

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an schlickbildenden Schwebstoffen aus dem Neßmersieler Außentief

Von KLAUS RICKLEFS

Zusammenfassung

Im Rahmen einer begleitenden Sonderuntersuchung innerhalb des KFKI Forschungsprojektes „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (Räumbootuntersuchungen)“ sind die stofflichen Zusammensetzungen und die morphologischen Strukturen schlickbildender Schwebstoffe aus dem Neßmersieler Außentief (niedersächsisches Wattenmeer) exemplarisch mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht worden.

Das überwiegend feinkörnige suspendierte Material besteht aus komplex zusammengesetzten Agglomeraten anorganischer und organischer Ausgangskomponenten. Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung im Außentief wirken sich in erster Linie auf die Schwebstoffmenge aus. Die qualitative Zusammensetzung des suspendierten Materials bleibt recht einheitlich.

Summary

In a special investigation within the KFKI Research Project „Depth Stabilisation of Offshore Channels“ the substantial composition and the morphological structure of mud forming suspended matter from the Neßmersiel offshore channel (Lower Saxonian tidal flats) were investigated using the scanning electron microscope.

The mostly fine-grained suspended matter consists of complex composed agglomerates of mineral and organic components. Changes in current velocity and in current direction in the offshore channel mostly influence the concentration of suspended sediments. The qualitative composition of the suspended matter remains quite uniform.

Inhalt

1. Einleitung.	295
2. Material und Methoden	296
2.1 Probenentnahme.	296
2.2 Präparation.	296
3. Ergebnisse und Diskussion.	297
3.1 Stoffliche Zusammensetzung und morphologische Strukturen der Schwebstoffe	297
3.2 Auswirkungen unterschiedlicher Strömungszustände auf den Stoffbestand der Schwebstoffe.	302
4. Fazit.	304
5. Schriftenverzeichnis	304

1. Einleitung

Versandung und Verschlickung von Rinnen und Häfen sind an der deutschen Nordseeküste ein alltägliches Problem. Die Beseitigung dieser unerwünschten Ablagerungen zur Aufrechterhaltung der Schifffahrt oder zur Sicherung der Vorflut erfordert meist erhebliche

finanzielle Aufwendungen. Aus diesem Grunde werden seit Jahrzehnten Untersuchungen zu diesem Themenkreis durchgeführt.

Im Rahmen des KFKI Forschungsvorhabens „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ sind die räumende Wirkung von Spülungen und die Einsatzmöglichkeiten eines speziellen Räumbootes am Beispiel des Neßmersieler Außentiefs eingehend untersucht worden (ERCHINGER, COLDEWEY u. PROBST, 1986). Das Neßmersieler Außentief liegt an der niedersächsischen Wattenmeerküste etwa in der südlichen Verlängerung des Seegattes zwischen den Inseln Norderney und Baltrum. Über den Hafen wird der Fährverkehr nach Baltrum abgewickelt.

Für die Bewertung von Transportvorgängen ist das Wissen über die Materialzusammensetzung und Materialbeschaffenheit suspendierter Sedimente von besonderem Interesse. Aus diesem Grunde ist vom Bauamt für Küstenschutz, Norden, die Frage an die Arbeitsgruppe Küstengeologie des Geologischen Institutes der Universität Kiel gerichtet worden, wie sich schlickbildende Schwebstoffe zusammensetzen und welchen Veränderungen sie bei verschiedenen Strömungssituationen unterliegen. Im Zuge einer in Auftrag gegebenen Sonderuntersuchung sind im Herbst 1986 exemplarisch Proben im Neßmersieler Außentief entnommen worden. Diese wurden am Geologischen Institut unter Anwendung erprobter Methoden mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

Wir möchten an dieser Stelle dem Bauamt für Küstenschutz, Norden, für die geleistete Unterstützung und die ausgezeichnete Zusammenarbeit danken. Besonders bedanken möchten wir uns auch bei Herrn Dr. C. Samtleben und seinen Mitarbeitern vom Geologischen Institut, die die Arbeiten am Rasterelektronenmikroskop ermöglichten.

2. Material und Methoden

2.1 Probenentnahme

Im Neßmersieler Außentief wurden bei folgenden Strömungszuständen Schwebstoffproben entnommen:

1. unbeeinflusster Ebbstrom
2. durch Ablassen der Spülwassermenge gesteigerter Ebbstrom (Spülstrom)
3. unbeeinflusster Flutstrom
4. Spülstrom mit Räumbooteinsatz
5. Flutstrom nach Räumbooteinsatz bei vorangegangener Ebbe

Der Entnahmeort liegt 1000 m seewärts des Spülsiels. Dies entspricht ungefähr der halben Länge des Außentiefs. Die Entnahmetiefe beträgt etwa einen Meter unter Wasseroberfläche.

2.2 Präparation

Für die Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop werden die Festsubstanzen der Suspension mit Hilfe von NUCLEOPORE Polykarbonatfiltern (Porenweite 0.1 μm , Durchmesser 13 mm) aus 1 bis 2 ml gegebenenfalls verdünnter Ausgangsprobe abgeschieden.

Da die Präparate im Rasterelektronenmikroskop unter Hochvakuumbedingungen bearbeitet werden, muß das Probenmaterial, bevor es in das REM gelangt, vollständig getrocknet werden. Dabei ist an die Trocknungstechnik der Anspruch zu stellen, daß weder die Gefüge der Schwebstoffteilchen, noch die Strukturen empfindlicher biologischer Objekte zerstört werden. Aus diesem Grunde ist eine einfache Lufttrocknung aus der wäßrigen Phase heraus

ungeeignet. Die starken Kohäsionskräfte zwischen den Wasserteilchen führen zwar im Inneren der Flüssigkeit zu einem Kräftegleichgewicht, an den Grenzflächen zu den Feststoffen treten jedoch Kräfte in radialer Richtung (Ursache für Tropfenbildung) und in vertikaler Richtung auf (Ursache für Oberflächenspannung). Werden Teilchen aus der Suspension durch einfaches Verdampfen der Flüssigkeit entwässert, entfalten diese Kräfte ihre deformierenden Wirkungen, sobald die Partikel aus der Flüssigkeit herausragen. Die Folge sind verformte, geschrumpfte und kollabierte Artefakte.

Eine ausreichend schonende Methode zur Entwässerung der Untersuchungsprojekte stellt die Kritische-Punkt-Trocknung (KPT) dar. Bei diesem Verfahren wird die Eigenschaft der Stoffe ausgenutzt, daß oberhalb bestimmter, kritischer Druck- und Temperaturbedingungen die Phasengrenze flüssig-gasförmig nicht vorhanden ist. Dies bedeutet, daß die Dichten der Flüssigkeit und des Gases jenseits des kritischen Punktes gleich sind und Oberflächenkräfte nicht auftreten.

Da bei den extrem hohen kritischen Werten von Wasser ($T_{kr} = 374^\circ\text{C}$ und $P_{kr} = 217.7$ bar) die Objekte zerstört werden, ist hierbei die KPT nicht anwendbar. Das Primärmedium Wasser muß zunächst durch flüssiges Kohlendioxid (CO_2) ersetzt werden, welches mit $T_{kr} = 31^\circ\text{C}$ und $P_{kr} = 71.5$ bar hinsichtlich der Probenaufbereitung wesentlich günstigere kritische Werte besitzt. Da Wasser und flüssiges CO_2 jedoch nicht miteinander mischbar sind, muß der Weg über ein geeignetes Austauschmedium, in diesem Fall 2,2-Dimethoxypropan (DMP), gegangen werden. DMP setzt sich mit Wasser zu Methanol und Aceton um. Beide Verbindungen sind vollständig mit flüssigem CO_2 mischbar (MULLER u. JACKS, 1975). Wird nun das Stoffgemisch aus flüssigem CO_2 und Feststoffen in einer entsprechenden Druckkammer den kritischen Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt und das gasförmige Kohlendioxid vorsichtig abgeführt, können selbst empfindlichste Schwebstoffteilchen ohne allzu große Schrumpf- und Verformungseffekte getrocknet werden.

Der genaue Ablauf der Präparationstechnik von der Filtration, über die Trocknung bis hin zur Beschichtung der Präparatoberfläche mit einer den Elektronenfluß leitenden Goldbeschichtung ist ausführlich bei RICKLEFS (1984) beschrieben.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Stoffliche Zusammensetzung und morphologische Strukturen der Schwebstoffe

Die im Neßmersieler Außentief suspendierten Sedimente setzen sich aus zwei großen Stoffgruppen zusammen (Abb. 1). Die erste Gruppe umfaßt Stoffe mineralischer Zusammensetzung. Ihre Zusammensetzung variiert mit der Korngröße. Partikel mit einem Durchmesser größer als etwa $5\text{ }\mu\text{m}$ bestehen hauptsächlich aus Quarz, Glimmer, Feldspat und Karbonaten. Die feinkörnigeren Anteile setzen sich zum überwiegenden Teil aus Tonmineralen zusammen.

Neben mineralischen Stoffen befinden sich zahlreiche organogen-detritische Teilchen in Suspension. In diesem Zusammenhang sind besonders die auf vielen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen so häufig zu erkennenden Reste von Kieselalgen zu erwähnen (Abb. 2). Die Schalen der Diatomeen bestehen aus Opal, der amorphen Form des Quarzes. Bruchstücke dieser Schalen sind leicht an ihren auffälligen Formen zu erkennen, die häufig Gittern oder Siebböden ähneln. Verglichen mit den Mündungsbereichen von Weser oder Eider ist ihr Anteil am suspendierten Sediment im Neßmersieler Außentief bemerkenswert

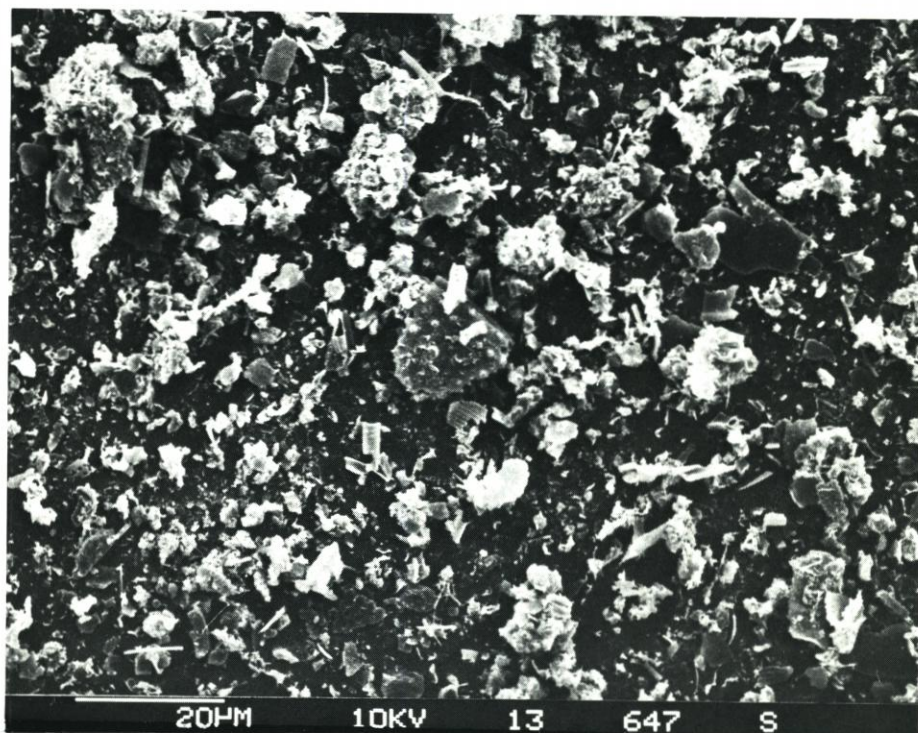


Abb. 1: Überblick über die Schwebstoffzusammensetzung einer Probe (Maßstab siehe Balken)

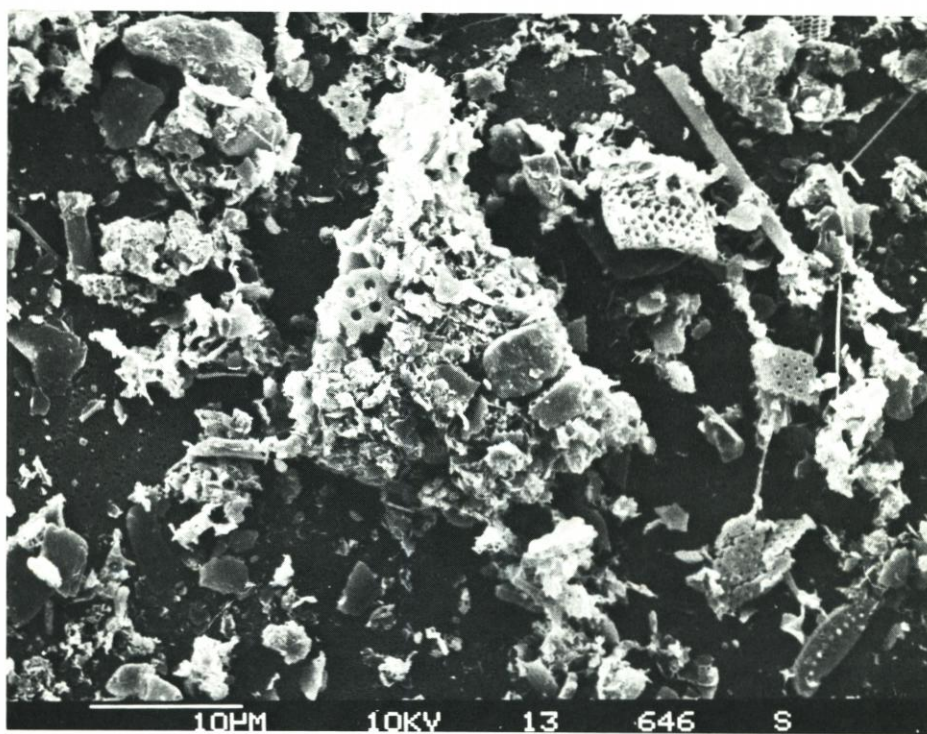


Abb. 2: Durch schleimige Fäden miteinander verklebte Reste von Diatomeen (Maßstab siehe Balken)

hoch. Neben den kieseligen Schalen der Diatomeen kommen gelegentlich auch sandschalige und kalkige Gehäuse von Foraminiferen und Coccolithospheriden vor.

Im Vergleich zu den auffälligen Fragmenten gehäusetragender Kleinstlebewesen sind andere organogene Materialien viel schwieriger zu entdecken. Neben einigen wenigen Algen mit Weichkörpern sind dies vor allem bakterielle Formen. Sie verbinden oder überziehen als fadenförmige Strukturen die meist komplex aus vielen Bausteinen zusammengesetzten Schwebstoffteilchen oder durchwirken diese in Form von gespinstartigen Gebilden (Abb. 3).

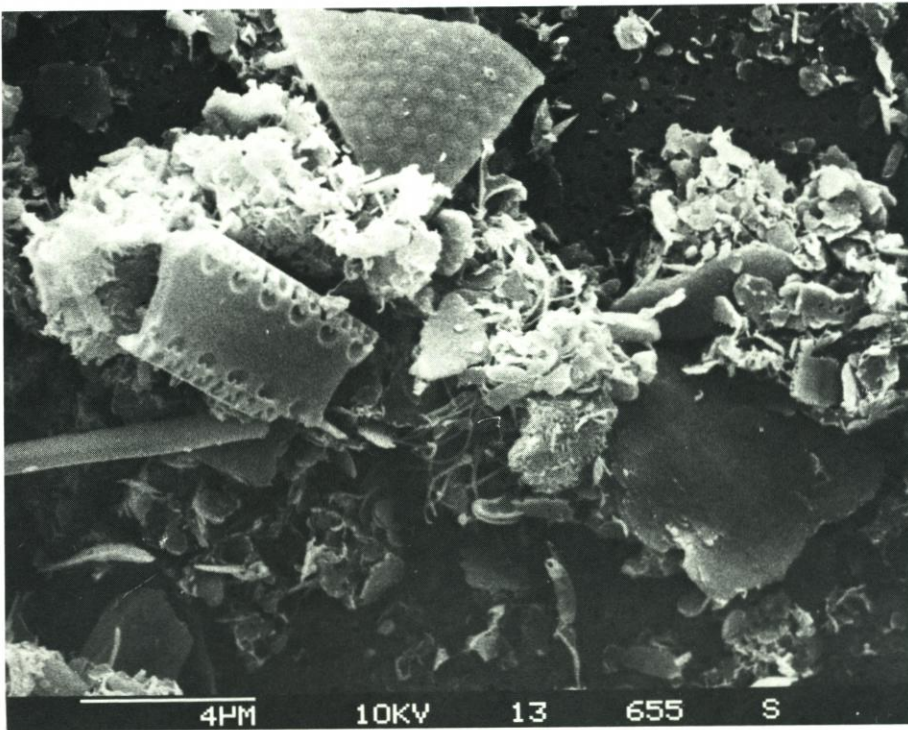


Abb. 3: Mikrobiologisch verfestigtes Agglomerat (Maßstab siehe Balken)

Da schleimige Fäden aber auch von einigen Diatomeenarten produziert werden, ist es sehr schwierig, diese Formen zweifelsfrei zuzuordnen. Für sedimentologische Fragestellungen ist allerdings auch von größerer Bedeutung, daß durch mikrobiologische Aktivität die Erosionsstabilität abgelagerter Sedimente erhöht werden kann (DE BOER, 1981; FÜHRBÖTER, 1983). Bei Schwebstoffen können die Mikroorganismen eine Zusammenballung oder Anlagerung von Teilchen erwirken, was zu Veränderungen der Sinkgeschwindigkeit (PAERL, 1975; LAL, 1977; GREISER, 1985) führen kann.

Einen wesentlichen Anteil am Stoffbestand der litoralen Schwebstoffe nehmen die von Muscheln, Würmern und Krebstieren produzierten Kotpillen ein (ZABAWA, 1978). Kotpillen sind auf den Fotos leicht an ihrer scharf begrenzten, runden oder ovalen Form zu erkennen. Das innere Gefüge ist dicht, da die unverdaulichen mineralischen und organischen Reste durch die Darmtätigkeit kompaktiert werden. Die äußeren Teilchen verlaufen mehr oder minder parallel zur Oberfläche und bilden zusammen mit der schleimigen Kotpillenmembran, die bei frischen Faeces noch gut zu erkennen ist, die glatte Oberfläche der Kotpillen (Abb. 4).

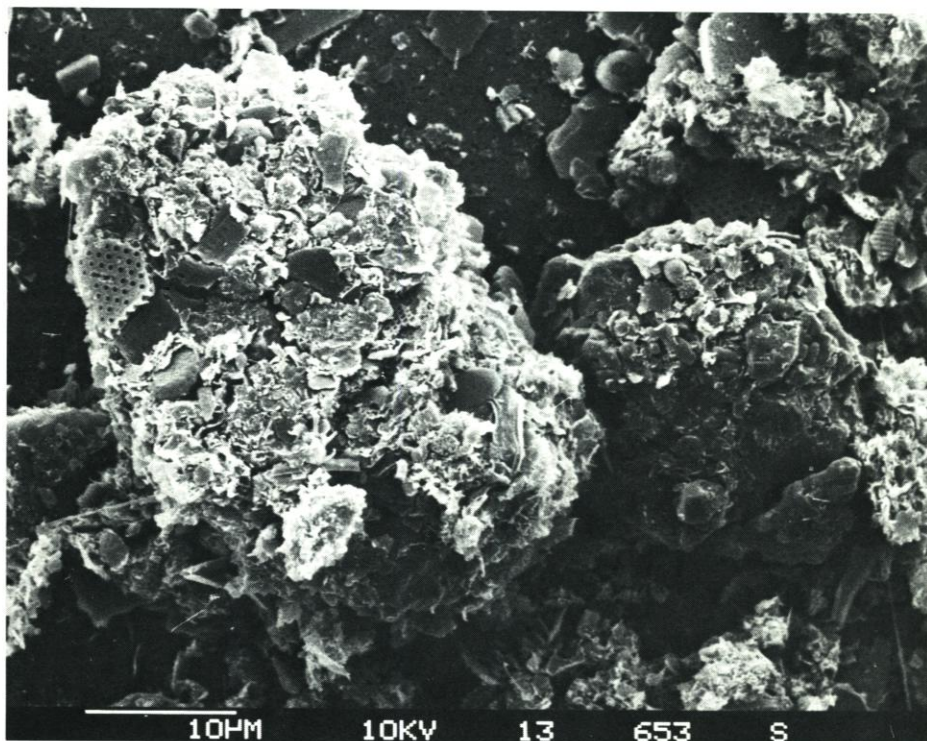


Abb. 4: Frische Kotpillen (Maßstab siehe Balken)

Ihre effektive Sinkgeschwindigkeit ist – bedingt durch den kompakten Aufbau – um ein Vielfaches höher, als die der feinen Partikel, aus denen sie aufgebaut sind (Abb. 5). Aus diesem Grund nimmt diese Form der Biodeposite eine zentrale Rolle bei der Schlickbildung in offenen Wattgebieten ein (GAST, KÖSTER u. RUNTE, 1984; GROSSMANN et al., 1981; DITTMANN, 1984).

Neben Teilchenzusammenballungen, deren Entstehung auf die Tätigkeit von Lebewesen zurückzuführen ist, kommen aber auch andere Agglomerationsformen vor. Diese meist als Tonflocken bezeichneten Gebilde entstehen durch die Wechselwirkung von Teilchen mit elektrisch unterschiedlich geladenen Oberflächen. Die unter dem Sammelbegriff „Elektrochemische Flockung“ zusammengefaßten Bildungsmechanismen (WHITEHOUSE, JEFFREY u. DEBBRECHT, 1960; VAN OLPEN, 1963) führen zu Agglomeraten, die sich durch eine relativ lockere Struktur auszeichnen (Abb. 6). Durch derartige Vorgänge schließen sich nicht allein einzelne Mineralkörner zu größeren Einheiten zusammen, sondern auch kleinere Zusammenballungen unterschiedlichster Genese werden zu größeren Komplexen vereinigt. Generell ist festzustellen, daß feinkörnige ($> 10 \mu\text{m}$) Materialien unter den brackischen oder marinen Bedingungen in den Wattgebieten selten als einzelne Körner in Bewegung sind, sondern meist an mehr oder weniger komplex zusammengesetzte Agglomerate gebunden sind.

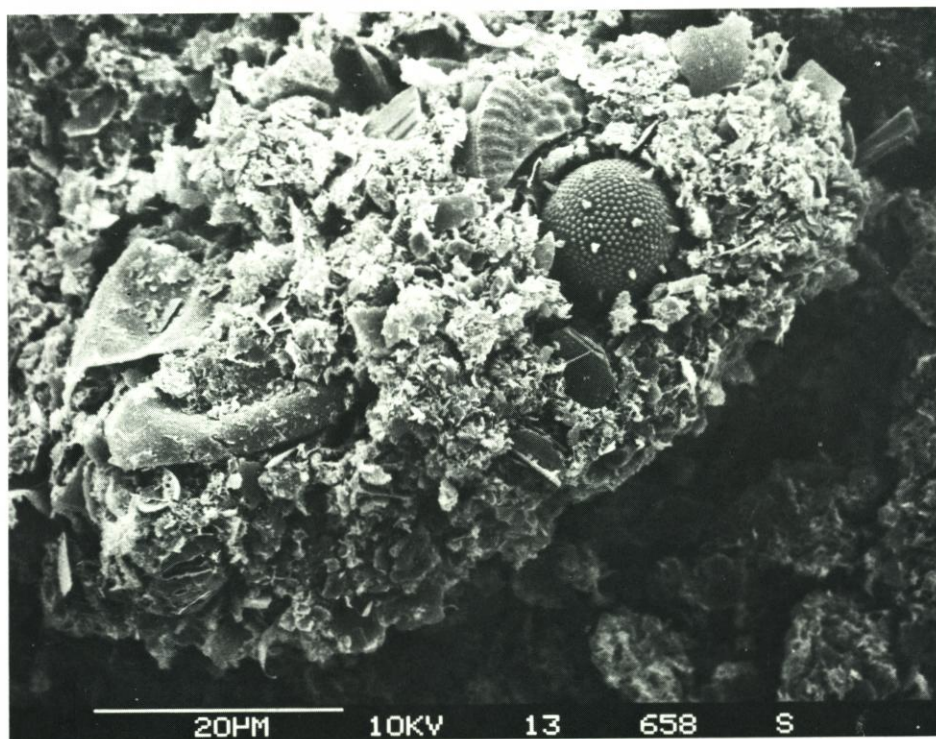


Abb. 5: Kotpille mit zahlreichen organischen Resten (Maßstab siehe Balken)

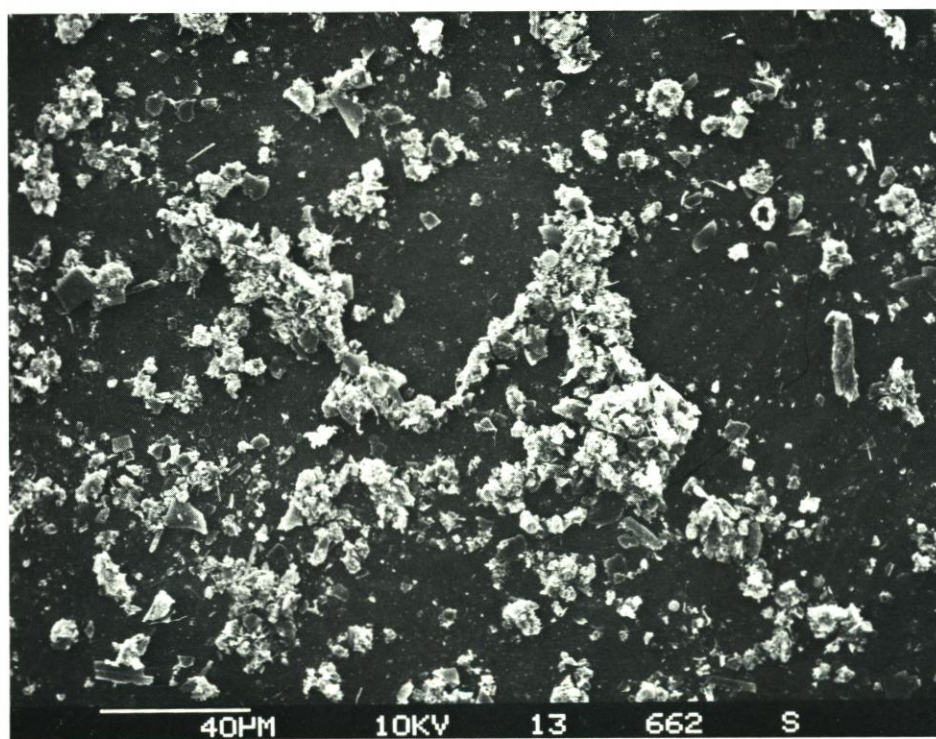


Abb. 6: Große Schwebstoffflocke (Maßstab siehe Balken)

3.2 Auswirkungen unterschiedlicher Strömungszustände auf den Stoffbestand der Schwebstoffe

Während des natürlichen, unbeeinflussten Ebbstromes sind im Neßmersieler Außentief meist kleine, locker aus mineralischen und organischen Komponenten aufgebaute Agglomerate in Schwebelage. Daneben kommen gelegentlich solitäre Schichtsilikate im Korngrößenbereich des Feinsilts vor. Bei den größten Schwebstoffteilchen handelt es sich um Kotpillen unterschiedlichen Zerfallsgrades. Alle weisen einen hohen Anteil an Resten von Diatomeenschalen auf.

Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie während des Spülstromes im Außentief erreicht werden, nimmt der Anteil an größeren und vor allem aber kompakter aufgebauten Agglomeraten zu. Die maximale Länge der suspendierten Kotpillen ist mit etwa 50 µm ebenfalls größer als während des unbeeinflussten Ebbstromes. Insgesamt verändert sich aber die Materialzusammensetzung nicht grundlegend, obwohl – wie die Zunahme der Schwebstoffkonzentration zeigt – durch die Erhöhung der Abflußgeschwindigkeit eine Resuspendierung von abgelagerten Sedimenten erfolgt. Als einzige, qualitative Anzeiger dieser Erosion von Sohlmaterial können allenfalls die recht häufig vorkommenden, stark mit Sediment verschmutzten Diatomeen angesehen werden, die den Eindruck erwecken, als seien sie längere Zeit im Boden eingebettet gewesen.

Der überwiegende Anteil der mit der Flut das Außentief aufwärts transportierten Schwebstoffe besteht aus locker aufgebauten, mineralischen Agglomeraten. Die stoffliche Zusammensetzung unterscheidet sich aber prägnant von der Zusammensetzung der mit der Ebbe transportierten Schwebstoffe durch den ungleich höheren Anteil organischer Komponenten. Die Flutstromprobe weist eine Vielzahl von meist hartschaligen Organismen, besonders planktischen Diatomeen auf. Zahlreiche Agglomerate sind zudem von fadenförmigen oder gespinstartigen Gebilden durchzogen, die als Reste schleimiger, teilweise bakterieller Ausscheidungsformen zu deuten sind. Wie mit Hilfe der Energie-Dispersions-Analyse von Röntgenstrahlen (EDAX) nachgewiesen werden konnte, bestehen einige dieser Agglomerate ausschließlich aus organischer Weichsubstanz. Vergleichbare Zusammenballungen waren in den Ebbstromproben nicht zu finden. Bemerkenswert ist weiterhin der hohe Anteil einzelner, nicht an Flocken gebundener, feinsiltiger Mineralkörner. Kotpillen sind dagegen relativ selten und zumeist auch recht klein.

Durch den Einsatz des Räumbootes gelangen große Mengen Sediment in Suspension. Bedingt durch die hohe Ausgangskonzentration und den großen Anteil an gröberkörnigen Komponenten entzieht sich ein derartiges Material bisher einer befriedigenden Präparation für das REM. Die Bearbeitung der unter Wasserbedeckung belassenen Schwebstoffe mit Hilfe lichtmikroskopischer Methoden zeigt aber, daß neben Partikeln, wie sie in den bereits beschriebenen Proben vorkommen, auch eine Vielzahl von bis zu einigen 100 µm großen Teilchen in Bewegung sind. Die überwiegend aus zahlreichen einzelnen, mit dem Lichtmikroskop nicht näher bestimmbaren Teilchen aufgebauten Partikel weisen zumeist einen hohen Anteil an Siltkörnern auf. Es ist wahrscheinlich, daß es sich hierbei um kleine Klümpchen erodierten Schlickes handelt (Abb. 7, 8). Dieses Material wird mit dem Spülstrom seewärts transportiert. Wie die Zusammensetzung der Schwebstofffracht der auf den Räumbooteinsatz folgenden Flut vermuten läßt, wird zwar ein Teil der besonders feinkörnigen Schwebstoffe wieder in das Außentief hineingetragen, die erodierten, gröberen Schlickklümpchen tragen aber wohl nicht erneut zur Verschlickung des Hafens bei.

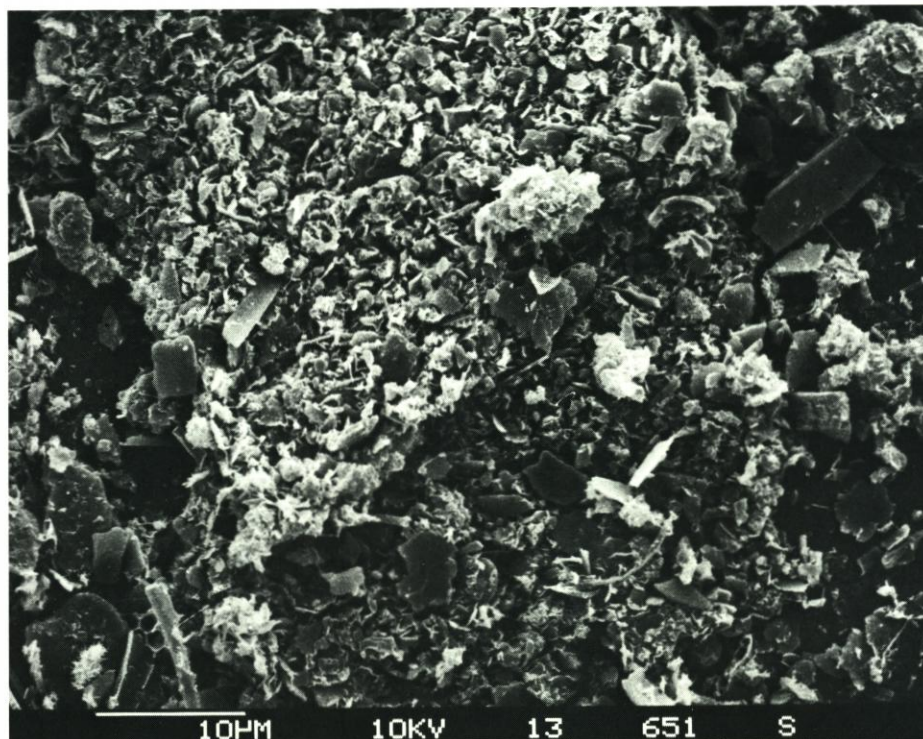


Abb. 7: Erodiertes Schlickklümpchen (Maßstab siehe Balken)

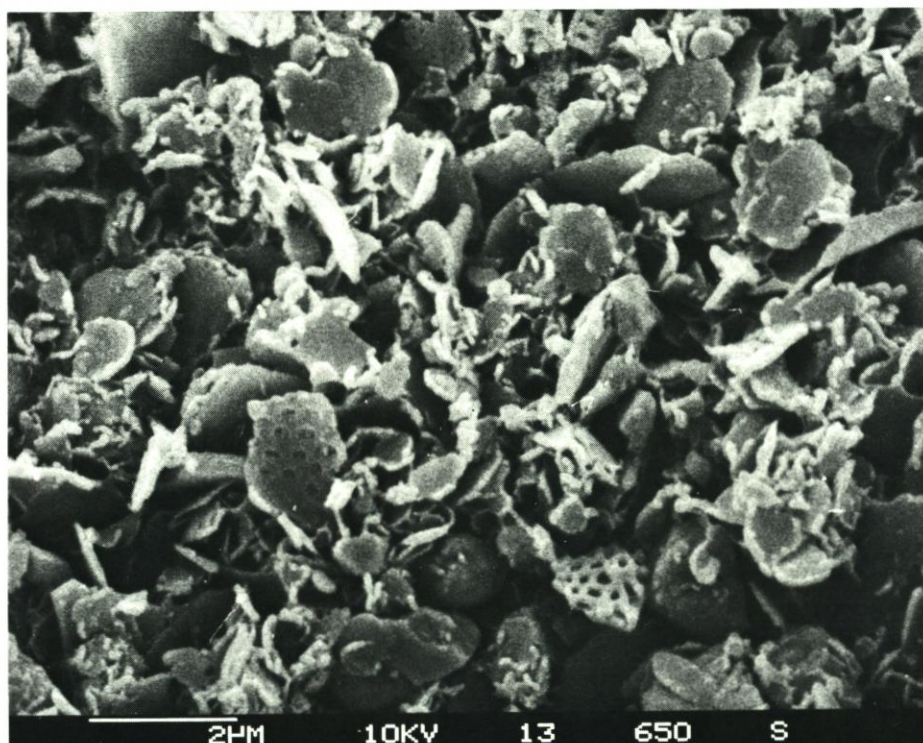


Abb. 8.: Detailaufnahme des Mikrogefüges (Kartenhausgefüge) (Maßstab siehe Balken)

4. Fazit

Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes konnte ein Einblick in Zusammensetzung und Aufbau der im Neßmersieler Außentief suspendierten, schlickbildenden Schwebstoffe gewonnen werden.

Es hat sich dabei gezeigt, daß die überwiegende Menge der Schwebstoffe nicht aus isolierten Einzelkörnern, sondern aus komplex zusammengesetzten Agglomeraten anorganischer und organischer Ausgangskomponenten zusammengesetzt sind. Die Beschaffenheit der während verschiedener Strömungszustände im Außentief suspendierten Materialien ist meist recht ähnlich und nur durch wenige Eigenarten, z. B. einen erhöhten Gehalt an organischen Komponenten, voneinander zu unterscheiden.

5. Schriftenverzeichnis

- DE BOER, P. L.: Mechanical effects of micro-organisms on intertidal bedform migration. *Sedimentology* 28, 1981.
- DITTMANN, S.: Die Bedeutung der Biodeposite für die Benthosgemeinschaft der Wattsedimente. Unter besonderer Berücksichtigung der Miesmuschel *Mytilus edulis* L. Universität Göttingen, unveröff. Dissertation, 1987.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H. G. u. PROBST, K.: Außentiefräumung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“. *Die Küste*, H. 44, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. *Wasser und Boden*, H. 3, 1983.
- GAST, R., KÖSTER, R. u. RUNTE, K. H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Untersuchungen zu Fragen der Sedimentverteilung und der Schlicksedimentation. *Die Küste*, H. 40, 1984.
- GREISER, N.: Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung in der Elbe – Untersuchungsmethoden und erste Ergebnisse. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- GROSSMANN, M., MEIN, B., SPYCHALLA, H. u. THIEL, H.: Einwirkungen von Organismen auf den Schlick. Abschlußbericht im „Schlickprojekt“ des KFKI. Hamburg, 1981.
- LAL, D.: The oceanic microcosm of particles. *Science* 198, 1977.
- MULLER, L. L. u. JACKS, T. J.: Rapid chemical dehydration of samples for electron microscopic examinations. *J. Histochem. Cytochem.* 23, 1975.
- VAN OLPHEN, H.: An introduction to clay colloid chemistry. New York – London, 1963.
- PAERL, H. W.: Microbial attachment to particles in marine and freshwater ecosystems. *Microbial Ecology* 2, 1975.
- RICKLEFS, K.: Geologisch-sedimentologische Untersuchungen an feinkörnigen Sedimenten aus dem Weser-Ästuar. – Teil II: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Schwebstoffen aus dem Trübungsmaximum des Weser-Ästuars. Universität Kiel, unveröff. Diplomarbeit, 1984.
- WHITEHOUSE, U. G., JEFFREY, L. M. u. DEBBRECHT, J. D.: Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters. *Clays and clay minerals. Proceeding of the seventh National conference on clays and clay minerals*, Washington, 1960.
- ZABAWA, C.: Microstructure of agglomerated suspended sediments in northern Chesapeake Bay Estuary. *Science* 202, 1978.