläger im N liegt.

2.2. Technische Voraussetzungen

Die grundlegenden Untersuchungen zur morphologischen, hydrographischen und geologischen Dynamik im Lister Tief können zugleich als ein Teil des gegenwärtig sehr aktuellen Projektes "Testfeld Sylt" angesehen werden, da möglicherweise die Auswirkungen der Sandvorspülung bei Westerland bis in den Bereich des Lister Tiefes zu verfolgen sein werden. Die technischen Voraussetzungen für die Durchführung der Vermessungsarbeiten im Testfeld wurden in erster Linie durch die Amtshilfe des Wasser- und Schiffahrtsamtes Kiel geschaffen. Dankenswerterweise wurde das Vermessungsschiff "Sturmmöwe" (Länge 17 m, Tiefgang 1,60 m) mit einem erfahrenen Hydrodist-Vermessungstrupp zur Verfügung gestellt, so daß die Untersuchungen im Sommer 1971 beginnen konnten.

Fahrt Nr.	Termin	Durchgeführte Arbeiten
I.	7. – 11. Juni 1971	Vermessung, Bodenproben, Bodenakustik
II.	16. – 20. August 1971	Vermessung
III.	29. 9 1. Oktober 1971	Vermessung
IV.	17. – 21. April 1972	Vermessung, Bodenproben, Bodenakustik
V.	19. – 23. Juni 1972	Vermessung, Bodenproben, Bodenakustik, Driftstrommessungen
VI.	7. – 11. August 1972	Vermessung, Driftstrom- messung
VII.	9. – 13. Oktober 1972	Vermessung, Driftstrom- messung, Side-Scan-Sonar
VIII.	16. – 18. Januar 1973	Vermessung, Bodenproben
IX.	7. – 11. Mai 1973	Vermessung, Bodenakustik, Bodenproben, Driftstrommessungen

Seither haben folgende Vermessungsfahrten stattgefunden:

Die technischen Vermessungseinrichtungen des Schiffes und die Erfahrungen der Hydrodist-Gruppe boten die Gewähr für eine genaue und sehr häufige Bestimmung der Schiffsorte. Günstige Aufstellungsbedingungen für die Hydrodist-Remotestationen waren durch die Existenz von Leuchttürmen, Festpunkten und guten Verbindungswegen gegeben. Die Einrichtung zusätzlicher Pegel (Standorte s. Abb. 2) ermöglichte eine exakte Erfassung der Wasserstandsschwankungen während der Vermessungsfahrten.

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in 1 bis 10 m Wassertiefe wurden Driftstromkörper eingesetzt. Bodenprobenentnahmen erfolgten mit dem Van-Veen-Greifer; bodenakustische Untersuchungen der Sedimente sowie Arbeiten mit dem Rammlot wurden durch die Arbeitsgruppe Dr. Lüneburg (IfM Bremerhaven) vorgenommen. Über die hierbei erzielten Ergebnisse wird getrennt berichtet werden.

3. Meßmethoden und Geräte

3.1. Navigation

Während der Meßfahrten wurde für die Ortsbestimmung ausschließlich das elektronische Entfernungsmeßsystem der südafrikanischen Firma Tellurometer, MRB 200, in Die Küste, 24 (1973), 95-112

100

der speziellen Auslegung für hydrographische Einsätze auch als Hydrodist bekannt, benutzt. Über die Wirkungsweise dieses Systems und seine Genauigkeit ist u. a. ausführlich VON W. LOHRBERG (1960), D. GROTHENN (1964), H. KOWALSKI (1968) und H. WEITZ (1968) berichtet worden. Hier sei nur kurz das Grundprinzip angesprochen: Aus der Phasenverschiebung elektromagnetischer Wellen zwischen zwei Sendern wird ihre Laufzeit und hieraus wiederum die Entfernung der Sender zueinander bestimmt, in dem man von einem bekannten Brechungsindex der Luft für elektromagnetische Wellen ausgeht. Änderungen der meteorologischen Verhältnisse beeinflussen hierbei die Messungen; der Gesamtfehler dieses Navigationssystems bleibt aber bei den speziellen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet im Bereich von ± 1,5 m, was von anderen Ortsbestimmungsverfahren auf See kaum noch unterboten werden kann. Von zwei festen Remotestationen an Land (Standorte siehe Abb. 2) werden durch die entsprechenden Master-Stationen an Bord die jeweiligen Entfernungen gemessen und über den Bogenschnitt der Standort des Schiffes bestimmt. Die Ablesung und Protokollierung erfolgt an Bord. Die technischen Vorbereitungen für eine Digitalisierung der Meßwerte und die Übernahme auf geeignete Datenträger (bereits an Bord) werden z. Z. getroffen.

3.2. Echolotung

Für die Tiefenmessung fand der Vermessungsechograph LAZ 17 mit magnetostriktivem Schwingersystem LSE 56 EW der Firma ELECTRO-ACUSTIC KIEL Verwendung. Die Schallausstrahlung bzw. -aufnahme erfolgt durch eine Schwingerfläche von 91,2 cm² mit 50 kHz. In den Registrierungen auf elektrosensitivem Funkendurchlaufpapier entspricht bei der hier verwendeten Geräteeinstellung 1 cm einer Tiefe von 1,35 m; in der Horizontalen ergibt sich ein mittlerer Maßstab von 1:4500, die Lotungsfolge beträgt 9 Impulse/sec. Eine nachträgliche Beschickung der Lotungen auf die Ortsschallgeschwindigkeit ist nicht nötig, da das Gerät bereits an Bord auf eine mittlere Schallgeschwindigkeit eingestellt wurde. Wiederholte Nacheichungen während einer Meßperiode zeigten nur sehr geringe Abweichungen, die theoretische Tiefenfehler im Zentimeterbereich bewirkt hätten, so daß sie vernachlässigt werden konnten.

3.3. Pegelnetz

Im Lister Tief rechnet man mit einem mittleren Tidenhub von 1,71 m¹). Amtliche Vermessungen werden mit auf den Pegel List-Hafen bezogenen Werten beschickt. Für nautische Belange sind die dabei auftretenden Ungenauigkeiten ohne Bedeutung. Bei unseren speziellen Untersuchungen mußten aber auch jene Abweichungen vom mittleren Tideverlauf bei extremen Windlagen berücksichtigt werden, die bei der Extrapolation vom Pegel List-Hafen nur sehr ungenau erfaßt werden. Durch großzügige Mithilfe der deutschen und dänischen Wasser- und Schiffahrtsverwaltungen war es möglich, vier selbstschreibende Pegel annähernd an den Eckpunkten des Testfeldes einzurichten (siehe Abb. 2). Die Pegel P 1, P 3 und P 4 wurden nur vorübergehend betrieben, während der Pegel List-West dauernd registrierte und z. Z. zum Fernpegel ausgebaut wird. Als Pegelgeräte kamen unterschiedliche Fabrikate zum Einsatz; P 1 und P 3 hatten eine Registrierdauer von 1 Monat. Zwar war die Betreuung der Pegel zeitweise durch schlechtes Wetter erschwert,

¹⁾ Angabe: Wasser- und Schiffahrtsamt Tönning.

doch lieferten die Geräte ausreichend Material, um eine exakte Beschickung vornehmen zu können (Abb. 3). Die Ergebnisse des Vergleichs der Wetterdaten der Station List mit den Pegeldaten werden später noch ausführlich dargestellt (H. PASENAU, 1974).



Abb. 3. Pegelregistrierungen aller Schreibpegel, die während der Reise V eingesetzt waren, und Vergleich mit der theoretisch berechneten Tidekurve für den Ellenbogen-Bereich

3.4. Vermessung des Testfeldes

Um die Einflüsse extremer Wetterlagen besonders im Herbst und Winter auf die Veränderungen des Bodenreliefs mittelbar über die Wasserbewegung zu erkennen, erschien es notwendig, die Untersuchungen auf einen längeren Zeitraum, d. h. einige Jahre, auszudehnen. Ob solche Einflüsse überhaupt erkennbar sind, war im voraus nicht zu sagen. Die Beantwortung dieser Frage ist ein grundsätzliches Ziel dieser Untersuchungen.

Das Areal sollte systematisch in zweimonatigem Abstand abgelotet werden. Organisations- und witterungsbedingte Abweichungen von einem festen Terminplan mußten in Kauf genommen werden (siehe Tabelle 1). Die herkömmliche Methode, Flüsse, Stromrinnen, Fahrwasser etc. bathymetrisch zu vermessen, ist das Abloten senkrecht von Ufer zu Ufer oder wenigstens annähernd rechtwinklig zur Achse des Sohlenverlaufes. Aus solchen Vermessungsergebnissen lassen sich verhältnismäßig einfach die für die Schiffahrt wichtigen Tiefenlinien ("nautische Warnlinien") konstruieren. Abb. 4 zeigt jedoch sehr deutlich, daß es unmöglich ist, aus solchen Profilen zutreffende Aussagen über die aus den oben erwähnten Untersuchungen (J. ULRICH, 1973) bekannte Rippelgliederung an der Sohle des Lister Tiefs zu machen, eine Tatsache, auf die bereits A. H. STRIDE (1960) im Hinblick auf die Rippelvorkommen vor der südenglischen Küste hingewiesen hat. Entsprechend der generellen Richtung des Tiefs wurde ein Grundvermessungsnetz von



Abb. 4. Quer zur Flut- und Ebbstromrichtung liegende Lotprofile als Beispiel ungeeigneter Seevermessung für morphologische Untersuchungen von Tiderippeln

32 Bahnen im 50-m-Abstand festgelegt (Abb. 2). In das Grundnetz wurden noch zusätzliche "25-m-Bahnen" gelegt und von Süden nach Norden fortlaufend durchnumeriert. Während jeder Reise wurden sämtliche Bahnen des Grundnetzes und je nach der noch zur Verfügung stehenden Zeit eine möglichst große Anzahl der "25-m-Bahnen" abgelotet. Vier Bahnen (14, 22, 48, 54) wurden während der einzelnen Reisen wiederholt abgefahren, um auch kleinräumige und kurzzeitige Veränderungen des Reliefs zu erfassen.

Wie aus den Kurskarten (Abb. 5) zu erkennen ist, sind die Abweichungen von den projektierten Bahnen stellenweise beträchtlich, obwohl der Schiffsort alle 15 sec kontrolliert und der Kurs nötigenfalls korrigiert wurde. Die Ursache dieser Versetzung ist in den starken Strömungen, die in diesem Gebiet eben jene gewaltigen Rippel aufgebaut haben, zu suchen. Wer in solch einem Strömungskanal mit Wasserwirbeln- und -walzen jemals ein Schiff zu steuern hatte, wird das Problem des genauen Kurshaltens zur Genüge kennen.





Abb. 5. Kurskarten der Reisen III (oben) und V (unten). Dargestellt sind die wirklich gefahrenen Vermessungskurse mit allen durch den außerordentlich starken Tidestrom verursachten Abweichungen. Hydrodist-Ortsbestimmung etwa alle 15 sec, d. h. in ca. 40 m Abstand

4. Auswertung und Darstellung der Vermessungsergebnisse

Wie schon oben (3.1.) erwähnt, wird eine Digitalisierung der Meßdaten (Navigation und Lotungen) für die zukünftigen Vermessungsfahrten und eine Übertragung auf geeignete Datenträger angestrebt.

Um die Auswertung der in dieser Arbeit verwendeten Daten per Datenverarbeitungsmaschine zu erleichtern, wurde das im geographischen Koordinatensystem schräg liegende Lotungsnetz um ca. 21° gedreht und alle weiteren Auswertungsvorgänge in diesem transformierten, internen Koordinatennetz vorgenommen. Die in einem annähernd konstanten Zeittakt von 15 sec protokollierten Entfernungsangaben der Hydrodist-Ortung wurden nach Ablochung maschinell berechnet und im Maßstab 1:5000 auf verzugsfreier Folie geplottet. Da die Strömungsgeschwindigkeiten zeitweise örtlich stark schwanken, wurden die Echolotregistrierungen für alle 60 m entzerrt - ebenfalls per Rechner. Die Tiefenbeschickung konnte mit Hilfe des bereits beschriebenen Pegelnetzes besonders genau vorgenommen werden. Dargestellt werden die einzelnen Profile in kompletten Profilserien, und zwar zunächst auf 12 Arbeitsblättern im Maßstab 1:1000 in fünffacher Überhöhung. Aus den Gerätefehlern und den Auswerteungenauigkeiten ergibt sich für alle Aussagen im Rahmen dieser Untersuchungen ein Fehler in der Vertikalen von \pm 10 cm und in der Horizontalen von ± 2 m. Die Zeichnungsungenauigkeiten in den stark verkleinerten Abbildungen dürfen nicht als Maßstab der Fehlergrenzen unserer Betrachtungen herangezogen werden.

5. Morphologische Ergebnisse

Die in der vorliegenden Untersuchung ausgewerteten Vermessungsergebnisse entstammen den Reisen III und V. Daher können hier die topographischen Verhältnisse von Ende September 1971 mit denen vom Juni 1972 verglichen werden, d. h., die innerhalb von etwa 9 Monaten vor sich gegangenen morphologischen Veränderungen können zumindest qualitativ erfaßt werden (Abb. 6).

Über die Einteilung submariner Sandtransportkörper nach Gestalt und Größe ist in verschiedenen Arbeiten berichtet worden von L. M. J. U. VAN STRAATEN (1953a, b), A. H. STRIDE (1965), R. L. ALLEN (1968), J. M. COLEMAN (1969), N. H. KENYON (1970) und J. ULRICH (1973). Uns erscheint es sinnvoll, die zusammenfassende Unterteilung nach H. REINECK et al. (1971) zugrunde zu legen, um die Rippelformen im Lister Tief zu beschreiben:

	Länge L	Höhe H	L/H
Strömungs-Kleinrippeln (small current rippels)	4–60 cm	< 6 cm	5
Strömungs-Großrippeln (mega rippels)	0,6–30 m	0,06–1,5 m	zumeist 15
Riesenrippeln (giant rippels)	30–1000 m	1,5–15 m	zumeist 30

5.1. Morphometrische Analyse der Rippelformen

Eine erste vorläufige Darstellung der Rippelverbreitung im Lister Tief erfolgte in Form einer Rippeltypenkartierung (vgl. Abb. 1), wobei die Kammlagen – infolge der

vorwiegend "kammseinerzeit parallelen" Vermessung - nicht erfaßt werden konnten. Erst die engabständige Vermessung parallel zur Hauptrichtung des Tidestromes, also quer zu den Rippelkämmen, führte zur exakten Erfassung der Rippelkammlagen sowie der Höhen- und Neigungsverhältnisse und damit der Rippelformen und ihrer generellen Tideorientierung. Die Untersuchung kurzfristiger Anderungen bleibt einer späteren Bearbeitung vorbehalten.

Wie die Profilserien (Abb. 10 und 11) zeigen, ist die Bodengestalt des Testfeldes fast überall durch markante Rippelformen geprägt, deren Physiognomie lokale Unterschiede aufweist. Besonders hohe und steile Riesenrippelformen treten im zentralen nördlichen Teil des Testfeldes auf, wo sie vorwiegend Ebborientierung besitzen. Der Nord- und Mittelteil ist durch überwiegend steile Formen über 3 m Höhe geprägt, während die übrigen Bereiche den weniger stark geneigten und kleineren Rippeln vorbehalten bleiben. Ein wesentlich genaueres Bild vermittelt uns Abb. 7. Zwei Areale höherer Riesenrippeln (ca. 4-6 m, stellenweise über 10 m Höhe) werden durch einen schmalen Streifen weniger hoher Riesen- und Großrippeln getrennt. Letztere treten als primäre Sohlformen nur im Osten und Südwesten des Testfeldes auf, als sekundäre Sohlformen findet man sie in weiten Bereichen den Riesenrippeln aufgelagert. Ähnliche Beobachtungen machten J. H. J. TER-WINDT (1971) und I. N. MCCAVE (1971) bei Rippeln vor der holländischen Küste. Während der Vermessungsfahrten mit einem Side-Scan-Sonar-Gerät im Oktober 1972 entdeckten wir noch ein wei-



105

teres System von Kleinrippeln besonders auf den Luvhängen der Groß- und Riesenrippeln.

In den Bereichen größter Rippelhöhen treten auch die größten Wellenlängen (300 bis 350 m) auf, wie die Abbildungen 10 und 11 zeigen²). Eine charakteristische Wellenlänge der Sandtransportkörper im Lister Tief liegt im Nordosten und im ganzen südlichen Teil mit ca. 100–150 m.

Ein häufig kennzeichnender Wert bei der Beschreibung von Rippelformen ist das Verhältnis der Rippelwellenlänge zur Höhe (L/H) (J. C. HARMS, 1969; H. REINECK, et al., 1971; H. REINECK und F. WUNDERLICH, 1968). Im ebborientierten Nordteil erhalten wir fast überall Werte unter 30, die zur Mitte hin über 30 ansteigen (größere Wellenlänge).



Abb. 7. Darstellung der Rippelhöhen im Testfeld und der Gebiete mit Flut- bzw. Ebborientierung der Rippelformen

Auf den Bahnen 28 bis 42 von 0 bis 1200 m treten häufig Formen auf, deren L/H-Werte noch unter 15 liegen. Die östlich und südlich anschließenden, langgezogenen flutorientierten Rippeln erreichen Werte zwischen 30 und 45, in einigen Fällen aber auch über 80.

Besondere Bedeutung kommt aber der Rippelasymmetrie und damit den unterschiedlichen Neigungsverhältnissen der Hänge zu. Die Luvhänge der größten flutorientierten Rippeln im Ostteil des Testfeldes weisen meist nicht mehr als 2°, die Leehänge dagegen bis zu 30° Neigung auf. Ähnlich sieht es bei den ebborientierten Formen aus. Zwischen diesen Werten extrem asymmetrischer Rippeln gibt es gleitende Übergänge bis zu den symmetrischen, deren Hangneigungen aber 12° kaum übersteigen. Die bereits wiederholt

²) M. S. YALIN (1964) bringt außerdem die Wellenlänge noch in einen Zusammenhang mit der Wassertiefe L = 5 h (in stationären Strömungen, h = mittlere Wassertiefe). Es zeigt sich, daß diese Beziehung in Tidegebieten nicht gegeben ist.

verwendeten Begriffe "flut- und ebborientiert" führen zur Kernfrage dieser Untersuchung: Läßt sich aus der Veränderung von Form, Größe und Länge der Sandtransportkörper ein Maß für Richtung und Umfang des Gesamttransports herleiten?

5.2. Strömung und Sedimentbewegung

Das Material einer Gerinnesohle wird entweder als Geschiebe oder als Schwebstoff transportiert. Aus verschiedenen Untersuchungen (H. G. DILLO, 1960; A. FÜHRBÖTER, 1967) ist bekannt, daß Großformen, wie sie Gegenstand dieses Berichtes sind, hauptsächlich durch den Schwebstofftransport aufgebaut werden. H. G. DILLO hat im Modellversuch auf Sedimente verschiedener Ursprungsgebiete (u. a. auch Sande aus dem Syltgebiet) nach einer in der Ems gewonnenen Gezeitenstrom-Geschwindigkeitskurve simulierte Tiden einwirken lassen, um über die Bewegungsvorgänge der Sedimentdecke Aufschluß zu erlangen. Bei 37 cm/sec setzt der Geschiebetransport ein, bei 50 cm/sec überwiegt bereits der Transport in Suspension. Der Md-Wert des Sediments lag bei 270 μ m. Während der Reise VIII wurden vom Kamm und aus dem Tal eines flut- und eines ebborientierten Rippels etwa vom gleichen mit Hydrodist eingemessenen Ort je drei vAN-VEEN-Greiferproben genommen³) (siehe Tabelle 1).

Probe	Bahn (siehe Al	Position bb. 10 u. 11)	Ortsfehler- kreisradius	lokale Situation	Md-Wert (µm)	Quartil- Sortierung (nach TRASK)
C1	46		5 m	Kamm	900	1,29
C2	46	1200 m			860	1,41
C3	46				800	1,21
D1	46				510	1,52
D2	46	1430 m	2 m	Tal	660	1,49
D3	46				740	1,52
E1	36				275	1,26
E2	36	2620 m	8 m	Tal	255	1,29
E3	36				300	1,28
F1	36				550	1,40
F2	36	2850 m	4 m	Kamm	640	1,21
F3	36				520	1,33

Tabelle 1

Korngrößen und Quartil-Sortierung von Bodenproben aus dem Lister Tief

Generell ist das Material auf dem Rippelkamm gröber als im Rippeltal; außerdem scheint das Sediment im Flutstrombereich im Osten des Testfeldes feiner und besser sortiert zu sein.

Um einen Überblick über die Strömungsverhältnisse zu gewinnen, wurden während einzelner Fahrten wiederholt *Driffstrommessungen* durchgeführt (Abb. 8). Wegen der geringen Wassertiefen im Süden mußten hier die Driftkreuze auf 5 m Tiefe befestigt werden, bei den übrigen Driftkörpern geschah dies auf 10 m Tiefe. Es wurden also nur mitt-

³) Die Auswertung übernahm dankenswerterweise Herr Dr. LÜNEBURG, Institut für Meeresforschung Bremerhaven.

lere Strömungsgeschwindigkeiten gewonnen, doch liegen die Werte so hoch, daß es berechtigt erscheint, auch für den wesentlich gröberen Lister Tief-Sand einen überwiegenden Schwebstofftransport anzunehmen, was ohnehin durch die Größe der Rippeln zu erwarten war.

Selbst in den Bereichen ausgeprägter Flutstrom-Rippeln treten beträchtliche Ebbströmungen auf (1 m/sec). Das Relief der Sohle ist also nicht durch die augenblicklichen Strömungen gebildet worden, vielmehr entspricht die Sohlenform in einem mit beweglichem Sediment bedeckten Tidenkanal den Bedingungen höherer mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten längerer Einwirkungszeiträume (H. G. DILLO, 1960). Nach A. H. STRIDE (1963) kann bereits eine Differenz von 0,1 Knoten zwischen Flut- und Ebbstrom die Wanderung der Rippeln in Richtung der höheren Geschwindigkeit bewirken.

Ein Vergleich der Vermessungsergebnisse der Fahrten III und V (Abb. 10 und 11) zeigt deutliche Veränderungen der Gerinnesohle. Wie Untersuchungen von J. ULRICH (1972) aus dem Heppenser Fahrwasser ergaben, können bereits während einer Tide beträchtliche Formveränderungen an Rippeln in der Größenordnung einiger Meter auftreten, was wohl auch für das Lister Tief angenommen werden kann. Hier soll aber nur die in mehrjährigen Beobachtungsreihen erfaßbare Wanderung der Riesenrippeln verfolgt werden. Verbindet man die einigermaßen eindeutig zuzuordnenden Gipfelpunkte der Kämme einzelner benachbarter Profile, so erhält man die Rippel-Kammlinien. Der Vergleich solcher Kammlinien aus den Ergebnissen verschiedener Fahrten zeigt eindrucksvoll die Wanderrichtung der Sandtransportkörper (Abb. 9).

Die bereits erwähnten Areale flut- bzw. ebborientierter Rippeln (Abb. 7) können auch in Abb. 9 deutlich gegeneinander abgegrenzt werden, d. h., die Orientierung entspricht der langfristigen Bewegungstendenz. Viele, vor allem kleinere Formen, lösen sich im Beobachtungszeitraum auf; andererseits läßt sich ein Großteil der Riesenrippeln auch noch nach ca. 9 Monaten wiederfinden.

Der Bereich der westwärts wandernden Formen scheint flächenmäßig kleiner zu sein als der der ostwärts sich bewegenden. Hieraus eine Tendenz der überwiegenden Massenumlagerungsrichtung herzuleiten, wäre allerdings verfrüht. Überschlagsberechnungen haben ergeben, daß in dem in Abb. 6 dargestellten Raum während einer vollen Tide etwa 5 t Sand pro 10 m Gerinnequerschnitt in Richtung des Ebbstroms von einem Rippel transportiert werden. Ähnliche Werte ergeben sich aus dem Gebiet der flutorientierten Rippeln. Damit ist aber noch nichts über den Durchsatz des Materials als Schwebstoff gesagt; zumindest kann man aber annehmen, daß die aus der Formverlagerung errechneten Werte die Größenordnung des Mindestsandtransportes angeben. A. FÜHRBÖTER (1967) ermittelte aus Gleichungen der Transportkörperbewegung und des Feststoffstromes eine Formel zur Berechnung der Mindestsanddriftmenge (V_Smin) in der Zeit Δ t, die auch bei instationären Strömungen in Tidegebieten anwendbar sein soll:

$$v_{s}min = \Delta x \cdot \overline{\Delta h} \cdot (\frac{2-\alpha}{2+\alpha}) \frac{2}{\alpha} - 1$$

wobei Δx die resultierende Strecke der Verlagerung, $\overline{\Delta h}$ die mittlere Höhe des Rippels aus beiden Messungen und α das Verhältnis $\overline{\frac{\Delta h}{h}}$ (h = mittlere Wassertiefe) darstellt. Berechnungen nach diesem Ansatz ergaben in allen Bereichen des Testfeldes – verglichen mit den Ergebnissen aus der Formverlagerung – stets 3 bis 5mal geringere Werte.

In den Arealen gleicher Verlagerungsrichtung wurden von den Transportkörpern größtenteils auch gleiche Strecken im Zeitraum $\Delta t = 9$ Monate zurückgelegt, ihr Volumen etwa beibehaltend (Abb. 6). Im Bereich der im allgemeinen westwärts wandernden



Abb. 8. Verlauf der Driftstrombahnen (in m/sec) im Testfeld nach einer Tidestrommessung bei ablaufendem Wasser am 13. 10. 1972 von 8.57 bis 10.50 Uhr



Abb. 9. Darstellung der Rippelkammlagen und ihrer Veränderungen; Vergleich der Reisen III (September 1971), ausgezogene Linien) und V (Juni 1972, punktierte Linien) im Testfeld Lister Tief

Riesenrippeln scheinen allerdings einige Rippeln in ihrer Form am gleichen Ort zu beharren; das sind besonders die Transportformen bei Distanz 250 m auf den Bahnen 42 bis 52, bei 1200 m auf den gleichen Bahnen und bei 1600 m auf den Bahnen 41 bis 53. Die Ergebnisse einer kürzlich stattgefundenen Fahrt (Mai 1973) bestätigen das sehr eindrucksvoll. Durch ein weiteres Phänomen heben sich diese Formen von ihrer Umgebung ab: Während bei fast allen anderen Rippeln der Leehang langsam am Fuß verflacht, um dann in den Luvhang des nächsten Rippels überzugehen, finden wir bei den oben bezeichneten

Formen eigenartigerweise eine Mulde von ca. 50 m Breite und 3 m Tiefe im Anschluß an den Leehang. Nach der "Regime Theory" (H. G. DILLO 1960; D. B. SIMONS, E. V. RI-CHARDSON und M. L. ALBERTSON 1961; F. ENGELUND und E. HANSEN 1967; T. STÜCKRATH 1969) für stationäre Strömungen würden stehende oder zurückwandernde Rippel ("standing waves" oder "antidunes") zum sogenannten "oberen Regime" gehören und nur bei einer Froudschen Zahl > 1 (Fr $= \sqrt{V}$ g·h; v = Abflußgeschwindigkeit, g = Erdbeschleunigung, h = Wassertiefe) auftreten. Eine Erklärung der beobachteten stehenden Sandwellen aus dieser Theorie ist für instationäre Strömungen nicht angebracht, zumal die Froudsche Zahl für diesen Gerinneabschnitt um eine Zehnerpotenz geringer ist. Welche Umstände zur Ausbildung dieser Formen führen können, ist augenblicklich noch unklar; ähnliche Beobachtungen aus der Natur liegen noch nicht vor. Für die Zukunft dürfte es von großem Nutzen sein, durch synoptische Sedimententnahmen in Form eines Probenprofils über einen Sandtransportkörper mit gleichzeitigen kontinuierlichen Strömungsmessungen und Bodenwasserprobenentnahmen zur Messung des Schwebstoffgehaltes die Zusammenhänge der vielfältigen Abläufe beim Feststofftransport durch Transportkörper zu erhellen.

6. Schlußbemerkung

Die im Lister Tief vor nunmehr zwei Jahren begonnenen morphologischen und hydrodynamischen Untersuchungen an Riesen- und Großrippeln haben erste Ergebnisse hinsichtlich einer Analyse der Rippelformen und ihrer Deutung sowie bezüglich der Strömungs- und Sedimentationsverhältnisse im Testfeld gebracht. Daß dies möglich war, ist in erster Linie der Bereitstellung einer Sachbeihilfe durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft zu verdanken. Doch auch andere Stellen haben wesentlich zum Gelingen der bisherigen Untersuchungen beigetragen. Das zuständige dänische Wasserbauamt in Tondern hat einen bedeutsamen Beitrag durch Installation von drei Schreibpegeln geleistet. Ebenso war die Amtshilfe des Wasser- und Schiffahrtsamtes Tönning, insbesondere im Hinblick auf den Einbau eines fernregistrierenden Pegels, von besonderem Wert. Doch die exakte Vermessung des Testfeldes wäre nicht möglich gewesen ohne die wiederholte Unterstützung der Wasser- und Schiffahrtsverwaltungen in Kiel, mit deren Vermessungsschiff "Sturmmöwe" unter Kapitän Porath diese Fahrten durchgeführt werden konnten und dessen Hydrodist-Vermessungstrupp unter der Leitung von Herrn Weitz die exakte Navigation betrieb.

Allen diesen Stellen und zahlreichen Einzelpersonen, die sich beratend oder praktisch helfend eingesetzt haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

7. Zusammenfassung

Seit Juni 1971 werden im Lister Tief (nördlich Sylt) mit dem Vermessungsschiff "Sturmmöwe" (WSA Kiel) systematische morphologische Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel haben, Intensität und Richtung des Sandtransportes innerhalb eines Testfeldes zu erfassen.

Erste vermessungstechnische Erfahrungen konnten gesammelt und aus dem Vergleich der Resultate zweier Vermessungsfahrten (September 1971 und Juni 1972) interessante Ergebnisse gewonnen werden, deren wichtigste im folgenden genannt sind:



Abb. 11. Lotprofilserie aus dem Testfeld Lister Tief auf Grund der bathymetrischen Vermessung der Reise V (Juni 1972)

- 1. Die Verbreitung der Riesen- und Großrippeln entsprechend der Rippeltypenkartierung (Abb. 1) wird generell bestätigt.
- 2. Die für eine genauere Erfassung der Wasserstände eingerichteten zusätzlichen Pegel (Lage s. Abb. 2) zeigen deutliche Abweichungen gegenüber der theoretisch berechneten Tidekurve (Abb. 3).
- 3. Quer zur Flut- und Ebbstromrichtung liegende Lotprofile eignen sich für morphologische Untersuchungen an Tiderippeln nicht (Abb. 4).
- 4. In Testfeldern mit extrem starkem Tidestrom müssen sämtliche Kursabweichungen mit Hilfe eines genauen Navigationssystems exakt erfaßt werden (Abb. 5).
- 5. Der Vergleich von sieben Echolotprofilen zweier Fahrten (Wiederholungskurse) zeigt deutlich die Tendenz der Sandbewegung im nördlichen Teil des Testfeldes sowie die E-W gerichtete Verlagerung der Riesen- und Großrippeln, die sämtlich ebborientiert sind (Abb. 6).
- 6. Die Bereiche mit Flut- bzw. Ebborientierung der bis zu 8 m hohen Riesenrippeln konnten abgegrenzt werden (Abb. 7). Überwiegend Flutstromeinwirkung zeigen die Rippelformen im südlichen Teil, überwiegend Ebbstromeinwirkung diejenigen im Norden des Testfeldes.
- 7. Driftstrommessungen (Abb. 8) und Korngrößenanalysen (Tabelle 1) bestätigen die Annahme eines überwiegenden Schwebstofftransportes.
- 8. Der Vergleich der Rippelkammlagen aus den Ergebnissen zweier Vermessungsfahrten läßt die Bewegungsrichtung der Sandtransportkörper erkennen (Abb. 9).
- 9. Eine Synthese der morphologischen Veränderungen im Zeitraum von 9 Monaten können die Lotprofilserien zweier Vermessungsfahrten geben (Abb. 10 und 11).
- Der Bereich der sich westwärts bewegenden Formen scheint flächenmäßig kleiner zu sein als der der ostwärts wandernden, was aber z. Z. noch keine quantitativen Rückschlüsse erlaubt.

Schrifttum

ALLEN, J. R. L.: Current Rippels. Amsterdam (1968).

- COLEMAN, J. M.: Brahmaputra River: Channel processes and sedimentation. Sediment. Geol. 3 (1969), 129-239.
- DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitt. Franzius-Inst. Grund- und Wasserbau TH Hannover, 17, (1960), 135–253.
- ENGELUND, F. und HANSEN, E.: A monograph on sediment transport in alluvial streams. Kopenhagen (1967).

FÜHRBÖTER, A.: Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitt. Franzius-Inst. Grund- und Wasserbau TH Hannover, 29, (1967), 1–35.

GRIPP, K., SIMON, W. G. und BECKER, W. G.: Untersuchungen über den Aufbau und die Entstehung der Insel Sylt. Die Westküste 2, H. 2, (1940), 24–84.

- GROTHENN, D.: Untersuchungen zur Wattvermessung. Wissensch. Arb. Inst. Geol. Photogramm. TH Hannover, 23, (1964).
- HARMS, J. G.: Hydraulic significance of some sand rippels. Geol. Soc. Am. Bull., 80, (1969), 363-396.
- HUNDT, C.: Die Abbruchursachen an der Nordwest-Küste des Ellenbogens auf Sylt. Die Küste VI, H. 2, (1957).

KENYON, N. H.: Sand ribbons of European tidal seas. Marine Geol. 9, (1970), 25-39.

- KOWALSKI, H.: Erfahrungen mit dem Hydrodist in der Vermessung küstennaher Seegebiete zwischen Ems und Elbe. Deutsche Gewässerk. Mitt., Jg. 12, H. 2, (1968) 35-38.
- LOHRBERG, W.: Hydrodist, ein Gerät zur Standortbestimmung im küstennahen Seegebiet. Deutsche Gewässerk. Mitt., Jg. 4, H. 2, (1960) 39-44.
- MAGER, F.: Der Abbruch der Insel Sylt durch die Nordsee. Schriften Balt. Kommission Kiel, VI. In: Veröffentl. der Schleswig-Holst. Universitätsges. Nr. 8, (1927).
- McCAVE, I. N.: Sand waves in the North Sea off the coast of Holland. Marine Geol. 10, (1971), 199-225.
- MEYN, L.: Geognostische Beschreibung der Insel Sylt und ihrer Umgebung. Abh. Geol. Specialkarte Preussen, Band 1. H. 4, (1876).

- Müller, F. und Fischer, O.: Sylt. In: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste, 2. Teil, 7. Folge, (1938).
- PASENAU, H.: Untersuchungen über Dimension und Dynamik der Sandtransportkörper im Lister Tief. Die Küste (in Vorbereitung, 1974).
- REINECK, H. E., SINGH, I. B. und WUNDERLICH, F.: Einteilung der Rippeln und anderer mariner Sandkörper. Senckenb. marit., 3, (1971) 93-101.
- REINECK, H. E. und WUNDERLICH, F.: Zur Unterscheidung von asymmetrischen Oszillationsrippeln und Strömungsrippeln. Senckenb. leth., 49, (4), (1968), 321–345.
- SIMONS, D. B., RICHARDSON, E. V. and ALBERTSON, M. L.: Flume studies using medium sand (0,45 mm) Wat. Supply Pap. U. S. Geol. Surv., 1948-A (1961).
- STRIDE, A. H.: Current-swept sea floors near the southern half of Great Britain. Quart. J. Geol. Soc. London, 119 (1963), 175-199.
- STÜCKRATH, T.: Die Bewegung von Großriffeln an der Sohle des Rio Paraná. Mitt. Franzius-Inst. Grund- und Wasserbau TH Hannover, 32, (1969) 266–293.
- TERWINDT, J. H. J.: Sand waves in the southern bight of the North Sea. Marine Geol. 10, (1971), Nr. 1, 51–67.
- ULRICH, J.: Untersuchungen zur Pendelbewegung von Tiderippeln im Heppenser Fahrwasser (Innenjade). Die Küste, H. 23, (1972) 112–121.
- ULRICH, J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. Ergänzungsheft zur Deutsch. Hydrogr. Zeitschr. Reihe B, 14 (im Druck, 1973).
- VAN STRAATEN, L. M. I. U.: Megarippels in the Dutch Wadden sea and in the basin of Arcachon (France). Geologie en Mijnbouw. 15. Jg., 1., (1953 a) 1-11.
- VAN STRAATEN, L. M. I. U.: Rhythmic patterns on Dutch North Sea beaches. Geol. en Mijnbouw. 15. Jg., 2, (1953 b) 31-43.
- WEITZ, H.: Erfahrungen mit dem Hydrodist im Bereich der schleswig-holsteinischen Nordund Ostseeküste. Deutsche Gewässerk. Mitt. 12. Jg., H. 6, (1968), 153–157.
- YALIN, M. S.: Geometrical proporties of sand waves. Proc. Am. Soc. Civil Engrs. J. Hydraul. Div. 90, (1964), HY 5, (1964).
- ZAUSIG, F.: Veränderungen der Küsten, Sände, Tiefs und Watten der Gewässer um Sylt (Nordsee) nach alten Seekarten, Seehandbüchern und Landkarten seit 1585. Geol. Meere Binnengew., 3, (1939), 4, 401–505.