

Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht

Untersuchungen zu Fragen der Sedimentverteilung und der Schlicksedimentation

Von REINHARD GAST, ROLF KÖSTER und KARL-HEINZ RUNTE

Zusammenfassung

Der Schlick des Wattenmeeres ist ein Sediment von komplexer Zusammensetzung und mit den anderen Sedimenttypen dieses Gebietes durch fließende Übergänge verbunden. Zur Charakterisierung des Schlickes müssen sedimentologische Eigenschaften (mehr als 50% < 63 µm, kein nennenswerter Anteil > 125 µm) ebenso herangezogen werden wie bodenmechanische (weiche Konsistenz).

Beide Eigenschaften verhalten sich oft parallel; einem hohen Anteil < 63 µm entspricht auch meist eine weiche Konsistenz. Häufig treten jedoch Ausnahmen in beiden Richtungen auf. Sande mit geringem Anteil < 63 µm und relativ hohem > 125 µm können weich sein und Sedimente mit hohem Anteil < 63 µm fest.

Die Geländebeobachtungen wie die Besiedlung mit Wattorganismen legen nahe, die Abgrenzung des Schlickes nicht an eine starre Grenze zu binden. Bei sehr weichem Material ist sie schon bei geringeren Anteilen an Schluff und Ton zu suchen, bei sehr festem bei höheren.

Die bei den Untersuchungen erarbeiteten sedimentologischen Daten wurden unter Einschluß biologischer Parameter mit statistischen Methoden weitergehend bearbeitet. Sie zeigen die unterschiedliche Eignung verschiedener Kennziffern, wobei die besten Unterscheidungsmerkmale bei gleichzeitiger Berücksichtigung verschiedener Merkmale erhalten werden. Die Anwendung dieses Weges setzt entsprechende umfangreiche Labor- und Rechenarbeiten voraus.

In der Meldorfer Bucht ist die Schlicksedimentation im Vergleich zu anderen Gebieten der deutschen Nordseeküste gering. Sie beschränkt sich auf die inneren Winkel der Bucht, auf Lahnungsfelder und die Füllung eines Baggerloches vor Deichhausen bei Büsum. Letzteres wurde neben einem Ost-West-Profil nördlich des Helmsandes als Testfeld für Detailuntersuchungen ausgewählt.

Das Testprofil in der Buchtmitte sowie das Testfeld mit zwei weiteren Testprofilen innerhalb des Feldes zeigten während des gesamten Untersuchungszeitraumes sehr starke wetterabhängige, kurzzeitige und deutliche jahreszeitliche Schwankungen der Sedimentverteilung, aber mit Ausnahme des landnahen Teiles des Testprofils in der Buchtmitte keine stetigen Veränderungsstendenzen. In letzterem Gebiet bildeten sich jedoch die Auswirkungen des Deichbaues vor dem Speicherkoog Nord deutlich ab.

Die Schlicksedimentation im Testfeld beruht überwiegend auf Biodeposition. Eine Ablagerung direkt aus der Suspension konnte hier nicht nachgewiesen werden. Die Bindung der Schlickpartikel erfolgt in erster Linie in Form von Kotpillen, die im Sediment wieder verfallen. Sie werden durch Organismen (Bioturbation) verwühlt und im Sediment in die Tiefe verlagert.

Die Ergebnisse aus der Meldorfer Bucht dürfen auf keinen Fall unkritisch auf andere Teilgebiete der deutschen Nordseeküste übertragen werden. Das Verhältnis zwischen rein anorganischer Schlickfällung und Biodeposition ist in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren sehr unterschiedlich und müßte für eine allgemeinere Aussage zur Schlicksedimentation an einigen geeigneten Positionen bearbeitet werden.

Summary

The mud in the German North Sea intertidal zone is a complex sediment. The transition to other sediment types is often not uniquely defined. Both sedimentological (more than

50 % < 63 μm , no significant fraction > 125 μm) and soil mechanics properties (e.g. consistency) have to be considered in order to characterize mud.

These properties are often complementary since a large fraction < 63 μm typically implies weak consistency. However, exceptions in both directions frequently occur. Sands with a low fraction < 63 μm and a relatively large fraction > 125 μm can be soft, and firm sediments can have a large fraction < 63 μm .

Terrain investigations, such as on the density of intertidal organisms indicate that mud is not strictly definable. It can be found at low silt and clay fractions in soft sediments and at higher fractions in firm sediments.

The statistical analysis of the sedimentological data included consideration of biological parameters. The results indicate the variable applicability of different parameters. The best parameters are those which can be correlated with various sediment characteristics. Extensive laboratory studies and research are prerequisites for this analysis technique.

The rate of sedimentation of fine particles in Meldorf Bay is relatively weak when compared with that in other German North Sea coastal regions. It occurs primarily at inner bay bends, docking locations and the dredged region at Deichhausen near Büsum. The last area, and an east-west profile north of Helmsand were chosen for detailed investigations.

Both the test profile in the middle of the bay and two additional profiles within the test region indicate extreme short term weather induced changes in the sediment distribution during the entire study period as well as seasonal variations. Clearly defined trends were only found in the near-shore zone as opposed to the middle of the bay. The influence of the dike construction at Speicherkoog is declining in the near-shore zone.

The sedimentation of fine particles in the test region is essentially caused by biodeposition. Deposition directly generated by the suspension could not be proved. The binding of the particles is primarily in the form of pellets which decay in the sediment. These are broken up by organisms (bioturbation) and vertically distributed in the sediment column.

The conclusions for Meldorf Bay can not be uncritically applied to other regions of the German North Sea coast. The relationship between purely inorganic particle sedimentation and biodeposition varies extensively depending on various factors. Additional investigations of relevant parameters must be conducted in order to arrive at general conclusions about fine particle sedimentation.

Inhalt

1. Einführung und Aufgabenstellung	167
2. Flächenkartierung des Watts der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht	168
2.1 Durchführung der Geländearbeiten	168
2.2 Gebietsbeschreibung und Sedimentverteilung nach Grobansprache im Gelände	168
2.3 Verbreitung charakteristischer Arten	172
2.4 Verteilung von Sedimentation und Erosion in den Sommern 1978 und 1979	172
3. Durchführung der Laborarbeiten und sedimentologische Kartierung nach Labordaten	177
3.1 Aufbau der Wattsedimente	177
3.2 Durchführung der Laborarbeiten	178
3.3 Errechnung von Probenparametern aus Labordaten	182
3.4 Kartierung nach Anteilen von Korngrößenbereichen und nach Sedimentparametern	183
3.5 Metallgehalte der Sedimente in der Meldorfer Bucht	188
4. Statistische Auswertung von Probandaten aus der Flächenkartierung	190
4.1 Parameterauswertung und Sedimenttypisierung mit Hilfe von Klassifikations- und Diskriminanzanalysen	190
4.2 Charakteristische Merkmale von Wattsedimenttypen	193
4.3 Regionale Verbreitung der Wattsedimenttypen in der Meldorfer Bucht	194
4.4 Häufigkeitsverteilungskurven der Wattsedimenttypen	202
5. Auswertung von Luftbildern	202
6. Allgemeines zu den Untersuchungen in den Testprofilen und im Testfeld	206
7. Testprofile	207
8. Das Testfeld östlich von Büsum	211
8.1 Sedimentverteilung im Testfeld	211
8.2 Sedimenttypen im Testfeld	216

9. Schwebfracht, Sedimentation und Biodeposition	219
9.1 Suspensionsmessungen	219
9.1.1 Messungen in den Jahren 1978 und 1979	219
9.1.2 Messungen im Jahre 1980	220
9.2 Sedimentation der Schwebfracht nach bisheriger Auffassung	221
9.3 Mikroskopische Untersuchung von kotpillenbedeckten Wattoberflächen	221
9.4 Die Auswirkungen von Wattvereisungen auf das Sediment	224
10. Gefügeuntersuchungen	225
10.1 Auswahl der Meßstellen im Testfeld	225
10.2 Methodische Grundlagen	226
10.3 Auswertung der Stechkasten-Profile	230
10.3.1 Allgemeines	230
10.3.2 Meßpunkt 54	230
10.3.3 Meßpunkt 53	238
10.3.4 Meßpunkt 52	244
10.4 Dünnschliffmikroskopie von Kleinprofilen	250
11. Überlegungen zur organischen und anorganischen Schlicksedimentation	254
12. Schriftenverzeichnis	254

1. Einführung und Aufgabenstellung

Umfang und Ursachen von Schlicksedimentation haben hohe wissenschaftliche und praktische Bedeutung. An manchen Orten beeinträchtigt hoher Schlickfall Wasserstraßen, an anderen wäre Schlickablagerung aus ökologischen Gründen wünschenswert. Eine Verfolgung der Fragen ist deshalb für praxisorientierte Forschung im Hochschulbereich, wie sie seit fast 15 Jahren in der Gruppe Küstengeologie des Geologischen Institutes der Universität Kiel durchgeführt wird, von großem Interesse.

Als das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) 1977 mit der Anregung an uns herantrat, in einem Forschungsprogramm „Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste“ mitzuarbeiten, haben wir deshalb gerne zugesagt. Unsere Aufgabe im Rahmen des Gesamtprogrammes bestand in einer Flächenkartierung des Watts in der mittleren und nördlichen Meldorfer Bucht sowie in methodischen Arbeiten und Detailuntersuchungen in einem Testfeld nahe Büsum. Die Arbeiten wurden im Zeitraum vom 1. 10. 1977 bis 30. 9. 1979 sowie 1. 4. 1980 bis 31. 3. 1981 durchgeführt. Sie erfolgten in enger Zusammenarbeit mit anderen Gruppen im gleichen Gebiet sowie Arbeiten im Sahlenburger Watt (FIGGE et al., 1980).

Unsere Ergebnisse werden im nachstehenden Bericht vorgelegt. Alle Aussagen beziehen sich auf die Meldorfer Bucht. Sie gelten für dieses Gebiet und dürfen nicht ohne kritische Prüfung der regionalen Bedingungen auf andere Bereiche übertragen werden. Die Geschichte der Küstenforschung an der deutschen Nordseeküste ist reich an Beispielen, wie wertvolle Arbeiten in kleineren („Test“-)Gebieten durch unzulässig verallgemeinernde Anwendung auf andere Küstenabschnitte zu Fehlschlüssen geführt haben.

Die Arbeiten im Gelände und die fachliche Auswertung erfolgten durch die Herren Dr. R. GAST und K.-H. RUNTE, die Laborarbeiten durch die technischen Assistentinnen Frau U. BOCK und Frau G. LANGE. Sie wurden durch zahlreiche studentische Hilfskräfte unterstützt. Viele Kollegen im Geologischen Institut der Universität Kiel standen uns mit Rat und Tat zur Seite. Stellvertretend seien hier die Herren Dr. H. LANGE, Dr. C. SAMTLEBEN und Dr. F. WERNER genannt.

Im Gelände erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit dem Dezernat Gewässerkunde des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide in Büsum, dem Geologischen Institut der

Universität Hamburg und dem Institut für Hydrobiologie der Universität Hamburg. Ständiger Gedankenaustausch erfolgte mit dem Senckenberg-Institut für Meeresgeologie und Meeresbiologie in Wilhelmshaven und der früheren Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk in Cuxhaven sowie dem Deutschen Hydrographischen Institut. Den Mitarbeitern dieser Einrichtungen möchten wir für die erfreuliche und effektive interdisziplinäre Zusammenarbeit herzlich danken.

Ebenso gilt unser aufrichtiger Dank dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, vertreten durch den Geschäftsführer, Herrn Ltd. Baudir. SINDERN, und den Forschungsleiter, Herrn Ltd. Baudir. Dr.-Ing. ROHDE, sowie dem Herrn Bundesminister für Forschung und Technologie der Bundesrepublik Deutschland für die großzügige Förderung der Untersuchungen.

2. Flächenkartierung des Watts der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht

2.1 Durchführung der Geländearbeiten

Als Basis für die Geländearbeiten im Watt der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht konnten die Einrichtungen des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde in Büsum, genutzt werden. Die Begehung der Wattflächen erfolgte teils von den Deichen aus und teils gestützt auf ein kleines Arbeitsboot des Geologischen Institutes der Universität Kiel.

Grundlage der Kartierung sind Beobachtungen und Probenentnahmen an insgesamt 1087 Positionen. Die Ortsbestimmung erfolgte mit einem Sextanten durch Doppelwinkelmessung. An jeder dieser Positionen wurde zunächst der Aufbau des Sedimentes nach Korngröße, Einsinktiefe sowie Anzeichen für frische Sedimentation oder Erosion beschrieben. Zusätzlich wurde die Besiedlung der Oberfläche mit für die Sedimentausbildung wichtigen Arten registriert.

Die Proben wurden, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, mit Hilfe von Probenzylindern entnommen, in denen sie bis zur Bearbeitung im Labor verblieben. Diese Probenzylinder bestehen aus einem PVC-Rohr von 4,5 cm Innendurchmesser und 10 cm Länge. Für die Probenentnahme wird der Zylinder in den Boden gedrückt und mit einem Spaten oder einer Handschaufel ausgegraben.

2.2 Gebietsbeschreibung und Sedimentverteilung nach Grobansprache im Gelände

Das Wattgebiet mit der Festlandküste als nördlicher und östlicher Begrenzung, einer Nord-Süd-Linie westlich von Büsum als westlicher und der Ost-West-Linie über den Helmsand als südlicher Grenze wurde in den Sommerhalbjahren 1978 und 1979 aufgenommen. Das Gebiet (Abb. 1) wird durch den Deich vor dem Speicherkoog Nord unterteilt. Die Flächen im heutigen Speicherkoog Nord sind als Folge der Baumaßnahmen der letzten Jahre stark verändert worden.

Westlich des neuen Deiches liegen die Watten der Meldorfer Bucht und des Bielshövensandes. Sie bestehen aus drei größeren Platen und dem Vorland östlich von Büsum. Die

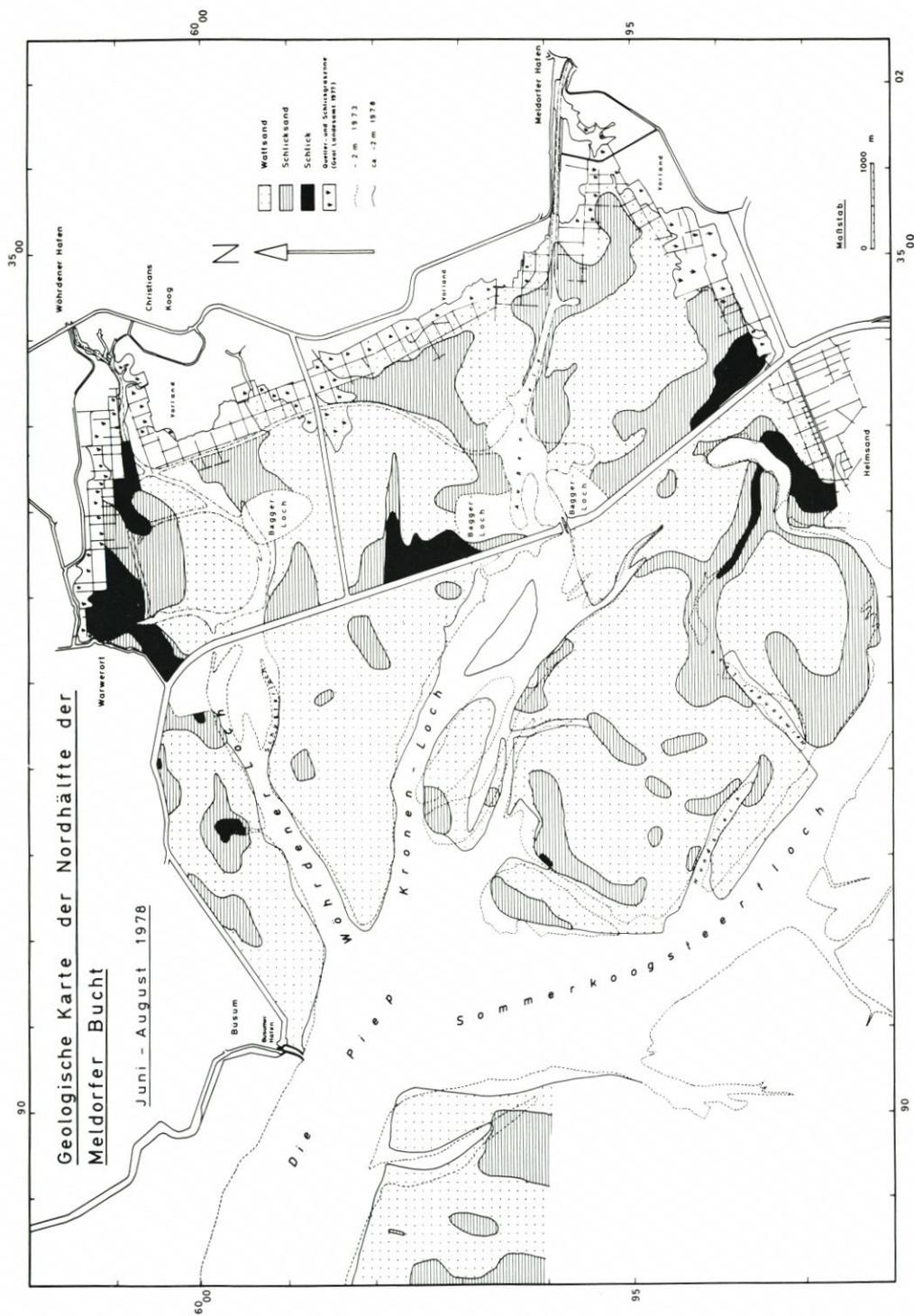


Abb. 1. Geologische Karte der Nordhälfte der Meldorfer Bucht

westliche Begrenzung der Platen wird durch die Piep und das Sommerkoog-Steertloch gebildet.

Die südliche, relativ wenig gegliederte Plate liegt zwischen dem Helmsander Damm und dem Helmsander Loch. Die mittlere grenzt daran an und reicht bis zum Kronenloch. Sie wird durch einige Seitenpriele untergliedert. Die nördliche Plate ähnelt einem Dreieck zwischen Kronenloch, dem Wöhrdener Loch und dem neuen Deich. Auf dem Wattgebiet östlich von Büsum liegt das von zwei Testprofilen begrenzte Testfeld.

Westlich vom Sommerkoog-Steertloch und südlich der Piep erstrecken sich die durch drei größere Priele gegliederten Wattflächen des Bielhövensandes.

Die Ansprache der Sedimente im Gelände erfolgte nach den Korngrößen und den Kriterien von SINDOWSKI (1973):

W a t t s a n d : Oberfläche rau, beim Begehen ohne nennenswerte Fußindrücke

S c h l i c k s a n d : Oberfläche leicht glitschig, beim Begehen bis knöcheltief einsinkend, wenig am Boden haftend

S c h l i c k : Oberfläche glänzend-seidig, beim Begehen bis knietief einsinkend, stark am Boden haftend

In die Grobansprachen gehen nicht nur Korngrößen, sondern auch bodenmechanische Eigenschaften ein. Daraus ergibt sich u. a., daß bei der Ansprache im Gelände gleiche Kornverteilungen in verschiedene Stufen fallen können. Ein Sediment mit hohem Wassergehalt und hoher Einsinktiefe erscheint schlickiger als ein gleichkörniges mit geringerem Wassergehalt und kleinerer Einsinktiefe.

In einer schematischen Darstellung wird von KÖSTER (1979) auf die Beziehungen zwischen der Grobansprache im Gelände, den Korngrößenverteilungen und den bodenmechanischen Eigenschaften hingewiesen. Hier wird deutlich, daß die Wechselbeziehungen zwischen den drei Kriterien zu fließenden Grenzen zwischen Wattsand, Schlicksand und Schlick führen müssen, solange die bodenmechanischen Kennziffern nicht präzise angegeben werden können.

Somit gehen die bodenmechanischen Eigenschaften zumindest qualitativ in Kartendarstellungen nach der Grobansprache (z. B. Abb. 1) ein. Der Vergleich dieser Grobansprache-Karten mit der Verbreitungskarte von *Cardium* und *Arenicola* (Abb. 2) zeigt, daß die Bodenmechanik auch für die Besiedlung von erheblicher Bedeutung ist. In weiten Bereichen der Meldorfer Bucht stimmen die Verbreitungskarten dieser Tiere, soweit nicht andere Faktoren einschränkend wirken, mit der Sedimentverteilung nach der Grobansprache überein.

Mit den Sedimentverteilungskarten nach Korngrößenparametern (Abb. 8-12) lassen sich die Verbreitungsareale dieser Arten weniger gut korrelieren. Eine Ausnahme bildet nur die Sedimenttypenkarte (Abb. 16), die aber auf der statistischen Auswertung von zehn Parametern beruht und nicht nur auf einem wie bei den bisher üblichen Sedimentkarten.

Das Gebiet östlich des neuen Deiches (Speicherkoog Nord) ist 1977 von ELWERT (1977) bodenkundlich kartiert worden. Deshalb konnte der von Pflanzen bedeckte Vorlandbereich vor den alten Deichen außerhalb der Untersuchung bleiben. In den übrigen Gebieten zeigt der Vergleich deutliche Veränderungen.

Während der Bauarbeiten am neuen Seedeich hat in Lee des Bauwerkes eine starke Schlicksedimentation eingesetzt. Vor allem im Winkel südwestlich von Warwerort im Norden des Gebietes wurden 20 bis 40 cm mächtige Lagen dünnflüssigen Schlickes auf harter Wattunterlage angetroffen.

Etwa 600 m südlich des Transportdammes wurde eine alte Rinne im Speicherkoog tiefgründig mit Schlick aufgefüllt, während sie an der Westseite des Deiches mit größerem Material zusedimentiert wurde. Auf der Karte der Verteilung von Erosion und Sedimentation

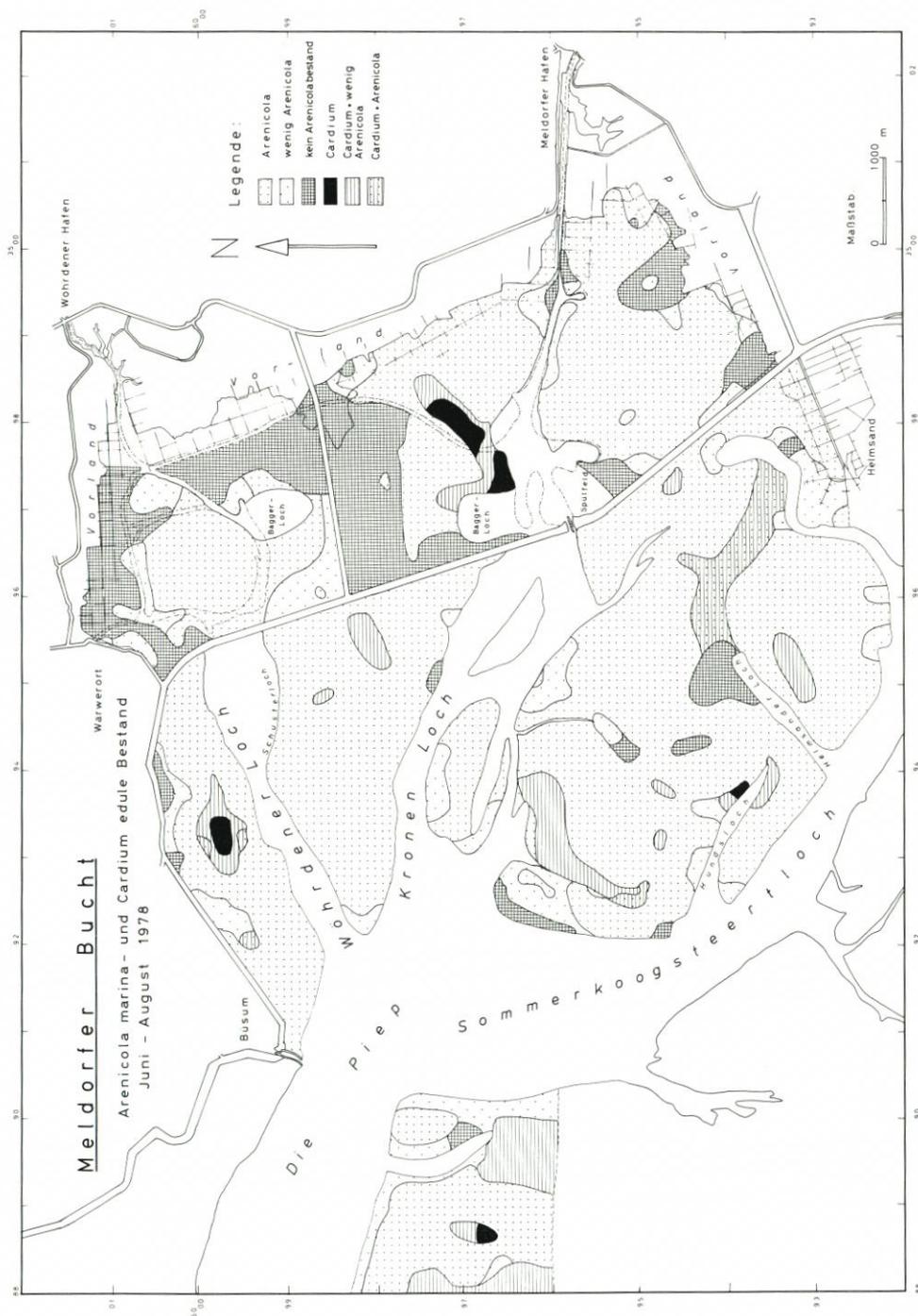


Abb. 2. Meldorf Bucht. Arenicola-marina- und Cardium-edule-Bestand Juni-August 1978

(Abb. 3) fällt dieses Gebiet, mit Ausnahme eines schmalen Streifens am westlichen Deichfuß, durch starke Sedimentation auf.

Eine unbeeinflusste Sedimentverteilung war innerhalb des Speicherkoogs nur noch an wenigen Stellen zu finden. Durch die verschiedenen Bauarbeiten, Baggerlöcher, Spülfelder und das Ausbaggern von neuen Wasserläufen sind vielfältige Veränderungen der Morphologie, der Sedimentverteilung und der Besiedlung eingetreten. Etwa die Hälfte der Flächen im Speicherkoog wurde nach der Grobansprache im Gelände von Wattsanden eingenommen. An die Wattsandflächen grenzen meist Schlicksande an, die wiederum teilweise in Schlickflächen übergangen.

Die Meldorfer Bucht westlich des neuen Deiches ist im Vergleich zu anderen Wattgebieten ein besonders schlickarmes Gebiet. Es gibt hier nur zwei größere zusammenhängende Schlickflächen mit Mächtigkeiten von mehr als 30 cm. Eine liegt nördlich des Helmsander Dammes, dessen seitliche Bühnen die Voraussetzungen für eine Schlicksedimentation begünstigt haben. Ein kleineres schlickreiches Gebiet liegt im Testfeld östlich von Büsum zwischen den Testprofilen 1 und 2 als Füllung eines Baggerloches, das inzwischen fast vollständig zusedimentiert ist. Schlickige Sedimente finden sich außerdem im Ostteil des Helmsander Loches und in einigen alten Rinnenresten auf der mittleren Plate.

Schlicksand ist jeweils angrenzend an Schlickgebiete anzutreffen. Schlicksandgebiete finden sich außerdem in Bereichen ruhigeren Wassers hinter höher liegendem Sandwatt, das als Wellenbrecher wirkt. Ein deutliches Beispiel bildet der Nordwestteil der mittleren großen Plate (vgl. Sedimentkarten). In diesen Gebieten scheint die Besiedlung von *Cardium edule*¹⁾ in einem Zusammenhang mit der Schlicksandbildung zu stehen.

Westlich des neuen Deiches überwiegen nach der Geländeansprache die Wattsande bei weitem. Die nördliche Plate wird nach SINDOWSKI's Kriterien fast ausschließlich von Wattsanden eingenommen. Auch die mittlere und südliche Plate besitzen große, zusammenhängende Wattsandflächen.

2.3 Verbreitung charakteristischer Arten

Während der geologischen Flächenkartierung der nördlichen Meldorfer Bucht im Jahr 1978 wurden auch charakteristische Pflanzen sowie Tiere erfaßt, die entweder auf der Sedimentoberfläche leben oder deren Spuren an der Oberfläche zu sehen sind. Nur für den Nachweis von *Macoma baltica* und teilweise auch für *Corophium* und *Nereis diversicolor* mußte der Wattboden aufgegraben werden. Bei der Beschreibung wurde zwischen dünner, mittlerer und dichter Besiedlung unterschieden.

Folgende Arten wurden kartiert:

Tiere: *Arenicola marine*, *Cardium edule*¹⁾, *Mytilus edulis*, *Macoma baltica*, *Littorina littorea*, *Hydrobia ulvae*, *Corophium volutator*, *Nereis diversicolor*, *Lanice conchilega*.

Pflanzen: *Zostera nana*, *Spartina anglica*, versch. Diatomeen, versch. Grünalgen, versch. Braunalgen.

Eine einmalige Flächenkartierung kann besonders bei der Erfassung von verschiedenen Populationen nur eine Momentaufnahme des jeweiligen Besiedlungsstandes sein. Jede Tier- und Pflanzengemeinschaft verändert sich mit den jahreszeitlich bedingten Veränderungen der Umwelt. Eine Kontrollbegehung im Sommer 1979 zeigte jedoch, daß im größten Teil des Gebietes westlich des neuen Seedeiches trotz des harten Eiswinters keine größeren Verschie-

¹⁾ Seit wenigen Jahren wird *Cardium edule* als *Cerastoderma edule* bezeichnet. Da ein Teil der Zeichnungen bereits fertiggestellt war, wird hier der alte Name verwendet.

bungen im Besiedlungsmuster eingetreten waren. Außerdem verändern sich die Populationen durch längerfristige Fluktuationen. Im neuen Speicherkoog starb nach der Trockenlegung der Wattflächen über -2 m NN im September 1978 die Wattfauna und Wattflora ab.

Für die Besiedlung von Wattflächen mit den verschiedenen Tier- und Pflanzenarten spielen abiotische und biotische Faktoren eine Rolle. Zu berücksichtigen sind vor allem:

- Wasserbedeckungszeit (abhängig von der Watthöhe, der örtlichen Gezeitenkurve und der Wetterlage),
- Lagestabilität,
- physikalische und chemische Eigenschaften des Substrates, wie Korngrößen, Konsistenz bzw. Plastizität, Chemismus,
- physikalische und chemische Eigenschaften des Wassers, wie Temperatur und Salinität,
- Siedlungskonkurrenz,
- Nahrungskonkurrenz.

Eine eingehende Beschreibung der im Watt der Meldorfer Bucht verbreiteten Arten wird am Beispiel des Testfeldes bei Büsum im biologischen Bericht (Beitrag THIEL, GROSSMANN u. SPYCHALA in diesem Heft) gegeben. Hier werden nur die im Zusammenhang mit den Sedimenteigenschaften besonders wichtigen Arten erwähnt.

Arenicola marina (Sandpiewurm): Besondere Bedeutung für die Veränderung der Grenzfläche Sediment-Wasser bzw. Luft im Watt besitzt der Polychaet *Arenicola marina*. Als Sedimentfresser ist der Wurm im sandigen Watt der wichtigste Faktor für die Bioturbation der Oberflächensedimente (0 - 40 cm).

Zur Nahrungsaufnahme selektiert *Arenicola* die kleineren Partikel des Sediments. Dies hat zu Folge, daß die größeren Partikel zurückbleiben und sich auf dem „Freßniveau“ in ca. 20 cm Tiefe anreichern (VAN STRAATEN, 1956; SCHÄFER, 1962).

Nach VAN STRAATEN (1956) erreichen größere Partikel nicht nur durch das Herabsinken im Kopfschacht des Wurms diese Tiefe, sondern auch durch die Umlagerung des Sediments, die *Arenicola* mit dem Fressen in 20 cm Tiefe und dem Koten an der Oberfläche (ohne größere Körner) bewirkt. An Stellen, wo *Hydrobia* in großen Mengen vorkommt, werden deren Gehäuse auf diese Art in einer Tiefe von ca. 20 cm in der sogenannten „*Hydrobia*-Lage“ (VAN STRAATEN, 1952) konzentriert. Auch von einer zweiten *Hydrobia*-Lage in 34 bis 37 cm Tiefe wird von CADÉE (1976) berichtet.

Außer *Hydrobia*-Gehäusen werden auch andere Schalenreste, grobe Sandkörner und Torfreste in der „*Hydrobia*-Lage“ angereichert. Nach CADÉE (1976) besitzen diese Lagen bis zu fünfmal höhere Gehalte an Corg. als das Sediment an der Oberfläche.

Der Sandpiewurm ist für die Sedimentumlagerung (Bioturbation) die wichtigste Art des Wattbiotops. Auf die Sedimentneubildung bzw. Sedimentablagerung hat er einen sehr viel geringeren Einfluß. Als reiner Sedimentfresser hat *Arenicola* keine Bedeutung für die Bindung von Schwebstoffen an das Sediment.

Wie aus der Literatur bekannt ist (z. B. PLATH, 1943; WOHLBERG, 1937), bevorzugt *Arenicola* sandige Wattflächen. Nach PLATH (1943) benötigt er eine Mindestschichtdicke von 10 cm Wattsand oder ein sehr stark wasserhaltiges Sediment feinerer Körnung. Nur in sehr schlickigen Gebieten kommt *Arenicola* nicht vor. Als Sand-Watt-Anzeigerart ist der Sandpiewurm infolgedessen nur bedingt geeignet.

Nach der Auswertung der Bestandsverteilung in der nördlichen Hälfte der Meldorfer Bucht und einem Vergleich mit den geologischen Daten lassen sich einige Ergänzungen anführen. Ab einer Watthöhe von etwa $+1,40$ m NN gibt es hier für *Arenicola* keine Existenzmöglichkeit mehr. Das Tier kann nur Nahrung aufnehmen, solange sein Bau unter dem „Grundwasserspiegel“ bei Niedrigwasser liegt.

In sehr dicht besiedelten *Cardium*-Feldern der Meldorfer Bucht tritt *Arenicola* ebenfalls nicht auf, da dort die Nahrungskonkurrenz zu groß ist. In weniger dichten *Cardium*-Beständen bei gleicher Sedimentzusammensetzung ist *Arenicola* stets anzutreffen (Abb. 2). Im Bereich von *Mytilus*-Bänken kommt der Wurm nicht vor.

Auf Wattflächen, die von trittfestem, dichtgelagertem Schlicksand eingenommen werden, tritt *Arenicola* selten (z. B. am Ostende des Helmsander Lochs) oder nur in dünner Besiedlung (östlich von Büsum) auf. Lockerer Schlicksand kann dagegen von *Arenicola* dicht besiedelt werden.

Ein Gebiet, in dem der Sandpiewurm aufgrund zu starker Erosion nicht siedelt, liegt am Nordwestende der mittleren Plate. Allgemein zeigen die der Wellenwirkung und Strömungs-erosion stärker ausgesetzten Randzonen der großen Platen eine sehr dünne *Arenicola*-Besiedlung.

Cardium edule (Herzmuschel): Die Herzmuschel gehört zu den individuenreichsten Arten des Watts. Ausgestattet mit einem kurzen Siphon, siedelt sie unmittelbar unter der Sedimentoberfläche (ca. 0,5 – 4 cm). Dort wird sie ab und zu von der Erosion freigelegt, gräbt sich aber in der Regel wieder ein.

Herzmuschelsiedlungen sind in der Meldorfer Bucht stets auf Schlicksandflächen und seltener auch auf Schlickwatt anzutreffen. Im sandigen Watt sind sie selten.

Allgemein finden sich *Cardium*-Bestände überall dort in dichten Feldern, wo durch vorgelagerte höhere Wattsandzonen der Seegang nicht stark einwirken kann (Abb. 2). *Cardium* siedelt auch auf niedriger gelegenen Flächen mitten auf den großen Platen, zum Teil auf ehemaligen, aufgefüllten Prielen und anderen Vertiefungen, wie z. B. dem Baggerloch im Testfeld bei Deichhausen (Abb. 2).

Wie durch Beobachtungen in einem Teststreifen (Profil 2) in Monatsabständen festgestellt werden konnte, bildet sich nach der Freilegung eines *Cardium*-Feldes durch Erosion bei ruhiger Wetterlage innerhalb eines Monats wieder eine dünne Schlicklage, während sich das Sediment an benachbarten Stellen ohne Herzmuschelvorkommen nicht veränderte (Mai–Juni 1978). Die Bildung von Sediment durch die Filtriertätigkeit dieser Muschelart wird im Abschnitt Biodeposition der Untersuchungen über das Testfeld näher erläutert.

Im Arbeitsgebiet konnten in dem fast dreijährigen Untersuchungszeitraum mehrere *Cardium*-Neuansiedlungen beobachtet werden. Nach gutem Anwachsen im Juni und Juli, verbunden mit einer Produktion von Schlick, wurden die Felder junger *Cardien* in den ersten Herbststürmen freigelegt und die noch kleinen Muscheln verdriftet.

Wie für *Arenicola* scheint auch für die Herzmuschel die Höhenlage des Watts bzw. die Wasserbedeckungszeit eine große Rolle zu spielen. Deichnahe Wattgebiete besitzen keine größeren *Cardium*-Bestände, obwohl die Sedimentzusammensetzung und die hydromechanischen Verhältnisse für die Muschelart günstig wären. Eine Ausnahme bilden die kleinen *Cardium*-Felder auf dem relativ niedrig gelegenen Watt vor dem neuen Seedeich. Nach dem Eiswinter 1978/1979, der die *Cardium*-Bestände auf dem Watt der Meldorfer Bucht vollständig vernichtet hat, fand auch vor dem neuen Deich eine Wiederansiedlung statt. Diese konnte sich aber nicht mehr halten, da sich die Strömungsverhältnisse und die Wellenschlagintensität nach den Deichschluß verändert haben. Die neuen Felder junger Herzmuscheln wurden bis zum Herbst 1979 erodiert und verdriftet.

Nach unseren Untersuchungen ist *Cardium edule* aufgrund ihrer enormen Filtrierleistung für ihren Siedlungsbereich mit Abstand der wichtigste Schlickproduzent. *Cardium* filtriert bei der Nahrungsaufnahme die Schwebfracht des Wassers heraus und scheidet die für sie unverdaulichen Reste in Form von Kotpillen an der Sedimentoberfläche aus. Diese Kotpillen besitzen eine beträchtlich höhere Sedimentationsgeschwindigkeit als die Teilchen,

aus denen sie bestehen. Sie werden infolgedessen an Stellen im Watt zur Ablagerung kommen, an denen die feinkörnige Schwebfracht noch nicht sedimentiert wird (HAVEN u. MORALES-ALAMO, 1972; KRAEUTER, 1976).

Mytilus edulis (Miesmuschel): *Mytilus* kommt im Untersuchungsgebiet nur an wenigen Stellen in größeren Mengen vor. Ein Areal von ca. 500 × 200 m Fläche etwa 750 m nordwestlich des Helmsander Dammes wird von mächtigen Schillbänken eingenommen. Schillbänke ähnlicher Ausdehnung finden sich auch auf dem Bielshövensand. Diese Schillmassen, die aus *Mya*-, *Cardium*-, *Mytilus*-, *Macoma*-Schalen und *Littorina*-Gehäusen aufgebaut sind, werden ausschließlich von den Bysussfäden der Miesmuscheln zusammengehalten. Wahrscheinlich bilden durch Erosion freigelegte Muschelfelder von *Cardium* oder *Mya* das für die Ansiedlung von *Mytilus* notwendige harte Substrat.

Da *Mytilus* ähnliche Mengen von Schwebstoffen aus dem Wasser filtriert wie *Cardium*, kommt es im Bereich der Schillbänke zu einer Sedimentation von Schlick. Meist bildet der Schlick zwischen den einzelnen Schillbänken jedoch nur geringmächtige Lagen von weniger als 10 cm aus (Sommer 1978). Auf der geologischen Karte ist dieses Sediment daher als Schlicksand aufgeführt.

2.4. Verteilung von Sedimentation und Erosion in den Sommern 1978 und 1979

Erosion und Sedimentation lassen sich auf den Wattflächen an folgenden Merkmalen erkennen:

Schwach erodierte Gebiete zeichnen sich durch flache Kolke, freigespülte, noch lebende Herzmuscheln (*Cardium edule*), freigelegte Wurmgänge, Pflanzenwurzeln (*Spartina*, *Zostera*) usw. aus. Für stark erodierte Areale des Watts sind Schalen der Sandklaffmuschel (*Mya arenaria*) typisch, die in Lebendstellung im Oberflächensediment stecken. Die Muschel lebt in 30 cm Tiefe im Boden. Da *Mya* im Watt weitverbreitet vorkommt, bildet sie das beste Indiz für eine stärkere Abtragung des Wattbodens.

Sedimentationsgebiete lassen sich durch die noch sehr locker gelagerten frischen Sedimente auf spürbar festerem Untergrund erkennen. Ein weiteres Kennzeichen bildet der Entschichtungsgrad des neu abgelagerten Materials. In frisch abgelagertem Sediment, z. B. nach einer Sturmflut, läßt sich stets eine primäre Schichtung nachweisen. In der warmen Jahreszeit ist dieses Kriterium von geringem Wert, da die Schichtung meist sehr schnell von Wattorganismen verwühlt wird. Nur an Rinnenrändern hält sich die primäre Schichtung etwas länger, weil dort das abgelagerte, meist sandige Sediment nur langsam besiedelt wird.

Auf den Wattflächen der Meldorfer Bucht machten im Sommer 1978 die Spuren schwacher Erosion einen flächenmäßig außerordentlich hohen Anteil aus (Abb. 3). Dies ist auf zwei Gründe zurückzuführen. Die häufigen und meist lange anhaltenden stürmischen Wetterlagen jenes Sommers bewirkten eine starke hydromechanische Beanspruchung großer Gebiete der Bucht. Außerdem veränderten sich durch den fortschreitenden Deichbau und den Deichschluß Einzugsgebiet und Morphologie.

Trotz dieser insgesamt negativen Tendenz im Sommer 1978 liegen in der Meldorfer Bucht auch Gebiete, die sich in diesem Jahr durch starken Sedimentzuwachs auszeichneten. Sie befinden sich vor allem in den ruhigen Gebieten östlich des neuen Deiches (Leeseite), in den ebenfalls vor starkem Wellenschlag geschützten Lahnungsbereichen vor allem im Norden des Speicherkooges und an Stellen, an denen Baggerlöcher aufgefüllt wurden.

Die Sedimentationsgebiete innerhalb eines Streifens von etwa 1 km Breite westlich des

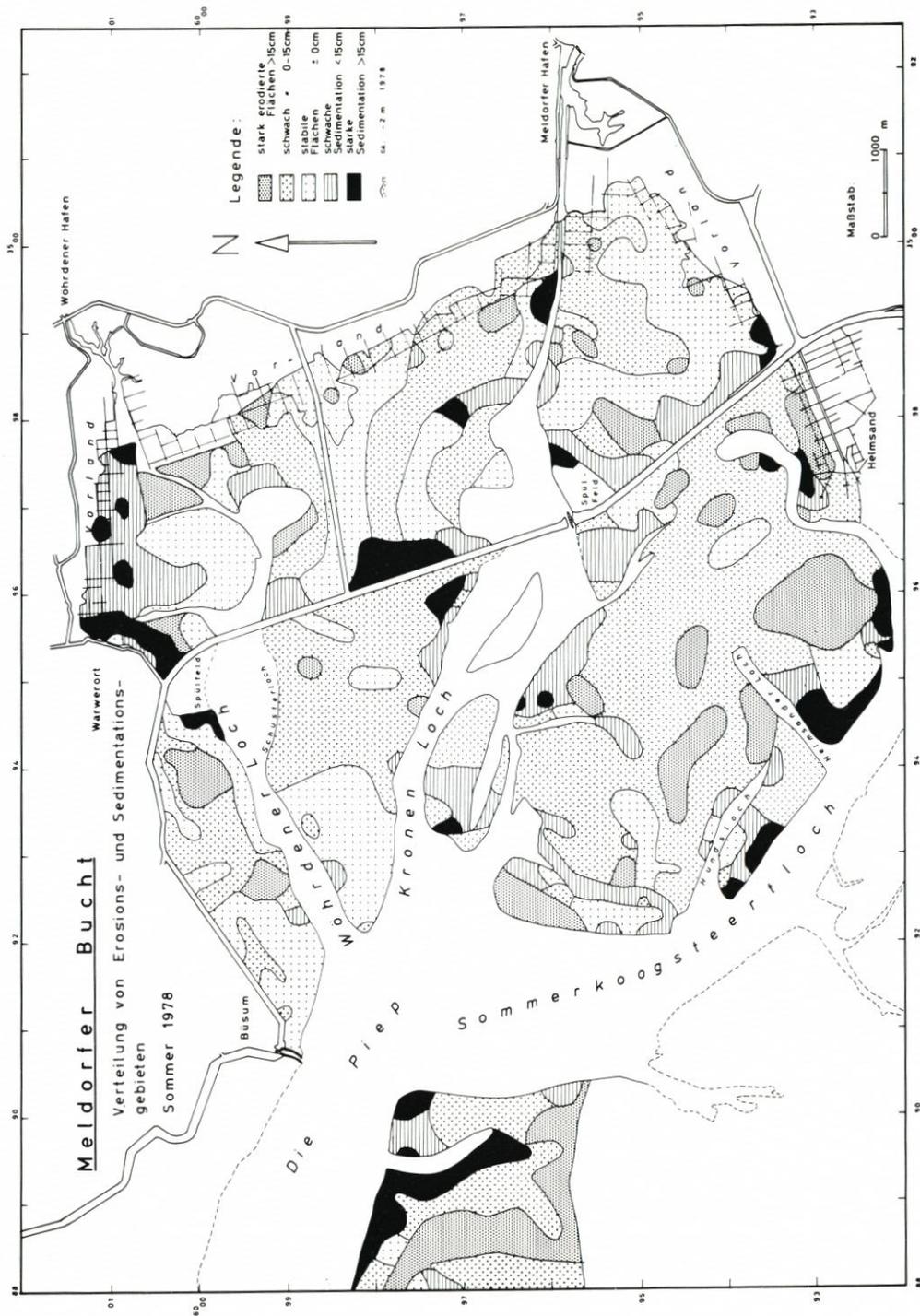


Abb. 3. Verteilung von Erosions- und Sedimentationsgebieten im Sommer 1978

neuen Deiches sind alle auf die Verfüllung von Baggerlöchern oder auf Spülfelder zurückzuführen.

Erosionsgebiete erfassen teilweise auch Bereiche, die von Lahnungen geschützt waren. Lahnungsfelder, in denen Abtragung festzustellen war, liegen im Vorfeld des Speicherkooges fast überall südlich des Wöhrdener Loches und nördlich vom Helmsander Damm im Westen des neuen Deiches. In den Lahnungen des Helmsander Dammes werden überwiegend schlackreiche Sedimente erodiert.

Gebiete, die im Sommer 1978 schwach erodiert wurden, zeigten im Sommer 1979 teilweise stabile Verhältnisse. Im Gebiet nördlich des Kronenloches wurden nur noch kleine Teilflächen schwach abgetragen. Auf der mittleren Plate zwischen Helmsander Loch und Kronenloch stabilisierten sich die Flächen schwacher Erosion zu einem großen Teil ebenfalls. Ein größeres Erosionsgebiet auf der südlichen Plate ist nach vergleichenden Beobachtungen aus dem Sommer 1979 nur kurzzeitig einer Abtragung ausgesetzt gewesen.

In einer etwa 2 km breiten Zone vor dem neuen Deich blieben die Verhältnisse auch im Sommer 1979 noch instabil. Ebenso waren die Flächen starker Erosion auf der mittleren Plate auch 1979 nachweisbar. Sie lassen sich also nicht auf kurzfristige wetterbedingte Ursachen zurückführen.

Die größten Sedimentationsgebiete westlich vom neuen Deich finden sich am Ostrand des südlichen Sommerkoog-Steertloches, wo Wattsand abgelagert wird. Beobachtungen aus dem Sommer 1979 zeigten, daß sich die Sedimentation dort weiterhin fortsetzt. Die Ursache für die Sedimentation in diesem Gebiet liegt möglicherweise in der Verkleinerung des Einzugsgebietes. Dieses umfaßte auch den südlichen Teil der Meldorfer Bucht, der schon seit 1972 eingedeicht ist.

3. Durchführung der Laborarbeiten und sedimentologische Kartierung nach Labordaten

3.1 Aufbau der Wattsedimente

Die Wattsedimente bestehen aus mineralischen und organischen Komponenten. Bei den mineralischen Komponenten handelt es sich im Sandbereich (2 – 0,0634 mm) vor allem um Körner von Quarz, dazu mit geringeren Anteilen Körner bzw. Blättchen von Feldspat, Glimmer und anderen Mineralien. Für den Schluff (0,063 – 0,002 mm) gilt noch eine ähnliche Zusammensetzung. Mit abnehmenden Korngrößen nimmt jedoch der Anteil der Tonminerale zu, die im Korngrößenbereich des Tones (< 0,002 mm) im Vordergrund stehen.

Zur Analyse der mineralischen Zusammensetzung des Tongehaltes wurden neben Proben aus der Meldorfer Bucht auch Proben aus dem Wattenmeer südlich von Texel, aus dem Sahlenburger Watt, aus dem Watt nördlich von Nordstrand, aus dem Watt vor dem Morsum-Kliff auf Sylt sowie aus dem schwach brackigen Milieu der Eider bei Nordfeld untersucht. Hierfür wurde der Anteil < 2 µm mit Hilfe der Pipette-Methode abgetrennt mit nachfolgender Bestimmung der Tonminerale an einem Philips-Röntgendiffraktometer des Geologischen Instituts der Universität Kiel.

Der Vergleich der Wattproben zeigte qualitativ eine uniforme Verteilung der Minerale und quantitativ meist recht homogene Gehalte der verschiedenen Tonminerale von Texel in den Niederlanden bis Sylt in Nordfriesland, wobei recht gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von DÖRJES, LITTLE-GADOW u. SCHÄFER (1976) besteht. Im wesentlichen kommen Montmorillonit, Illit, Chlorit und Kaolinit vor.

Nur drei Proben zeigen etwas abweichende Werte. Die Probe vom Nordstrander Watt

fällt wegen etwas höheren Kaolinitgehaltes auf, dessen Ursache in der Aufarbeitung von „altem Klei“ zu suchen ist. Eine Probe von bereits acht Monate trockenliegendem Watt im Speicherkoog Nord besitzt ebenfalls höhere Kaolinitwerte, als es dem Durchschnitt der Wattedimente entspricht. Die Nordfelder Probe aus brackigem Milieu weist diesem gegenüber einen etwa verdoppelten Montmorillonitgehalt auf.

Die organischen Komponenten sind im Sandbereich Schalen und Schalensplitter von kalkschaligen Organismen. In Schluff und Ton können die Schalen und Schalensplitter erheblich größere Bedeutung haben, so daß sie zumindest unter methodischen Gesichtspunkten betrachtet werden müssen. Außerdem nehmen die Anteile an C_{org} und organisch-chemischen Verbindungen zu (vgl. Bericht von DEGENS u. KEMPE).

3.2 Durchführung der Laborarbeiten

Die im Watt entnommenen Proben wurden im Labor auf Korngrößenverteilung sowie teilweise auf den Gehalt an Metalloxiden untersucht (vgl. Abschn. 3.5).

Die Bearbeitung des vollen Korngrößenspektrums in einem Arbeitsgang mit einem einzigen Verfahren wäre wünschenswert, doch stößt ein solches Vorgehen auf unüberwindbare Schwierigkeiten. Für eine Durchführung der Laborarbeit unter praktikablen Bedingungen ist es erforderlich, den Sandanteil vom Schluff- und Tonanteil zu trennen und beide Komponenten mit verschiedenen Verfahren weiter zu untersuchen.

Eine zusätzliche Aufgabe ist, zu Beginn der Laborbearbeitung den Salzgehalt zu entfernen, ohne dabei in die Zusammensetzung des Materials einzugreifen. Ferner muß beachtet werden, daß von ausgetrockneten oder mit H_2O_2 behandelten Proben keine sinnvollen Schlämmanalysen angefertigt werden können.

Die Sonderprobleme bei einer Bearbeitung des Kiesanteils in Proben (> 2 mm) brauchen nicht hier betrachtet zu werden, weil diese Korngrößen in den Wattedimenten der Meldorfer Bucht nicht vorkommen. Für Sand-, Schluff- und Tonanteil hat sich folgender Bearbeitungs-gang im Aufwand als praktikabel und im Ergebnis als zuverlässig erwiesen:

Die Proben enthalten neben Sand, Schluff und Ton auch Salz. Die Trennung des Sandes von Schluff und Ton erfolgt zusammen mit der Entsalzung (abweichend von der Grenze nach DIN) durch Auswaschung im 50- μ m-Sieb, weil dieser Schritt aus sedimentologischen Gründen soweit wie möglich in den feinen Bereich verschoben werden sollte.

Die Korngrößenbestimmung des Sandanteiles ist unproblematisch. Sie erfolgte durch Trockensiebung in Plansiebmaschinen (JEL). Im Interesse eines guten Auflösungsvermögens bei den meist engen Kornverteilungsspektren wurde der Siebsatz nach der ASTM-Stufung von 0,25-PHI $^\circ$ -Schritten verwendet. Damit ist zugleich die volle Kompatibilität aller Siebanalysen mit den Daten aus dem sedimentologischen Labor des Deutschen Hydrographischen Instituts gewährleistet.

Die Bestimmung der Kornverteilungen $< 0,50$ μ m erfolgt durch Schlämmanalysen nach dem Pipette-Verfahren. Schlämmanalysen nach dem Aräometer-Verfahren haben sich nicht als ausreichend reproduzierbar erwiesen. Schlämmanalysen mit Atterberg-Zylindern sind wegen des großen Aufwandes in der Regel nicht vertretbar.

Für die Bearbeitung von insgesamt etwa 2500 Proben (Flächenkartierung, Testprofile und Testfeld) mit dem Pipette-Verfahren wurde bei Beginn der Untersuchungen ein Labor eingerichtet. Dieses enthielt neben den für die Pipette-Analysen üblichen Geräten zwei Wasserbäder, die für die Konstanthaltung der Temperatur in den Fallzylindern sorgten. Für die Analysen wurde eine Temperatur von 22 $^\circ$ C eingestellt, um von den Schwankungen der Raumtemperatur unabhängig zu sein.

Den Schlämmanalysen nach dem Pipettierverfahren liegt, wie allen vergleichbaren Methoden, die Berechnung der Fallgeschwindigkeiten in Wasser nach dem STOKES'schen Gesetz zu Grunde.

Der Anteil $< 50 \mu\text{m}$ der Proben wurde beim Waschen entsalzt und dann in einen 1000-ml-Standzylinder überführt. Das Pipettiermedium war Aqua dest., dem je nach der Menge der Probe Dispersionsmittel zugegeben wurde (1 ml 10%iger Lösung je 1 g Trockengewicht der Probe). Für die Dispersion wurde Natriumpyrophosphat und teilweise auch Calgon eingesetzt.

Im Gegensatz zu der bei Siebung erfolgenden Fraktionierung des Sandanteils in verschiedene Korngrößenklassen von $0,25 \text{ PHI}^\circ$, wird der Schluff- und Tonanteil des Sedimentes durch die Pipette-Analyse in „Summengewichte“ zerlegt. Die erste, nach der Homogenisierung der Probe aus 20 cm Tiefe entnommene Pipettenfüllung enthält noch sämtliche Korngrößen der Suspension und beschreibt damit die Gesamtmenge aller Fraktionen bzw. die „Summe aller Gewichte“ $< 50 \mu\text{m}$. Die Entnahme aus 20 cm Tiefe stellt sicher, daß auch die größte Kornfraktion des Schluff- und Tonanteiles $< 50 \mu\text{m}$ noch nicht unter den Entnahmepunkt gesunken ist.

Die darauf folgenden Pipette-Proben werden zu der Zeit und in der Tiefe des Fallzylinders entnommen, zu der die zu bestimmende Korngrößenfraktion den jeweiligen Probenentnahmepunkt passiert hat.

Zur Kombination der Siebfraktionsgewichte und der Summengewichte der Pipette-Analysen müssen letztere in Fraktionsgewichte umgerechnet werden. Nach der Lochung der Daten erfolgte diese Berechnung durch ein EDV-Programm von KACHHOLZ (1980).

Vor Beginn dieser Untersuchungen wurde mit Hilfe einer Schlick-Großprobe die Reproduzierbarkeit der Pipette-Analysen unter verschiedenen Bedingungen geprüft. Bei Versuchsanalysen mit Aqua dest. + Salz (25 %), Aqua dest. + Salz + Calgon und mit Leitungswasser flockten die Schlickpartikel sehr schnell aus, so daß sich eine weitergehende Untersuchung erübrigte.

Die statistischen Fehler, die beim Analysengang von der Probenvorbereitung an und bei der Arbeit mit Aqua dest. und mit Aqua dest. + Calgon bis zur Trocknung und Wägung auftreten, wurden durch je fünfzehnfache Wiederholung des gesamten Arbeitsganges bestimmt.

Von beiden Versuchsreihen wurden Mittelwerte und Streuungen (Standardabweichungen) bestimmt und in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1

Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (s) von den Analysenreihen Aqua dest. + Calgon und Aqua dest.								
φ -Grad	4,5	5	5,5	6	7	8	9	
A. dest.	\bar{x}	85,33	77,36	61,82	54,35	50,66	46,07	37,13
	s	2,71	4,02	4,95	4,89	4,41	5,59	5,30
A. dest. + Calgon	\bar{x}	86,0	74,79	58,54	53,04	49,14	44,86	39,99
	s	2,84	3,5	4,27	3,2	3,92	4,29	4,76

Angaben in Prozent des Anteiles an Schluff und Ton

Bei dem Vergleich der Standardabweichungen fällt auf, daß sie mit der Abnahme der Korngrößen zunehmen. Der Meßfehler ist also bei den kleinsten Fraktionen (8 und 9 PHI°) größer als bei den gröberen Fraktionen. Auch die Standardabweichung der 2- μ m-Fraktion ist nur ca. doppelt so groß wie die der 44- μ m-Fraktion. Daraus kann gefolgert werden, daß die Reproduzierbarkeit der Pipette-Analysen auch bei sehr feinen Fraktionen noch für das Untersuchungsziel ausreichend gewährleistet ist.

Darüber hinaus müssen für genaue Analyseergebnisse folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Partikel müssen aus festen Körpern bestehen.
- Diese Körper müssen eine glatte Oberfläche haben.
- Die Partikelform muß kugelig sein.
- Die Partikel müssen eine Mindestgröße von 0,5 μ m besitzen, da kleinere Teilchen von der Brownschen Molekülbewegung beeinflußt werden. Diese verhindert, daß die Partikel in einer geraden Linie auf dem kürzesten Wege absinken.
- Die Teilchen dürfen nicht größer als 50 μ m sein. Diese obere Grenze ergibt sich durch eine Funktion aus Temperatur, der Reynolds-Zahl der Flüssigkeit und der Dichte der Partikel.
- Das Pipettiermedium (Flüssigkeit im Fallzylinder) muß in Relation zur Partikelgröße eine unendliche Ausdehnung besitzen, da z. B. Partikel, die in Wandnähe absinken, eine verringerte Fallgeschwindigkeit aufweisen.
- Die Partikelkonzentration im Fallzylinder sollte 1 % des Pipettiermediums nicht überschreiten, da sich sonst dessen Viskosität verändert und die einzelnen Partikel miteinander referieren.
- Die Proben müssen aus einer Tiefe im Standzylinder entnommen werden, bei der sichergestellt ist, daß die Partikel ihre höchste Fallgeschwindigkeit erreicht haben.

Einige dieser Bedingungen können bei der Bearbeitung eines natürlichen Korngemisches nicht erfüllt werden. Rasterelektronische Untersuchungen haben gezeigt, daß nur ein kleiner Teil des Sedimentes < 50 μ m aus gerundeten Körnern besteht. Der Anteil an kugeligen Teilchen nimmt zudem von den gröberen Fraktionen zu den feineren hin deutlich ab. Die Oberfläche der Körner ist nie völlig glatt.

Die übrigen Bedingungen konnten besser eingehalten werden. Die Partikelkonzentrationen überschritten nur bei extrem schlickigen Proben die 1%-Grenze. Die Mindestgröße 0,5 μ m wurde schon wegen der extrem langen Analysenzeiten dieser Fraktion stets eingehalten, und die Obergrenze bei 50 μ m wurde durch die Vorbehandlung eingegeben.

Auch die Genauigkeit der Berechnung nach der STOKES'schen Formel konnte mit dem Raster-Elektronenmikroskop überprüft werden. Da die Pipette-Analyse mit Fallzeiten arbeitet, die für Quarzkugeln bestimmt wurden, ergibt sich, daß je nach Material unterschiedlich starke Abweichungen zwischen den berechneten Werten und den tatsächlichen Korngrößen auftreten müssen.

Deshalb wurden die verschiedenen Pipette-Fraktionen mit dem Raster-Elektronenmikroskop des Geologischen Instituts der Universität Kiel analysiert. Überprüft wurde in erster Linie, ob die Pipette-Analyse auch bei einem inhomogenen Korngemisch, wie es die Feinanteile der Wattsedimente darstellen, den Berechnungen von STOKES entsprechende Korngrößenangaben liefert.

Von großer Bedeutung war auch die Frage, ob Ausflockung oder Koagulation vermieden worden waren. Eine Koagulationssedimentation müßte nach den Ergebnissen von MATTIAT (1969) unter dem Raster-Elektronenmikroskop zumindest beim Tonanteil als Koagulationsgefüge zu erkennen sein.

Aus den verschiedenen Pipette-Fraktionen zwischen 9 und 4,3 PHI° wurden Proben

entnommen, auf REM-Objektträger aufgebracht und getrocknet. Auf eine spezielle Entwässerung der Proben über eine Alkoholreihe oder Gefriertrocknung (z. B. nach MATTIAT, 1969) konnte in diesem Fall verzichtet werden, da nur die Kontrolle des Pipetteverfahrens angestrebt war. Die Präparate wurden mit einem Raster-Elektronenmikroskop der Firma Cambridge untersucht und fotografiert.

Die beiden Wiedergaben von REM-Aufnahmen (Abb. 4 u. 5) zeigen Beispiele für die Zusammensetzung von Pipette-Fractionen. Die erste Abbildung stellt das Korngemisch aller Korngrößen $< 44 \mu\text{m}$ (4,5 PHI°) und die zweite sämtliche Partikel $< 1,95 \mu\text{m}$ (9 PHI°) dar.

Die Fractionen des mittleren und groben Schluffs zwischen 15 und 50 μm (Obergrenze der Pipette-Analyse) besitzen noch eine relativ gute Übereinstimmung der tatsächlichen Korngrößen mit den berechneten Werten. Zum feinen Schluff hin werden die Abbildungen

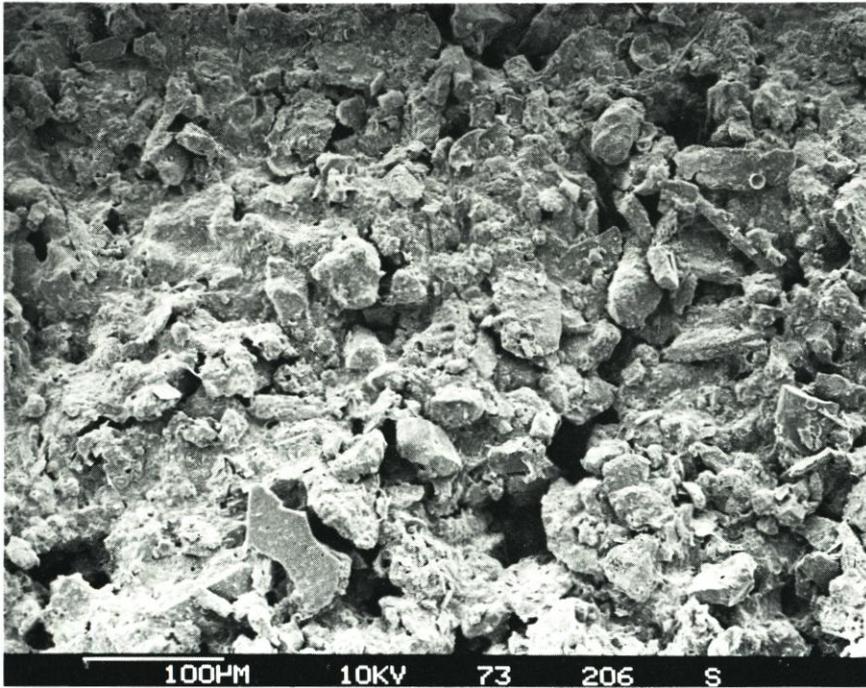


Abb. 4. Rasterelektronische Aufnahme der Pipette-Fraktion $< 44 \mu\text{m}$ (4,5 PHI°), 200fache Vergrößerung, Kippung der Objektebene um 15°

der Pipette-Fractionen dann von einzelnen, durch ihre Größe auffallenden Diatomeenschalen durchsetzt. Meist finden sich nur die Bruchstücke von Schalen.

Im Tonanteil ($< 2 \mu\text{m}$) „schlickiger“ Wattproben beherrschen dann die plättchenförmigen Tonminerale und Diatomeenschalen-Bruchstücke das Bild (Abb. 4 u. 5). Beide sind oft bis über doppelt so groß, als es ihrer Fraction entspricht. Blättchenförmige Tonpartikel sedimentieren deutlich langsamer als Quarzkörner gleicher Masse, und Diatomeenschalen liegen auch aufgrund ihrer porösen Struktur oft erheblich über der Fraktionsgrenze. Sind Diatomeenschalen relativ vollständig erhalten, wie z. B. auf der Abbildung der 9 PHI°-Fraction, so erreichen sie in der Tonfraction oft mehr als die vierfache Größe der theoretischen Fraktionswerte.

Im Gegensatz zu den „schlickreichen“ Sedimentproben besitzen „schlickarme“ Watt-

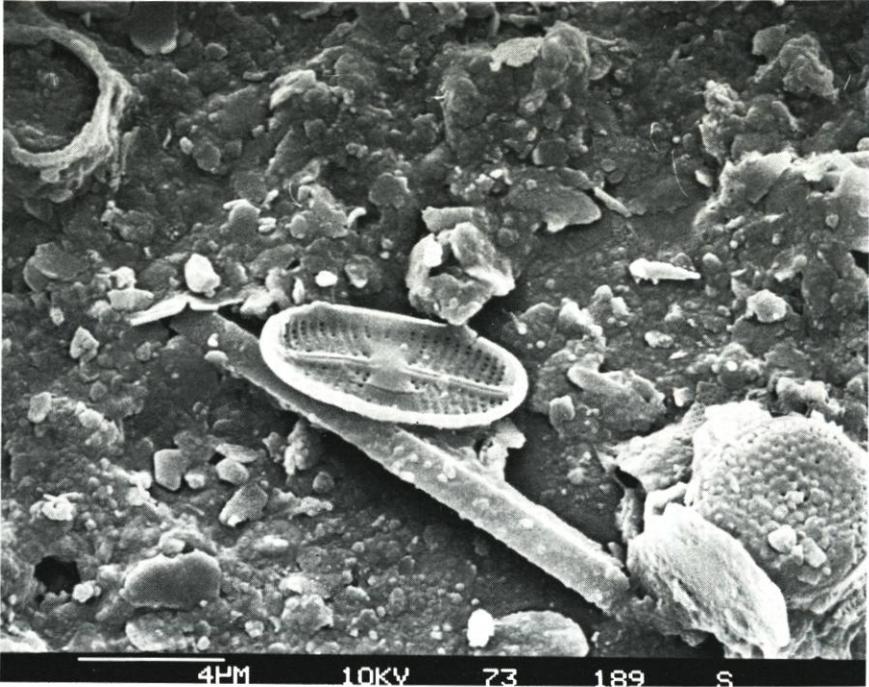


Abb. 5. Rasterelektronische Aufnahme der Pipette-Fraktion $< 1,95 \mu\text{m}$ (9,0 PHI°), 5000fache Vergrößerung, Kippung der Objektebene um 15°

sande auch in den Fraktionen des Feinsilts und Tons einen höheren Quarzanteil und – verglichen mit Schlick – wenige Diatomeenreste.

Nach den Ergebnissen der REM-Untersuchungen ist bei der Pipette-Analyse in einem mit Dispersionsmitteln versehenen Medium und einer entsalzten Probe also sichergestellt, daß eine Einzelkornsedimentation stattfindet. Die Einzelkornsedimentation spielt jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit bei der Schlicksedimentation im Wattbereich unter natürlichen Bedingungen keine oder nur eine verschwindend geringe Rolle. Wie bei den Versuchen mit der Pipette-Analyse im Salzwasser gezeigt wurde, koagulieren die Schlickpartikel trotz vorheriger Entsalzung sehr bald wieder, und es tritt eine stark beschleunigte Sedimentation ein.

3.3 Errechnung von Probenparametern aus Labordaten

Das aus dem Pipette- und Sieb-Labor erhaltene Datenmaterial wurde mit Hilfe von Datenlochgeräten in maschinenlesbare Form übertragen. Die Berechnung der Sedimentparameter erfolgte durch das von WALGER (1971) erstellte Fortran-IV-Programm Pardis. Dieses von KACHHOLZ (1980) überarbeitete Programm berechnet die Fraktionsgewichte und Summengewichte der Proben und die Parameter des Quartil-, IMMAN-, Perzentil-99(WALGER, 1971)-, FOLK- und Momenten-Systems. Auf der Grundlage dieser Daten konnte die Sedimentverteilung in den Wattgebieten der Meldorfer Bucht in verschiedenen Karten dargestellt werden.

Im ersten Teil der Bearbeitung wird die prozentuale Verteilung bestimmter Korngrößenbereiche des Sediments gezeigt, im zweiten die Auswertung von Parametern dargestellt.

Zur Berechnung und Darstellung sämtlicher Daten wurde das international gebräuchliche „PHI-Grad“-System nach KRUMBEIN (1936) benutzt. PHI-Grade sind ein relativierender Korngrößenmaßstab (WALGER, 1964), der durch die logarithmische Transformation auf folgende Art entsteht:

$$\text{PHI}^{\circ} = -\log \frac{x \text{ (mm)}}{1 \text{ (mm)}} = 1 \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{x \text{ (mm)}}{1 \text{ (mm)}}; x_0 = 1 \text{ mm}$$

Die PHI-Werte sind als Logarithmen von Längenverhältnissen dimensionslose Zahlen.

Für die praktische Arbeit mit den PHI-Graden ist die Aufstellung eines PHI⁰-mm-Vergleichsmaßstabs sinnvoll.

Für die Untersuchung der Wattsedimente wurden die Parametersysteme „Quartilsystem“ und „Momentensystem“ verwendet und in Form von Kartendarstellungen ausgewertet. Karten auf der Grundlage des „Momentensystems“ werden im Bericht vor allem für das Testfeld wiedergegeben.

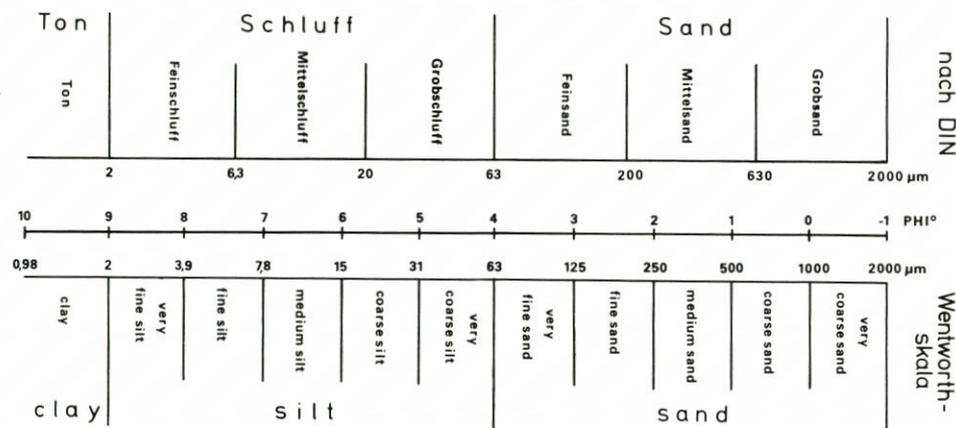


Abb. 6. Vergleichende Darstellung der Korngrößenmaße

3.4 Kartierung nach Anteilen von Korngrößenbereichen und nach Sedimentparametern

Bei allen Kartendarstellungen, die auf Labordaten beruhen, ergibt sich stets das Problem, daß die Auftragung eines Parameters je nach Stufung der Werte sehr voneinander abweichende Bilder ergeben kann. Bei einer zu großen Zahl von Stufen besteht außerdem die Gefahr der Unübersichtlichkeit. Deshalb muß in jedem Falle sorgfältig geprüft werden, ob die natürlichen Zusammenhänge berücksichtigt und keine zusammenhängenden Gruppen durch unglückliche Stufenwahl zerschnitten werden.

Prozentanteil von Korngrößen < 50 µm (Abb. 7): Mit der Prozentangabe bei 50 µm wurde der Grenze bei der Trennung des Siebanteils der Probe vom Pipetteanteil entsprochen. Durch eine Dreierstufung der Prozentanteile in 0–5 % < 50 µm (näherungsweise Wattsand), 5–35 % (näherungsweise Schlicksand) und 35–100 % (näherungsweise Schlick) wurde versucht, die Wattsedimentgliederung nach SINDOWSKI (1973) nachzuvollzie-

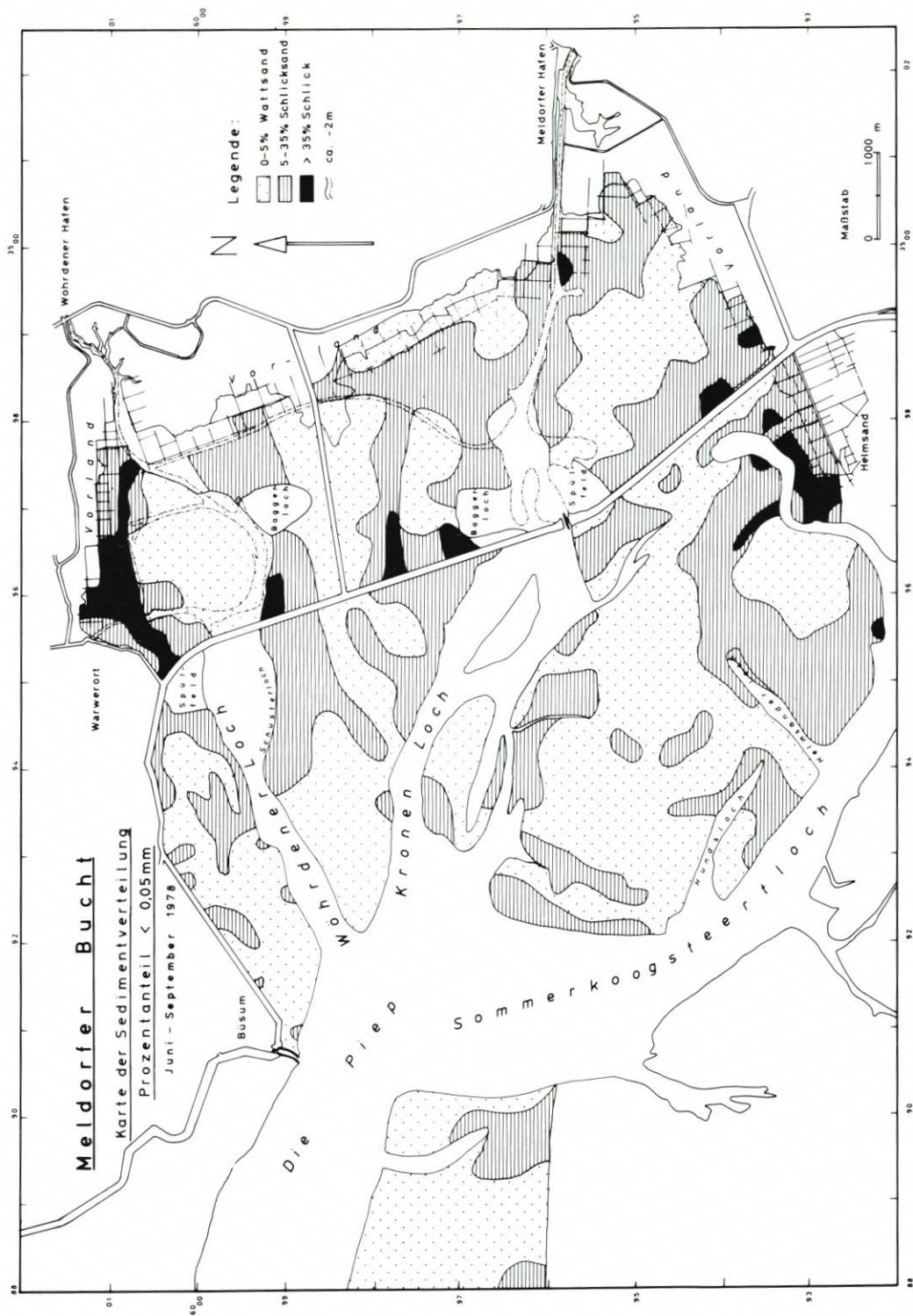


Abb. 7. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil < 0,05 mm

hen. Hierbei zeigten sich einige Unterschiede mit der Kartendarstellung (s. Abb. 1 – Grobansprache), die auch bei verschobenen Stufengrenzen der Prozentanteile nicht beseitigt werden konnten.

Die größten Differenzen zwischen den Kartendarstellungen der Grobansprache und dem %-Anteil $< 50 \mu\text{m}$ liegen in der Flächenausdehnung der Schlicksande. Diese nehmen auf der %-Anteil-Karte viel größere Flächen ein als auf der Karte der Geländeansprache. Wie oben erläutert, wurden bei der Geländebegehung kompakt gelagerte, trittfeste und relativ schlickreiche Sedimente in größerem Umfang den Wattsanden zugeordnet. Verständlich wird daher, weshalb die Schlicksandgrenzen der Grobansprache mit den Verbreitungsgrenzen der Muschel *Cardium edule* gut übereinstimmen. Diese Tierart kommt nämlich überwiegend in locker gelagerten Schlicksanden vor, die SINDOWSKI's Definition entsprechen.

Die vergrößerten Schlicksandflächen der $< 50\text{-}\mu\text{m}$ -Karte haben eine kleinere Ausdehnung der Wattsand- und in geringerem Umfang auch der Schlickareale zur Folge. Sehr locker gelagertes Material, vor allem in Lee des neuen Deiches, das nach der Grobansprache als Schlick bezeichnet wurde, fällt nun nach der Beurteilung durch die Prozentanteile der Korngrößenverteilungen in die Kategorie Schlicksand.

Prozentanteil von Korngrößen $< 63 \mu\text{m}$ (Abb. 8): Das Kartenbild der Prozentanteile $< 63 \mu\text{m}$ zeigt als Folge einer sechsfachen Stufung eine etwas stärker untergliederte Sedimentverteilung. Diese Darstellung beruht auf einem Erfahrungsaustausch innerhalb des „Schlickprogrammes“ und ist 1979 im „Schlickkolloquium“ vorgetragen worden (vgl. FIGGE et al., 1980).

Die Angabe des Prozentsatzes $< 63 \mu\text{m}$, die den Ton- und Schluffanteil im Sinne der DIN vom Sand abtrennt, ermöglicht unter bestimmten Bedingungen eine näherungsweise Beschreibung der gesamten Kornverteilung:

- 0– 5 % heller Wattsand
- 0–10 % Wattsand bzw. 5–10 % dunkler Wattsand
- 10–25 % sandiger Schlicksand
- 25–50 % schlickiger Schlicksand
- 50–85 % Schlick
- > 85 % stark toniger Schlick (sehr geringe Verbreitung)

Bei der Kartendarstellung des %-Anteils $< 63 \mu\text{m}$ befriedigte die Aufteilung des Schlicksandes in der Meldorfer Bucht unter biologischen Gesichtspunkten nicht, da einige der kartierten Verbreitungsgrenzen von Arten systematisch abwichen. Deshalb wurden zusätzlich Schlicksandgebiete ausgeschieden, die nur Anteile zwischen 20 und 30 % $< 63 \mu\text{m}$ enthielten. Es gelang zwar auch damit nicht, die Verbreitungsgebiete von *Cardium* besser zu beschreiben, aber dieser Bereich scheint einen Hinweis auf das Substrat verschiedener Polychaeten (vor allem *Nereis diversicolor*) und *Corophium* zu geben.

Die Aufgliederung des Schlicksandes zeigte, daß die Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ zwischen 10 und 25 % weit größere Flächen einnimmt, als das Material $< 63 \mu\text{m}$ zwischen 25 und 50 %. Schlickige Schlicksande bilden oft einen Saum um die Schlickgebiete und konzentrieren sich mehr auf die inneren, deichnahen Gebiete der Meldorfer Bucht. Die Schlickvorkommen 50–85 % $< 63 \mu\text{m}$ liegen, bis auf die Areale nördlich von Helmsand, alle östlich der neuen Deichtrasse. Sie haben bei dieser Art der Kartendarstellung ähnliche Verbreitungsgrenzen wie auf der $< 50\text{-}\mu\text{m}$ -Karte. Stark toniger Schlick ($> 85 \%$ $< 63 \mu\text{m}$) wird nur im Norden des Speicherkoooges in Lee des neuen Deiches angetroffen. Die Wattsande sind auf beiden Darstellungen ähnlich verteilt.

Wegen der insgesamt relativ detaillierten Darstellung der Sedimentverteilung mit Hilfe des $< 63\text{-}\mu\text{m}$ -%-Anteils werden die folgenden Parameter meist mit dieser Auftragsform verglichen.

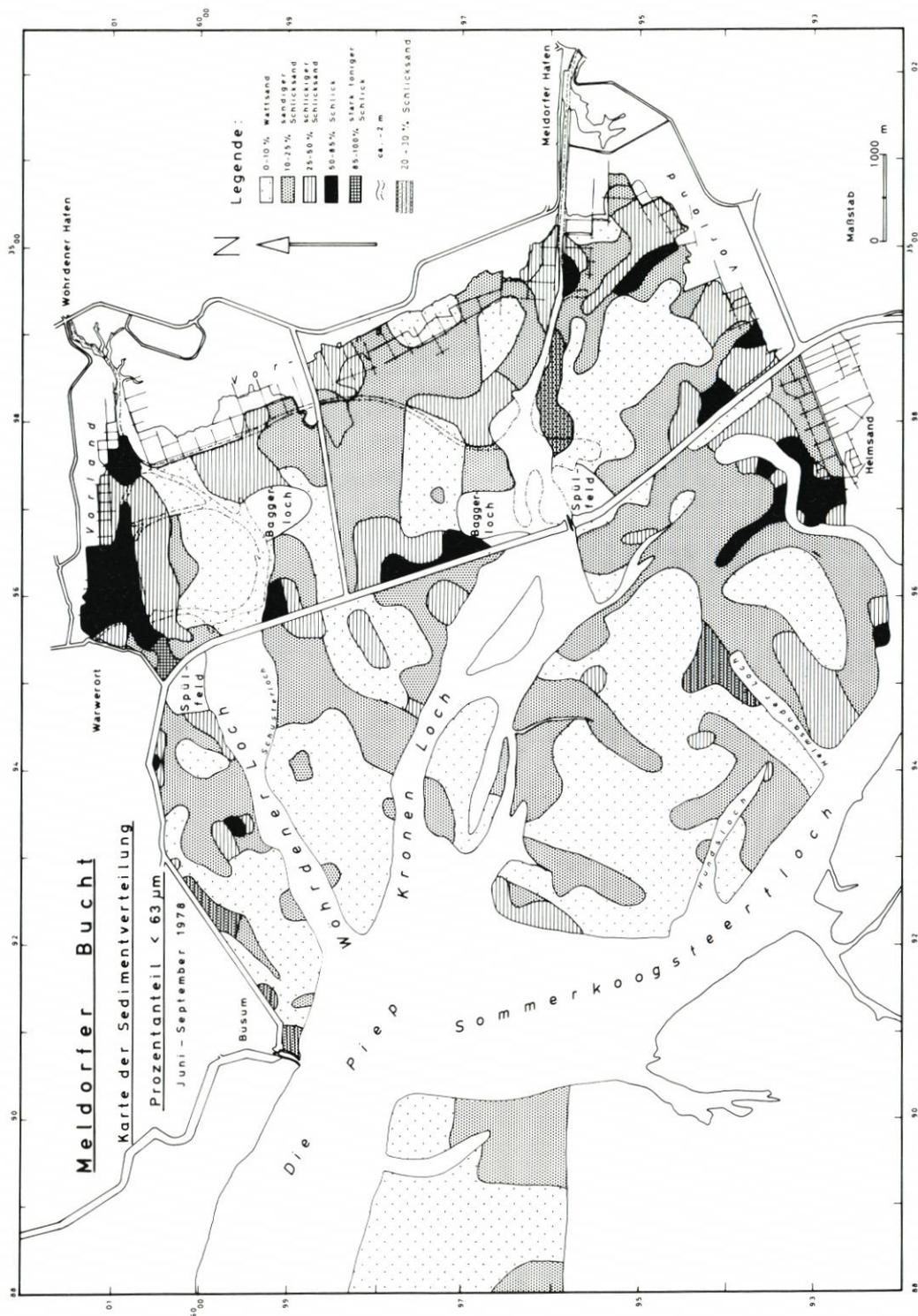


Abb. 8. Melderder Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil <math>< 0,063 \text{ mm}</math>

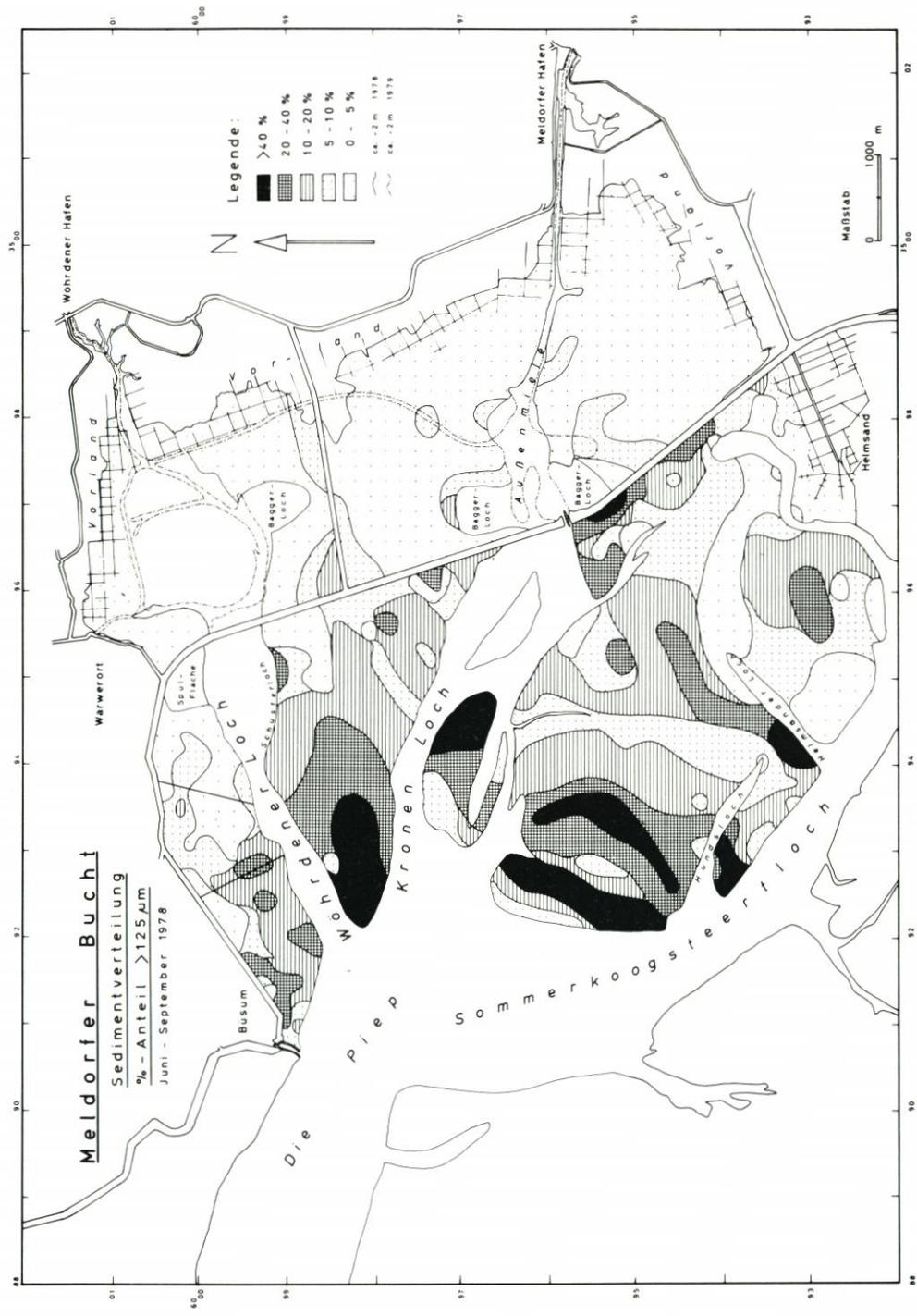


Abb. 9. Melderfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil $< 0.125 \mu\text{m}$

Prozentanteil von Korngrößen $> 125 \mu\text{m}$ (3 PHI°) (Abb. 9): Bei Wattsedimenten ist der Prozentanteil an Korngrößen $> 125 \mu\text{m}$ in landnahen Gebieten meist sehr gering ($< 10\%$). Erst auf landferneren Platen steigt der Anteil an Korngrößen $> 125 \mu\text{m}$ bis auf Werte von 40 % und mehr an. Die Abbildung der Prozentanteile $> 125 \mu\text{m}$ zeigt eine Darstellung in fünffacher Stufung 0–5 %, 5–10 %, 10–20 %, 20–40 %, $> 40\%$.

Die Kartendarstellung verdeutlicht die Tiefenstaffelung der Sedimente in der Meldorfer Bucht. Die höchsten Anteile an größerem Material ($> 125 \mu\text{m}$) finden sich an den westlichen Rändern der großen Platen. Nur auf einer „Insel“ im Kronenloch sind die Verhältnisse umgekehrt, da der Ebbstrom im Kronenloch die Ostseite der Plate möglicherweise stärker hydraulisch belastet als Flutstrom und Brandung die Westhälfte.

Ab ca. 1000 m westlich der neuen Deichtrasse bildet sich in der Verteilung des Grobanteils $> 125 \mu\text{m}$ eine Zonierung der Wattsedimente ab. Auf der nördlichen Plate entsteht diese durch die nach Osten hin stetig abnehmenden Anteile an Material $> 125 \mu\text{m}$. Auf den nach Süden angrenzenden Wattgebieten wechseln dagegen Zonen größerer Materials mit Zonen höherer Feinanteile. Insgesamt nimmt auch dort der Anteil größerer Fraktionen in Richtung Deich ab.

Verteilung der Medianwerte (Quartilssystem) (Abb. 10): Beim Medianwert handelt es sich um den beim Perzentil 50 abgegriffenen Wert der Summenkurve einer Kornverteilung. Er wurde in einer sechsfachen Stufung (< 3 ; 3–3,5; 3,5–3,75; 3,75–4; 4–6; > 6 PHI°) zur Charakterisierung der Sedimentverteilung aufgetragen. Die Signaturen wurden so gewählt, daß ein Vergleich mit den Kartendarstellungen der Prozentanteile möglich ist.

Wattsande mit besonders hohen Gehalten an Komponenten $> 125 \mu\text{m}$ werden bei der Medianwertauftragung nicht so deutlich untergliedert wie bei der Prozentanteilkarte $> 125 \mu\text{m}$. Trotzdem werden auch bei dieser Darstellung die besonders belasteten Randgebiete der großen Platen herausgehoben.

Trotz der im Schlicksand- und Schlickbereich (Medianwerte $< 88 \mu\text{m}$) relativ engen Stufung von 0.25 PHI-Graden liefert das Kartenbild der Medianwerteverteilung nicht so viele Informationen über die Sedimentverteilung wie die Prozentanteilkarte $< 63 \mu\text{m}$.

Das Wattgebiet östlich des neuen Deiches wird durch die Medianwerteverteilung weniger gut gegliedert, als das Watt westlich davon. Vor allem im Bereich der Schlicksande übertreffen die Kartendarstellungen der Anteile an Schluff und Ton < 50 und $< 63 \mu\text{m}$ die Medianwertekarte an Detailreichtum. Die stärker belasteten Gebiete im Westen der Meldorfer Bucht werden dagegen von den Medianwerten deutlicher gekennzeichnet.

Sedimentverteilung des nordöstlichen Bielshövensandes: Der Bielshövensand ist ein ausgedehntes, westlich der Meldorfer Bucht und südwestlich von Büsum gelegenes Wattgebiet. Es ist stark gegen anlaufende Wellen exponiert. Entsprechend herrschen hier grobkörnigere Sedimente mit nur geringen Anteilen $< 63 \mu\text{m}$ vor. Einzelheiten finden sich in GAST (1981).

3.5 Metallgehalte der Sedimente in der Meldorfer Bucht

An 256 Proben aus der Flächenkartierung wurden mit Hilfe der Atom-Absorptions-Spektroskopie die Gehalte an Mangan, Chrom, Zink und Kupfer untersucht. Diese Auswahl erfolgte, weil die genannten Elemente mit relativ geringem Aufwand erfaßt werden können, andererseits aber eine beginnende Verschmutzung deutlich anzeigt.

Nach diesen Daten treten im Watt der Meldorfer Bucht noch keine ungewöhnlich hohen Konzentrationen auf. Allerdings wurden die höchsten Gehalte in den locker gelagerten jungen

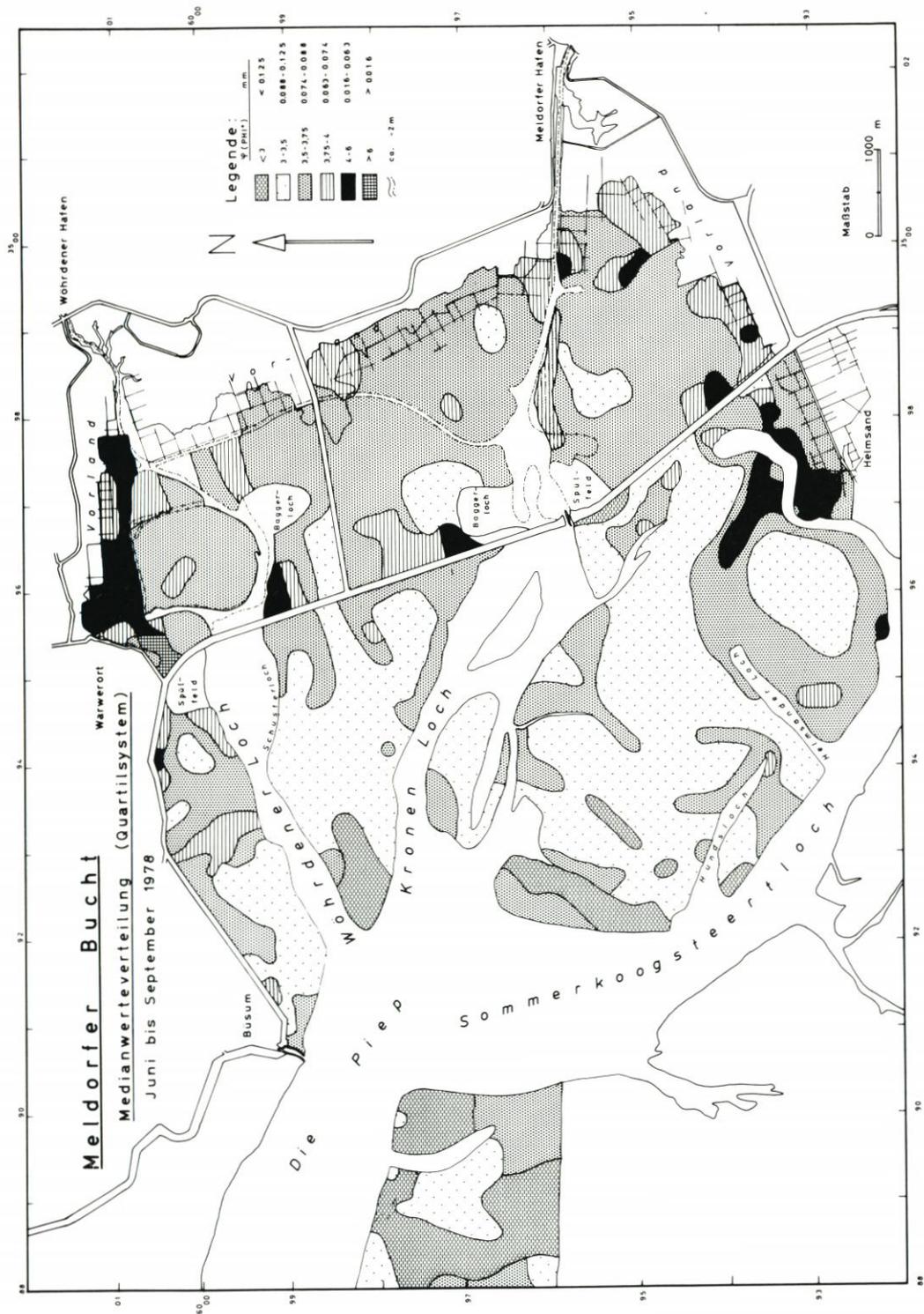


Abb. 10. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Medianwerte

Schlicken in Lee des neuen Seedeiches gemessen. In den Testprofilen waren außer bei Zink, dessen Gehalt nach unten abnimmt, im Vertikalprofil keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

4. Statistische Auswertung von Probandaten aus der Flächenkartierung

4.1 Parameterauswertung und Sedimenttypisierung mit Hilfe von Klassifikations- und Diskriminanzanalysen

Zur Untersuchung der natürlichen Gliederung der Wattsedimente sowie zur Wertung und Gewichtung der Sedimentparameter wurden Klassifikationsanalysen durchgeführt. Da die Kapazität des Rechenprogramms nicht ausreichte, um sämtliche Sedimentproben des Untersuchungsgebietes in einem Durchgang zu klassifizieren, wurden die Klassifikationsergebnisse der Teilgebiete durch Diskriminanzanalysen überprüft.

Für die Untersuchungen wurde das Klassifikationsprogramm YHAK/KDIAG eingesetzt (VOGEL, 1975 u. 1978). YHAK ist ein Programm zur Klassifikation von Merkmalsträgern oder Merkmalen nach einem von acht wählbaren Verfahren und unter Verwendung eines von vier Unähnlichkeitsmaßen. Das Programm KDIAG dient der Erstellung von Klassendiagnosen für metrische und binäre Merkmale unter Verwendung der Ergebnisse aus YHAK.

Klassifikations- und Diskriminanzanalysen unterscheiden sich vor allem dadurch, daß bei der Diskrimination die Anzahl der Teilgesamtheiten (Klassen) bekannt ist; Elemente werden den Klassen mit bekannten Eigenschaften zugewiesen, während bei der Klassifikationsanalyse Anzahl und Eigenschaften der Klasse vorerst unbekannt sind.

Das hier eingesetzte Programm stammt aus dem IBM Scientific Subroutine Package und wurde von KACHHOLZ (1978) überarbeitet. Die Diskriminanzanalyse diente bei den vorliegenden Untersuchungen vorwiegend dazu, die Ergebnisse der Klassifikationsanalysen zu überprüfen. Sie stellt ein gutes Maß für die Brauchbarkeit und die Qualität der Klassenbildungen der verschiedenen Klassifikationsläufe dar.

Die Überprüfung der Klassifikationsanalysen von Teilgebieten der Meldorfer Bucht ergab stets gute bis sehr gute Übereinstimmung der Resultate. Dabei war es für das Ergebnis der Diskriminanzanalysen unerheblich, ob für den Versuch alle 10 Parameter, 7 Parameter verschiedener Kombinationen oder die 4 Momentenparameter eingesetzt wurden. Erst die Kombination zweier Teilgebiete ergab Neuordnungen in etwas größerem Umfang.

Im Ausdruck des Teilprogramms KDIAG lassen sich vor allem über die Angaben der Fehlerquadratsummen zwischen den Klassen Schlüsse über die Qualität der verwendeten Parameter ziehen. Die Trennung der Klassen ist um so besser, je größer die Fehlerquadratsumme zwischen den Klassen und je kleiner die FQS innerhalb der Klassen ist (WARD, 1963). Die Relevanz der Sedimentparameter und ihre Bedeutung für die Charakterisierung der Klassen lassen sich an diesem Verhältnis messen.

Für einen großen Teil der Proben aus der Flächenkartierung der Meldorfer Bucht wurden außer den Korngrößenparametern auch die Gehalte von den Metallen Mn, Cr, Zn und Cu bestimmt. Dazu kommen noch Angaben über die Watthöhe und die Verteilung bzw. die Verbreitung von *Arenicola marina* und *Cardium edule*. Als Sedimentparameter wurden die Momentenparameter Mittelwert (MIW), Sortierung (SDV), Schiefe (SCH) und Kurtosis (KURT) und außerdem die Summenprozentage bei 9, 6, 5, 4,25, 4 und 3 PHI° eingesetzt.

Um die Bedeutung dieser 17 Parameter bei der Klassifikation zu untersuchen, wurden die Merkmale mit Hilfe von 71 Sichtproben in vier Versuchsläufen mit wechselnden Parameterzahlen bearbeitet. Dendrogramme der Klassifikationen mit 17, 10, 8 und vier Merkmalen sind als Abb. 11 (1 bis 4) wiedergegeben.

Die Fehlerquadratsummen zwischen den Klassen, die bei guter Trennung der Klassen voneinander besonders groß sein sollten, besitzen bei den Metallen, der Watthöhe und *Arenicola* sehr niedrige Werte. Die *Cardium*-Gehalte sind von den ersten sieben Parametern noch am ehesten für eine Klassifikation unter sedimentbezogenen Gesichtspunkten geeignet. Die Chrom- und Zinkgehalte sind jedoch gut mit dem Prozentanteil kleiner als 63 µm ($> 4 \text{ PHI}^\circ$) und den anderen Schlickwerten korreliert.

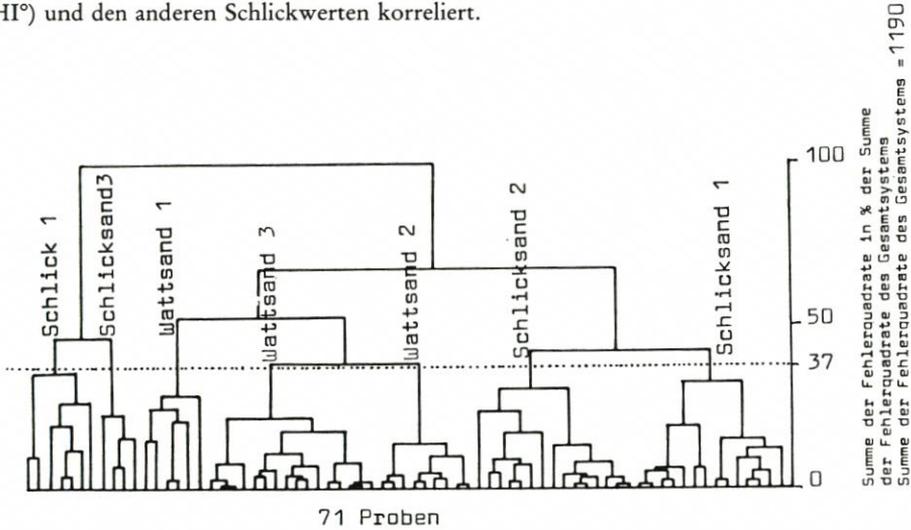


Abb. 11. Dendrogramme (Programm YHAK von FORST & VOGEL, 1978) von 71 Stichproben aus der Meldorfer Bucht westlich des neuen Deiches
 1. Klassifikation mit 17 Merkmalen (Mn, Cr, Zn, Watthöhe, *Arenicola*, *Cardium*, Mom-MIW, -SDV, -SCH, -KURT, 9, 6, 5, 4, 2,5, 4 und 3 PHI^o)

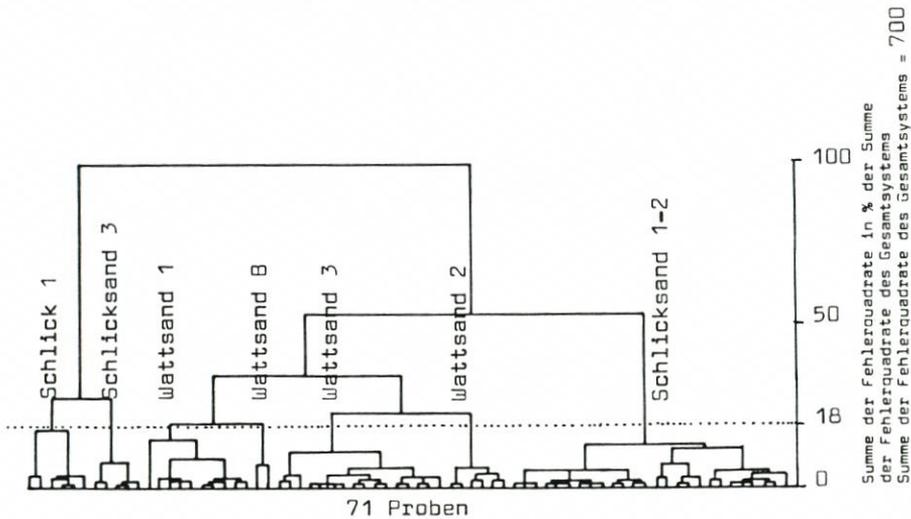


Abb. 11. 2. Klassifikation mit 10 Merkmalen (Mom-MIW, -SDV, -SCH, 9, 6, 5, 4, 2,5, 4 und 3 PHI^o)

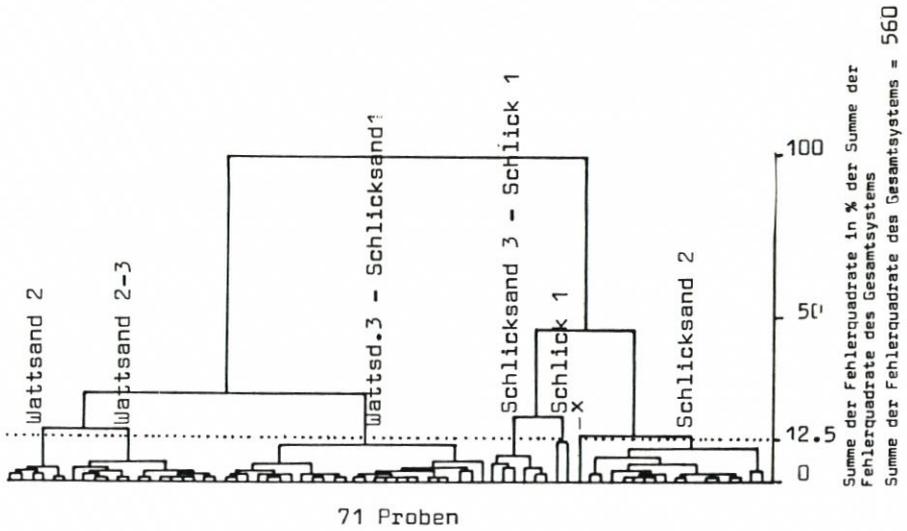


Abb. 11. 3. Klassifikation mit 8 Merkmalen, die mit Hilfe einer Faktorenanalyse ausgewählt worden sind (Zn, Mom-SDV, -KURT, 9, 6, 5, 4.25 und 4 PHI°)

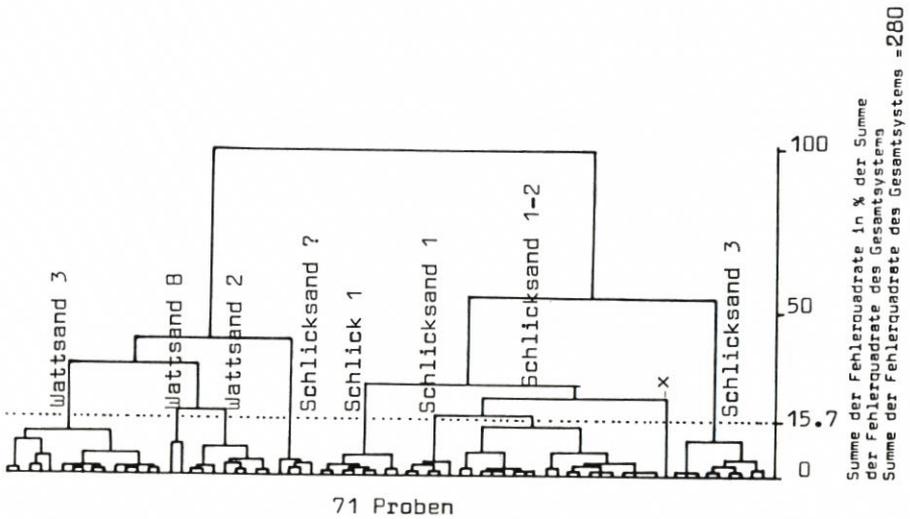


Abb. 11. 4. Klassifikation mit 4 Merkmalen (Mom-MIW, -SDV, -SCH, -KURT)

Unter den zunächst 17 Merkmalen befanden sich also einige, die für die Sedimentklassifikation von geringer Bedeutung waren. Beim Testlauf mit 10 Parametern, bei dem auf die weniger geeigneten Parameter verzichtet wurde, ergaben sich hohe Fehlerquadratsummen. Durch Faktorenanalysen wurden für weitere Klassifikationen acht (Abb. 11, 3) und schließlich vier (Abb. 11, 4) Merkmale ausgewählt. Nach VOGEL (1975) dienen Faktorenanalysen dazu, die Zahl der Merkmale zu reduzieren. Dabei werden möglichst wenig miteinander korrelierte Merkmale bevorzugt.

4.2 Charakteristische Merkmale von Wattsedimenttypen

Bei umfangreichen Untersuchungen zur Klassifikation der Wattsedimente der Meldorfer Bucht ergab sich schließlich eine Unterscheidung von 10 Sedimenttypen auf der Grundlage von jeweils 10 Merkmalen. Die Sedimenttypen sind also durch einen Komplex von Parametern charakterisiert. An dieser Stelle liegt der prinzipielle Unterschied gegenüber den bisherigen Betrachtungen, die sich auf jeweils einen Parameter bezogen.

Wattsande lassen sich in vier Sedimenttypen untergliedern (Wattsand 1, 2, 3 und B), Schlicksande in drei (1, 2 und 3) sowie Schlicke ebenfalls in drei (1, 2 und 3). Einzelheiten sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Der Prozentsatz $< 125 \mu\text{m}$ ($> 3 \text{ PHI}^\circ$) grenzt einige Sedimentklassen deutlich voneinan-

Tabelle 2
Mittelwerte und Standardabweichungen von Stichproben aller Klassifikationsläufe
des Kartierungsgebietes

		Wattsand				Schlicksand			Schlick		
		1	2	3	B	1	2	3	1	2	3
MIW	\bar{x}	3,0	3,1	3,4	2,5	3,4	3,6	3,6	3,5	3,6	6,1
	s	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
SDV	\bar{x}	0,9	0,5	0,6	0,6	1,1	1,2	2,0	2,4	2,9	2,1
	s	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
SCH	\bar{x}	-4,6	-0,9	-5,6	-1,5	-4,3	-3,8	-2,4	-2,1	-1,7	-0,5
	s	1,1	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,3
KURT	\bar{x}	29	3,6	49	4,4	23	17	6,0	4,6	3,0	1,8
	s	11	0,7	10	1,7	6,1	5,6	1,3	0,8	0,5	0,3
PHI ⁰		Angaben in Prozent:									
9	\bar{x}	1,4	0,9	0,7	-	2,3	3,2	9,8	13,3	19,5	24,2
	s	0,6	1,2	0,4	-	0,9	1,2	2,5	2,7	3,1	6,8
6	\bar{x}	1,9	3,1	1,0	-	3,6	5,5	16,8	21,5	33,7	58,7
	s	0,9	1,4	0,5	-	1,2	2,3	4,0	4,8	6,3	8,4
5	\bar{x}	2,3	3,7	1,3	-	4,4	6,9	21,9	27,1	41,9	71,6
	s	1,2	1,7	0,7	-	1,5	2,8	5,6	6,4	7,9	10,6
4,3	\bar{x}	3,7	4,7	3,3	2,9	8,8	13,1	32,7	37,8	53,5	80,7
	s	2,2	2,0	1,5	1,5	3,7	4,5	7,5	8,9	10,7	9,4
4	\bar{x}	5,7	6,8	8,2	4,1	14,8	22,1	42,6	53,1	62,5	84,3
	s	2,7	2,7	5,0	2,7	5,5	7,5	10,5	11,5	11,9	7,6
3	\bar{x}	58,3	62,1	92,0	31,1	90,9	98,2	99,1	96,5	99,1	98,8
	s	10,2	17,8	4,9	11,4	5,3	1,8	0,5	3,2	0,3	0,3
Wattsand 1	n = 20	Schlicksand 1	n = 20	Schlick 1	n = 6						
Wattsand 2	n = 20	Schlicksand 2	n = 24	Schlick 2	n = 8						
Wattsand 3	n = 21	Schlicksand 3	n = 20	Schlick 3	n = 3						
Wattsand B	n = 18										

Anmerkung: Bei einem Teil der Proben des Sedimenttyps Wattsand 2 und allen Bielhövensand-Proben der Tabelle wurde der Schlickanteil des Sediments ($< 50 \mu\text{m}$) nicht untergliedert. Die Werte der Schiefe und der Kurtosis sind deshalb zu niedrig.

der ab. Die Wattsande des Bielshövensandes (Wattsand B) zeichnen sich durch einen besonders niedrigen Gehalt an Korngrößen $< 125 \mu\text{m}$ aus. Eine Mittelstellung in den Prozentgehalten $< 125 \mu\text{m}$ nehmen die Wattsande vom Typ 1 und 2 ein. Wattsande vom Typ Wattsand 3 und alle schlickreicheren Sedimenttypen besitzen stets mehr als 90 % Material $< 125 \mu\text{m}$. Der Prozentsatz $< 125 \mu\text{m}$ gibt einen Hinweis auf die Intensität, mit der Seegang und Strömungen auf die Wattsedimente einwirken. Demnach sind die Wattsande des Bielshövensandes wesentlich stärker Seegang und Strömungen ausgesetzt als die Wattsande der Wattsandklasse 3 und alle schlickigeren Sedimente der Meldorfer Bucht. Eine Mittelstellung nehmen auch hier die Wattsandtypen 1 und 2 ein, die überwiegend auf den Sandwattplatten der Bucht zu finden sind.

Eine bessere Untergliederung der Wattsedimente ergeben die Werte der Prozentsätze $< 63 \mu\text{m}$ ($> 4 \text{ PHI}^\circ$). Vor allem im Bereich der schlickreichen Sedimente werden die Wattsedimenttypen gut durch die hier sehr unterschiedlichen Mittelwerte getrennt. Die Wattsande dagegen müßten nach diesem Parameter in höchstens zwei Gruppen unterteilt werden, nämlich in einen schlickärmeren Typ und einen etwas schlickreicheren Typ. Diese Einteilung entspräche der im Gelände praktizierten Gliederung in einen hellen und in einen dunklen Wattsand.

Mit abnehmendem Gehalt an Schluff und Ton wird auch bei den Summenprozenten bei $50 \mu\text{m}$ ($4,25 \text{ PHI}^\circ$), $31 \mu\text{m}$ (5 PHI°), $15 \mu\text{m}$ (6 PHI°) und $2 \mu\text{m}$ (9 PHI°) die Zuordnungsmöglichkeit zu den Wattsedimenttypen geringer. Nur die schlickigen Sedimente (Schlicksande und Schlicke) lassen sich auch mit den Prozentwerten bei $2 \mu\text{m}$ (9 PHI°) noch gut trennen. Einen vorzüglich zur Trennung der Wattsedimenttypen geeigneten Parameter bildet überraschenderweise die Kurtosis, obwohl beim „Schlick 1“ ähnliche Werte auftreten wie bei den Wattsandtypen „Wattsand 2“ und „Wattsand B“.

Eine gute Abgrenzung zwischen den schlickreichen Sedimenttypen erlauben die Parameter der Sortierung (SDV) und der Schiefe (SCH), während der Mittelwert (MIW) bei den Klassen der Schlicksande und Schlick 1 und 2 fast keine Abweichungen erkennen läßt. Die Wattsande lassen sich dagegen mit Hilfe des Momenten-Mittelwertes relativ gut voneinander trennen.

4.3 Regionale Verbreitung der Wattsedimenttypen in der Meldorfer Bucht

Als Ergebnis wird in Abb. 12 eine Karte der Wattsedimenttypen vorgelegt. Sie zeigt eine relativ geschlossene Verteilung von Probenstationen gleicher Sedimentklassen, was als weiteres Kriterium für die Typisierungsqualität angesehen werden kann.

Da die bisher vorhandenen Klassifikationsprogramme YHAKund KDIAG (FORST u. VOGEL, 1978), wie oben erwähnt, nur 208 Proben bei zehn Merkmalen verarbeiten können, wurde das Untersuchungsgebiet in vier Regionen aufgeteilt. Eine Region umfaßt die Wattflächen östlich vom neuen Deich (Speicherkoog Nord), zwei die westlich an den Deich angrenzenden Gebiete der Meldorfer Bucht und die vierte Teile des nordöstlichen Bielshövensandes. Da das nördliche Gebiet der beiden seewärts von dem neuen Deich liegenden Teilgebiete auch das Testfeld bei Deichhausen mit einschließt, das gesondert beschrieben wird, wird im folgenden das Gebiet südlich des Kronenlochs stellvertretend für die Gebiete der Meldorfer Bucht westlich des neuen Deiches behandelt. Ein Vergleich der Klassifikationsergebnisse der beiden Teilgesamtheiten „Süd“ und „Nord“ ergibt außerdem sehr ähnliche Sedimenttypisierungen.

Während sich die Klassifikationsergebnisse der westlichen Meldorfer Bucht (ohne den

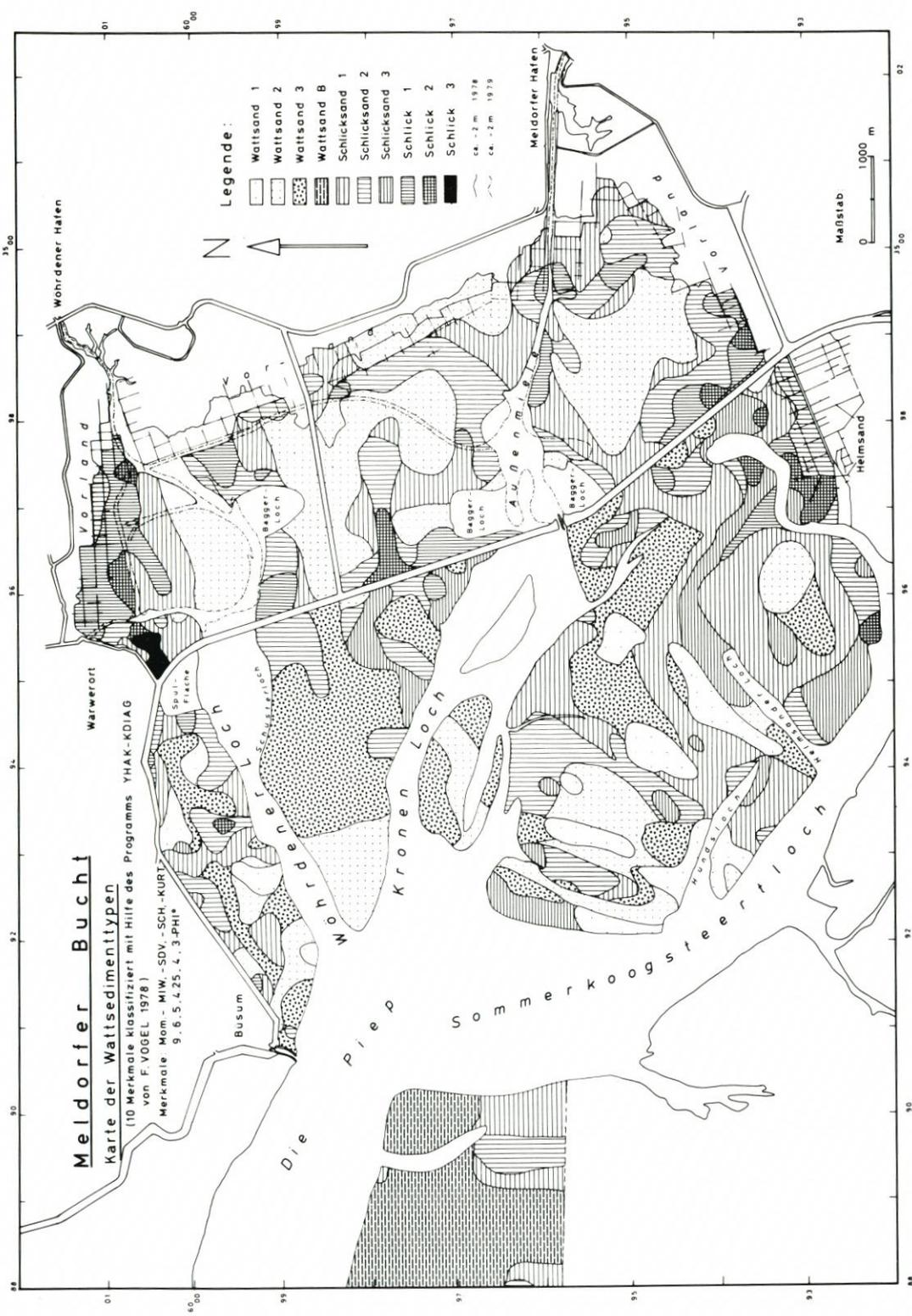


Abb. 12. Meldorfer Bucht. Karte der Wattle sedimententypen

Bielshövensand) nicht wesentlich voneinander unterscheiden, zeigt die Klassifikation der landnahen Wattgebiete der inneren Meldorfer Bucht charakteristische Eigenheiten. Bei keinem der anderen Klassifikationsversuche war die Gliederung in gut voneinander abgegrenzte Sedimenttypen so problemlos wie in diesem Gebiet. Außerdem erbrachte die Kontrolle mit der Diskriminanzanalyse bei 10 Merkmalen keine relevanten Abweichungen vom Klassifikationsergebnis.

Folgende Sedimenttypen wurden gebildet (vgl. Abb. 12). Aus nur wenigen Proben setzt sich die extrem schlickreiche Gruppe des „Schlick 3“ zusammen. Dieses Schlickvorkommen liegt in dem geschützten Bereich hinter dem neuen Deich bei Warwerort im Norden des Gebietes. Auch die Schlickklasse „Schlick 2“ besitzt keine weite Verbreitung und ist ebenfalls an besonders geschützten Orten zu finden. Wo diese Schlicktypen auftreten, werden sie stets von der sehr viel häufiger auftretenden Klasse des „Schlick 1“ eingerahmt.

Wattsedimente des Typs „Schlicksand 3“ sind im inneren Teil der Meldorfer Bucht nicht vertreten, bzw. Proben dieser Kategorie wurden bei der Klassifikation wegen zu geringer Anzahl den jeweils angrenzenden Sedimentklassen „Schlick 1“ oder „Schlicksand 2“ zugeordnet. „Schlicksand 2“ ist häufig anzutreffen.

Ein Vergleich der Verbreitungskarte der Herzmuschel *Cardium edule* mit der Sedimenttypenkarte zeigt, daß die Verteilung dieser Art mit dem Vorkommen von „Schlicksand 2“ weitgehend übereinstimmt (vgl. Abb. 2 u. 12). Der Prozentanteil <math>< 63 \mu\text{m}</math> beträgt beim „Schlicksand 2“ der Klassifikationsanalysen 20 bis 30%. Demnach scheint der Wattsedimenttyp „Schlicksand 2“ den Teil des Korngrößenspektrums zu umfassen, in dem sich die Herzmuschel *Cardium edule* bevorzugt ansiedelt. Da diese Muschelart zu den Filtrierern mit den größten Filtrationsraten gehört und ein großer Teil des filtrierten Materials über Kotpillen (fecal pellets) im Sediment festgelegt wird, liegt der Schluß nahe, daß es sich beim „Schlicksand 2“ um ein biogen stark beeinflusstes Sediment handelt (vgl. Abschn. „Biodeposition“ in der Darstellung der Untersuchungen im Testfeld).

„Schlicksand 1“ bedeckt im Ostteil der Meldorfer Bucht größere Flächen, die fast stets an Wattsande angrenzen (Abb. 12). Wo dies nicht der Fall ist, wie zum Beispiel in der Südost-Ecke des Gebietes, fand zum Zeitpunkt der Probennahme eine Erosion der Vorlandbereiche statt. Diese Erosion war vor dem Vorland nördlich der Außenmaße noch stärker ausgeprägt, was durch die Verbreitung von „Wattsand 2“ verdeutlicht wird. „Wattsand 2“ wird überall dort angetroffen, wo eine leichte Erosion beobachtet werden konnte. Da im Sommer vor dem Deichschluß die Sedimentbilanz im Gebiet östlich des neuen Deiches überwiegend negativ war, fehlt deshalb in diesem Bereich Sediment der Klasse „Wattsand 3“, die im westlichen Teil des Kartierungsgebietes stabile Wattsandflächen anzeigt.

Die Wattsedimentklasse des „Wattsandes 1“ tritt im Ostteil der Meldorfer Bucht nicht auf.

Im Gebiet der Wattflächen westlich des neuen Deiches bis zum Sommerkoog-Steertloch sind „Schlick 1“ und „Schlick 2“ nur lokal nördlich und westlich vom Helmsander Damm und im ehemaligen Baggerloch im Testfeld östlich von Büsum anzutreffen.

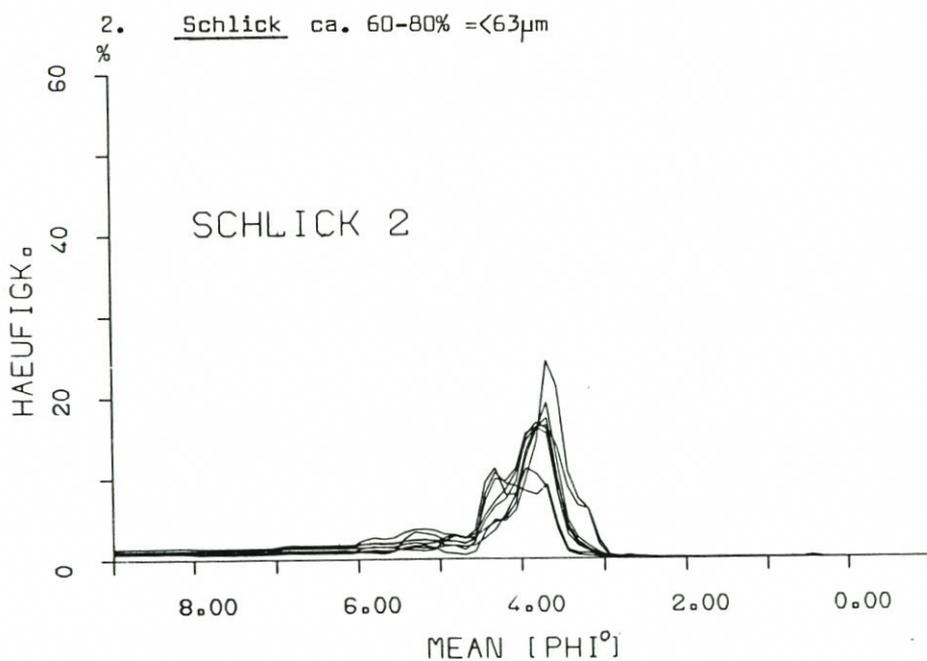
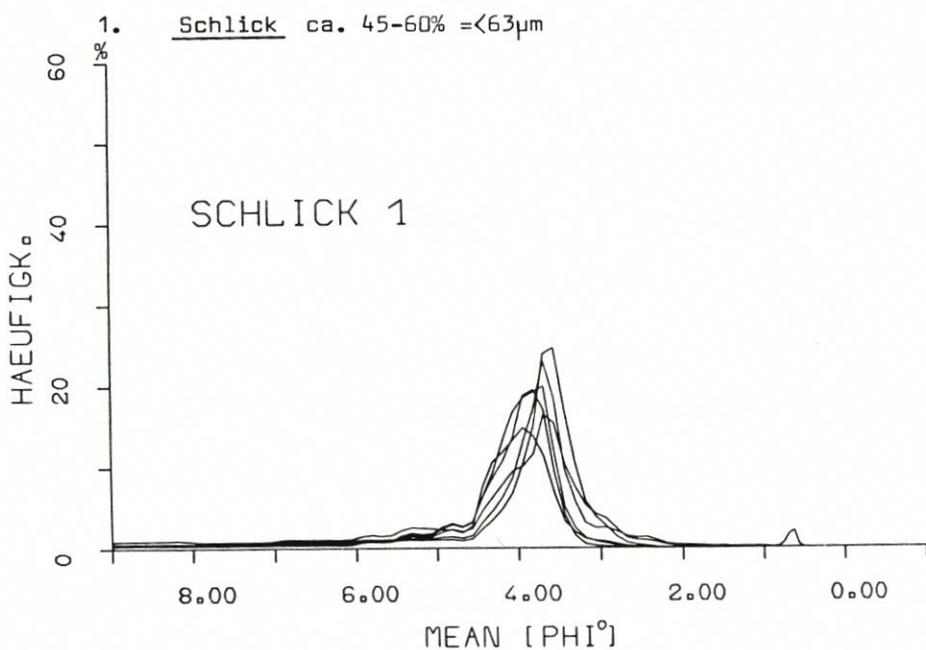
Als Ergänzung zu den Wattsedimentgruppen des Ostgebietes traten hier noch zusätzlich die Klassen „Wattsand 1“, „Wattsand 2“ und „Schlicksand 3“ auf. Wie die Diskriminanzanalysen zeigten, sind auch hier die Klassifikationsergebnisse zufriedenstellend genau.

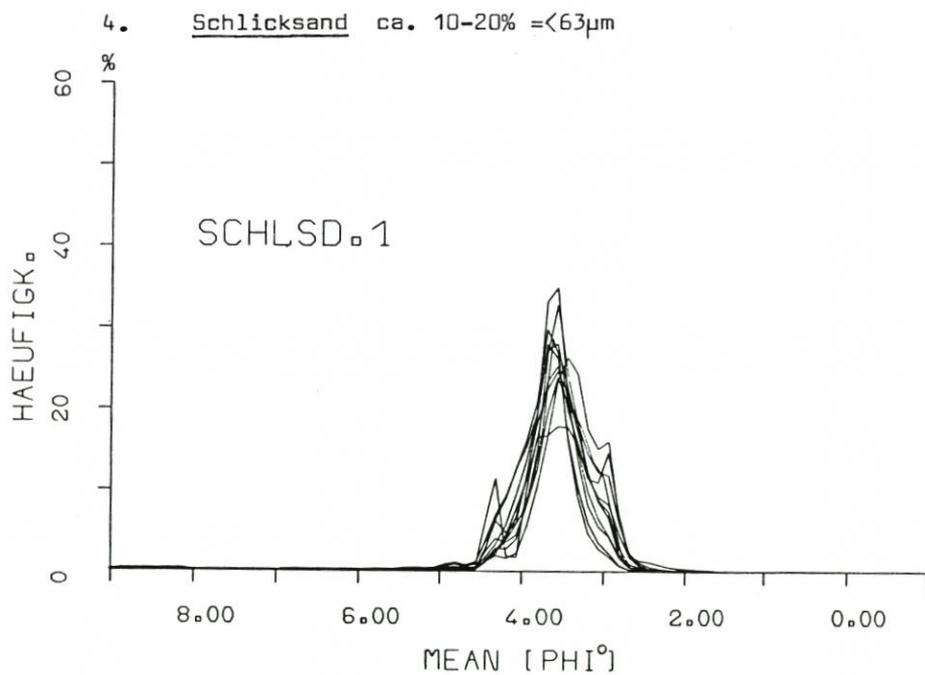
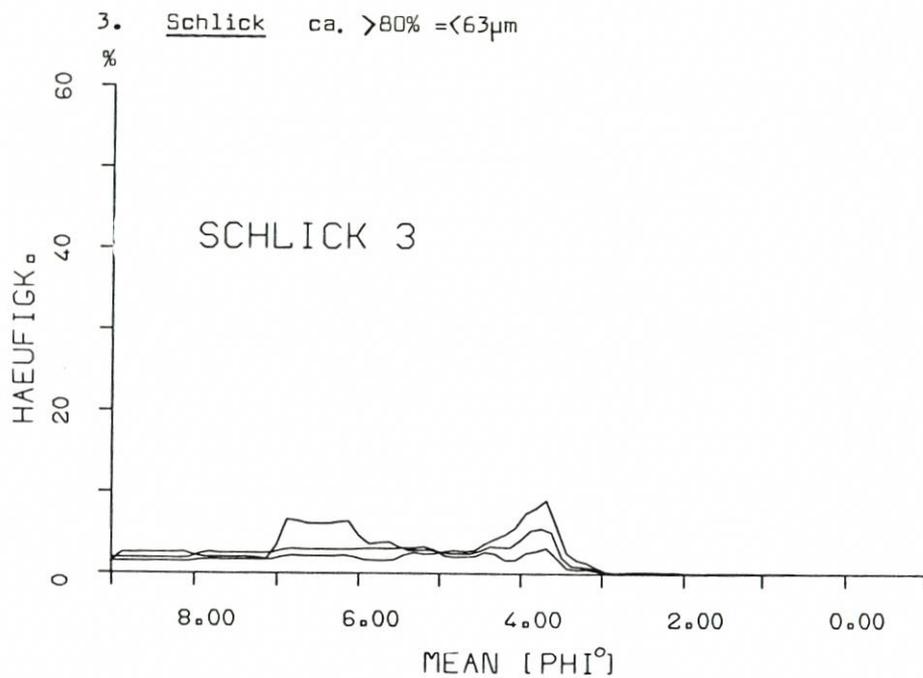
„Wattsand 1“ findet sich überwiegend an Stellen, die einer starken Umlagerungsaktivität unterliegen. Meist ist die Sedimentbilanz auf „Wattsand 1“-Flächen negativ. Im Vergleich zur Flächenausdehnung der anderen Wattsandtypen besitzt der „Wattsand 1“ eine relativ kleinräumige Verbreitung.

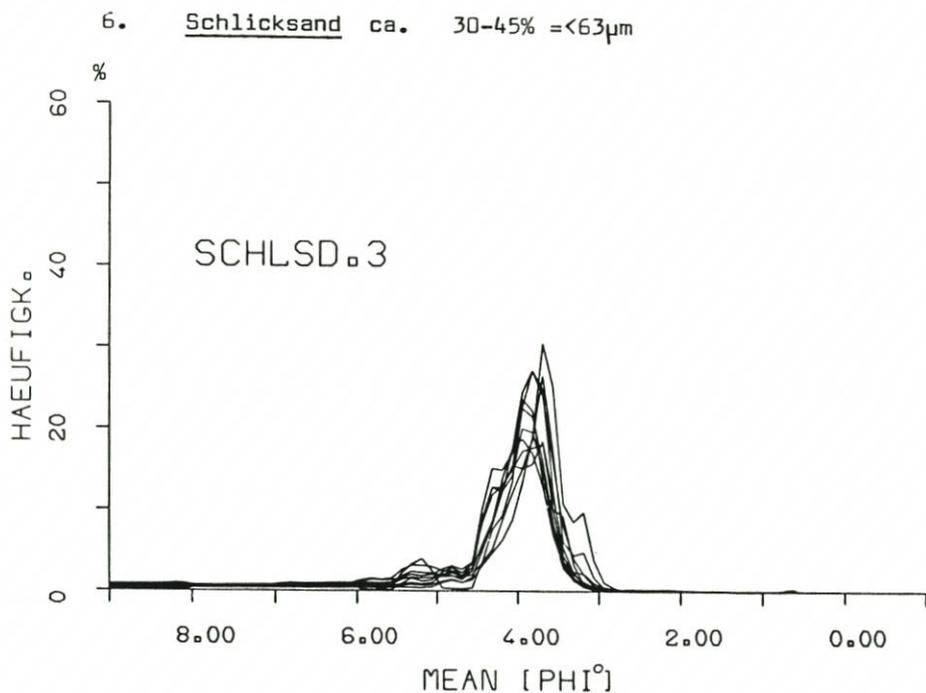
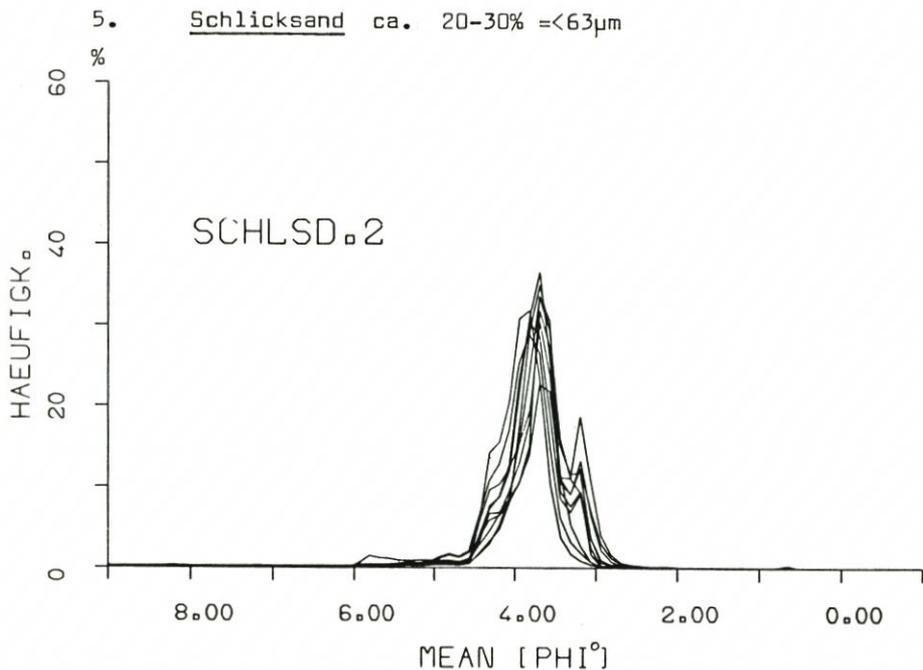
Eine Diskrepanz zwischen der Aussage, daß „Wattsand 3“ bevorzugt an Stellen stabilen

Abb. 13. Häufigkeitsverteilungen von Wattsedimenttypen der Meldorfer Bucht und des Bielshövensandes

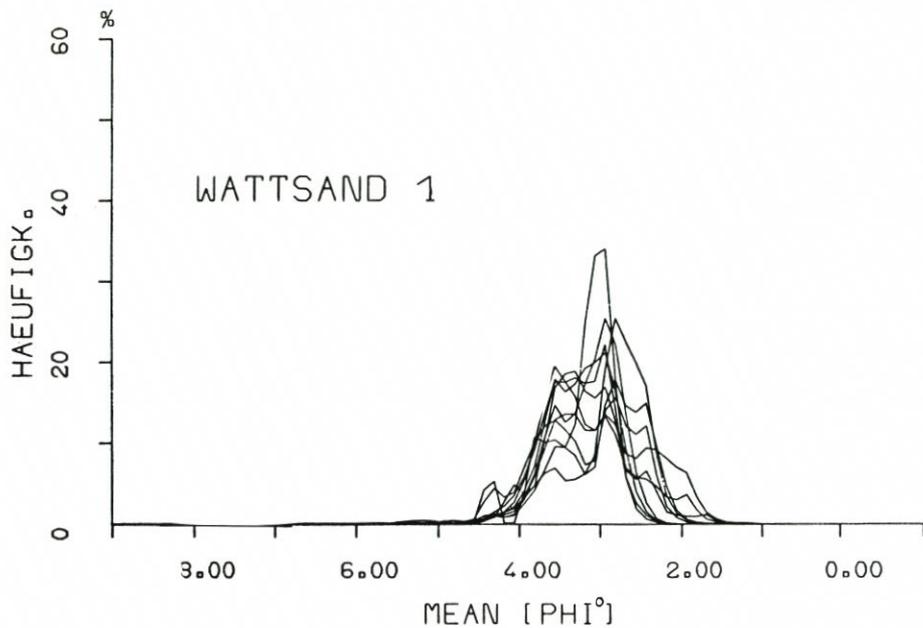
1. Schlick 1; 2. Schlick 2; 3. Schlick 3; 4. Schlicksand 1; 5. Schlicksand 2; 6. Schlicksand 3; 7. Wattsand 1;
8. Wattsand 2; 9. Wattsand 3; 10. Wattsand B



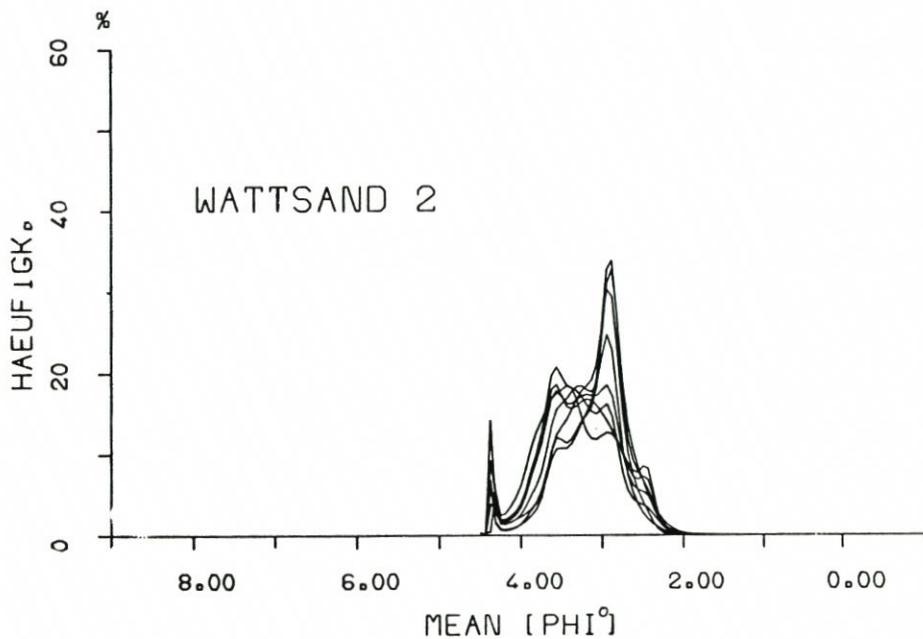




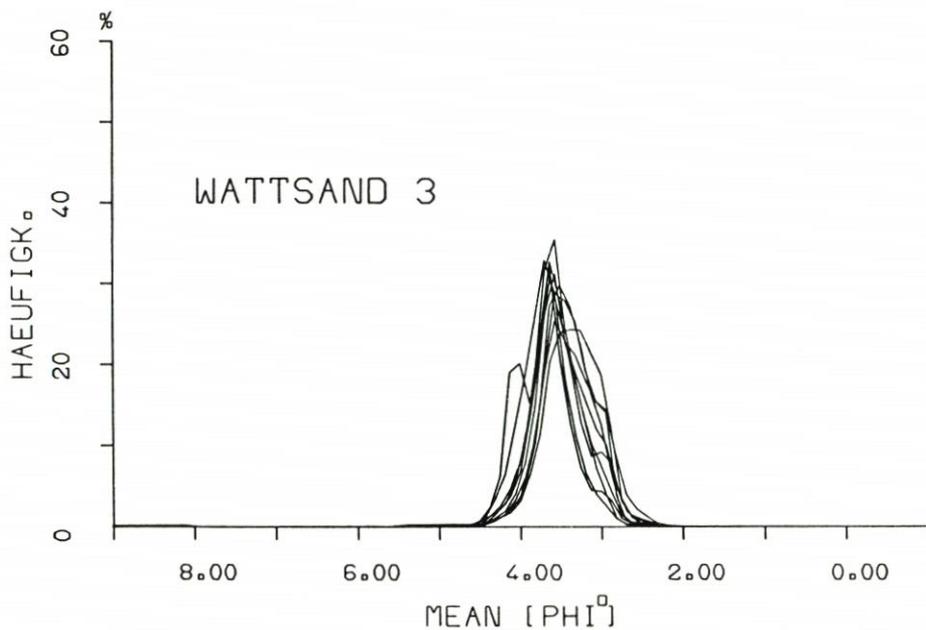
7. Wattsand ca. 2-7.5% = <63 μ m



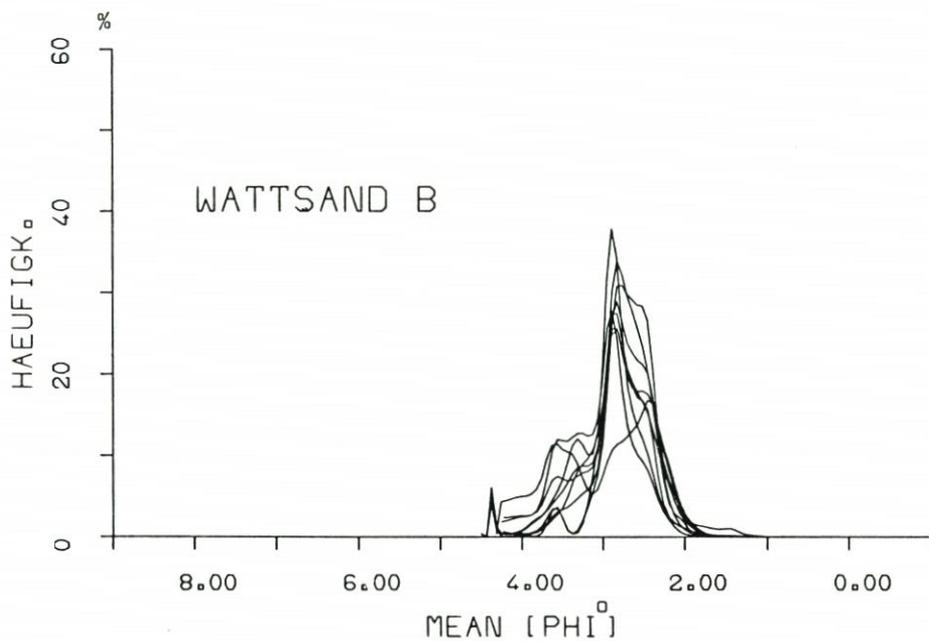
8. Wattsand ca. 2-7.5% = <63 μ m



9. Wattsand ca. 2-10% $\leq 63\mu\text{m}$



10. Wattsand Bielshövensand ca. 1-5% $\leq 63\mu\text{m}$



Zustands angetroffen wird, ergibt sich wiederum beim Vergleich der Kartendarstellungen „Sedimentation-Erosion“ für die Plate zwischen dem Kronenloch und dem Wöhrdener Loch. Dort ist auf der Karte der Erosions- und Sedimentationsverteilung zum großen Teil schwache Erosion eingetragen. Diese entspricht jedoch, wie eine Massenbilanz (vgl. GAST, 1981) zeigt, nur einer kurzfristigen, sehr wahrscheinlich durch die Deichbauarbeiten verursachten Situation. Nach dem Deichbau stabilisierten sich die Wattflächen dieser Plate im Gegensatz zum größten Teil der südlichen Gebiete bald wieder. Auch das große Erosionsgebiet südlich des Helmsander Lochs, das sich in einem ausgedehnten Seegrassfeld befindet, hat sich bald nach Deichschluß teilweise wieder stabilisiert.

„Schlicksand 1“ als noch relativ schlickarme Gruppe ist vor allem auf den zwei Platen nördlich vom Helmsand weit verbreitet. Zusammen mit dem schlickreichen „Schlicksand 3“ füllt dieser Sedimenttyp das ehemalige Rinnensystem in der Verlängerung des heutigen Helmsander Lochs. Das auffallende „Schlicksand 3“-Vorkommen an der Nordwest-Ecke der mittleren Plate hat historische Gründe, die der Vergleich der Luftbilddarstellungen von 1958 und 1977 verdeutlicht. Bei diesem „Schlicksand 3“-Feld handelt es sich um einen in Lee einer kleinen Wattinsel abgelagerten Schlicksand, der nun erodiert wird.

Der Vergleich der von der Klassifikationsanalyse gebildeten Wattsedimenttypen des Bielhövensandes erbrachte zwei zusätzliche Wattsandgruppen. Da sie sich jedoch in ihren Parameterwerten nicht sehr unterschieden, wurden sie in der Tabelle der Mittelwerte und für die Häufigkeitskurvendarstellungen (Abb. 13, 10) zu einer Bielhövenssandgruppe „Wattsand B“ zusammengefaßt.

4.4 Häufigkeitsverteilungskurven der Wattsedimenttypen

Die Darstellungen der Häufigkeitsverteilungen wurden durch das Programm LINE 3 von KACHHOLZ (1980) ermöglicht. Wegen der besseren Übersichtlichkeit wurden jeweils zehn Häufigkeitskurven eines Sedimenttyps übereinandergezeichnet. Bei den zehn Kornverteilungen handelt es sich um Stichproben aus den Probengesamtheiten der Wattsedimenttypen. Lediglich vom Typ „Schlick 3“ waren nur drei Proben verfügbar (Abb. 13, 1 bis 10).

Wenn bi- oder polymodale Häufigkeitsverteilungen auftreten, ist dies vielfach auf den Einfluß von Schichtung innerhalb der Probenentnahmetiefe zurückzuführen. Vor allem in schlickigen Wattsedimenten kann jedoch eine Beeinflussung der Häufigkeitskurven durch Schichtung innerhalb der obersten 10 cm oft ausgeschlossen werden, da diese Sedimente in der Regel durch Bioturbation durchmischt sind.

5. Auswertung von Luftbildern

Längerfristige Veränderungstendenzen durch Erosion und Sedimentation können mit Hilfe eines Vergleichs von Luftbildern abgeleitet werden. Für die Auswertung standen Schwarzweißaufnahmen aus den Jahren 1958 (1:25 000) und 1977 (etwa 1:10 000) zur Verfügung, also aus einem Zeitraum von 20 Jahren.

Eine Auswertung für die Wattmorphologie ist schwierig. Trotz der starken Überhöhung der Formen bei der Stereo-Betrachtung fallen die insgesamt etwa 3 m Höhendifferenz nicht sehr ins Gewicht. Für die Ansprache des Sedimentes wichtige Formen sind die Rippeln, die nur auf sandigen Wattflächen auftreten. Jedoch waren zum Zeitpunkt der Aufnahmen nicht auf allen Wattsandflächen Rippeln zu beobachten. Für Erosionsfelder sind die auch im

Luftbild erkennbaren größeren Muschelschillfelder, die vor allem in der Nachbarschaft von Prielien liegen, typisch. Alle genannten Formen sind auf den Luftbildern jedoch unterschiedlich deutlich sichtbar.

Auswertungsschwerpunkte wurden zunächst auf den Vergleich der Wasserlinien bei Niedrigwasser und die Ausbildung der Prielnetze gelegt. Der Vergleich der Prielnetzarten für 1958 und 1977 (Abb. 14 u. 15) zeigt die deutlichsten Unterschiede im mittleren Teil der Meldorfer Bucht. In den übrigen Abschnitten sind die Veränderungen geringer. Bei diesen spielen die Auswirkungen der baulichen Maßnahmen eine bedeutende Rolle.

Nördlich vom Wöhrdener Loch im Zentrum des Testfeldes war 1958 noch keine künstliche Vertiefung zu finden, während das Entwässerungsnetz des Testfeldes von 1977 die Position des inzwischen schon wieder zusedimentierten Baggerlochs aus den 60er Jahren sichtbar macht. Die 1977 bereits teilweise aufgespülte Deichtrasse zeichnet sich durch den Mangel an Prielien in diesem Bereich deutlich ab (Abb. 15).

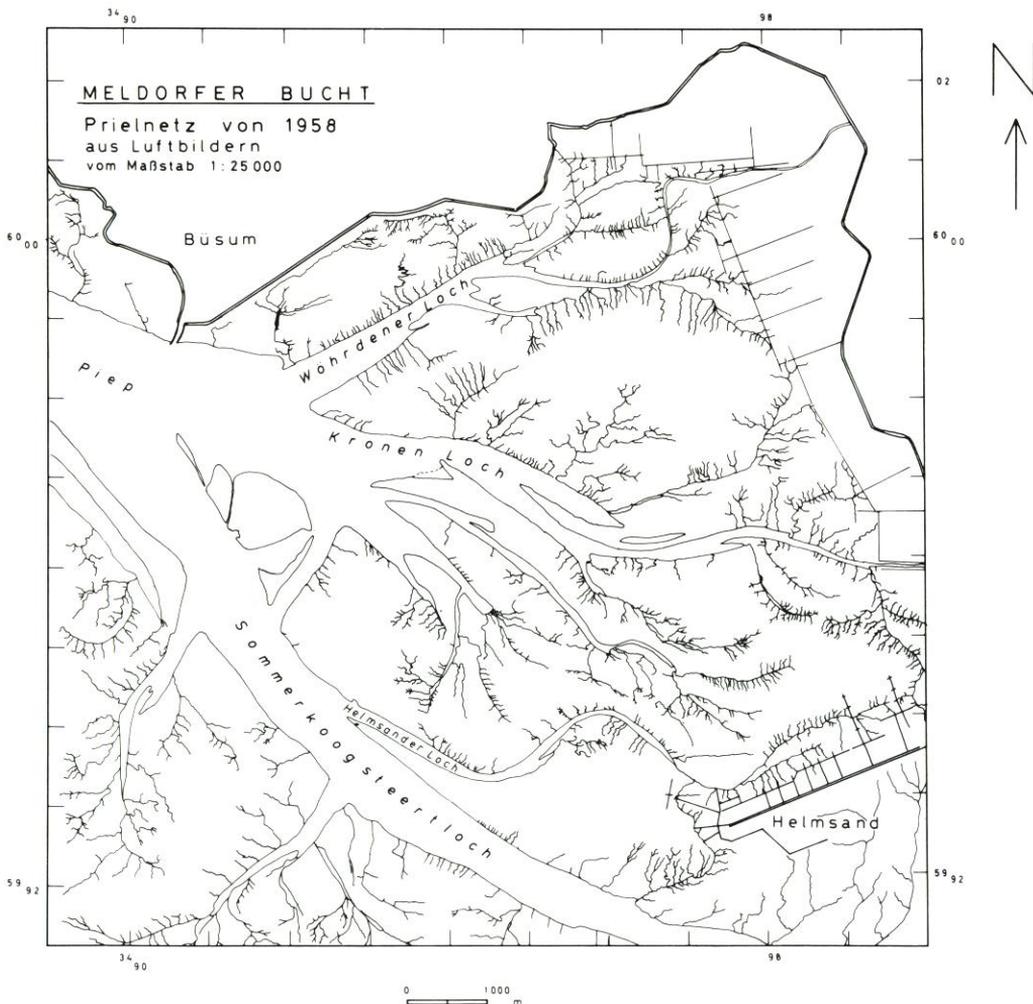


Abb. 14. Meldorfer Bucht. Prielnetz von 1958 aus Luftbildern

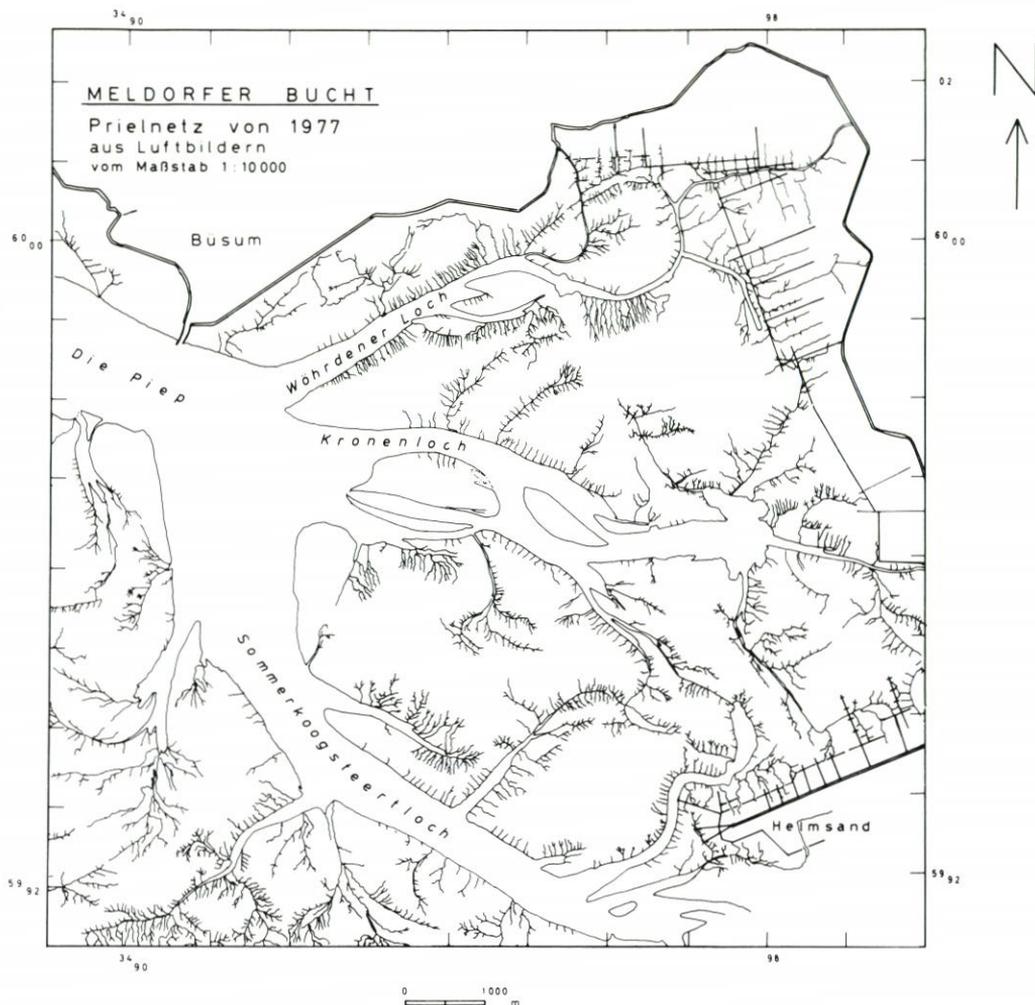


Abb. 15. Meldorfer Bucht. Prielnetz von 1977 aus Luftbildern

Eine Übereinanderprojektion der beiden Auswertungen zeigt, daß sich die nördliche Plate zwischen dem Kronenloch und dem Wöhrdener Loch bis 1977 etwas nach Westen hin vorgebaut hat (ca. 300 m). Diese Anlagerung in westlicher Richtung im Nordteil der Bucht steht im Gegensatz zu dem beträchtlichen Abbau einer dreieckigen Insel zwischen der Piep, dem Kronenloch und dem Sommerkoog-Steertloch.

Im mittleren Bereich der Meldorfer Bucht hat sich die Konfiguration der Wattflächen auffallend stark verändert. Der Bielshövensand ist seit 1958 um etwa 1 km in östlicher Richtung gewachsen. Dafür wurde eine Sandbank westlich der großen Plate völlig abgetragen. Ein Teil des Abtragungsmaterials scheint die östlich anschließenden Wattgebiete teilweise aufgefüllt zu haben. SCHMIDT (1975) weist entsprechend für diese Teilbereiche der Meldorfer Bucht einen überdurchschnittlichen Materialgewinn bis 1973 nach. Im südlichen Teil der großen Plate nördlich vom Helmsand haben Baggerarbeiten im Zuge des Deichbaus das natürliche Prielsystem stark verändert. Auch im Verlauf der Außenmiele (östliche Fortsetzung des Kronenlochs) sind größere Ausbuchtungen eine Folge von Ausbaggerungen.

Aus dem Vergleich der heutigen Sedimentverteilung in der Meldorfer Bucht mit der Karte des Prielnetzes von 1977 können Zusammenhänge zwischen Prielnetzdicke, Priellänge und Prielverlauf mit dem Sedimenttyp festgehalten werden. Die meisten Hinweise ergaben sich aus dem Vergleich der Luftbildkarte von 1977 (Abb. 15) mit der Sedimenttypenkarte (Abb. 12), die auf der Klassifikationsanalyse der Probandaten beruht.

Vor allem Wattsand-Flächen werden von Prieln nur wenig untergliedert. Lediglich im Südosten des Gebietes ragen einzelne kleine Prielenden in Wattsandgebiete hinein. Steil abfallende Randbereiche der Platen besitzen jedoch auch bei Wattsanden sehr kurze, feine Priele, wie zum Beispiel am Südufer des Wöhrdener Lochs. Die infolge des hohen Gefällsgradienten sehr kurzen Priele an den Rändern größerer Rinnen können demnach als Hinweis auf sandige Wattsedimente betrachtet werden.

In der an Feinanteilen reicheren „Wattsandgruppe 3“ sind nur dort Prielenden zu finden, wo diese Flächen an Schlicksande angrenzen, wie z. B. auf der nördlichen Plate.

In der Meldorfer Bucht liegen längere, verästelte Priele, die in die großen Wattrinnen münden, stets in schlickigen Gebieten. Sehr feine Verästelungen der Prielenden und ein stark geschlängelter Lauf sind charakteristisch für alle drei Schlickgruppen, wobei in einem stark wasserhaltigen Schlick die Verästelungen am dichtesten sind. In festerem Schlick, meist in Landnähe, nimmt die Zahl der Verästelungen und auch die Prieldichte wieder ab. Der charakteristische, sehr stark gekrümmte Verlauf der Priele ist jedoch auch dort vorhanden.

Ein Beispiel für weniger starke Verästelungen im landnahen, dichteren Schlickwatt findet sich im Nordosten der Bucht. Die Gruppe der Schlicksande nimmt auch in der Ausprägung des Prielnetzes zwischen den Wattsanden und den Schlicken eine Mittelstellung ein. Die Prielläufe sind weniger stark gewunden, und deren Seitenäste sind im Verhältnis kürzer und weniger stark verästelt als in den Schlickgebieten.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde ein Versuch zur Rekonstruktion der Verteilung der Oberflächensedimente im Jahre 1958 unternommen. Die Unterschiede gegenüber dem heutigen Zustand scheinen vor allem in den damals größeren Schlickbereichen im Vorland nördlich des Helmsander Dammes zu liegen. Schlickreichere Sedimente konnten wahrscheinlich auch auf der nördlichen Plate südlich des Wöhrdener Lochs und östlich von

Tabelle 3
Zusammenfassung sedimenttypischer Prielnetzmerkmale

Ausprägung des Prielnetzes	Wattsedimenttyp	%-Anteil < 63 µm
keine Priele	Wattsand 1 bis 2	< 7
keine Priele bis wenig verzweigte kurze Enden	Wattsand 1 und 3	< 10
längere, wenig verzweigte, wenig gewundene bis mittel- mäßig geschlängelte Priele; geringe Prielnetzdicke	Schlicksand	< 30
längere Priele, stark gewunden, mit starker Verästelung. Seitenäste, stark gewunden, dichtes Prielnetz	Schlicksand 3 und Schlick 1 (2, 3)	< 50 > 50
wie oben, aber kleine Seitenpriele, sehr geschlängelt und stark verästelt; sehr dichtes Prielnetz bei stark wasserhaltigem Schlick (bessere Identifizierung bei größeren Luftbildern)	Schlick 2 und 3	> 60

Büsum im Spartinafeld bei Deichhausen angetroffen werden. Dagegen dürfte die 1958 noch stark untergliederte mittlere Plate damals insgesamt schlickärmer gewesen sein als 1977. Sandiger, wahrscheinlich als Folge der Baggerarbeiten, ist heute das Gebiet südwestlich des Helmsandes.

Die vergleichende Betrachtung der beiden Luftbildkarten (Abb. 14, 15) zeigt deutlich, in welchem Umfang die Deichbauarbeiten bereits 1977 die Sedimentverteilung in Deichnähe verändert haben. Auf der Leeseite des neuen Seedeiches hat eine zunehmend schlickige Sedimentation eingesetzt. Auch um das Baggerloch nördlich des Helmsander Dammes entwickelten sich verschiedene kleine Schlickfelder.

6. Allgemeines zu den Untersuchungen in den Testprofilen und im Testfeld

Zur Beobachtung der Wattveränderungen während des Deichbaues in der Meldorfer Bucht und der nachfolgenden Entwicklung hatte das Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide sieben Teststreifen ausgepflockt, auf denen ab 1974 durch das Dezernat Gewässerkunde in Büsum in jährlichem Abstand Höhenmessungen durchgeführt und Proben entnommen wurden.

Die von 1976 bis 1980 in jährlichem Abstand entnommenen Proben sind im Deutschen Hydrographischen Institut bearbeitet worden (FIGGE, 1983). Aus diesem Bericht sind die Abbildungen 16 und 17 entnommen. Am Beispiel des Profiles 2 zeigt sich, daß bei dem gewählten zeitlichen Abstand der Probenentnahmen keine Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung sichtbar wurden.

Für die weitergehenden Untersuchungen im Schlickprogramm des KFKI wurden aus diesen sieben Teststreifen 3 Profile ausgewählt, die von November 1977 bis August 1980 in ungefähr monatlichen Abständen untersucht und in der Regel auch beprobt wurden.

Das südlichste der drei Testprofile (Profil 3 in diesem Bericht = Profil 7 in der Zählung des ALW Heide bei den Untersuchungen über die Auswirkungen des Deichbaues und in Abb. 16) verläuft von der Küste nördlich des Helmsander Dammes mit Ost-West-Richtung durch den heutigen Speicherkoog Nord und quert den Deich und die vorgelagerte Sandplate bis zum Rand des Sommerkoog-Steertloches. Es hat eine Länge von 9 km.

Die Profile 1 und 2 in diesem Bericht entsprechen den gleichen Nummern in der Zählung des ALW Heide und liegen mit je etwa 1 km Länge im Watt vor Deichhausen östlich von Büsum (Abb. 16).

Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich bald, daß diese drei Testprofile für die Beantwortung vieler Fragen nicht ausreichten, weil zahlreiche Beobachtungen ohne gleichzeitige Betrachtung einer zusammenhängenden Fläche nicht sicher interpretierbar waren. Deshalb wurde das Gebiet zwischen den Profilen 1 und 2 als Testfeld ausgewählt, und die Detailarbeiten wurden auf dieses konzentriert.

Nachstehend werden zunächst die Untersuchungsergebnisse aus den Testprofilen im Hinblick auf die zeitliche Veränderlichkeit der Sedimentbedeckung des Watts in der Meldorfer Bucht erläutert, danach die Arbeiten im Testfeld.

7. Testprofile

Die Sedimentzusammensetzung im Bereich der Profile ist bis zu einer Tiefe von 2 m durch Bohrsondierungen kartiert worden. Die Sedimente der Profile 1 und 2 wie auch eines großen Teils des 3. Profils (westlich des neuen Deiches) werden überwiegend aus Wattsanden aufgebaut, in die einzelne Schlicksandlagen und selten auch Schlick eingeschaltet sind. Östlich des neuen Deiches nimmt im Profil 3 der Anteil feinkörniger Sedimente in Landrichtung deutlich zu.

Schon das ab November 1977 geführte Geländeprotokoll über die Testprofile macht die vielfältigen, oft sehr kleinräumigen Veränderungen der Wattoberfläche deutlich. In das Protokoll wurde auch die Wetterentwicklung in der Woche vor der Geländearbeit aufgenommen, um deren Einfluß auf Morphologie und Sedimentzusammensetzung erfassen zu können. Eine Kurzfassung der Feldbuchaufzeichnungen wird in Tab. 4 dargestellt.

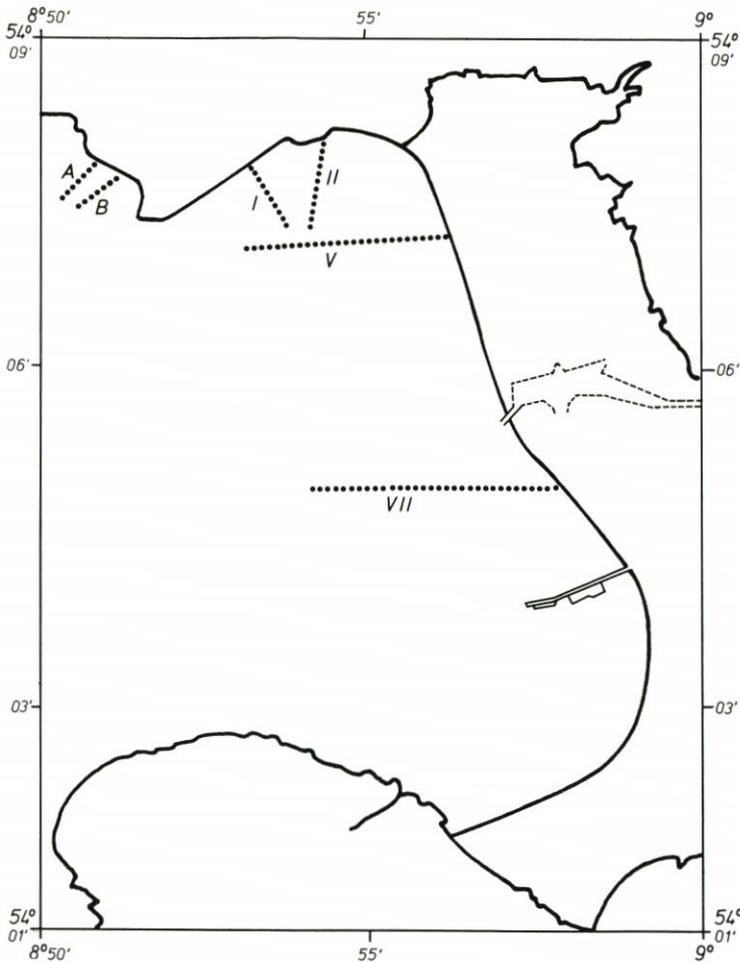


Abb. 16. Lage der Testprofile (aus FIGGE, 1983)

Profil II

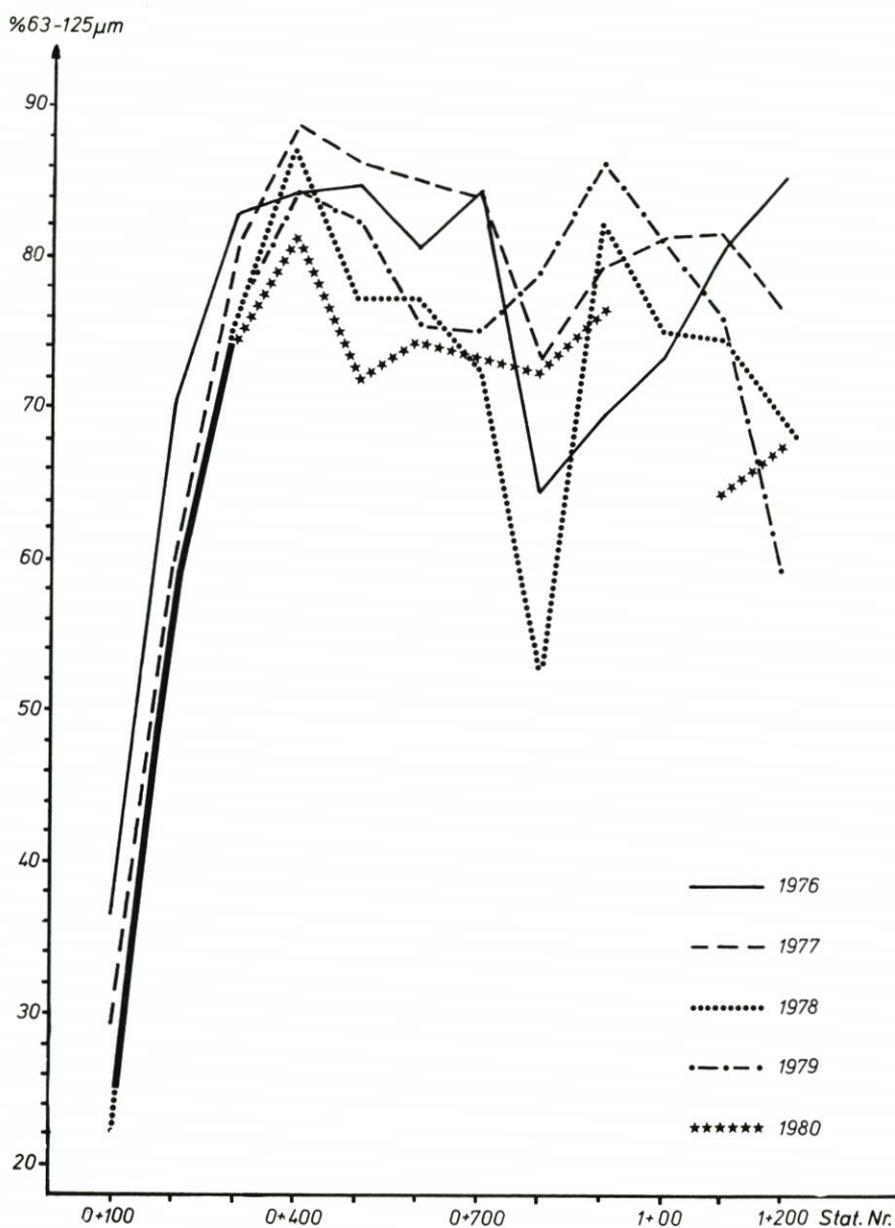


Abb. 17. Anteile der Krongrößen 0,063 bis 0,125 mm im Profil 2 in den Jahren 1976 bis 1980 (aus FIGGE, 1983)

Nach den Beobachtungen im Gelände haben die verschiedenen Wetterlagen starke Auswirkungen auf die Wattoberfläche. Ruhige, stabile Wetterlagen führten oft zu einer vermehrten Sedimentation in den geschützteren Bereichen. Diese jungen Sedimente waren vor allem an ihrer besonders geringen Lagerungsdichte zu erkennen. Stürmisches Wetter dagegen brachte meistens eine stärkere Umlagerung und oft auch Erosion mit sich.

Tabelle 4
Kurzfassung der Geländeprotokolle in Tabellenform

Monat	Profil	Wetterlage in der Woche vorher	sichtbare Veränderungen
Anf. Nov.	1, 2, 3	Einführung (keine Probennahme)	
Nov. 77	1, 2 3	stürmisch ruhig, Ostwind	wenig gelockerter Schlick
Dez. 77	1, 2, 3	ruhig – wechselhaft	etwas Sedimentation
Jan. 78	3 1, 2	stürmisch (W-SW) ruhig und kalt, Eis auf Profil 2	wenig Eis, Erosion keine Veränderungen
Feb.	3 1, 2	wechselhaft ruhig und kalt, viel Schnee	neuer Priel seeseitig, Erosion landseitig viel Eis auf dem Watt, Treibeisproben!
März	3 1, 2	ruhig und sehr kalt stürmisch (W)	geschlossene Eisdecke Reste der Eisschlickdecke noch vorhanden
April	1, 2 3	stürmisch, 2–6 °C	neuer Schlick im Profil 2 seeseitig auffallende Prielverlagerungen, Aufschlickung landseitig
Mai	1, 2 3	starke Ostwinde, kalt	keine Veränderungen seeseitig weitere Prielverlagerungen und Erosion
Juni	1, 2 3	stabile Wetterlage, 15–20 °C	Sedimentation auf Profil 1 seewärts deutliche Sedimentation, weitere Eintiefung von neuem Priel
Juli	1, 2, 3	stürmisches Wetter	schwache bis starke Erosion auf allen Profilen
Aug. 78	1, 2, 3	ruhig, warm	keine Veränderungen
Sept.	1, 2 3	stürmisch	keine Veränderungen landseitig trocken, Deichschluß
Okt.	1, 2 3	wechselhaft	Erosion besonders im Profil 2 seeseitige Fläche zwischen den 2 großen Prielen sehr stark erodiert (Mya in Lebendstellung)
Nov.	1, 2 3	ruhig	geringe Sedimentation Erosion nimmt seeseitig weiter zu
Dez.	1, 2, 3	starke Ostwinde, –9 °C	Wattflächen dick vereist

(Fortsetzung Tabelle 4)

Monat	Profil	Wetterlage in der Woche vorher	sichtbare Veränderungen
Jan. 79	1, 2, 3	Eis! 2,5 m hoch, -7 °C	Eisschlick
März	1, 2, 3	ruhig, ± 1 °C, Eis abtauend (noch 1 m dick)	Eisschlick
April	1, 2, 3	stürmisch	Eisschlick wieder erodiert, starke Erosion Profil 3
Juni			weitere Erosion Profil 3
Juli	1, 2, 3	stürmisch, 15-17 °C	weitere Erosion Profil 3
Jan. 80	1, 2 3	ruhig	Eisbedeckung, wenig Eisschlick etwas Erosion
Juli	1, 2 3	wechselhaft, kühl	etwas Sedimentation (Deichnähe) keine Veränderungen
Aug.	1 2	wechselhaft	keine Veränderungen Aufschlickung in Deichnähe

Bei jeder Begehung wurden Proben entnommen. Die Labordaten zeigen, daß sich die Zusammensetzung der Korngrößenverteilungen entlang der Profilstreifen trotz extremer Wetterlagen und baulicher Eingriffe auch bei Anwendung dieses zeitlich und räumlich dichten Netzes von 1977 bis 1980 nicht wesentlich verändert hat. Eine Ausnahme stellt das 3. Profil beiderseits des neuen Seedeiches dar. Hier bilden sich in den Kornverteilungskurven klare Veränderungen ab.

Auf dem landseitigen, östlichen Teil des 3. Profils war mit dem fortschreitenden Deichbau auch eine deutliche Zunahme des Schluff- und Tonanteiles in der Sedimentzusammensetzung verbunden. Im seewärtigen Teil des 3. Profilstreifens tiefen sich zwei größere Priele, die das Profil queren, vor allem nach dem Deichschluß deutlich ein. Muschelfelder wurden freigelegt, und die Sedimentverteilung veränderte sich in der Nachbarschaft der Priele ständig.

An den Rändern des Testfeldes hat sich die Sedimentverteilung auf dem ersten Profilstreifen bei Büsum im Beobachtungszeitraum nicht signifikant verändert, während auf dem 2. Teststreifen bei Deichhausen eine geringe Aufschlickung von etwa 10 cm in Deichnähe zu beobachten war. Diese Verschiebung von Faziesgrenzen hat sich im Laufe des Jahres 1980 auch im Testfeld fortgesetzt, so daß sich bei Betrachtung gleicher Sedimenttypen gelegentlich zwischen den Positionsnummern bis 1979 und den Nummern für 1980 Abweichungen ergeben.

Stürme hatten jedoch auf etwas tiefergelegene, von *Cardien* besiedelte Flächen, die sich z. B. in der Nachbarschaft des 2. Profiles finden, stärkere Auswirkungen. Diese Flächen wurden in den letzten drei Jahren bei stürmischem Wetter mehrfach freigelegt, und das Korngrößenspektrum verschob sich jedesmal vom schlickigen Schlicksand zum sandigen Schlicksand.

Alle auf den Profilen entnommenen Proben wurden mit den schon beschriebenen Verfahren der Klassifikationsanalyse untersucht. Hierbei wurde besondere Aufmerksamkeit darauf gelegt, ob und in welchem Umfange jahreszeitliche Schwankungen in den Korngrößenverteilungen auf den Teststreifen eintreten.

Aus dem Vergleich der Daten aus den drei untersuchten Jahreszeiten Winter, Sommer und Herbst lassen sich nachstehende Ergebnisse ableiten: Der prozentuale Anteil feinerer Korngrößen liegt bei den Winterproben in den Wattsedimenttypen Wattsand 3, Schlicksand 1, Schlicksand 2, Schlicksand 3 deutlich niedriger als in den entsprechenden Sedimentklassen der Sommer- und Herbstproben. Die Werte der Sommer- und Herbstprofile unterscheiden sich in diesen Klassen untereinander nur geringfügig.

Die Wattsandklassen weisen von Jahreszeit zu Jahreszeit etwas größere Unterschiede auf. Der Vergleich von Wattsandklassen erbrachte auch bei der großen Flächenkartierung in der Meldorfer Bucht die höchsten Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten (große Standardabweichungen). Ein Grund dafür ist, daß die Wattsandflächen von ihrer Lage her viel stärkeren hydromechanischen Kräften ausgesetzt sind und damit auch schnelleren und vielfältigeren Veränderungen unterliegen als die geschützteren schlickreicheren Gebiete.

Im Jahresgang treten charakteristische Verschiebungen in der Lage der Sedimentzonen auf, die auf von Jahreszeit zu Jahreszeit wechselnde Sedimentations- und Erosionsbedingungen hinweisen. Darüber hinaus ergab sich im Sommer 1980 teilweise eine Verschiebung gegenüber den Vorjahren.

Insgesamt zeigt sich jedoch, daß die Sedimentverteilung in den Profilen 1 und 2 (= Grenzen des Testfeldes) trotz extrem schwerer Wetterlagen und trotz der Deichbaumaßnahmen über kurzzeitige Schwankungen hinaus nur wenig veränderlich war. Nur im landnäheren Teil von Profil 3 sind deutliche Verschiebungen in der Sedimentzusammensetzung sichtbar, die auf Auswirkungen der Baumaßnahmen im Profilbereich zurückzuführen sind.

8. Das Testfeld östlich von Büsum

8.1 Sedimentverteilung im Testfeld

Im Testfeld östlich von Büsum wurde die Zusammensetzung des Sediments der obersten 2 m mit Hilfe von 125 Bohrsondierungen untersucht. In schlickigem Sediment wurde für die Bohrsondierungen eine „Pürkhauerspitze“ benutzt, deren Hohlkerbe einen Durchmesser von ca. 2 cm besitzt und deren unteres Ende offen ist. Für sandigeres Sediment war der Einsatz einer dünneren Bohrspitze mit ca. 1 cm breiter Hohlkerbe und geschlossener Spitze sinnvoller, da ein nasser Feinsand aus der breiten Pürkhauerspitze wieder herausfließt und eine Schichtenaufnahme unmöglich macht. Die Bohrspitzen haben eine Länge von einem Meter und können mit weiteren Stahlstangen verlängert werden.

In den Bohrprotokollen wurde außer dem Schichtenverzeichnis auch die Lagerungsdichte und die Färbung des Sediments vermerkt. Der Schillgehalt wurde in *Hydrobia*-Schill und anderen Schill getrennt.

Die Ergebnisse der Grobansprache der Oberflächensedimente, des Materials in 90–100 cm Tiefe und in 190–200 cm Tiefe, wurden auf drei Karten dargestellt (Abb. 18, 19 u. 20). Der Vergleich dieser Grobansprache-Karten zeigt, daß in 2 m Tiefe Schlicksande und auch Schlick eine größere Verbreitung besitzen als in 1 m Tiefe und an der Oberfläche. Das schlickreiche Zentrum kennzeichnet auf allen drei Karten die Position eines inzwischen weitgehend aufgefüllten Baggerlochs.

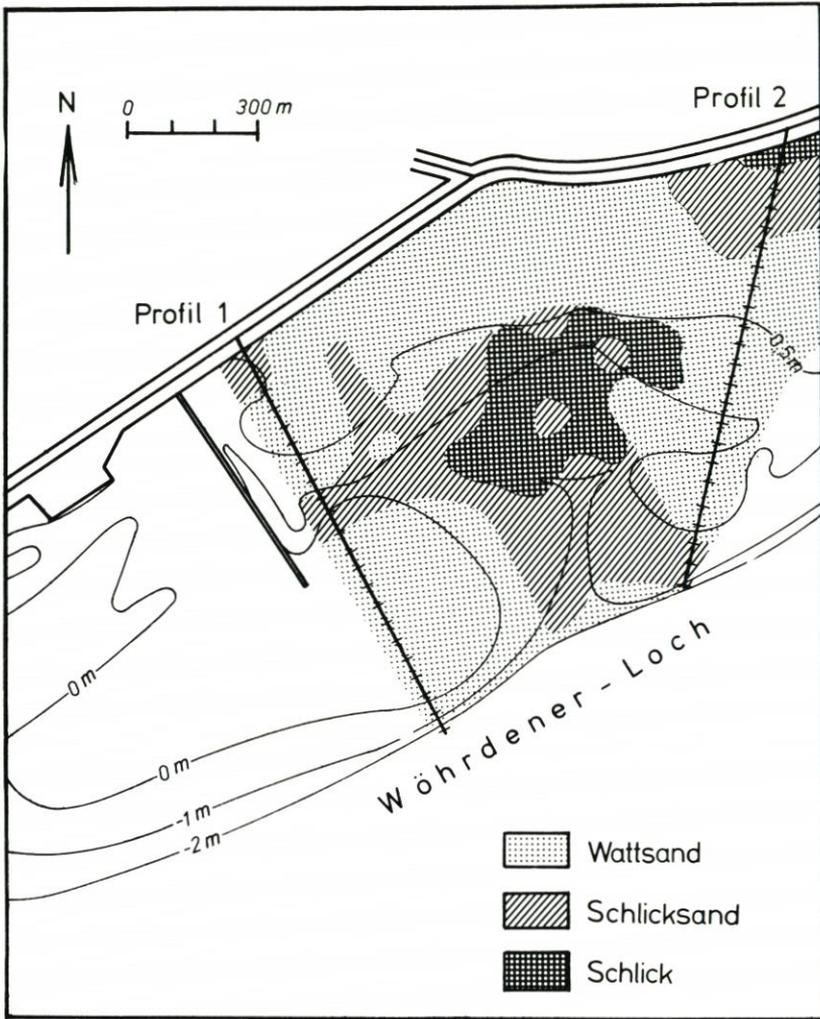


Abb. 18. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 0,0 – 0,10 m Tiefe

Die Auftragung der Lagerungsdichte, die bei der Rammsondierung nach dem Eindringwiderstand ermittelt wurde, ergab zusätzliche Informationen über den Aufbau der Wattgebiete des Testfelds. In einer Kartendarstellung wurden Flächen dichter, mittlerer und lockerer Sedimentlagerung unterschieden (Abb. 21). Weitere Untersuchungen zur Lagerungsdichte der Sedimente im Testfeld finden sich im Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau (1981) und in dem Beitrag von RECHLIN in diesem Heft.

Die stärkste Sedimentverdichtung wurde im Vorfeld des Deiches angetroffen. Mit der Ausnahme eines kleinen Feldes auf dem 2. Profil bestehen die Sedimente stärkster Verdichtung stets aus Wattsanden. Sedimente mittlerer Dichte konzentrieren sich ebenfalls meist auf das Vorfeld des Deiches. Kleinere Partien liegen über das restliche Testfeld verstreut.

Zum großen Teil wird der Eindringwiderstand der verstreut liegenden kleinen Areale mittlerer Dichte von *Hydrobia*-Schillagen in 5–50 cm Tiefe beeinflusst. Auf dem 2. Profil wird der Zusammenhang zwischen Sedimentdichte bzw. Eindringwiderstand und dem Schillgehalt

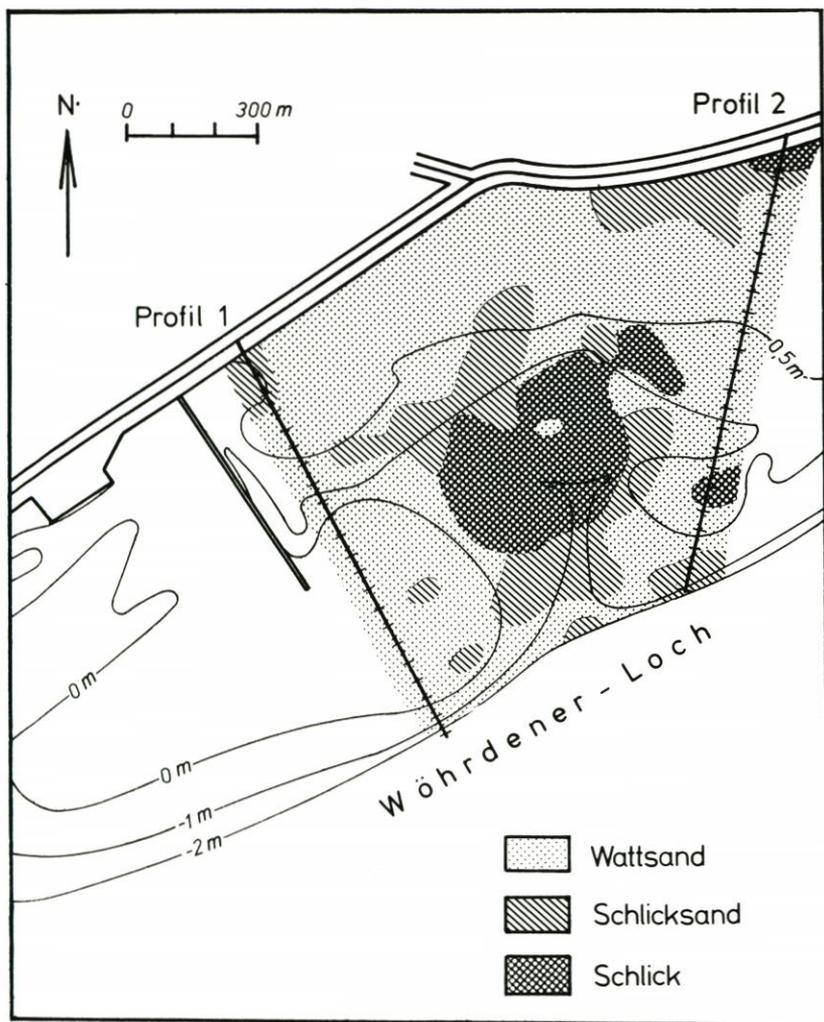


Abb. 19. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 0,90 – 1 m Tiefe

besonders deutlich. Hier führte der hohe Schillanteil sogar in schlickigem Sediment zu der Angabe „dichtes Sediment“.

Prozentanteile von Korngrößen $< 50 \mu\text{m}$, $< 63 \mu\text{m}$ und $> 125 \mu\text{m}$ (Abb. 22, 23 u. 24): Entsprechend den Ergebnissen der großflächigen Darstellungen der Meldorfer Bucht ähnelt die Verteilung der Korngrößen $< 50 \mu\text{m}$ der Grobansprache-Karte am meisten, da auch hier eine Dreierstufung der Sedimentaufteilung gewählt wurde. Die $< 50\text{-}\mu\text{m}$ -Karte zeigt eine etwas geringere Flächenausdehnung des Schlicks und eine entsprechend größere des Schlicksandes.

Eine noch großflächigere Angabe von Schlicksandflächen zeigt die vierfach gestufte Darstellung der Korngrößen $< 63 \mu\text{m}$. Nach dieser Auftragsart nehmen die beiden Schlicksandstufen (10–25 und 25–50 % $< 63 \mu\text{m}$) den größten Teil der Testfeldflächen ein. Schlick ist nach der Korngrößendefinition (mehr als 50 % $< 63 \mu\text{m}$) nur in kleinen Arealen des Baggerlochs und im Spartinagrassfeld am Deichfuß im Osten des Testfelds anzutreffen.

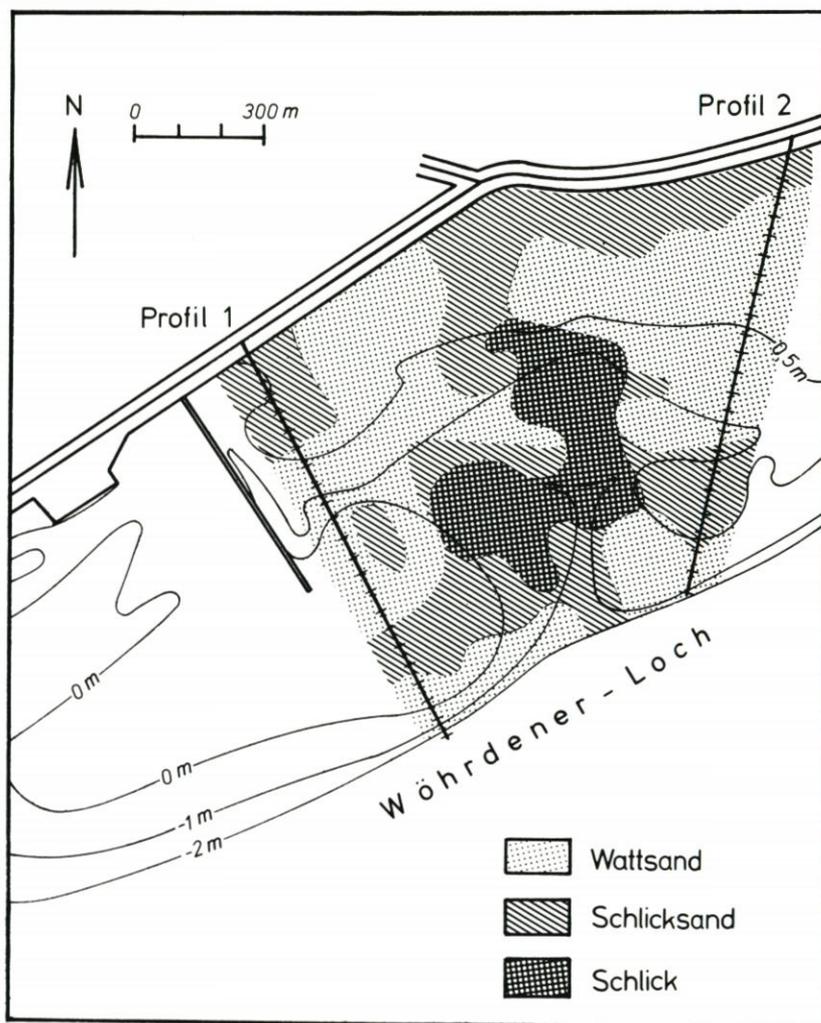


Abb. 20. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 1,90 – 2 m Tiefe

Der Unterschied zwischen Grobsprache im Gelände und Laboranalyse der Korngrößenverteilungen ist im Bereich des Baggerlochs besonders auffällig. Nach der Definition von SINDOWSKI (1973) ist das locker gelagerte, leicht bindige Sediment eindeutig als Schlick zu bezeichnen.

In der Kartendarstellung des Prozentanteils $> 125 \mu\text{m}$ wurde die Stufung der Prozentanteile im Bereich der Wattsande enger gewählt als auf der Übersichtsdarstellung der Bucht, da Sedimente mit einem größeren Anteil $> 125 \mu\text{m}$ im Testfeld nicht auftreten. Die geschützten Bereiche des Baggerlochs, die von der NN-Linie begrenzt werden, enthalten Sedimente mit einem geringen Prozentsatz (0–5 %) $> 125 \mu\text{m}$. Auch die Stillwassergebiete der von Vegetation bedeckten oder von Lahnungen gesicherten Gebiete weisen entsprechende Anteile auf.

Nur zwei Teilgebiete des Testfeldes besitzen Sedimente mit einem Prozentsatz von mehr als 20 % $> 125 \mu\text{m}$. Ein Vergleich mit den Häufigkeitsverteilungen dieser Gebiete zeigt, daß dort zweigipfelige Kornverteilungen vorherrschen.

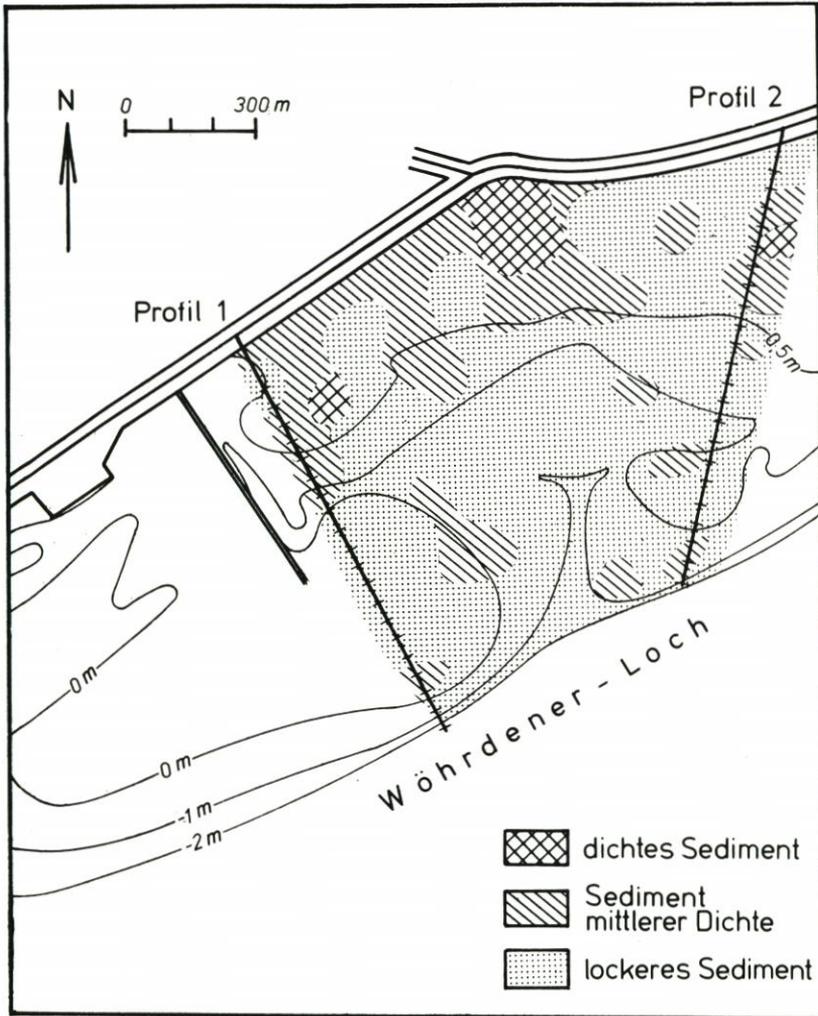


Abb. 21. Testfeld bei Deichhausen. Sedimentdichte in 0 – 30 cm Tiefe

Verteilung von Mittelwerten verschiedener Parametersysteme: Bei den vergleichenden Darstellungen der Sedimentverteilung im Testfeld wurde als einziger Parameter des Quartilsystems der Medianwert verwendet.

Die Medianwerte-Karte zeigt einen sehr ähnlichen Grenzverlauf der verschiedenen Sedimenttypen wie die Karte der Prozentanteile $< 63 \mu\text{m}$. Zusätzlich zu dieser scheidet sie ein Erosionsgebiet auf der seewärtigen Hälfte des ersten Profils aus. Die Medianwerte des Quartilsystems waren viel besser als die Mittelwerte des Momentensystems dazu geeignet, Schlickgebiete und Flächen von Schlicksanden mit korrekten Verbreitungsgrenzen darzustellen. Auch die Gliederung von Wattsand- und Schlicksandflächen wurde durch die Medianwerte vollzogen.

Die aussagereichsten Mittelwertkarten von Wattsedimenten konnten mit Hilfe des hydraulischen Mittelwerts nach BAGNOLD (1968) gezeichnet werden. Dieser Mittelwerttyp ermöglicht eine Kartendarstellung, die der $< 63\text{-}\mu\text{m}$ -Karte gut entspricht, aber noch einige

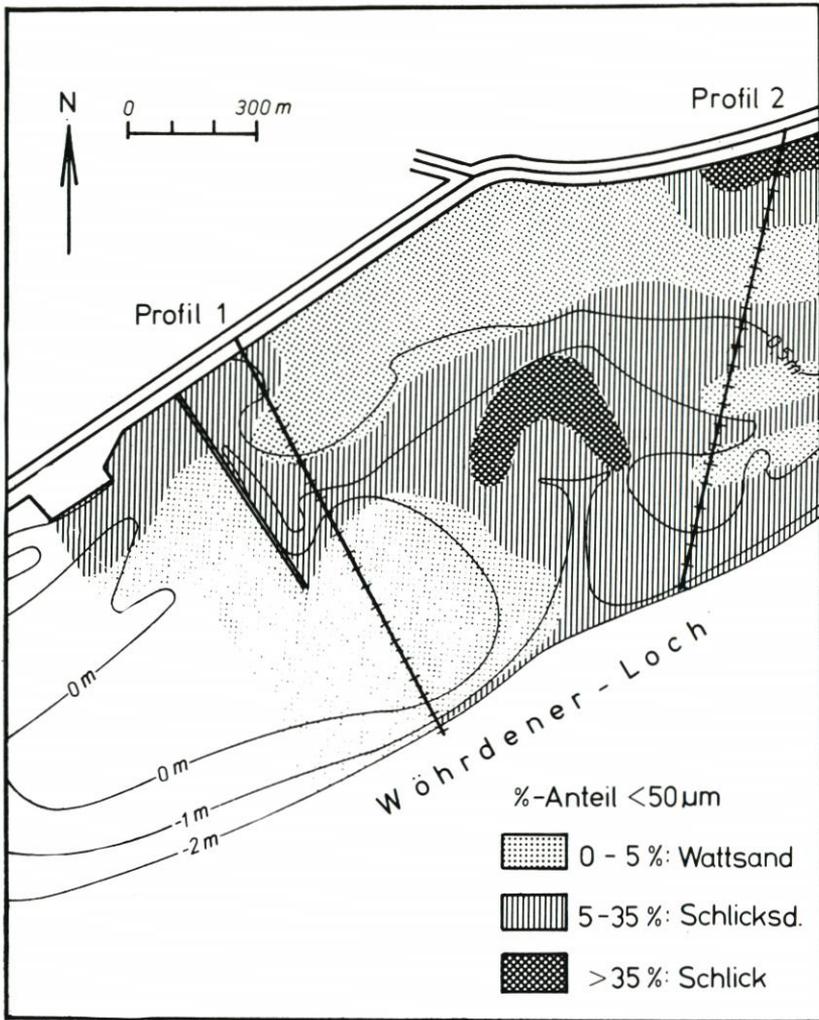


Abb. 22. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil $< 0,05 \text{ mm}$

zusätzliche Informationen enthält. Die hydromechanisch besonders beanspruchten Bereiche des Testfeldes treten noch deutlicher hervor als bei den Quartil-Medianwerten und bei der mit den %-Anteilen $> 125 \mu\text{m}$.

8.2 Sedimenttypen im Testfeld

Für die Typisierung der Wattsedimente im Testfeld wurden, abweichend von der großräumigen Kartierung, nur die Momentenparameter (MIW, SDV, SCH, KURT) benutzt. Obwohl auch im Testfeld die Klassifikation mit den Momentenparametern keine Trennung der Schlicksandklassen 1 und 2 ermöglicht, entspricht die resultierende Karte doch besser den natürlichen Verhältnissen als die Einzeldarstellungen der verschiedenen Sedimentparameter (Abb. 25).

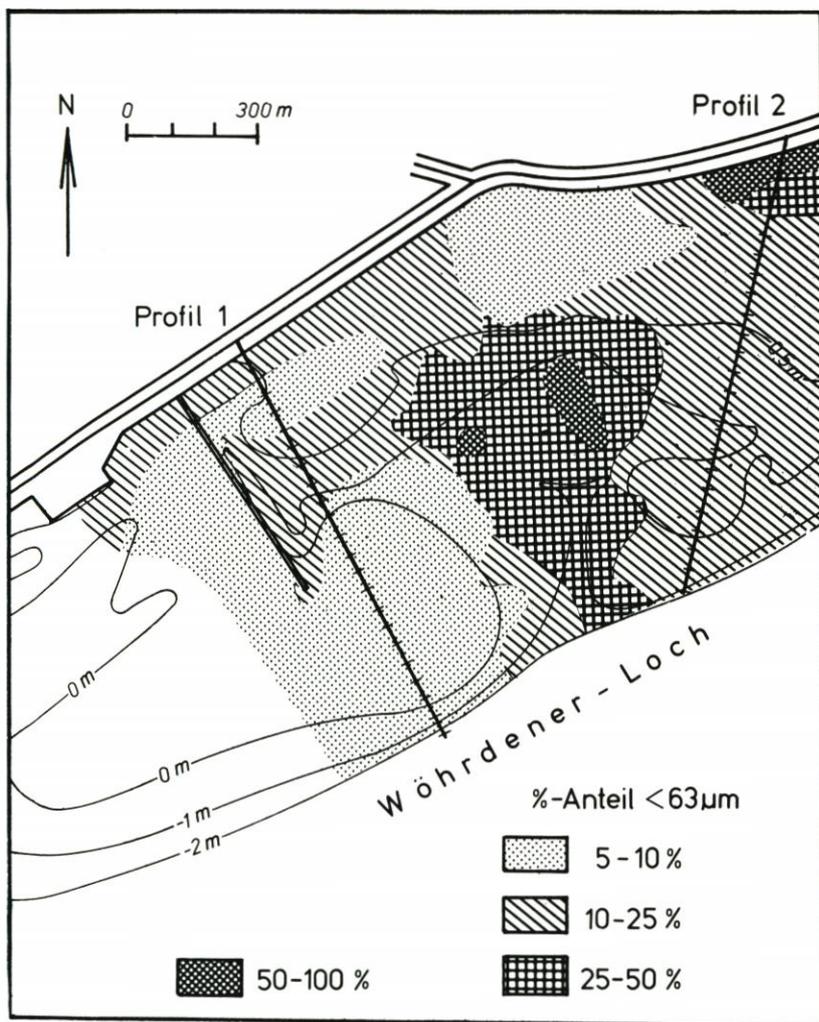
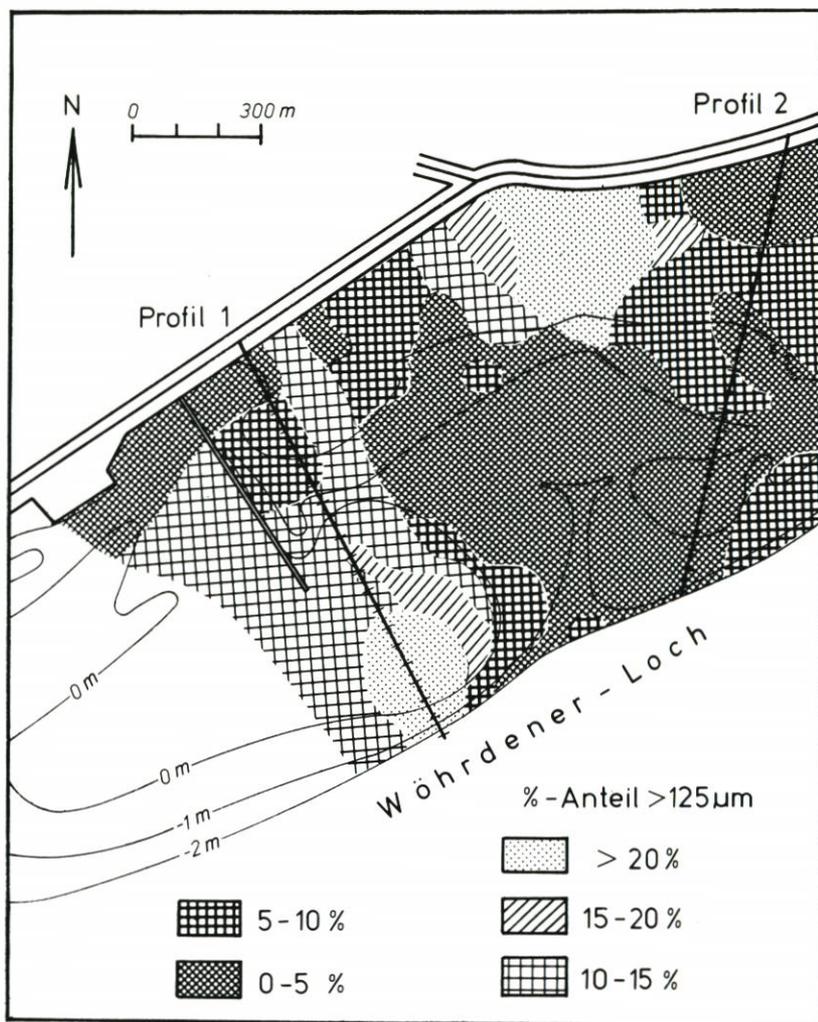


Abb. 23. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil $< 0,063 \text{ mm}$

Im Westen des Testfeldes befindet sich in Lee einer Buhne ein schlickiges Sediment (Schlicksand 3). Ein südlich davon gelegenes Sandwattgebiet wird von einer Wattsandklasse eingenommen, die typisch für starke Umlagerungsintensitäten ist (Wattsand 2).

Solche Wattsande finden sich auch vor dem Deich, etwa in der Mitte zwischen beiden Profilen (Badestrand). Zu beiden Seiten dieses Vorkommens erstrecken sich in einer etwa 300 m breiten Zone vor dem Deich Wattsande des Typs „Wattsand 3“. Beim 2. Profil rahmen diese Sande ein Schlickgebiet ein, das sich in einem Spartinasrasfeld gebildet hat. Auch seawärts des von schlickigen Sedimenten angefüllten Baggerlochs im Zentrum des Testfeldes bilden die Wattsande des Typs „Wattsand 3“ einen schmalen Streifen, der in der Osthälfte des Testfeldes in Richtung Wöhrdener Loch von schlickigen Sedimenten abgelöst wird. Im Gebiet des ehemaligen Baggerlochs verteilen sich die schlickigen Sedimente der Wattsedimenttypen „Schlicksand 1 und 2“, „Schlicksand 3“ und „Schlick 1“ entsprechend den morphologischen Gegebenheiten.

Abb. 24. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil $>0,125\text{ mm}$

Die Wattsande und sandigen Schlicksande von Gebieten, in denen keine stärkere Umlagerungsaktivität nachzuweisen war, besitzen stets eingipfelige Verteilungen. Kornverteilungen mit höheren Schlickanteilen zeigen bei ca. 4 PHI° ($63\ \mu\text{m}$) einen Knick in der Häufigkeitskurve. Bei Schlickten, zum Beispiel im zweiten Profil in Deichnähe, deutet sich ein zweites Maximum im Grobschluffbereich an. Deutliche bimodale Verteilungen besitzen Wattsande von hydromechanisch stärker beanspruchten Gebieten auf der Südhälfte des ersten Profils und im Norden des Testfeldes zwischen den beiden Profilen.

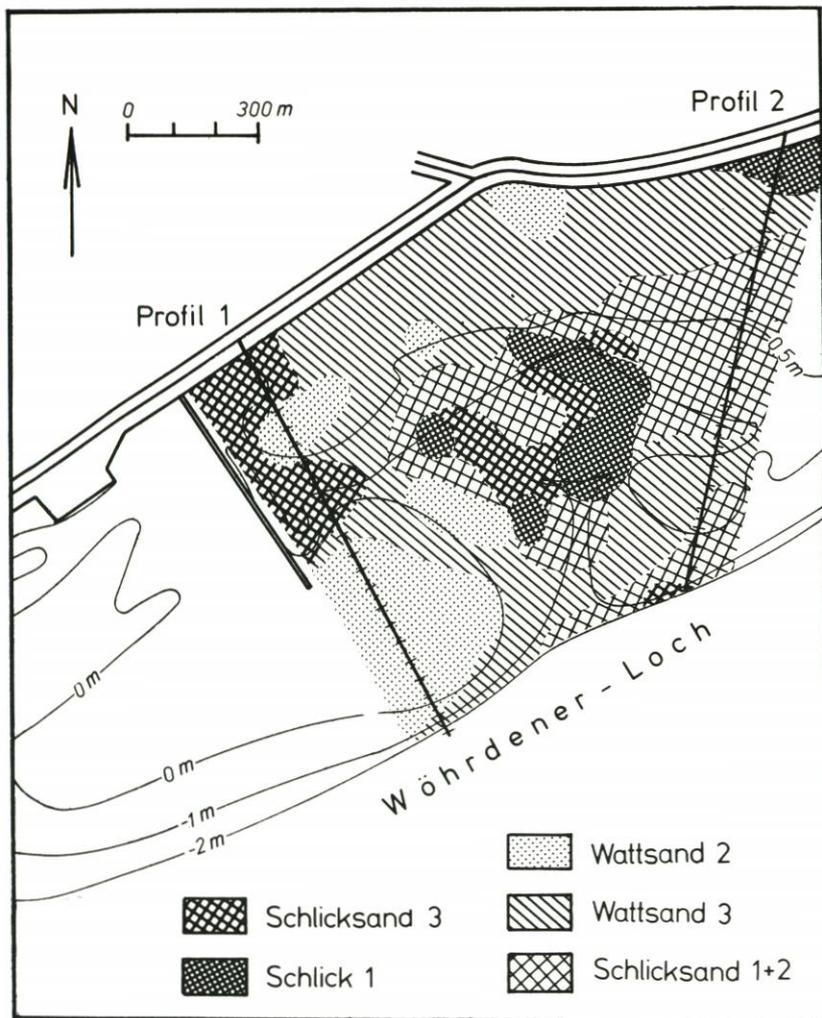


Abb. 25. Testfeld bei Deichhausen. Karte der Wattsedimenttypen (Momentenparameter klassifiziert nach VOGEL, Programm YHAK-KDIAG)

9. Schwebfracht, Sedimentation und Biodeposition

9.1 Suspensionsmessungen

9.1.1 Messungen in den Jahren 1978 und 1979*)

In den Jahren 1978 und 1979 wurden während vier Tiden von der Meßplattform aus und an der Hafenschleuse Büsum Suspensionsproben entnommen, die neben einer Bestimmung der Suspensionskonzentration zur Materialgewinnung für geochemische Untersuchungen

*) Auszug aus dem Bericht des Geologischen Instituts der Universität Hamburg

bestimmt waren und im Bericht des Geologischen Instituts der Universität Hamburg näher beschrieben werden.

Die Mittelwerte der Suspensionskonzentrationen dieser vier Tiden zeigen große Differenzen zwischen den einzelnen Probenreihen. Diese waren in erster Linie vom Wind abhängig.

Der Suspensionsgehalt ändert sich außerdem in charakteristischer Weise mit der Tide. Am 21. 6. 1979 sank der Suspensionsgehalt von 80 mg/l im „ersten Wasser“ auf unter 30 mg/l zur Zeit der Flut. Im „letzten Wasser“ erhöhte sich die Konzentration noch einmal auf 37 mg/l. Diese starke Asymmetrie der Suspensionskurve zeigt, daß der Suspensionsgehalt nicht allein eine Funktion der Überströmungsgeschwindigkeit ist. Allerdings ist auch die Tidenkurve am Meßpunkt merklich asymmetrisch, und entsprechend dürfte das auflaufende Wasser eine etwas höhere Geschwindigkeit haben als das ablaufende.

Die von der Suspensionskurve gezeigte Asymmetrie ist jedoch weit stärker als die der Tidenganglinie. Die sehr hohen Suspensionsgehalte zu Beginn der Überflutung sind vielmehr im Zusammenhang mit den hydrochemischen Daten erklärbar: Die während der Ebbe von Diatomeen und anderen Algen auf der Wattoberfläche erzeugten Sauerstoffbläschen sind durch freigesetzte organische Substanzen an den Schlickpartikeln festgeklebt und heben die Diatomeenfelder mitsamt anhaftenden Partikeln von der Wattoberfläche ab, sobald das erste Wasser sie erreicht und ihnen Auftrieb verleiht („Bläschen-Lifting“).

9.1.2 Messungen im Jahre 1980

Ergänzend zu den Suspensionsmessungen für geochemische Untersuchungen wurden am 10. Juli 1980 in der Nähe der Position 54 (Grenzbereich des Schlickgebiets im Testfeld) von einem Boot aus weitere Proben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Schwebfracht entnommen. An der gleichen Stelle erfolgten auch die Untersuchungen über die Bindung der Schwebfracht in Kotpillen (vgl. Abschn. 9.3).

Um mit den Sedimentanalysen vergleichbare Messungen durchführen zu können, werden größere Menge (1 g) Schwebfracht pro Probe benötigt. Die Wassermenge betrug jeweils etwa 60 l, um eine genügende Schwebfrachtmenge zu erhalten. Untersucht wurde nur der Suspensionsgehalt der oberen 30 cm der Wassersäule. Die Entnahmezeiten lagen 1,5 Stunden vor Hochwasser, bei HW und wiederum 1,5 Stunden nach HW. Die Probenentnahme erfolgte bei ruhigem Wetter (ca. Windstärke 3).

Entsprechend den Messungen von KEMPE (vgl. 8.1) wurden im Flutwasser deutlich höhere Schwebfrachtgehalte als zur Hochwasserzeit und den wieder erhöhten Gehalten bei Ebbe festgestellt. Der Suspensionsfrachtgehalt lag jedoch während der Ebbephase im Verhältnis beträchtlich höher als bei Hochwasser. Eineinhalb Stunden vor Hochwasser wurde ein Gesamtgehalt von 57 mg/l, zur Hochwasserzeit nur 18 mg/l und bei Ebbe, eineinhalb Stunden später, eine Menge von 41 mg/l gemessen.

Der Hauptanteil der Suspensionsfracht liegt im Bereich von Korngrößen $< 2 \mu\text{m}$ ($> 9 \text{ PHI}^\circ$). Der Feinsiltanteil $< 31 \mu\text{m}$ ($> 5 \text{ PHI}^\circ$) ist nur in sehr kleinen Prozentsätzen vertreten. Den größten Anteil an Korngrößen im Grobschluff- und Feinsand-Bereich ($> 31 \mu\text{m}$ [$< 5 \text{ PHI}^\circ$]) besitzt das Suspensionsmaterial des Flutwassers. Bei Stauwasser, zur Hochwasserzeit, besteht dagegen nur ein Viertel der Schwebfracht aus Material dieser Korngrößenklassen. Bei ablaufendem Wasser steigt der Prozentsatz gröberer Materials ($> 31 \mu\text{m}$) dagegen wieder erheblich an. Der mit der Pipette-Analyse nicht erfassbare Korngrößenbereich $> 63 \mu\text{m}$ ($< 4 \text{ PHI}^\circ$) konnte wegen der sehr geringen Materialmengen nicht in weitere Fraktionen

aufgeschlüsselt werden. Es besitzt aber ohnehin über dem schlickreichen Gebiet nur einen sehr kleinen Anteil am Korngrößenspektrum der Suspensionsfracht (vgl. WOHLBERG, 1953).

Insgesamt lassen sich die im Testfeld bei Büsum gemessenen Sinkstoffmengen sehr gut mit denen von PETERSEN (1941) zwischen Pellworm und Südfall vergleichen. Dort ergab sich eine Streubreite von wenigen mg/l bis 53 mg/l und ein Mittelwert von 25 mg/l. Die Proben der zitierten Werte wurden ebenfalls unter der Wasseroberfläche entnommen. PETERSEN (1941) hat auch die Schwebfracht verschiedener Tidephasen auf dem Watt untersucht und maß bei Flut 20–40 mg/l, bei Hochwasser 12–19 mg/l und bei Ebbe 5–30 mg/l Schwebfracht. Auch er stellte also eine starke Abnahme des Schwebstoffgehaltes bis zum Hochwasser mit einer anschließenden etwas schwächeren erneuten Zunahme fest.

9.2 Sedimentation der Schwebfracht nach bisheriger Auffassung

Da Schwebfrachtmessungen verschiedener Wattgebiete bei Ebbe stets geringere Werte ergeben als bei auflaufendem Wasser, liegt der Schluß nahe, daß ein Teil der Schwebfracht in landnäheren Gebieten abgelagert oder über andere Wege wieder in die größeren Watttrinnen zurückgeführt wird.

Nach den Ergebnissen von POSTMA (1961) sinkt gegen Hochwasser ein großer Teil des Materials zu Boden und kann bei ablaufendem Wasser erst nach Erreichen höherer Strömungsgeschwindigkeit wieder suspendiert werden. Daraus ergibt sich ein Überwiegen des landwärts gerichteten Flutstrom-Transportes. Die nachstehend beschriebenen Ergebnisse lassen jedoch Zweifel an der Übertragbarkeit auf die Meldorfer Bucht aufkommen.

9.3 Mikroskopische Untersuchung von kotpillenbedeckten Wattoberflächen*)

Mit diesem Teil der Untersuchungen wurde angestrebt, das Ausmaß der Biodeposition sowie die Größe von „fecal pellets“ im Testfeld Büsum zu bestimmen und die Kotpillen mit den im Labor ermittelten Korngrößenverteilungen zu vergleichen. So sollte der Einfluß der Festlegung sehr feiner Suspensionspartikel in den sehr viel größeren Kotpillen geklärt werden. Diese Arbeiten erfolgten an drei Positionen (53, 54 und 55) im Testfeld. Hier fanden sich 1979 die Sedimenttypen „Wattsand 3“ (Position 53), „Schlicksand 2“ (Position 54) und „Schlick 1“ (Position 55).

Mit großer Vorsicht wurden sechs möglichst ungestörte Oberflächenproben entnommen und sofort in der nahegelegenen Außenstelle des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide in Büsum untersucht. Mit Hilfe eines Binokulars wurden die noch intakten Oberflächen der Sedimentproben im frischen Zustand mit verschiedenen Vergrößerungsstufen fotografiert. Die größte Anzahl an der Oberfläche meßbarer Teilchen innerhalb einer geschlossenen Fläche betrug 269. Die geringste Anzahl, die noch zur Auswertung herangezogen wurde, bestand aus 149 Kotpillen.

Die Auswertung der Fotografie einer natürlichen Oberfläche hat stets den Nachteil, daß nur die Teile der Partikel gemessen werden können, die an der Oberfläche sichtbar sind. Bei

*) Ergänzende Untersuchungen an Dünnschliffen von gehärteten Profilen der oberen 5 cm des Wattsediments werden im Abschnitt 10.4 dargestellt.

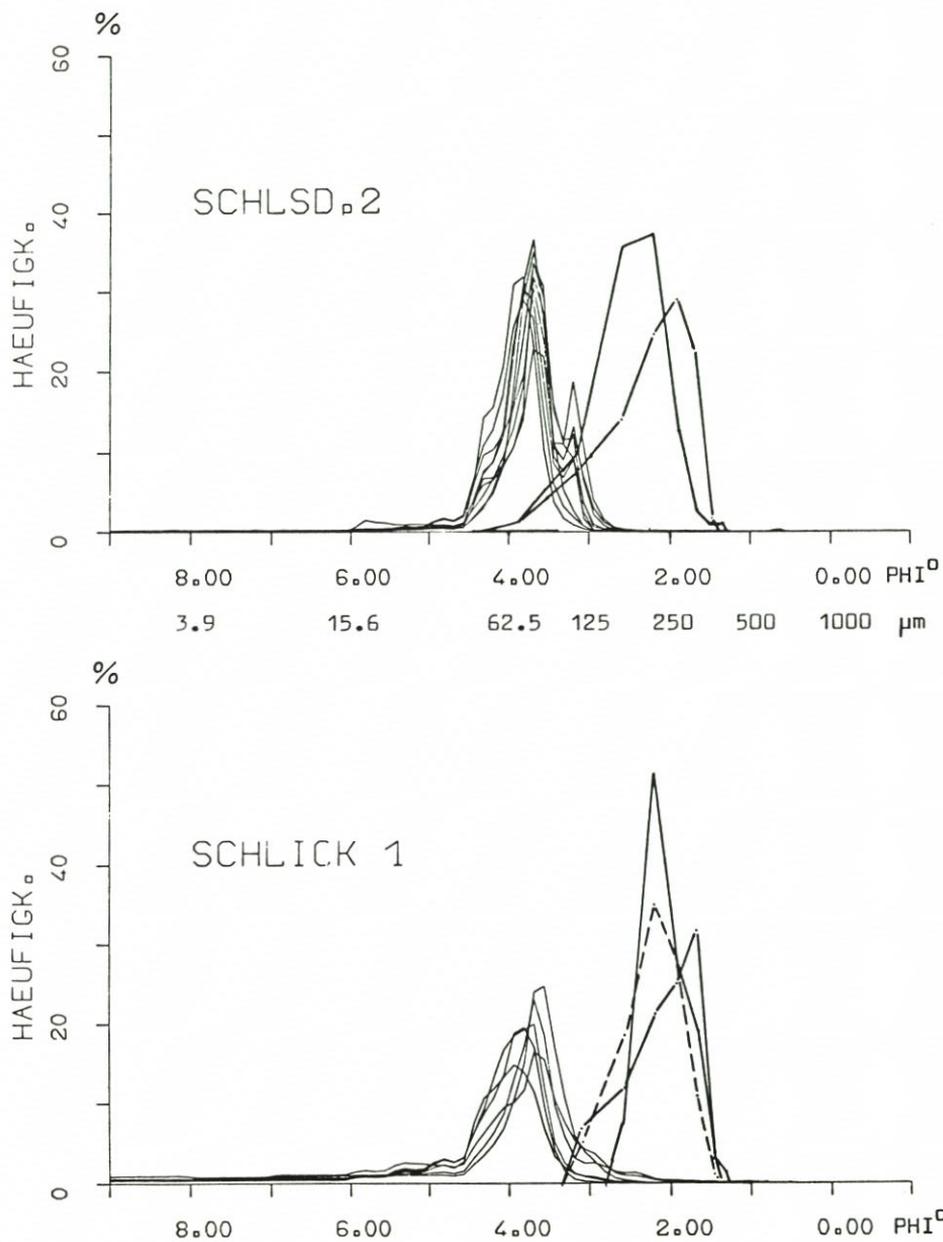


Abb. 26. Vergleich von Korngrößenverteilungen der Wattsedimenttypen Schlicksand 2 und Schlick 1 mit den Korngrößenverteilungen von Kotpillen an den entsprechenden Wattoberflächen

einem zweidimensionalen Schnitt durch ein nicht eingeregelttes Gemenge elliptischer Körper, wie es von einer mit Kotpillen bedeckten Fläche gebildet wird, kann jede Flächenform von der Kreisfläche bis zur Ellipsenfläche auftreten. Die Korngrößenverteilung – hier wurden jeweils die Durchmesser der äquivalenten Kreisflächen berechnet – ergibt infolgedessen eine größere

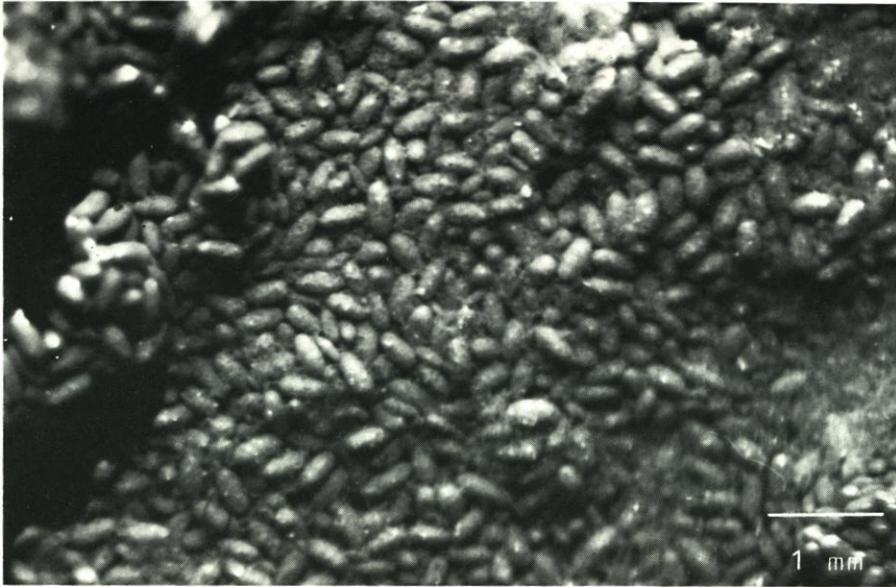


Abb. 27. Kotpillenbedeckte Schlicksandoberfläche (Schlicksand 2)

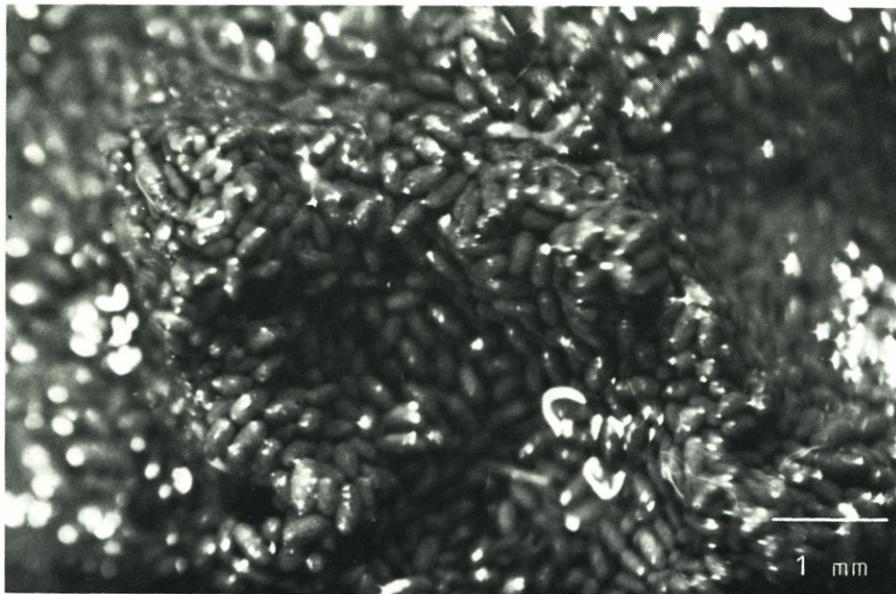


Abb. 28. Kotpillenbedeckte Schlickoberfläche (Schlick 1)

Variation der Korngrößen mit einem insgesamt niedrigeren Mittelwert, als es der Wirklichkeit entspricht.

Für die Untersuchungen im Labor wurden ebenfalls Oberflächensedimentproben benutzt. Deren organische Bestandteile zerfielen jedoch bei der Analyse weitgehend.

Die Kotpillen der Wattoberflächen in der Meldorfer Bucht erreichen zwar nicht die

Größe der von HAVEN u. MORALES-ALAMO (1972) beschriebenen Beispiele, ihre mittleren Korngrößen liegen jedoch noch erheblich über dem Medianwert der entsprechenden anorganischen Korngrößenverteilungen (Abb. 26). Für den Vergleich der Pellet-Kornverteilungen mit dem Sediment der beiden Stationen wurden für die Abbildungen (Abb. 27 u. 28) die auch für die ganze Meldorfer Bucht charakteristischen Kornverteilungen des Oberflächensediments gewählt. Die Aufnahmen von „Wattsand 3“ wurden nicht ausgewertet, da an seiner Oberfläche keine organischen Bildungen zu erkennen waren, die das Korngrößenspektrum beeinflusst hätten.

Der mittlere Durchmesser der den Ellipsenflächen äquivalenten Kreisflächen beträgt für die Proben der Schlicksand-Position 2,3 $\text{PHI}^\circ = 0,2$ mm und für die der Schlick-Position 2,2 $\text{PHI}^\circ = 0,22$ mm. Da der Unterschied sehr gering ist, kann wahrscheinlich davon ausgegangen werden, daß der überwiegende Teil der Kotpillen beider Sedimenttypen von denselben Tierarten produziert wurde.

Bei den Schlicksandproben scheint jedoch noch ein etwas feinkörniger, ebenfalls elliptischer Kotpillentyp möglicherweise von einer oder mehreren anderen Arten hervorgebracht zu werden. Die Verteilungen überspannen beim Schlicksand zum Feineren hin einen deutlich größeren Bereich bis hinab zu einer Korngröße von 4,3 $\text{PHI}^\circ = 0,05$ mm, während beim Schlick die kleinste gemessene Kotpille eine Größe von 3,3 $\text{PHI}^\circ = 0,1$ mm besitzt. Die größten Kotpillen liegen bei beiden Sedimenttypen bei ca. 1,3 $\text{PHI}^\circ = 0,4$ mm.

Die von Invertebraten aus dem Wasser herausfiltrierten Partikel sind meist kleiner als 5 μm . Die Untersuchungen an verschiedenen Muscheln und Schnecken an der amerikanischen Ostküste in vergleichbarem Watt ergab, daß 82 bis 93 Vol-% der Pellet-Partikel kleiner als 4 μm und noch 95 Vol-% kleiner als 9 μm (HAVEN u. MORALES-ALAMO, 1972) sind.

Die verdaute Substanz wird nach dem Passieren des Verdauungstraktes als „feste“ Kotpillen je nach Tierart mit einer Länge von ca. 500 bis 3000 μm ausgeschieden (HAVEN u. MORALES-ALAMO, 1972). Die Formen der Pellets reichen von kurzen, eiförmigen Pillen bis zu länglichen Strängen und haben je nach Tierart auch unterschiedliche Oberflächenstrukturen.

Kotpillen besitzen aufgrund ihrer beträchtlichen Größe eine sehr viel höhere Sedimentationsgeschwindigkeit als ihre Einzelbestandteile, die meist nur eine Größe von 1–5 μm haben. Daraus folgt, daß auch an solchen Stellen biogene, schlickige Sedimente abgelagert werden können, wo sonst von den hydromechanischen Verhältnissen her nur sandige Korngemische sedimentiert werden.

Auf die Ablagerung der Kotpillen folgt der mechanische und bakterielle Abbau. Ein Teil des Materials der Kotpillen wird nach deren Auflösung wieder resuspendiert, ein anderer Teil durch die Umschichtungstätigkeit von im Sediment lebenden Tieren (z. B. *Arenicola marina*) in das Sediment eingearbeitet. Versuche mit fluoreszierenden und radioaktiven Partikeln zeigten, daß Pelletteilchen innerhalb von knapp drei Wochen bis zu einer Tiefe von 15 cm in das Sediment mit eingemischt worden waren (HAVEN u. MORALES-ALAMO, 1972).

9.4 Die Auswirkungen von Wattvereisungen auf das Sediment

In den Wintern 1978/79 und 1979/80 wurden von Treibeisschollen auf dem Watt vor Deichhausen bei Büsum Proben entnommen. Hierbei konnte zwischen der gefrorenen Schwebfracht des Wassers und dem von Wellen auf die Schollen geworfenen Sediment (Treibeisaufwurf) unterschieden werden.

Zur Untersuchung der Schwebfracht mußten große Mengen Eis aus den Schollen – je Probe etwa 3 bis 4 kg – herausgebrochen werden. Um den Sedimentaufwurf zu untersuchen, wurde ca. 1 kg Eis gezielt von der Schollenoberfläche abgekratzt. Nicht immer kann die

Schwebfracht bei der Probenentnahme von sehr feinen Lagen aufgeworfenen Sediments unterschieden werden. Bei der Auswertung der sedimentologischen Analysendaten ergab sich jedoch eine deutliche Trennung der beiden oben beschriebenen Typen.

Bei der feinen Schwebfracht handelt es sich um ein sehr feinkörniges, siltig-toniges Material, das feinverteilt im Eis eingefroren ist. Teilweise ist es auch durch die Filterwirkung der porösen Eisstruktur konzentriert worden.

Da der organische Anteil in den Schwebfrachtproben recht hoch liegt (Planktonen), wurde besonderer Wert auf eine schonende Probenaufbereitung gelegt (ohne H_2O_2). Organischer Detritus und Organismen blieben auf diese Weise größtenteils unzerstört und gingen in die Korngrößenanalyse mit ein.

Die analysierten Eisproben der Schwebfrachtgruppe besitzen einen sehr hohen Feinanteil. Der Prozentsatz $< 63 \mu m$ liegt fast fünfmal höher als bei der Aufwurfprobe, der des Tonanteils ($< 2 \mu m$) um das zwölffache. 54 % der Schwebfracht besteht aus kleineren Korngrößen als $20 \mu m$ (Feinsilt und Ton), 18 % aus Grobsilt und nur 20,5 % aus Feinsand.

Die Eisschwebfracht fällt von der Korngrößenzusammensetzung her in die Kategorie „Schlick“ (50–85 % $< 63 \mu m$). Der Mittelwert der Schwebfrachtproben beträgt 72,12 % $< 63 \mu m$.

Der Sedimentaufwurf wird durch die sich an den Eisschollen brechenden Wellen verursacht. Er besteht zum überwiegenden Teil aus einem Korngrößenspektrum, das nach seinem Anteil $< 63 \mu m$ zwar einem sandigen Mischwatt entspricht, aber besser sortiert ist. Oft werden auch kleine Herzmuschelschalen (*Cardium edule*) auf den Schollen gefunden, die aus von der Erosion freigelegten *Cardium*-Feldern stammen.

Nach der Wattsedimenttypisierung von FIGGE et al. (1980) zählen die im Testfeld bei Deichhausen entnommenen Sedimentaufwurfproben zu den sandigen Schlicksandten (10–25 % $< 63 \mu m$). Der Hauptanteil des Sediments (80,6 %) liegt innerhalb der Grenzen $63 \mu m$ bis $125 \mu m$. Der durchschnittliche Tongehalt ($< 2 \mu m$) dieses Materials entspricht dem Mittel eines sandigen Schlicksandtes (2,33 %). Der Anteil des feinen Silts ($2-20 \mu m$) ist ungewöhnlich gering (ca. 1 %), und der des Grobsilts ($20-63 \mu m$) beträgt 11,75 %.

Beim Abtauen der Eismassen auf dem Watt wird deren Sedimentfracht erst auf den dünner werdenden Eisschollen konzentriert und schließlich auf der Wattoberfläche abgelagert. Nach dem Abtauen des Eises im März 1978 und im März 1979 überzogen Eisschlickablagerungen die gesamte Fläche des Testtales bis auf eine Zone von etwa 200 m Breite entlang dem Wöhrdener Loch. Auch an Stellen, an denen sonst Wattsand anzutreffen ist, konnten Eisschlickmächtigkeiten bis 20 cm beobachtet werden.

Die Eisschlicksedimente waren im März 1979 innerhalb von knapp 14 Tagen wieder bis auf geringe Reste verschwunden (20. 3. bis 3. 4. 79). Auch 1978 war Ende März die Eisschlickbedeckung zum größten Teil wieder abgetragen. Diese schnelle Wiederherstellung der alten Sedimentverhältnisse beweist die starke Abhängigkeit der Sedimentzusammensetzung von der Wattmorphologie und der Wasserbewegung auf den Wattflächen. Auch extreme Wetterlagen bewirkten im Untersuchungsgebiet meist nur kurzfristige Änderungen in der Korngrößenzusammensetzung der Wattsedimente.

10. Gefügeuntersuchungen

10.1 Auswahl der Meßstellen im Testfeld

Ergänzend zu den in den obigen Abschnitten beschriebenen Untersuchungen im Testfeld vor Deichhausen bei Büsum wurden vom Mai bis Oktober 1980 Gefügeuntersuchungen

durchgeführt, um die jahreszeitlichen Veränderungen der Sedimente unter dem Einfluß von Sedimentations- und Erosionsvorgängen und vor allem der Einwirkung der Wattfauna (Bioturbation) zu erfassen.

Nach den Ergebnissen der Kartierung im Testfeld wurden drei Meßpunkte in Abständen von je 100 m so angelegt, daß nebeneinander Sandwatt, Schlicksand und Schlickwatt erfaßt wurden. Die Meßpunkte lagen auf einer ausgeflockten Profillinie, die etwa senkrecht zum Deich in Richtung auf das Wöhrdener Loch verlief. Die Probenentnahmen erfolgten jeweils innerhalb eines Kreises mit einem Radius von 5 m um den betreffenden Pflock.

Das Sandwatt wird durch den Meßpunkt am Pflock 52 beschrieben, der Schlicksand findet sich um den Pflock 53, während das Schlickwatt durch den Meßpunkt 54 charakterisiert wird. Letztere Position stand im Mittelpunkt der Untersuchungen. Beim Vergleich mit den vorherigen Abschnitten des Berichtes ist, wie schon erwähnt, zu berücksichtigen, daß 1980 gegenüber den Vorjahren leichte Verschiebungen der Faziesgrenzen eingetreten waren.

Die Probenentnahmen im Gelände erfolgten an vier Terminen im Abstand von je etwa 7 Wochen (21. 5. 1980, 6. 7. 1980, 1. 9. 1980, 18. 10. 1980).

10.2 Methodische Grundlagen

Die zeitliche Veränderung der Korngrößenverteilungen des Sedimentes war durch die Entnahme von Proben mit Stechzylindern von 10 cm Eindringtiefe bestimmt worden. Schon in diesem Stadium der Untersuchungen hatte sich für das Schlickwatt um Position 54 eine stetige Sedimentation mit hohen Feinanteilen ergeben.

Um das Sedimentationsverhalten dieses Wattkörpers nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ durch Sedimentzuwachs oder Sedimentabnahme zu beschreiben, wurden an den Meßpunkten Stechkastenproben entnommen. Die Stechkästen sind rechteckige Metallkästen, die ungestörte Proben bis zu einer Tiefe von 25 cm ergeben. Entnahmetechnik und Präparationsmethoden sind von REINECK und WERNER in verschiedenen Veröffentlichungen beschrieben worden. Sie wurden für die Aufgaben dieses Vorhabens ergänzt.

Der große Vorteil des Verfahrens liegt in der Gewinnung eines nahezu ungestörten Profiles mit Wiedergabe der natürlichen Sediment- und Faunenverteilung. Für die räumliche Erfassung der Strukturen wurden je zwei Stechkästen entnommen, einer mit der Längsseite in Nord-Süd-, der andere mit der Längsseite in Ost-West-Richtung.

Die Profile in den Stechkästen wurden nach Beobachtung beschrieben. Schlickige Partien traten durch ihren Oberflächen-, „Glanz“ hervor, der für den Anschnitt feinstkörniger Sedimente mit hohem Wassergehalt typisch ist.

Die Auswertung der ersten Stechkastenprofile zeigte Schwierigkeiten bei der Parallelisierung charakteristischer Schichten auf, deren Tiefenlage relativ zur Oberfläche für die Beurteilung von Sedimentation oder Erosion von Bedeutung war. Hierfür erwiesen sich künstliche „Leithorizonte“ aus feinem Sand, der mit Uranin präpariert war, als günstig. Der unter ultraviolettem Licht stark fluoreszierende Farbstoff macht Sedimentationsvorgänge zwischen zwei Probenentnahmen deutlich, bleibt jedoch bei Erosion naturgemäß unwirksam.

Im Labor wurden von den Stechkästen bis max. 2 cm dicke Profilpräparate über die ganze Kastenbreite angefertigt. Diese wurden in einem speziell entwickelten Röntgengerät mit 30 kV über einer Photoplatte bestrahlt. Die Röntgenaufnahme zeigt die Projektion von biologischen und sedimentologischen Informationen des Präparats auf die Photoebene.

Wichtig bei dieser Betrachtung sind Überlegungen, inwieweit diese Projektionen der sedimentologischen Strukturen verfälschend wirken können. Während der ersten Auswertun-

gen wurde die Präparat-Dicke von 0,7 bis 2 cm variiert, um ein optimales Informationsspektrum sicherzustellen. Es zeigte sich schnell, daß eine saubere Herstellung von schmalen, ungestörten Präparaten wegen des hohen Schill-Anteils sehr schwierig war. Wenn dies gelang, wurde das sedimentologische Gefüge oftmals so stark von Verwühlungen überprägt, daß eine vernünftige Schichtdifferenzierung, und damit ein wesentliches Merkmal zur Beurteilung von Verlagerungstendenzen, nicht mehr gewährleistet erschien.

Die Priorität der sedimentologischen Information in der Thematik machte es notwendig, den Präparatschnitt auf 2 cm zu erweitern, um mit dem „Projektions-Gewinn“ wichtige Ablagerungsereignisse besser auseinanderzuhalten. Allerdings wirkt sich dieser „Gewinn“ negativ auf die genaue Differenzierung bioturbater Strukturen aus. Projektions-Überlagerungen ließen eine genaue Trennung in Gestaltungs- und Verformungs-Wühlgefügen (SCHÄFER, 1956) nicht mehr zu. In der Parameterauswertung wurden sie deshalb zusammengefaßt (vgl. Abb. 29).

Anhand unterschiedlicher Grautöne, welche direkt mit der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt eines Schichthorizonts in Beziehung stehen, konnte das Röntgennegativ sofort auf einem Leuchttisch ausgewertet werden. Feinkörnigere Sedimente wurden aufgrund ihres relativ höheren Wassergehalts dunkler, Schichten mit zunehmendem Grobanteil heller abgebildet.

Nur auf diese Weise war es möglich, eine Verschiebung von Leithorizonten im Profil relativ zur Oberfläche über einen längeren Untersuchungszeitraum zu verfolgen und Aussagen über Sedimentations- und Erosionsvorgänge zu machen. Das Identifizierungsverfahren der Grautöne reichte bei Meßpunkt 54 aus, um eine Aufschlickung durch meßbare Größen zu erfassen. Bei den Punkten 52 und 53 mußten für eine Parallelisierung zusätzliche Parameter, wie kleinräumige Wechsellagerungen, Laminationen u. a., herangezogen werden, da eine deutliche Trennung von Grautönen durch sehr homogenes Sediment bei Meßpunkt 52 (Sandwatt) erschwert wurde. Bei Station 53 traten zusätzliche Schwierigkeiten durch kleinräumige Faziesänderung im Testfeld auf, die aber durch Berücksichtigung anderer Parameter gelöst wurden.

Für die Untersuchung der empfindlichen Wattoberfläche auf biogene oder sedimentologische Feinstrukturen wurden „Ministechkästen“ in der Größenordnung einer Streichholzschachtel eingesetzt, welche direkt an den Meßpunkten zusammen mit der eingeschlossenen Wattprobe in flüssiger Luft (-193°C) schockgefroren wurden.

Beim Rücktransport hielt eine Kühlvorrichtung die Temperatur bei -190°C . Im Labor wurde unter Erhaltung aller Internstrukturen das gefrorene Porenwasser unter direktem Übergang der Eis- in die Dampfphase bei extrem niedrigem Druck entzogen. Diese Gefrier-trocknung schlickiger Sedimente wurde von WERNER (1966) angewandt. Die Dünnschliff-Herstellung geschah nach Kunststoff-Tränkung und Härtung der Proben im Trockenschrank unter größtmöglicher Erhaltung der Informationsdichte. Biologische und sedimentologische Feinstrukturen bleiben bei dieser Gefrier-trocknung erhalten. Die Auswertung erfolgte unter dem Polarisationsmikroskop.

Versuche, sedimentologische Strukturen über Härtung der Wattprobe mit Kunststoffen oder Paraffin besser zu beschreiben, verliefen unbefriedigend, da bei Proben mit hohem Feinanteil durch den Trocknungsvorgang Schrumpfungerscheinungen und damit starke Gefügestörungen nicht zu verhindern waren. Dagegen erwies sich die Auswertung von Radiographien in Verbindung mit der direkten Präparatansprache als effektiv und sinnvoll.

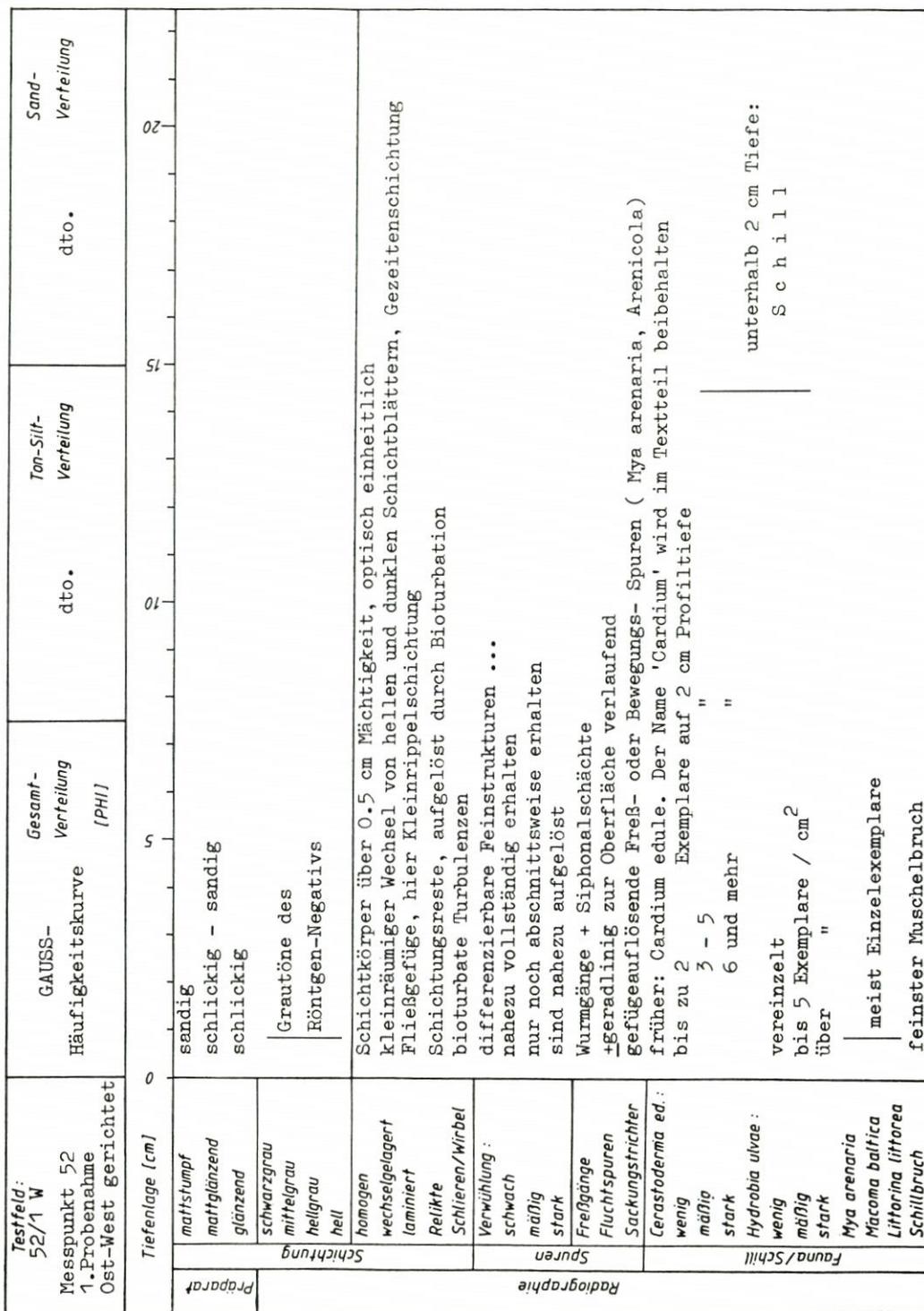


Abb. 29. Legende zur Darstellung der Stechkasten-Profile

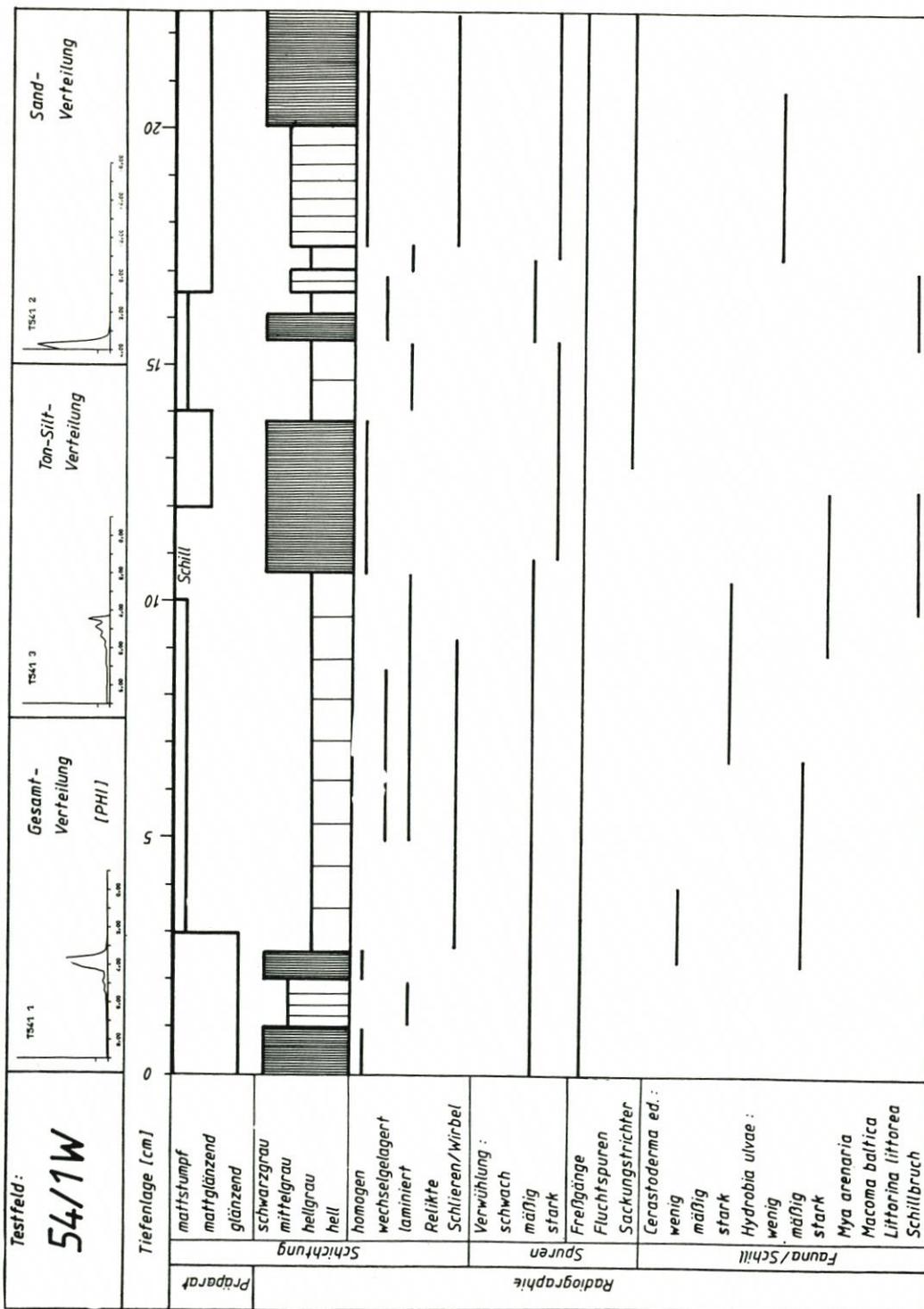


Abb. 30. Stechkasten-Profil 54/1 W

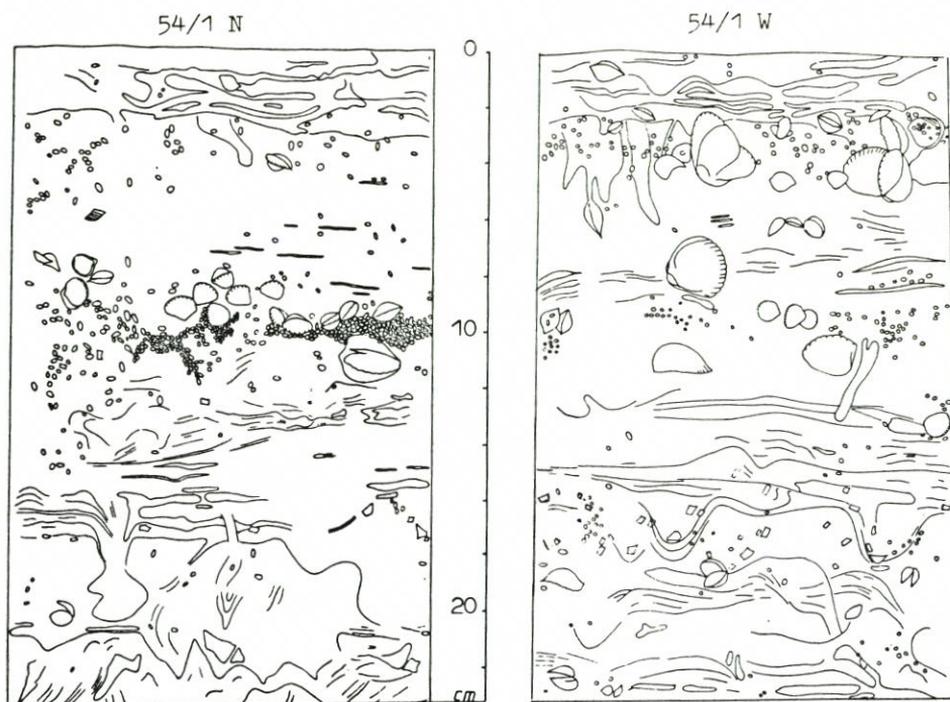


Abb. 31. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/1 N und 54/1 W

10.3 Auswertung der Stechkasten-Profile

10.3.1 Allgemeines

Für die Beschreibung der Sedimentationsvorgänge wurden zuerst die Stechkästen verwendet, die in ost-westlicher Orientierung entnommen worden waren, da hierbei der tendenzielle Ablauf der Sedimentation gut zu beobachten war. Die Nord/Süd-orientierten Proben differierten leicht in ihren beobachtbaren Sedimentationsraten. Für die generelle Sedimentationstendenz jedoch sind sie durchaus gut mit den westlich orientierten Stechkästen zu vergleichen.

10.3.2 Meßpunkt 54

Erste Probennahme (21. 5. 1980) (Abb. 30, 31): Die Abfolge ist in fünf sedimentologische Einheiten gegliedert:

1) Schlickschicht 0–2,7 cm

Der Abschnitt zeigt den typischen „Glanz“ eines tonig schluffigen Sediments. Geringmächtige „mattstumpfe“ Bänder sind Anzeichen sandiger Einlagerungen (REINECK, 1978), die sich im Röntgennegativ als hell, schwach gewellt darstellen.

2) Sandkörper, 2,7–10,5 cm

Durch die abdichtende Wirkung des hangenden Schlicks ist er reduziert und schwarz. Die

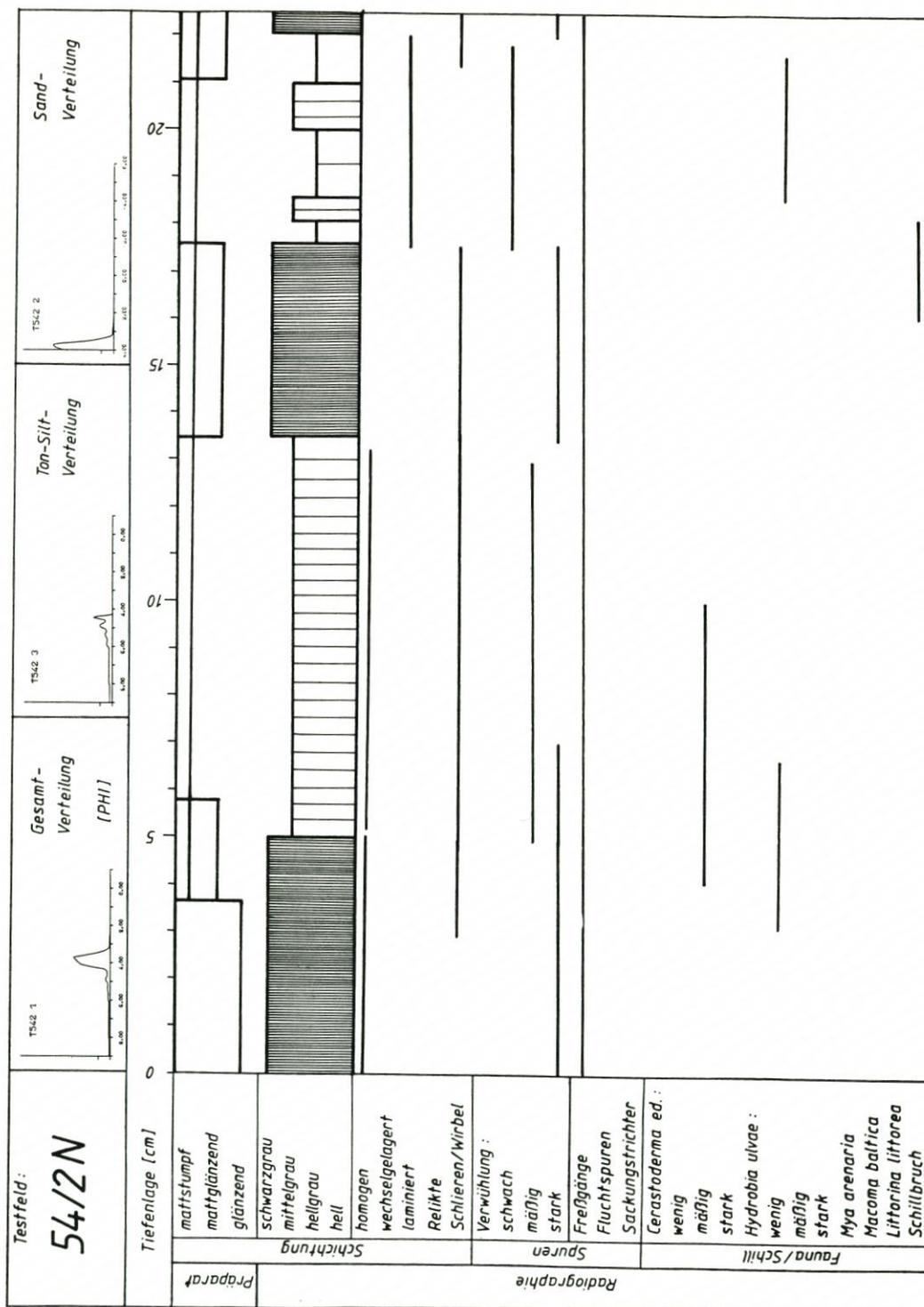


Abb. 32. Stechkasten-Profil 54/2 N

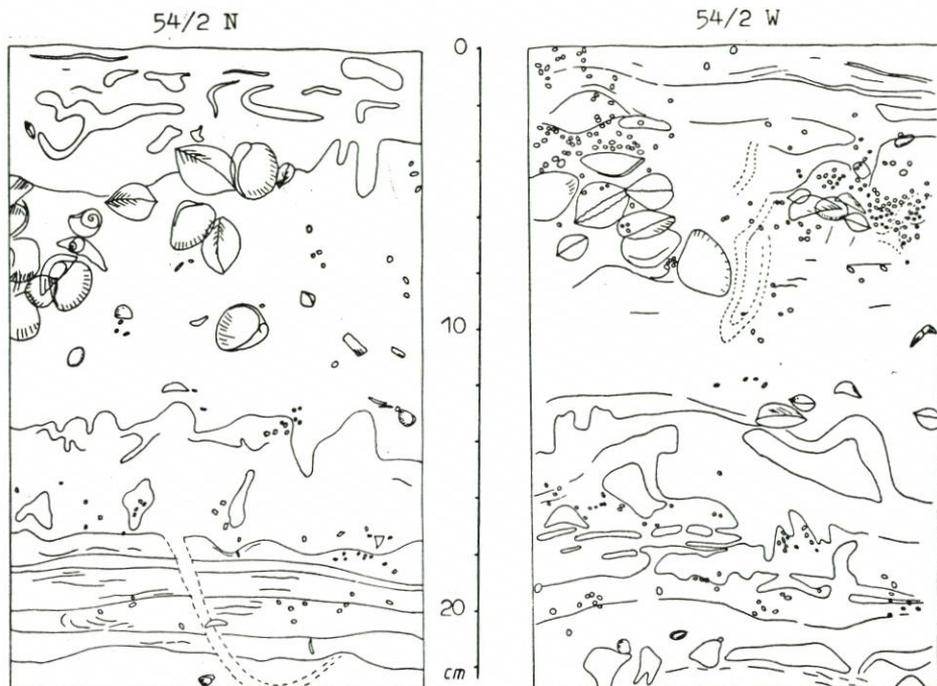


Abb. 33. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/2 N und 54/2 W

Oberfläche ist gewellt, wird jedoch durch diskordante Schlickauflage morphologisch ausgeglichen.

Im unteren Bereich: wechselgelagerte Schichtblätter einer Gezeitenschichtung (LÜDERS, 1930; HÄNTZSCHEL, 1938). Die Basis bilden Schillanreicherungen von *Hydrobien* und juvenilen *Cardien*.

3) sandiger Schlick, 10,5–14 cm

Das Sediment ist „mattglänzend“, sandiger als die Schlickschicht der Oberfläche. Die Radiographie zeigt einen dunklen, intensiv turbirten Bereich, aus dem Schlieren bis wolkige Turbulenzen in das Hangende hineinreichen. An der Basis ist zerriebener Schill angereichert.

4) Sandabfolgen, 14–17,5 cm

- a) 14–15,5 feine Laminationen
- b) 15,5–16,5 Gezeitenschichtung
- c) 16,5–17,5 feine Laminationen

5) sandiger Schlick, 17,5–(23,5) cm

Hohe strukturelle Ähnlichkeit zur 3. Einheit: mattglänzendes Sediment, intensiv turbirtes Interngefüge, vereinzelt *Hydrobien*- und *Cardien*-Schill eingelagert.

Zur Ansprache von Verlagerungsvorgängen wird die Basis der 1. Schichtungseinheit (Schlick) im folgenden als 1. Leithorizont, die Oberfläche der Einheit 3 als Kontrollzone L2 definiert. Die Kriterien der Auswahl waren eine sichere Identifizierung in allen Profilen, relativ horizontale Begrenzung und typische Einlagerungen.

Zweite Probennahme nach 46 Tagen (6. 7. 1980) (Abb. 32, 33): Bezogen auf die Wattoberfläche verschiebt sich der 1. Leithorizont auf 5,0 cm Tiefe, was einem Schlickaufwuchs von 2,3 cm gegenüber der Vorprobe gleichkommt. Zuvor noch differenzierbare

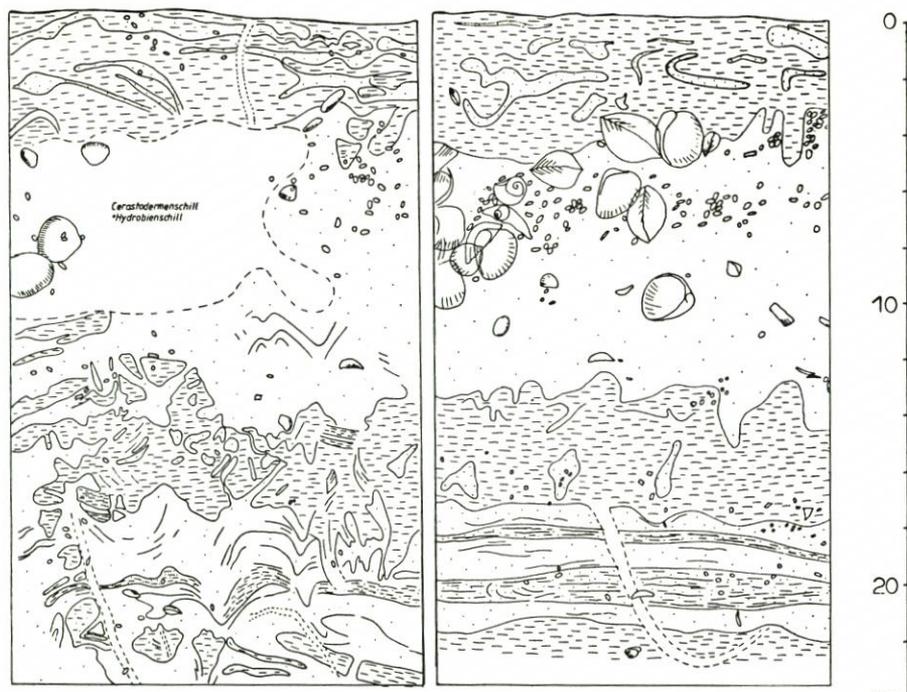


Abb. 34. Steckkasten-Profil 54/2 N. Zeichnung von 2 parallelen Schnitten in 3 cm Abstand. Sie zeigen unterschiedlich ausgeprägte Bioturbation

sandige Schichtbänder sind bioturbat eingearbeitet. Der hellgraue Schlick ist durchzogen von sandigen, im Anschnitt ovalen Röhren von bräunlich oxidiertem Farbgebung.

Im liegenden Sandkörper ist das Ablagerungsgefüge strukturell aufgelöst. Im Präparat sind schlackige Flecken und Schlieren in sandiger Umgebung sichtbar, die als Anzeichen von Verformungswühlgefügen von REINECK (1963) beschrieben sind. Die zu erwartende Tiefenverschiebung von L2 auf 13 cm offenbart die gute Korrelation zur Veränderung von L1. Eine Beurteilung der tiefergelegenen Einheiten auf biogene Veränderungen stößt durch unterschiedliche Ausprägung der Merkmale im identischen Profilkörper auf Schwierigkeiten (Abb. 34).

Die Erfahrung zeigt, daß man sich bei Analysen bioturbater Gefüge oder Lebensgemeinschaften in begrenzten Wattkörpern darüber im klaren sein muß, daß es sich beim Antreffen dieser Formen um Zufallsereignisse handeln kann, deren Aussagewert erst mit angemessener Stichprobenzahl gesichert wird. Dies gilt weniger für sedimentologische Strukturen, z. B. Gezeitschichtung, Kleinrippelgefüge u. a., die aufgrund ihrer genetisch i. d. R. weitflächigen Verbreitung anderen Gesetzmäßigkeiten unterliegen (Morphologie, Faziesgrenzen u. a.).

Dritte Probenahme nach 101 Tagen (1. 9. 1980) (Abb. 35, 36): L1 liegt jetzt in 6,6 cm Tiefe, entsprechend einem weiteren Sedimentzuwachs von 1,6 cm. Hiervon abweichend weist die N/S-gerichtete Probe einen Zuwachs von nahezu 3,5 cm Schlick auf. Für Wattgebiete ist eine schwache Morphologie nichts Ungewöhnliches. Bei der Beprobung wurde wahrscheinlich ein Wattbereich angetroffen, dessen liegender Sandkörper (Einheit 2) geringen Schwankungen der Mächtigkeit unterworfen ist. Unebenheiten werden durch eine horizontale Schlickablagerung abgeschwächt und ausgeglichen. Die Folgeerscheinung sind lokale Mächtigkeitsschwankungen des Schlicks. Da kleinräumig gesehen nicht nachweisbar

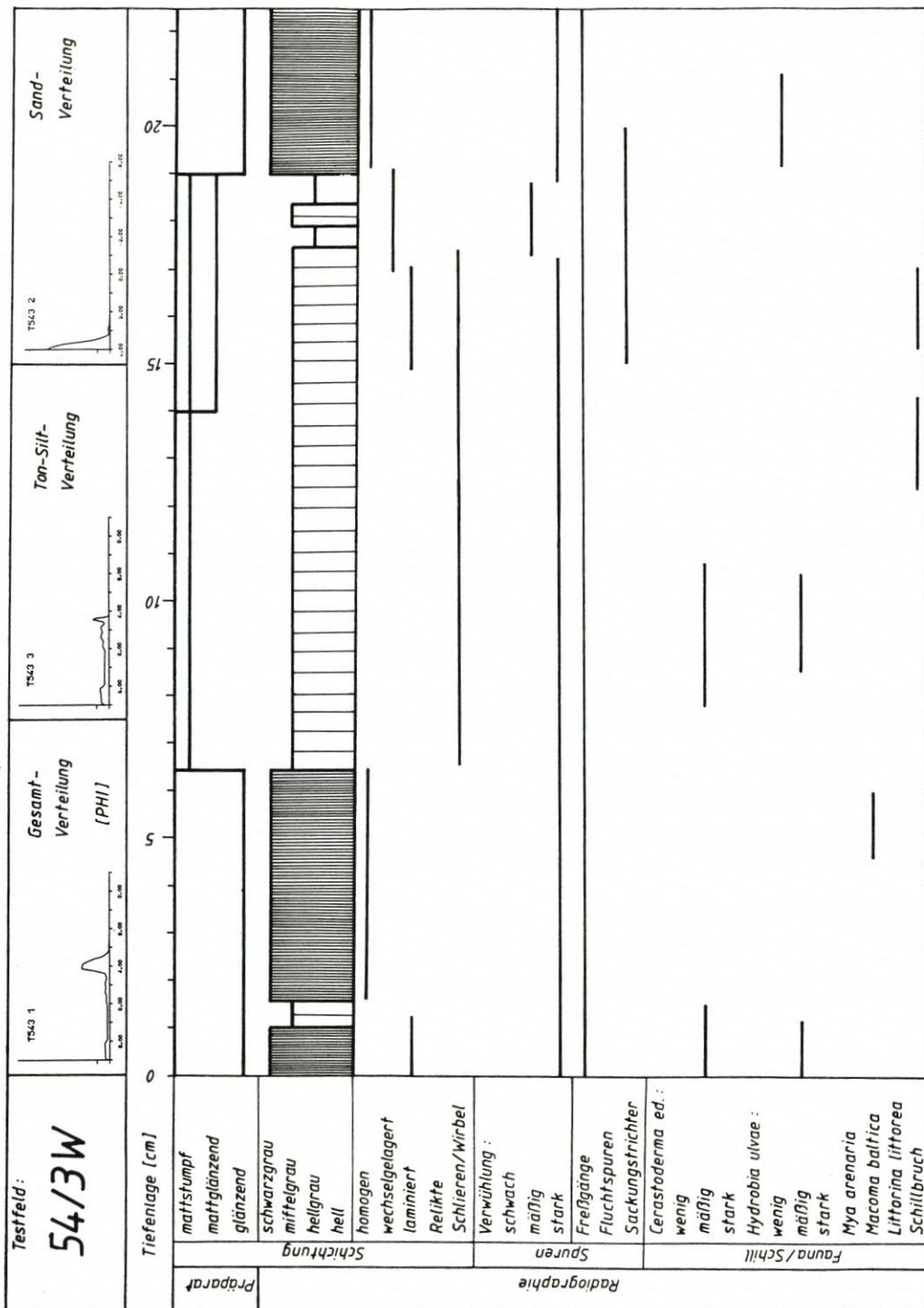


Abb. 35. Stechkasten-Profil 54/3 W

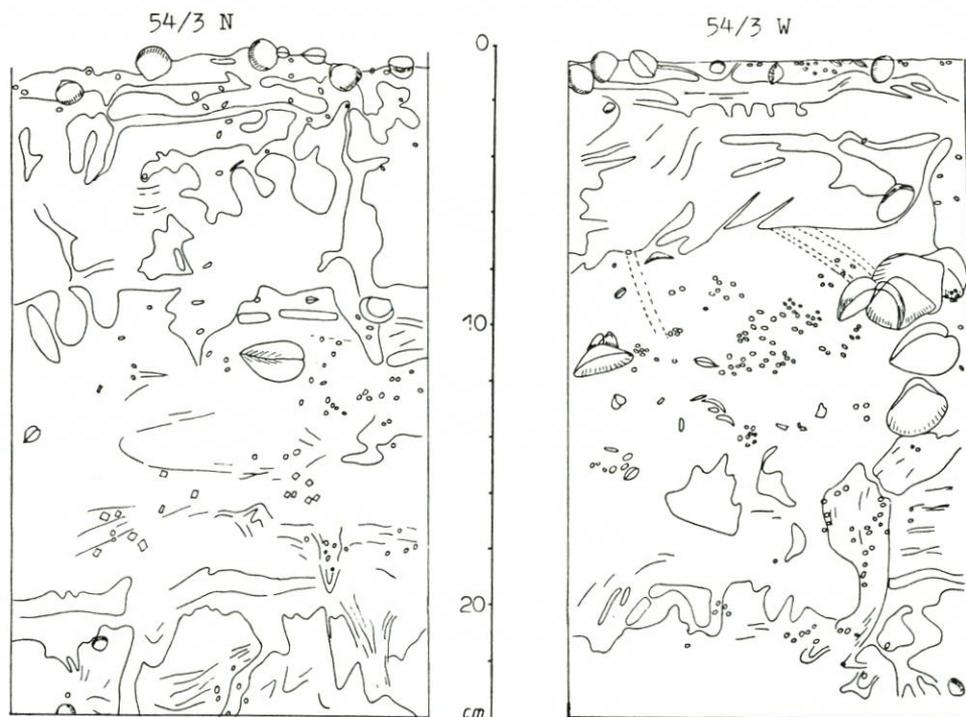


Abb. 36. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/3 N und 54/3 W

ist, bei welcher der beiden Profilproben diese Höhen- oder Tiefenanomalie vorliegt, ist durch die Zuwachswerte in etwa die obere und untere Grenze der Schlicksedimentation beschrieben.

Der Schlick ist stark verwühlt und wird an der Basis zunehmend in die Sandschicht eingearbeitet. Unmittelbar an der Oberfläche sind junge *Cardien* abgebildet, deren Bewegungsspuren im Sediment als hellere „Schichtdurchbrüche“ erscheinen. Eine wesentlich seltener vorkommende *Macoma baltica* liegt in 5 cm Tiefe. Sie gehört zur Gruppe der „Pipettierer“. Ihre äußerst dehnbaren Siphonen gestatten es, auch die unmittelbare Umgebung des Gangaustritts an der Oberfläche nach Nahrung abzusuchen (REINECK, 1978).

Oberhalb L2 reichen wiederum Schlieren der liegenden Schlickschicht in den stark turbirten Sandbereich. Lebende *Cardien* sind in dieser Tiefenlage nicht existenzfähig.

Vierte Probennahme nach 148 Tagen (18. 10. 1980) (Abb. 37, 38): In der radiographischen Auswertung stagniert die Tiefenlage des obersten Leithorizonts bei 6,6 cm; Grobansprache gibt noch schwache Sedimentation an. Für die N/S-ausgerichtete Beprobung ist sogar eine Abnahme der Schlickauflage festzustellen. Da Erosionserscheinungen weder bei regelmäßigen Feldbeobachtungen noch bei den Analysen nachweisbar waren, sind morphologische Gründe anzunehmen. Die ersten 5 cm der Schlicklage sind intensiv verwühlt und durchsetzt mit juvenilen *Cardien*-Beständen. Vor allem in der oberen Hälfte des liegenden Sandkörpers ist *Hydrobien*- und *Cardien*-Schill angereichert.

Sedimentologische Internstrukturen sind nicht mehr vorhanden. Die untere Schlickschicht ist durch Bioturbation zwar stark beeinflusst, aber immer noch gut im Liegenden und Hangenden abzugrenzen.

Auffällig ist, daß zum ersten Male seit Beginn der Beobachtungen das Wattprofil im Oberflächenbereich ein feines, sandiges Fließgefüge aufweist. Sandsedimente sind, bezogen

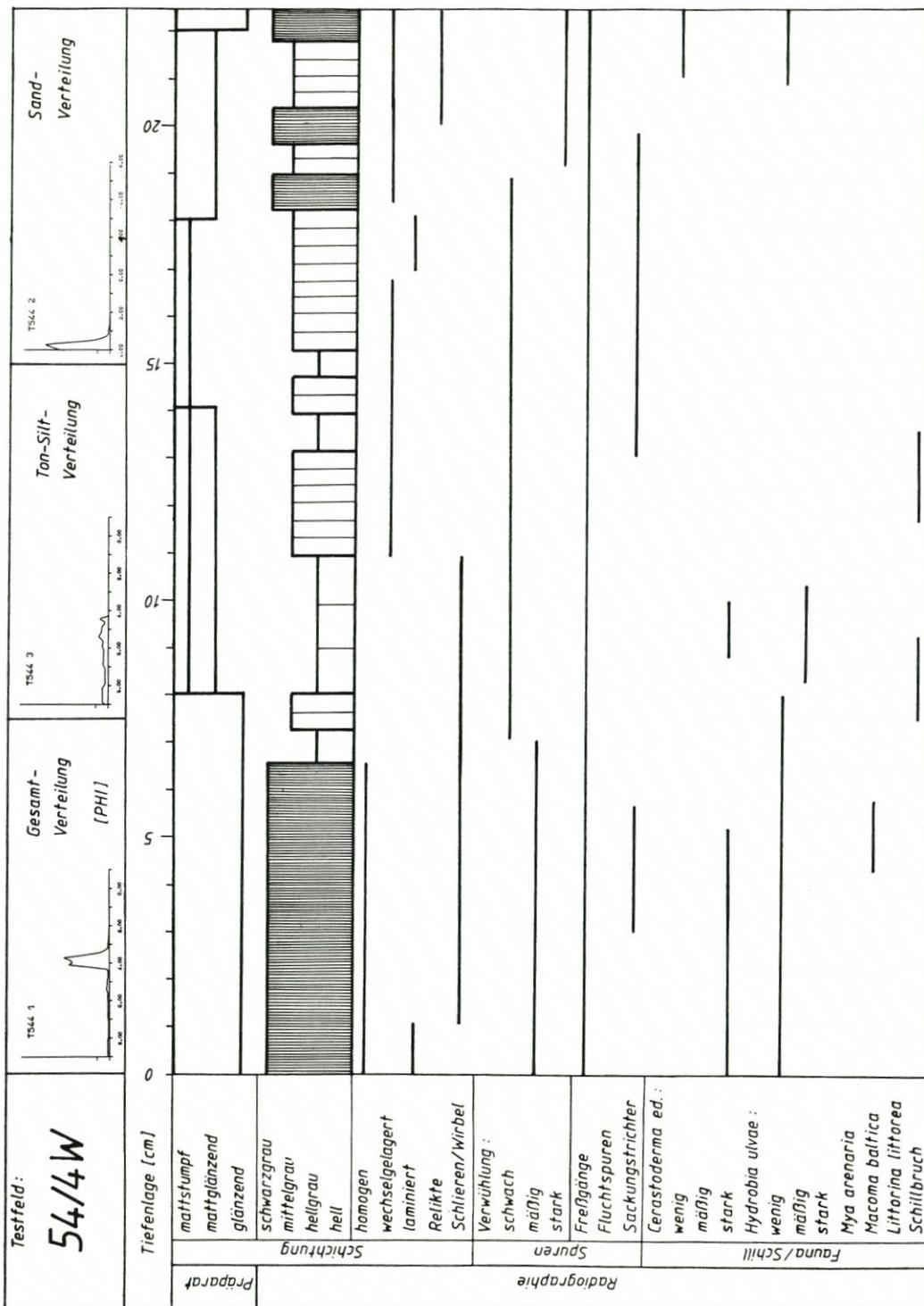


Abb. 37. Stechkasten-Profil 54/4 W

auf das liegende Schlicksediment, Anzeichen von erhöhter hydromechanischer Energie und damit einer Zunahme von unruhigen Wetterlagen, wie sie verstärkt in den Herbst- und Wintermonaten zu erwarten sind.

Interpretation der Beobachtungen: Für die unterschiedenen sedimentologischen Einheiten ist die Aussage gerechtfertigt, daß die wechselnden Bereiche schlickiger mit sandiger Sedimentation ausgeprägte jahreszeitabhängige Sedimentzyklen darstellen.

UNSÖLD (1974) unterschied ebenfalls in Ablagerungsfolgen einer Baggerlochfüllung vor Nordstrand Sommer- und Winter-Beeinflussung, allerdings nach bioturbaten Merkmalen. Einer winterlichen Sedimentation (Gezeitschichtung) folgte im Sommer die intensive Verwühlung durch *Hydrobien*, *Polychaeten*, *Nereis diversicolor*, *Heteromastus filiformis* und *Macoma baltica* – jedoch ohne wesentlichen Materialzuwachs. Auch im Meßfeld 54 der Meldorfer Bucht ist diese Biozönose durchaus vertreten. Die winterliche Gezeitschichtung ist als Gefügeform der Einheiten 2 und 4 übereinstimmend vorhanden. Der Unterschied liegt in der ausgeprägten sommerlichen Schlicksedimentation im Testfeld.

Das Fehlen von *Cardium edule* und *Mya arenaria* in der Biozönose des Nordstrander Baggerlochs kann auch auf Zufällen beruhen (Stichprobeneffekt). UNSÖLDS zahlreiche Beprobungen dürften allerdings dagegensprechen.

Künstliche Wattvertiefungen müssen hinsichtlich ihrer außerordentlich hohen Sedimentationsneigung als Ausnahmerecheinungen gelten. Die Mindestaufwachsrate für das Nordstrander Baggerloch gibt UNSÖLD (1974) mit wenigstens 5–7 cm/Jahr, im Winter 1963/64 sogar mit 122 cm an. Diese Aufwachsdifferenz ist dadurch zu erklären, daß bei anfangs hohen Sedimentschüttungen nach Aufgabe eines Baggerlochs durch einen „Falleneffekt“ mit zunehmendem Ausgleich im morphologischen Tiefenunterschied auch ein Konvergieren der Ablagerungsmächtigkeiten zu erwarten ist.

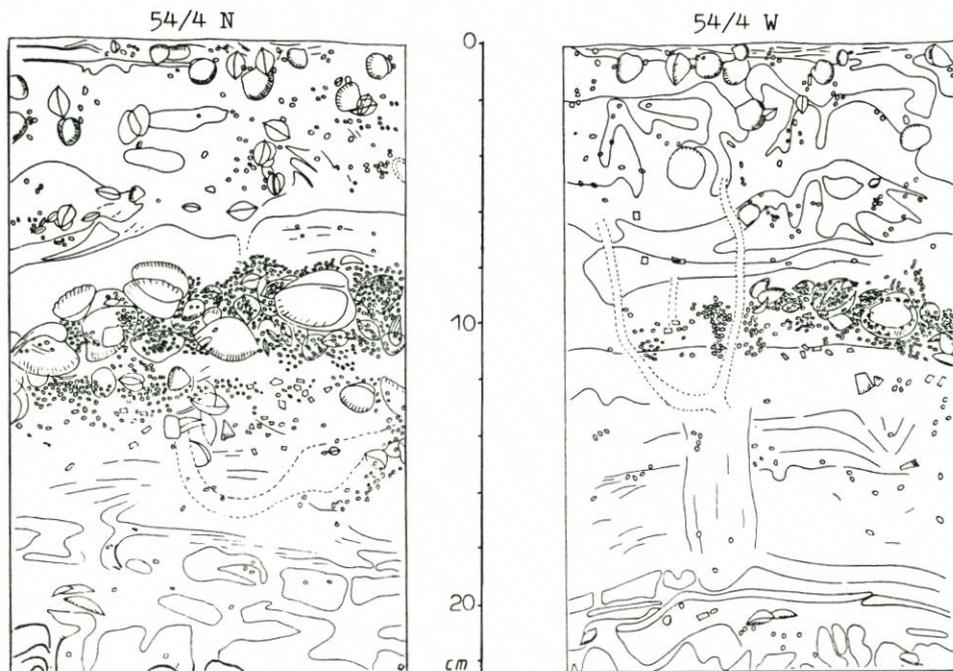


Abb. 38. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/4 N und 54/4 W

Im Baggerloch von Meßfeld 54 wird der Auffüllungsvorgang früher ähnlich abgelaufen sein. Die hohe Sedimentation von 6–8 cm allein im Sommerhalbjahr 1980 ist nur als Entwicklungsphase in Richtung konvergierender Tendenzen zu sehen. Wie wenig repräsentativ das Testgebiet für die Entwicklungen innerhalb der Meldorfer Bucht ist, zeigt deren negative Sedimentbilanz (SCHMIDT, 1975; GAST, 1980).

10.3.3 Meßpunkt 53

Erste Probennahme (21. 5. 1980) (Abb. 39, 40): Die Grobgliederung des Profils unterscheidet fünf Sedimenteinheiten, die nicht mit denjenigen am Meßpunkt 54 übereinstimmen und auch nur bedingt zu parallelisieren sind.

- 1) Schlickig-sandige Schicht 0–0,5 cm.
- 2) Wechsel von 0,5 bis 3 cm mächtigen schlickigen und sandigen Lagen 0,5–11 cm: Das Interngefüge der Sandschichten ist schwach laminiert, die Schlickschichten sind nicht weiter differenzierbar. Sie sind durch Wühltätigkeit nur schwach verändert.
- 3) Kleinrippelschichtung und Gezeitengefüge 11–18 cm: Unterhalb der Wechselschichtung 2 lagert ein Sandkörper mit Kleinrippelschichtung (REINECK, 1978), Klappenhälften junger *Cardien* sind auflagernd eingeregelt. In einem schmalen Übergangsbereich vollzieht sich ein Gefügewechsel zur Gezeitschichtung. Die Wechsellagen sind sehr feinschichtig, differenzierbare Abstände erreichen 0,01 cm.
- 4) Schlickschicht 18–21 cm: Obwohl nur noch reliktsch erhalten, ist sie gut im Gefügewandel von der hangenden Gezeitschichtabfolge mit aussetzender Bioturbation abzugrenzen, welche diskordant abgelagert wurde.
- 5) Gezeitschichtung 21–23 cm: Neben der Aufwachsentwicklung der obersten schlickig-sandigen Lage werden alle Kontrollbetrachtungen auf die Lageveränderung der Diskordanzfläche relativ zur Wattoberfläche abgestimmt.

Zweite Probennahme (6. 7. 1980) (Abb. 41): Der beschriebene Übergangsbereich verschiebt sich auf 17,5 cm, während die schlickig-sandige Schicht der Wattoberfläche auf 1 cm Mächtigkeit anwächst. Der zuvor gut differenzierbare obere Profilbereich bis 11 cm zeigt nun undeutliche, turbulente Schichtstrukturen. Kontraste der radiographischen Grautönung sind nur noch undeutlich wahrzunehmen. Einzelne *Cardien* sind bis in 3 cm Tiefe anzutreffen. Gangsysteme mit Weiten von 0,1–0,4 cm (*Heteromastus filiformis*, *Nereis diversicolor*) durchziehen das Sediment. Im oberen Gezeitschichtkörper ist die Schichtung an den Rändern eines Wühlkanals (*Mya arenaria*) nach unten gezogen. Weitere Veränderungen der Sedimentstruktur sind unbedeutend.

Dritte Probennahme (1. 9. 1980) (Abb. 42): Die ausgewählte Diskordanz liegt nunmehr in einer Tiefe von 18,5 cm. Die Veränderungen zu den Vorproben sind mit 0,5 bis 1,0 cm nur unwesentlich. Die radiographisch dunkle, schlickig-sandige Schicht (0–1 cm) ist schwach laminiert. Das biogene und sedimentäre Gefügebild gestaltet sich unverändert.

Vierte Probennahme (18. 10. 1980) (Abb. 43, 44): Verlagerung des Gefügeübergangs um 2 cm auf 16,5 cm Tiefe. Ähnliche Dichteverhältnisse, und somit undeutliche Radiographie-Informationen, machen eine nähere Schichtdifferenzierung nach weiteren Merkmalen der Präparat-Direktansprache notwendig. Von der Oberfläche bis in 2,5 cm Tiefenlage wechseln sich langgezogene, entfärbte Sande mit flaserigen Schlicklagen ab. Unterhalb, bis 4 cm, ist Sand mit *Hydrobien*- und *Cardien*-Schill durchsetzt. Starke Bioturbation im Bereich 4–11 cm verhindert wiederum eine Unterscheidung nach Gefügemerkmalen. Die liegenden Einheiten zeigen keine besonderen Veränderungen.

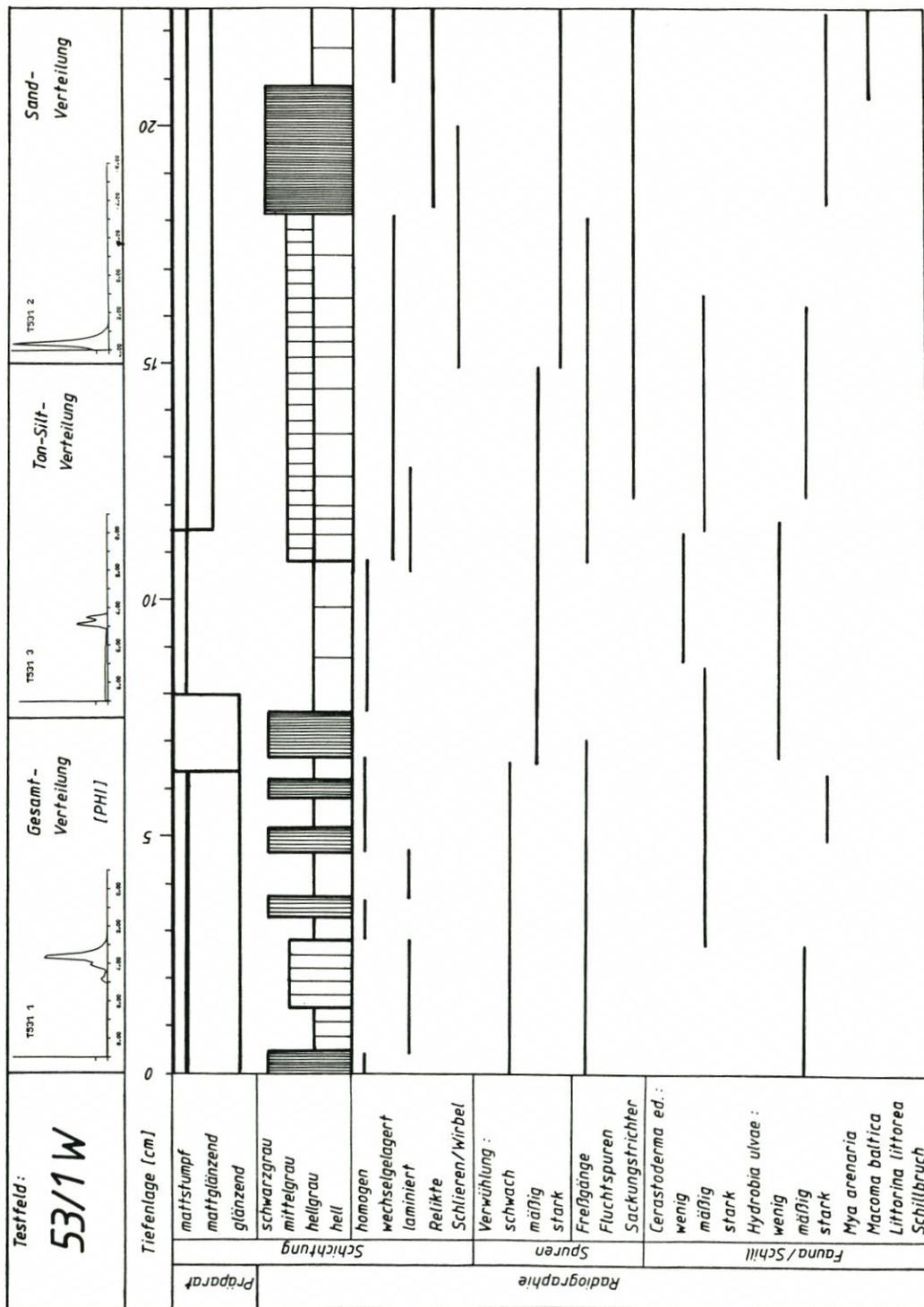


Abb. 39. Stechkasten-Profil 53/1 W

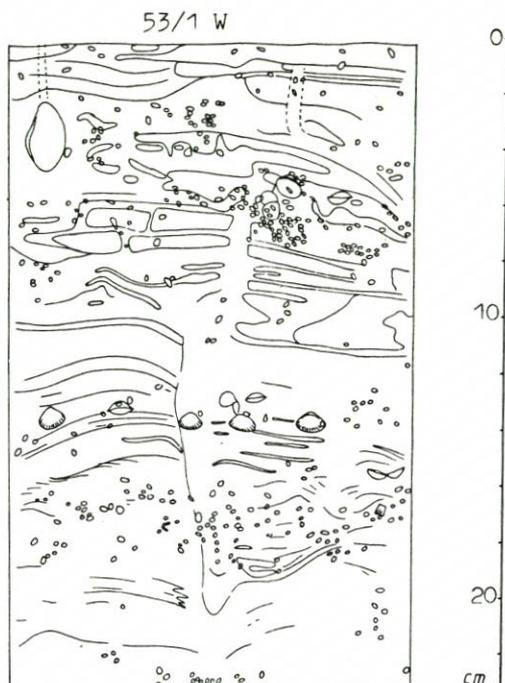


Abb. 40. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 53/1 W

Interpretation der Beobachtungen: Das in Meßfeld 54 mit Erfolg angewandte System, durch Verlagerung von Leithorizonten auf Tendenzen zu schließen, ist hier nach der vierten Probennahme mit Problemen belastet. Einerseits verschieben sich typische Schichteinheiten relativ nach oben, also „Sedimentverlust“, andererseits nimmt die Mächtigkeit der obersten Schlicklage um 1,5 cm gleichzeitig zu, also erfolgte „Sedimentation“.

Dieser Zuwachs kann als gesichert gelten, zumal sich ein künstlicher Uranin-Sand-Horizont, der nach der dritten Beprobung ausgelegt wurde, entsprechend verlagert hatte. Der Methode ist also nur dann Erfolg beschieden, wenn Sedimentations- oder Erosionsraten größer sind als die Fehlergrenzen, welche durch morphologische Unebenheiten definiert sind.

Der Durchmesser der obersten schlickig-sandigen Schicht von 2,5 cm kann jedoch als effektiver Zuwachs angesehen werden, da sie offensichtlich erst im Sommerhalbjahr sedimentiert wurde. Es ist weiterhin anzunehmen, daß das Sedimentationsverhalten nicht unwesentlich durch die Nähe des Baggerlochs (Abstand 100 m) beeinflusst ist.

Eine Parallelisierung von identischen Schichteinheiten zu Meßfeld 54 ist schwer durchführbar, da sie auf gemeinsamen charakteristischen Merkmalen, welcher Art auch immer, beruhen müßte. Zwar wurden Merkmale beobachtet, die bei beiden Meßfeldern sicherlich unter gleichen Strömungsbedingungen, aber nicht notwendig zum selben Zeitpunkt entstanden sind: Die Ablagerungen des Baggerlochs waren geprägt von zyklischen Abfolgen, Gezeitenschichtung (Winter)/Schlicksediment (Sommer). Unterhalb 11 cm Tiefe in Meßfeld 53 sind die gleichen Bedingungen angedeutet: Gezeiten-/Schlick-/Gezeiten-Schichtung, deren Fortsetzung in der Tiefe den Messungen entzogen ist. Es ist zu vermuten, daß sich dieser beschriebene Bereich in einem Synchron-Zyklus von Testfeld 54 zwar in einer unbekanntem Tiefe wiederfindet, daß dessen Mächtigkeit jedoch erheblich höher ausfallen dürfte (Schichtspreizung in Senken).

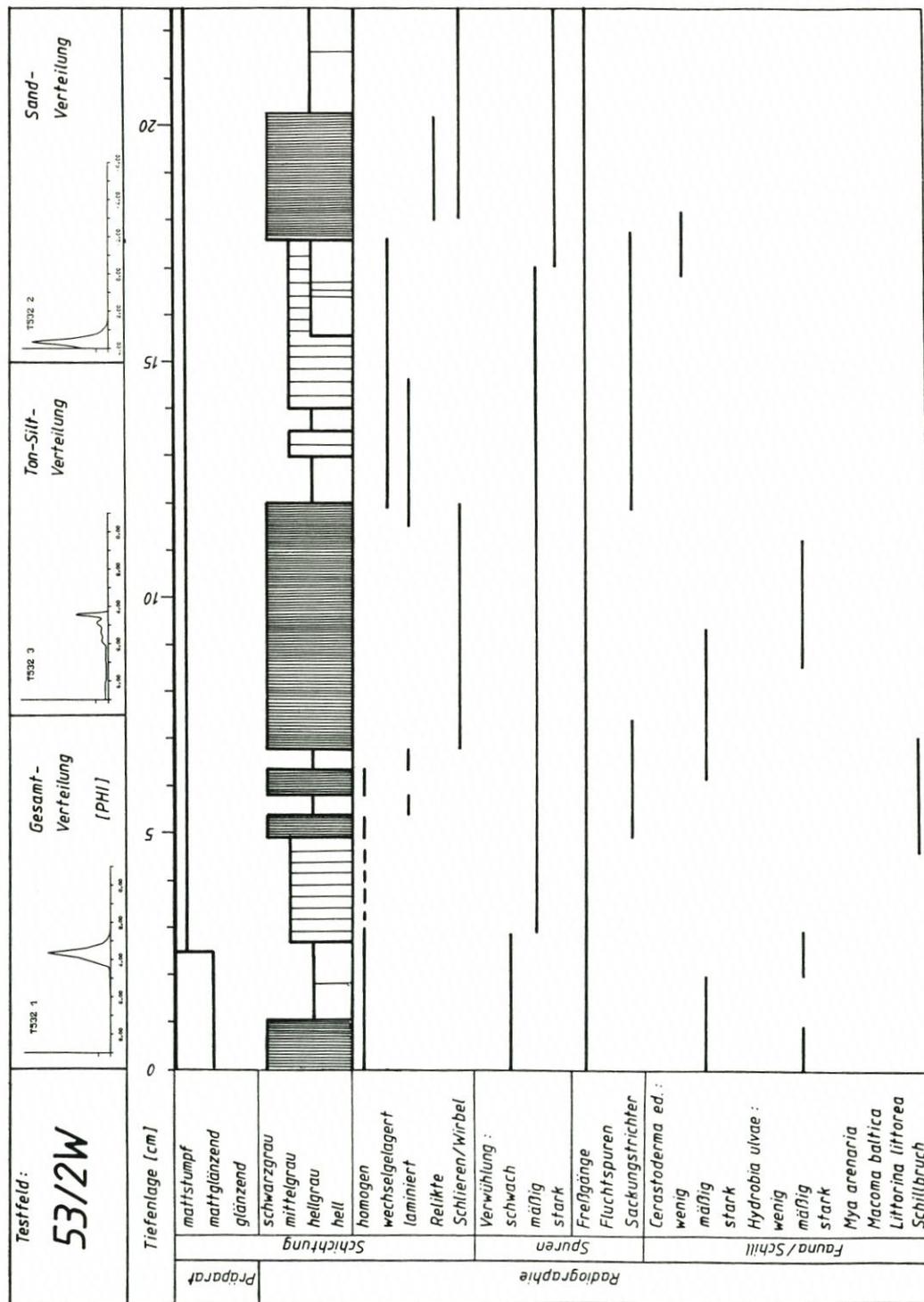


Abb. 41. Stechkasten-Profil 53/2 W

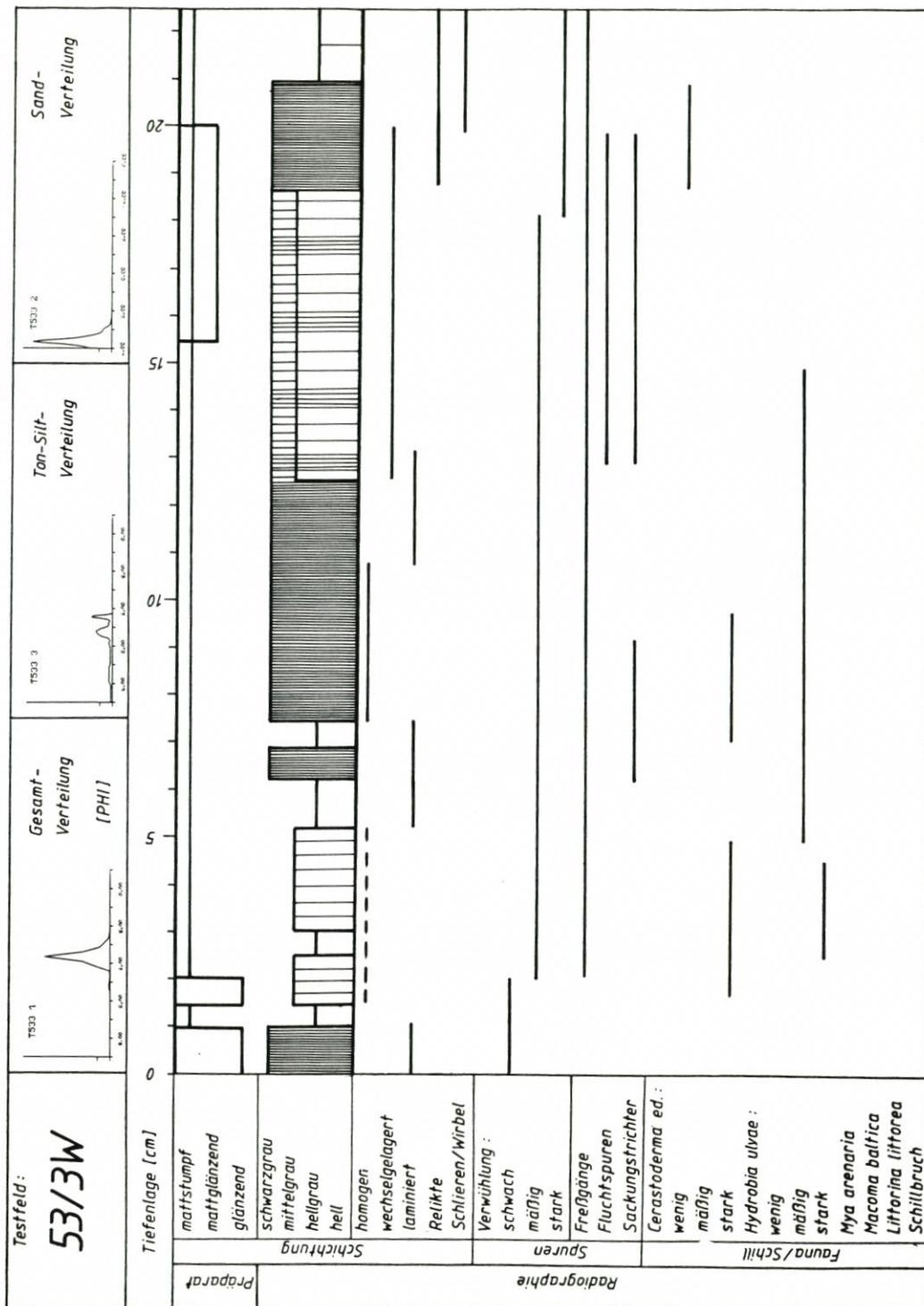


Abb. 42. Stechkasten-Profil 53/3 W

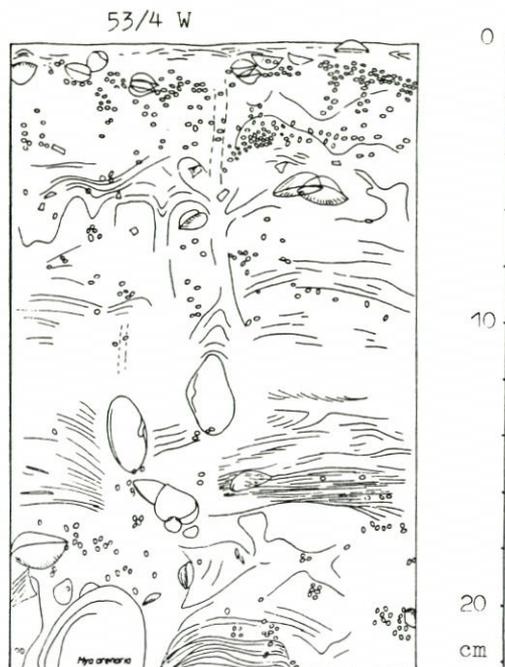


Abb. 44. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 53/4 W

Die einzig sicheren Informationen sind die aktuellen Messungen: Eine von Meßfeld 54 bis 53 durchgehende Schlicklage hat ihre Mächtigkeit offensichtlich von über 6 cm auf 2,5 cm reduziert, wobei die direkte Korrelation zur Oberflächenneigung festzustellen ist.

10.3.4 Meßpunkt 52

Erste Probennahme (21. 5. 1980) (Abb. 45, 46): Alle Stechkastkerne sind im wesentlichen sehr ähnlich strukturiert.

- 1) Kleinrippelschichtung 0–3,5 cm: Grau-bräunlicher heller Sand (Oxidationszone), der oftmals durch Sackungen gestört ist.
- 2) Strukturloser Sandkörper 3,5–18 cm: Das sedimentologische Primärgefüge ist durch Bioturbation vollständig aufgelöst. Die Informationen aus der Direktansprache erweisen sich gerade in dieser Situation als wertvoll, weil die Kopplung der Röntgenanalyse an Dichteunterschiede zwar noch die Schillverteilung, nicht aber die natürliche Farbgebung des Sediments berücksichtigt. Diese ist aber ein guter Anhaltspunkt für bioturbate Veränderungen.

Bräunliche Sande sind von der Oberfläche zungenförmig in Freßgänge von *Arenicola marina* nachgesackt, gut differenzierbar von der reduzierten Umgebung. Wurmröhren geben sich durch kreis- bis ellipsenförmige Anschnitte, hell hervortretend, zu erkennen.

Bemerkenswert sind die starken Schillanreicherungen von *Hydrobien* in den *Arenicola*-Gangsystemen. Sie werden als Opfer der Freßgewohnheiten des Pierwurms in Sackungstrichtern mit nach unten gezogen und aus Gründen ihrer „Gehäusegröße“ selektiert und in „Nestern“ angereichert. VAN STRAATEN (1952) beschrieb *Hydrobien*-Lagen in 20 cm Tiefe; noch tiefer wurde eine zweite Anreicherung von CADÉE (1976) beobachtet.

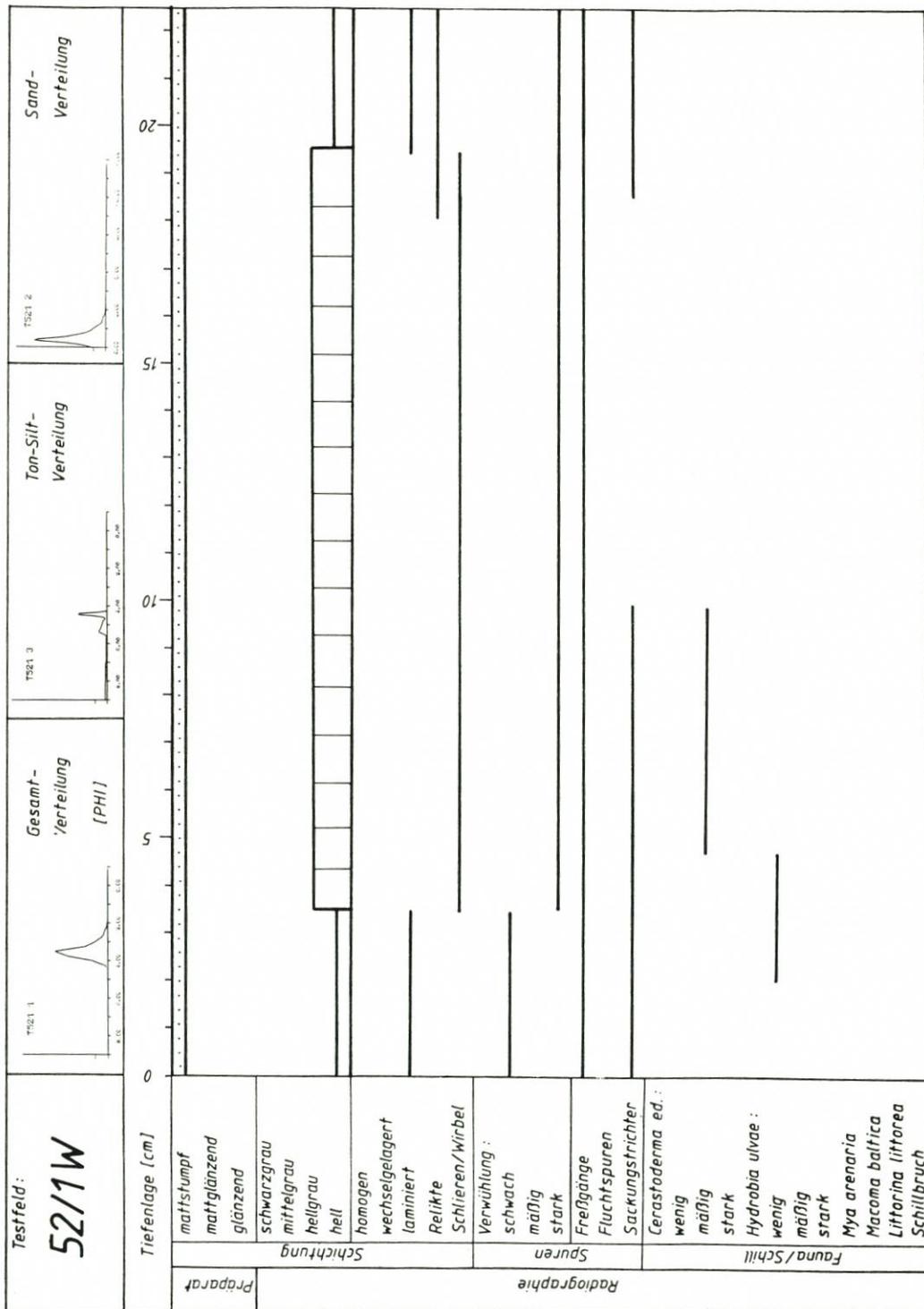


Abb. 45. Steckkasten-Profil 52/1 W

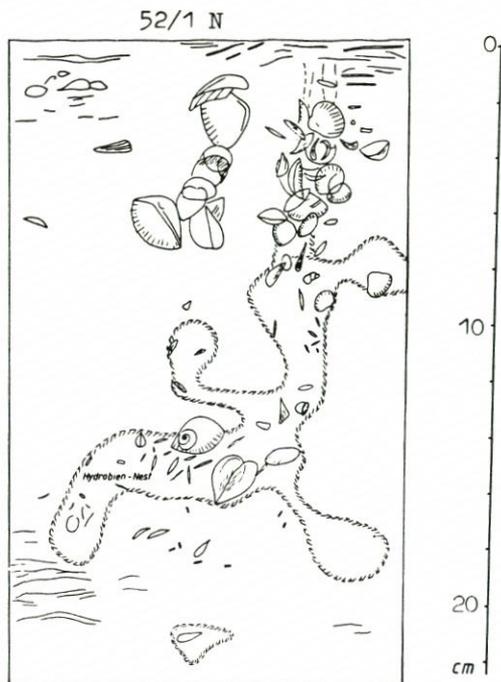


Abb. 46. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 52/1 N

In geringem Maße sind auch Gänge von *Heteromastus filiformis* und *Nereis diversicolor* vorhanden, die jedoch als Wühlformen unbedeutend bleiben.

- 3) Überprägtes Gezeitengefüge 18–23 cm: Eine ursprünglich vorhandene Gezeitenschichtung ist durch Kleinrippelgefüge, ähnlich Einheit 1, überprägt oder verändert, wie kleine Bereiche mit paralleler mm-Horizontalschichtung offenbaren.

Für alle weiteren Probennahmen (Abb. 47 bis 50) sind Mächtigkeitsschwankungen der obersten Schichteinheit von ± 1 cm gegeben; die Gefügestruktur wird bioturbat nur unbedeutend weiter verändert.

Interpretation der Beobachtungen: Für das Meßfeld 52 ist eine ausgeglichene Tendenz charakteristisch. An dieser Stelle sind nur längerfristige Veränderungen zu erwarten.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Meßfeldern ist die jüngere sedimentologische Vergangenheit des Meßfeldes 52 ohne nachweisbaren Einfluß der Baggerloch-Morphologie verlaufen. Ruhige Wetterlagen im Beobachtungszeitraum verhinderten weiteren Sandtransport, der erst bei erhöhten Strömungsenergien in den Herbst- und Wintermonaten zu erwarten ist.

Die Bioturbation ist geprägt durch *Arenicola marina*. Die starke Verbreitung und charakteristische Lebensweise können sich nur negativ auf Muschelansiedlungen auswirken. In Schillanreicherungen, verursacht durch das Fressverhalten, sind zahlreiche *Macoma*- und *Cardium*-Jungstadien vertreten.

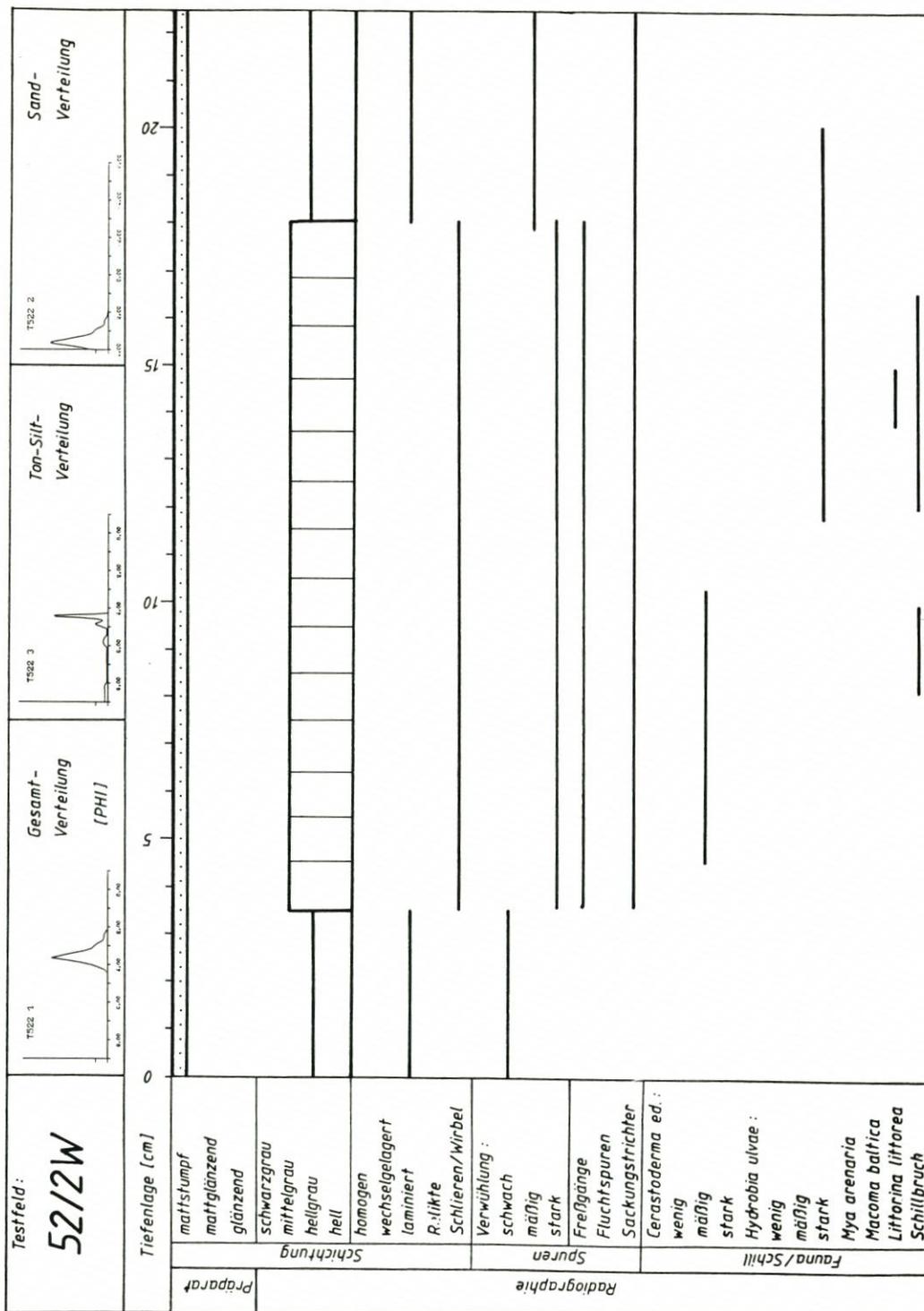


Abb. 47. Stechkasten-Profil 52/2 W



Abb. 48. Stechkasten-Profil 52/3 W

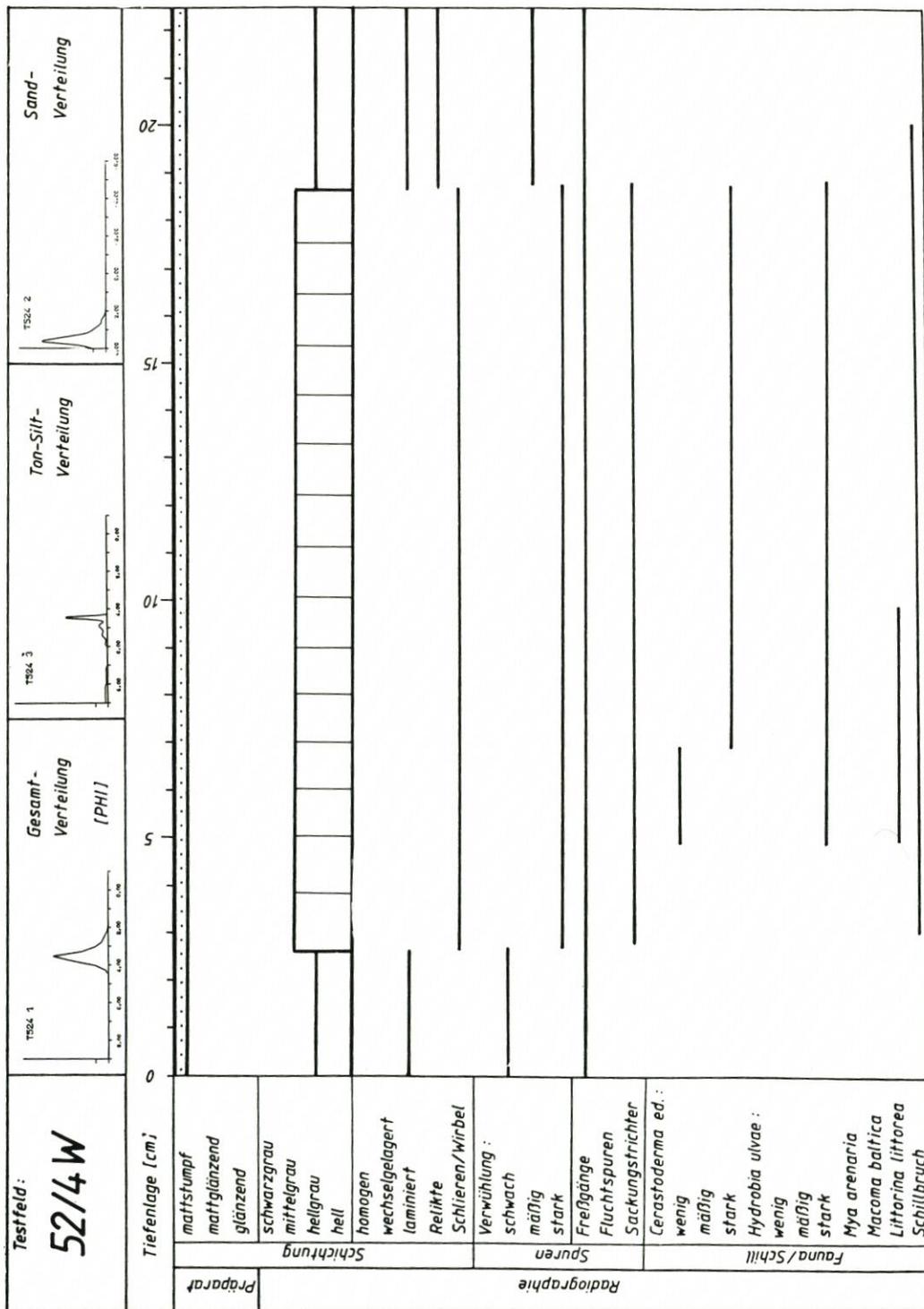


Abb. 49. Stechkasten-Profil 52/4 W

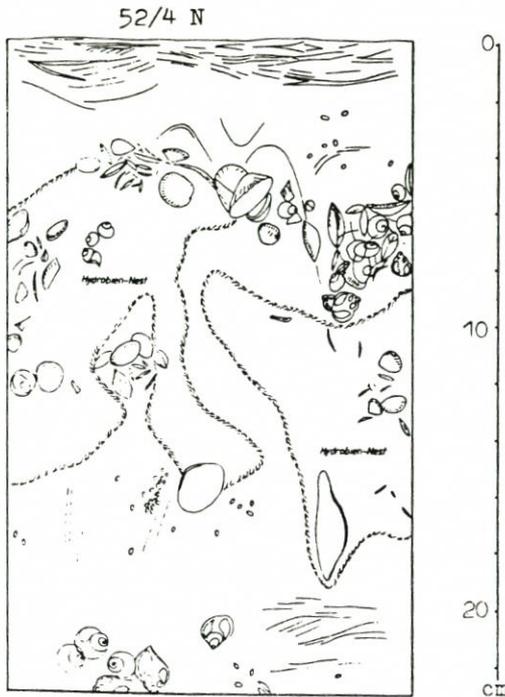


Abb. 50. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 52/4 N

10.4 Dünnschliffmikroskopie von Kleinprofilen¹⁾

Von den bis 5 cm tiefen Kleinprofilen der „Ministechkästen“ wurden nach Trocknung und Konservierung Dünnschliffe angefertigt. Sie sollten über den Feinstaufbau der Wattoberfläche Auskunft geben.

Schon makroskopisch erkennt man im Durchlicht bräunliche, in sandiger Matrix massenhaft auftretende „Pillen“ unterschiedlicher Größenordnung in ovaler Form. Anschnitte von *Cardien*, *Hydrobien* und Wurmgängeln geben Einblick in die Internstrukturen der Weichkörper.

Schnitte von *Cardium edule*: Die Schockgefrierung konserviert sie in Lebendstellung. Der Längsdurchmesser über das Ligament schwankt bei acht Exemplaren zwischen 5 und 10 mm bei 0,3 mm Schalenstärke. Es handelt sich also ausschließlich um juvenile Formen, die sich nach der Vernichtung der *Cardien*-Bestände im „Eiswinter“ 1978/79 und einer weiteren Abdrift im folgenden Winter erneut ansiedelten. Der Ablauf dieses Geschehens läßt sich in der Schillverteilung von Profil 54 nachvollziehen (vgl. Abb. 38, 54/4 N).

Im Internkörper der Herzmuscheln sind dunkle Kotpellets erhalten, deren Formung und Größe denen der Umgebung entspricht (Abb. 51, 53). Sie erklären sich als komprimierter Verdauungsrückstand der gefilterten Suspensionen. Ähnliche Identifizierungsmethoden für Pillenkörper wandte schon Cox (1960) an, als er deren Herkunft durch die Analysierung von Verdauungspartikeln im Darmtrakt fossiler Wurmreste und Schnecken nachvollzog.

Die Pellets sind durch eine optisch klare, farblose Hülle voneinander getrennt, die sich als gallertartige Sekretmasse erklärt und verdauende Fermente enthält (KÜKENTHAL u. RENNER,

¹⁾ Dieser Abschnitt ergänzt die Beschreibungen der frischen Wattoberfläche im Abschnitt 9.3.

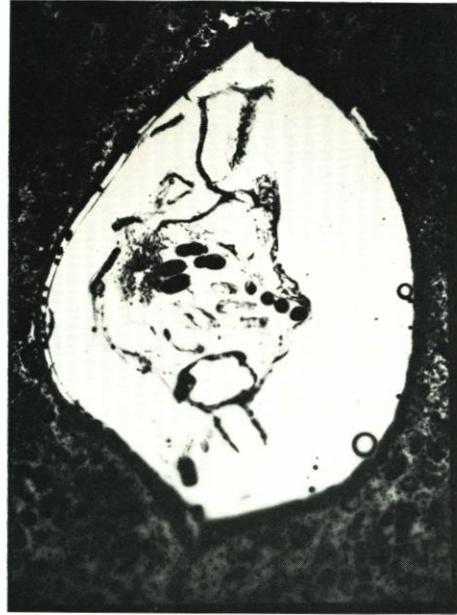


Abb. 51. *Cardium edule* juv. Anschnitt des Weichkörpers, Kotpellets intern erhalten. Einfach polarisiertes Licht



Abb. 52. Wurmanschnitt, Weichkörper mit Pellets, leicht geschrumpft. Wahrscheinlich *Heteromastus filiformis*. Einfach polarisiertes Licht

1982). Sie unterbindet offensichtlich ein Verschmelzen der Pillensubstanz untereinander und beeinflusst wesentlich seine mechanische Stabilität.

In Tiefen von mehreren Zentimetern sind massenhaft Pellets eingebettet, die trotz Kontakt mit mikroskopisch scharfkantigen Quarzkörnern keinerlei Auslösungserscheinungen zeigten. Sie können mit Sand transportiert werden, ohne zu zerfallen (REINECK, 1963).

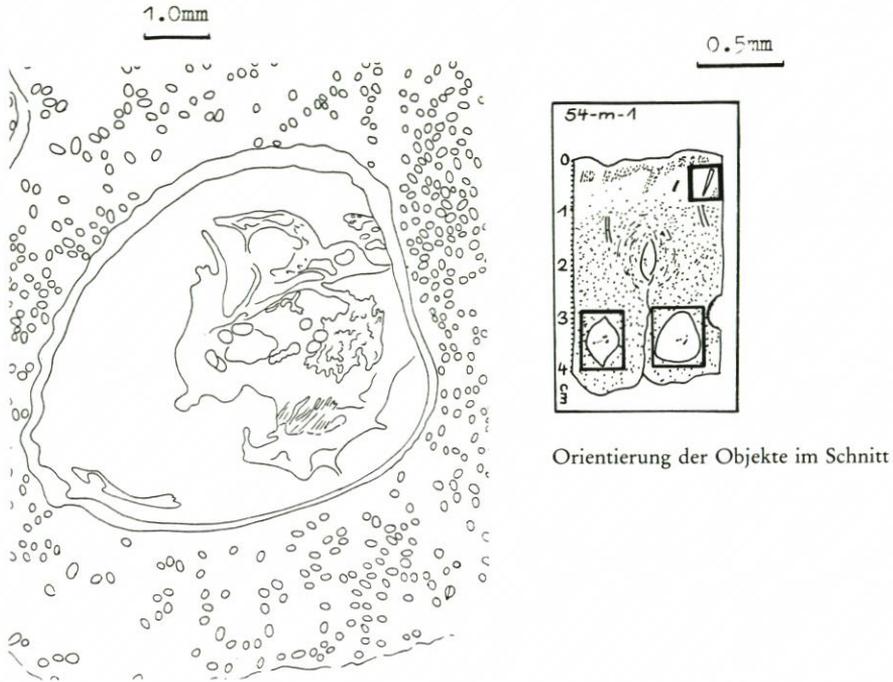


Abb. 53. *Cardium edule* juv. Zeichnung der wichtigsten Konturen

Eine Einlagerung von Pillen durch Bioturbation untersuchten HAVEN u. MORALES-ALAMO (1972). Mit Hilfe fluoreszierender und radioaktiver Partikel belegten sie Einturbierungen bis in 15 cm Tiefe.

In Dünnschliffen von Wattproben, die schon verschiedene Arbeitsgänge durchlaufen hatten und deren Porenwasservolumen und -chemismus nicht mehr dem natürlichen entsprach, zeigten sich deutliche Zerfallserscheinungen unter Auflösung des Schleim-Bindemittels. Sie verschmelzen zu einer braunen, feinkörnigen Matrix, deren biogene Herkunft nicht mehr zu identifizieren ist.

Wurmschnitte: Abb. 52 stellt den Anschnitt eines Wurmes dar, etwa 5 mm unter der Wattoberfläche. Der Gang ist 1 mm weit. (Die Klassifikation ist durch die Methodik der Präparation sehr erschwert. Der Gangdurchmesser spricht für *Heteromastus filiformis*). Der Wurmtrorso ist gefüllt mit Pellets, deren Formung durch Peristaltik des segmentierten Körpers geschieht (SCHÄFER, 1955) und die in ihrer Größe in etwa denen der *Cardien* entsprechen.

Aufbau der Pellets (Abb. 54, 55): Die Auswahl der Nahrung aus der Suspension scheint in erster Linie von der Korngröße abhängig zu sein, die von der Fauna gerade noch verdaut werden kann. Die von einer juvenilen *Cardium* maximal verdaute Korngröße betrug etwa 0,16 mm, also dem mittleren Feinsandbereich entsprechend. Neben Quarz, Calcit, Plagioklas, Chlorit, Glauconit sind Reste von Mikrofauna und bräunliche Fasern am Aufbau der Pillen beteiligt (vgl. auch RICKLEFS, 1983).

Einige Bruchstücke sind Reste von wahrscheinlich radiären Diatomeen. Sie zeigen als *Centricae*-Diatomeen meist einen kreisförmigen oder abgerundet-dreieckigen Umriss und bilden nach FÜCHTBAUER (1977) einen wesentlichen Teil des Phytoplanktons. Andere Bruchstücke waren nicht weiter bestimmbar; nähere Informationen über Art und Aufbau der

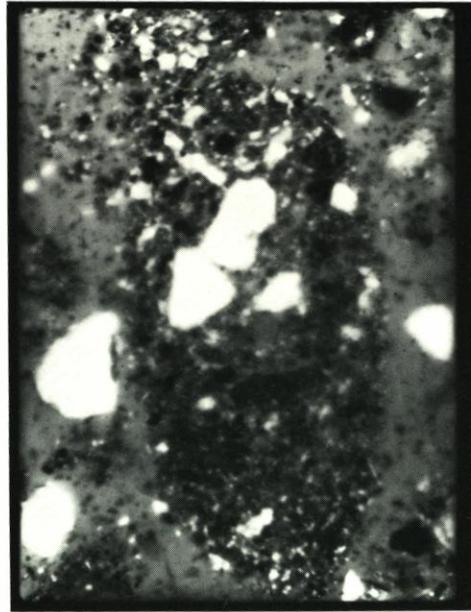


Abb. 54. Kotpellet. Deutlich erkennbar der feinkörnige Aufbau mit hell erscheinenden Quarzkörnern. Polarisationsmikroskop, schräg gekreuzte Nicols

0.1mm



Abb. 55. Gleiches Kotpellet im einfach polarisierten Licht. Faserige organische Substanz, Gitterrelikt von Diatomeen (Centricae, planktonisch)

0.1mm

faserigen Substanz lagen unterhalb der Mikroskopauflösung. Weitere Untersuchungen bleiben elektronenmikroskopischen Untersuchungen vorbehalten (RICKLEFS, 1984). Weitere Ergänzungen des Kenntnisstandes sind in Kürze zu erwarten.

Größe und Form der Pellets: Die Längsachsen bewegen sich zwischen 0,160 und 0,360 mm bei einer Breite von 0,120 bis 0,180 mm, also von ovaler Form. Eine zweite Gruppe ist etwa um den Faktor 3 kleiner. Da ein Teil dieser Beobachtungen und Messungen mit Sicherheit auf Schnitteffekten beruht, ist ein hoher potentieller Fehler der Längsachsen unterhalb 0,360 mm zu berücksichtigen. Die Größenanalysierungen von GAST (1980) bei der Oberflächenphotographie erbrachten die maximale Länge von 0,4 mm (vgl. auch Abschn. 9.3). Eine Zuordnung nach Art und Größe zur Wattfauna war aus Gründen mangelnder Differenzierungsmerkmale nicht möglich.

Die eiförmige Rundung der Pellets ist für sessile Muschelarten nicht unwichtig. Ein Abgeben von ungeformten Rückständen brächte Gefahr für Nahrung und Atmung durch ein Verschließen des Siphonalschachts (SCHÄFER, 1953). Gerundete Pellets werden somit offenbar leichter von einer Strömung entfernt als andere.

11. Überlegungen zur organischen und anorganischen Schlick sedimentation

Aus den Beobachtungen in der Meldorfer Bucht ergibt sich, daß durch biogene Aktivität ein erheblicher Anteil von Suspensionspartikeln und Feinsedimenten als Kotpellets gebunden und dadurch stabilisiert wird. BROCKMANN (1935) meinte sogar, daß Schlick nur dort entsteht, wo die Lebensbedingungen für die Organismen gegeben sind, durch deren Tätigkeit erst die herangeführten Sinkstoffe in Schlick umgewandelt werden. Auch SCHWARZ (1932) stellte schon damals eine physikalische mechanische Ablagerung von Schlick in Frage.

Der bisweilen erhebliche Schlickfall in Ästuaren oder Hafengebieten oder die hohe Schlicksedimentationsrate im Watt südlich des Hindenburg-Dammes sind dagegen nicht mit Biodeposition zu erklären. In den Hafengebieten mögen ebenso wie in den Ästuaren Flockungen in den Vordergrund treten. Für das Gebiet südlich des Hindenburg-Dammes kann auch diese Erklärung alleine nicht überzeugen. Hier sind Umlagerungsvorgänge größeren Umfangs wahrscheinlich, sei es, daß Schlick aus anderen Sedimentationsräumen angeliefert wird, sei es, daß ein Überschuß an Schluff und Ton durch Erosion in tertiären oder pleistozänen Sedimenten antransportiert wird. Hier wäre eine Sedimentation im Sinne der Vorstellungen von POSTMA (1961) durchaus denkbar.

Hierzu sind noch viele Fragen offen. Die Ergebnisse aus der Meldorfer Bucht dürfen nicht unbesehen auf andere Bereiche des Wattenmeeres übertragen werden. Die vergleichende Untersuchung verschiedener Sedimentationsräume verspricht weitergehende Erkenntnisse.

12. Schriftenverzeichnis

- BAGNOLD, R. A.: Deposition in the process of hydraulic transport. *Sedimentology* 10, 1968.
 BROCKMANN, C.: Diatomeen und Schlick im Jadegebiet. *Senckenb. Naturf. Ges.* 430, 1935.
 BRÜMMER, G.: Untersuchungen zur Genese der Marschen. Dissertation, Univ. Kiel, 1968.
 BRÜMMER, G. u. LICHTFUSS, R.: Phosphorgehalte und Bindungsformen in den Sedimenten von Elbe, Trave, Eider und Schwentine. *Naturwissenschaften* 65, 1978.
 BRÜMMER, G. u. SCHROEDER, D.: Bestand, Umwandlung und Neubildung von Tonmineralen in küstennahen Sedimenten der Nordsee. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 1, 1976.

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Bericht über Dichtemessungen im Wattgebiet vor Büsum. Kiel, 1981.
- CADÉE, G. C.: Sediment reworking by *Arenicola marina* on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 10, Nr. 4, 1976.
- CARVER, R. E.: Procedures in Sedimentary Petrology. New York, London, Sydney, Toronto (Wiley-Interscience), 1971.
- COX, L. R.: The preservation of moulds of the intestine in fossil Nuculana (Lamellibranchia) from the Lias of England. Palaeontology 2, 1960.
- DITTMER, E.: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. Meyniana, Bd. 1, 1952.
- DUANE, D. B.: Significance of skewness in recent sediments, Western Pamlico Sound, North Carolina. J. Sed. Petrol. 39/4, 1964.
- ELWERT, D.: Erläuterungen zur Bodenkarte 1 : 10 000 Speicherkoog Dithmarschen, Nordteil I und II. Geol. Landesamt Schleswig-Holstein, Kiel, 1977.
- FIGGE, K., KÖSTER, R., THIEL, H. u. WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht - Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. Die Küste, H. 35, 1980.
- FIGGE, K.: Korngrößenverteilungen und ihre Änderungen entlang mehrerer küstennormaler Profile in der Dithmarscher Bucht. Unveröffentl. Bericht, 1983.
- FISHER, J. J.: Comparison between sieving and settling-tube determinations of sand sizes by using discriminant analysis: Comment. Geology (U.S.A.), 5, 1977.
- FOLK, R. L. u. WARD, W.: Brazos River Bar: A study in the significance of grain-size parameters. J. Sed. Petrol. 27/1, 1957.
- FOLK, R.: A review of grain-size parameters. Sedimentology 6, 1966.
- FÜCHTBAUER, H. u. MÜLLER, G.: Sedimente und Sedimentgesteine. Stuttgart 1977.
- GELDOF, H. J. u. SLOT, R. E.: Settling-tube analysis of sand. Laboratory of Fluid Mechanics Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Internal Report, No. 4, 1979.
- GÖHREN, H.: Gegenläufige Restströmungen im Küstenmeer zwischen Amrum und Knechtsand und ihr Einfluß auf die Sandbewegung. DFG-Forschungsbericht Sandbewegung im Küstenraum. Boppard, 1979.
- GROSSMANN, M.: Bestandsaufnahme der Makrofauna im Testgebiet des Büsumer Wattes. Zwischenbericht im „Schlickprojekt“ des KFKI. Hamburg, 1979.
- GROSSMANN, M., MEIN, B., SPYCHALA, H. u. THIEL, H.: Einwirkungen von Organismen auf den Schlick. Abschlußbericht im „Schlickprojekt“ des KFKI. Unveröffentl., 1981.
- HANSEN, K.: The sedimentation along the Römödam. Medd. fra Dansk geol. Foren. 13/2, 1956.
- HAVEN, D. S. u. MORALES-ALAMO, R.: Biodeposition as a factor in sedimentation of fine suspended solids in estuaries. Geol. Soc. Amer. Mem. 133, 1972.
- HIGELKE, B.: Morphodynamik und Materialbilanz im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe. Ergebnisse quantitativer Kartenanalysen für die Zeit von 1936-1969. Dissertation, Univ. Kiel, 1975.
- HJULSTRÖM, F.: Transportation of detritus by moving water. In: Recent Marine Sediments, a symposium (Ed. by P. D. Trask). Spec. Publs. Soc. econ. Paleont. Miner. Tulsa, 4, 1939.
- HUNDT, C., KÖNIG, D. u. REINECK, H.-E.: Die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuerker Watt infolge der geplanten Dammbauten für das Hafenprojekt Scharhörn. Die Küste, H. 30, 1977.
- JONES, J. R. u. CAMERON, B.: Comparison between sieving and settling-tube determinations of sand sizes by using discriminant analysis. Geology 4/12.
- KACHHOLZ, K. D.: Gestalt und Entwicklung der Ostseeküste im Bereich Laboe-Bottsand. Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Kiel, 1978.
- KACHHOLZ, K. D.: Sedimenttypen der Flachwasserzone im Ostteil der Kieler Außenförde (Schleswig-Holstein). Meyniana Bd. 31, 1979.
- KACHHOLZ, K. D.: Erläuterungen des FORTRAN-IV-Programmpaketes für die Auswertung von Korngrößenverteilungen. Geol. Inst. Univ. Kiel. Unveröffentl., 1980.
- KEMPE: Geochemische und elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt. Abschlußbericht für das Schlickprojekt des KFKI. Unveröffentl., 1980.
- KLUG, H. u. HIGELKE, B.: Ergebnisse geomorphologischer Seekartenanalysen zur Erfassung der Reliefentwicklung und des Materialumsatzes im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe 1936-1969. DFG-Forschungsbericht Sandbewegung im Küstenraum. Boppard, 1979.

- KÖSTER, R.: Unveröffentl. Vortrag im „Schlickkolloquium“ des KFKI. Hamburg 1979.
- KRUMBEIN, W. C.: Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. *J. Sediment. Petrol.* 6, 1936.
- KÜKENTHAL, W. & RENNER, M.: Leitfaden für das zoologische Praktikum. Stuttgart 1982.
- LANG, A. W.: Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung des Dithmarscher Wattes von der Mitte des 16. Jahrhunderts bis zur Gegenwart. *Hamburger Küstenforschung*, H. 31, 1975.
- LINKE, O.: Die Biota des Jadebusenwattes. *Helgol. wiss. Meeresunters.*, Jg. 1, H. 3, 1939.
- MATTIAT, B.: Eine Methode zur elektronenmikroskopischen Untersuchung des Mikrogefüges in tonigen Sedimenten. *Geol. Jahrb.* 88, 1969.
- MCCAVE, I. N.: Mud in the North Sea. In: E. D. Goldberg (ed.), *North Sea Science*, p. 75-100, Cambridge, Massachusetts, London (MIT Press), 1971.
- MICHAELIS, H.: Die Makrofauna des nördlichen Eversandes (Wesermündung). Forschungsstelle Norderney, Bd. 27, 1976.
- MÜLLER, C. D.: Fauna und Sediment in der Leybucht. Forschungsstelle Norderney, Bd. 11, 1960.
- NOMMENSEN, B.: Die Sedimente des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres. Dissertation, Univ. Kiel, 1983.
- OLSEN, H. A.: The influence of the Romö-Dam on the sedimentation in the adjacent part of the Danish Wadden-Sea. *Geogr. Tidskrift* 58, København, 1959.
- PAERL, H.: Microbial attachment to particles in marine and freshwater ecosystems. *Microbial Ecology* 2, 1975.
- PAGE, H. G.: Phi-millimeter conversion table. *J. Sed. Petrol.* 25, 1955.
- PIERCE, J. W. u. SIEGEL, F. R.: Quantification in clay mineral studies of sediments and sedimentary rocks. *J. Sed. Petrol.* 39, 1969.
- PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. *Z. Westküste, Kriegsheft*, 1943.
- POSTMA, H.: Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea Res.*, Vol. 1, 1961.
- PRÖBER, C.: Geologisch-sedimentologische Oberflächenkartierung im Watt der Nordstrander Bucht. Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Kiel, 1978.
- REINECK, H. E.: Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. *Abh. Senckenb. Naturf. Ges.* 505, 1963.
- REINECK, H.-E.: Das Watt, Ablagerungs- und Lebensraum. Frankfurt, 1970.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. *Hamburger Küstenforschung*, H. 33, 1975.
- RICKLEFS, K.: Unveröffentl. Diplom-Arbeit, in Vorbereitung. Kiel 1984.
- RUBEY, W. W.: Settling velocities of gravel, sand and silt-particles. *Am J. Sci.* 225, 1933.
- Schäfer, W.: Zur Untersuchung gleichförmiger Kotpillen meerischer Evertebraten. *Senckenbergiana* 34, 1953.
- SCHÄFER, W.: Aktuopaläontologie, nach Studien in der Nordsee. Frankfurt, 1962.
- SCHMIDT, R.: Geologische Untersuchungen des Holozäns in der östlichen Meldorfer Bucht und angrenzender Marschen (Dithmarschen). Dissertation, Univ. Kiel, 1975.
- SCHNEIDER, W.-M.: Korngrößen- und Schilluntersuchungen in Holozänablagerungen der schleswig-holsteinischen Westküste (Deutsche Bucht, Nordsee). Dissertation, Univ. Kiel, 1979.
- SCHWARZ, A.: Der tierische Einfluß auf die Meeressedimente - besonders auf die Beziehung zwischen Verfrachtung, Ablagerung und Zusammensetzung von Wattedimenten. *Senckenbergiana* 14, 1932.
- SHARP, R. P. u. FAN, P. F.: A sorting index. *J. of Geol.* 71, 1963.
- SHIDELER, G. L.: A Comparison of Electronic Particle Counting and Pipette Techniques in Routine Mud Analysis. *J. Sed. Petrol.* 46, 1976.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. *Mitt. Leichtweiß-Inst. d. TU Braunschweig*, H. 40, 1974.
- SMAYDA, T. J.: Some measurements of the sinking rates of fecal pellets. *Limnology and Oceanography* 5/14, 1969.
- STRAATEN, L. M. J. U. VAN: Composition of shell beds formed in tidal flat environment in the Netherlands and in the Bay of Arcachon (France). *Geologie Mijnb. sd* 19, 1956.
- STRIDE, A. H.: Sediment transport by the North Sea. In: E. D. Goldberg (ed.), *North Sea Science*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1973.

- SUNDBORG, A.: The River Klarälven; a study in fluvial processes. Geog. Ann. Stockholm, 38, 1956.
- TAIRA, A. u. SCHOLLE, P. A.: Origin of bimodal sands in some modern environments. J. Sed. Petrol. 49/3, 1979.
- UNSÖLD, G.: Jahreslagen und Aufwachsdaten in Schlicksedimenten eines künstlichen, gezeiten-offenen Sedimentationsbeckens. Meyniana 26, 1974.
- VERSTAPPEN, H.-TH.: Remote sensing in geomorphology. New York, Amsterdam, Oxford, 1977.
- VOGEL, F.: Probleme und Verfahren der numerischen Klassifikation. Göttingen, 1975.
- VOGEL, F. u. FORST, H. T.: Klassifikationsprogramme: Beschreibung von den Programmversionen YHAK und KDIAG. Institut für Statistik und Ökonometrie der Univ. Kiel, 1978.
- WADELL, H.: Some new sedimentation formulas. Physics 5, 1934.
- WALGER, E.: Zur Darstellung von Korngrößenverteilungen. Geol. Rundsch. 54, 1964.
- WALGER, E.: FORTRAN-IV-Programme zur EDV-Bearbeitung von Korngrößenendaten. Geol. Inst. Kiel. Unveröffentl., 1971.
- WENTWORTH, C. K.: A scale of grade and class terms for classifying sediments. J. Geol. 30, 1922.
- WENTWORTH, C. K.: Method of Computing Mechanical Composition Types in Sediments. Bull. Geol. Soc. Am., 40, 1922.
- WERNER, F.: Herstellung von ungestörten Dünnschliffen aus wassergesättigten, pelitischen Lokkersedimenten mittels Gefriertrocknung. Meyniana, Bd. 16, 1966.
- WOHLBERG, E.: Die Wattenmeer-Lebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgoländer wiss. Meeresunters., H. 1, 1937.
- WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste, Jg. 2, H. 2, 1953.
- ZABAWA, C. F.: Estuarine Sediments and Sedimentation processes in Winyah Bay, South Carolina. Technical Rep. 11, CRD Univ. South Carolina, 1976.
- ZABAWA, C. F.: Microstructure of Agglomerated Suspended Sediments in Northern Chesapeake Bay Estuary. Science 202, 1978.