

Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt

Von Hans-Erich Reineck und Winfried Siefert

Zusammenfassung

In den Jahren von 1976 bis 1978 wurde im Watt vor Cuxhaven an zwei ca. 2 km langen Meßprofilen mit insgesamt 39 Punkten im zeitlichen Abstand von meist 14 Tagen der Wechsel von Schluff- und Tongehalt von Oberflächensedimenten gemessen und mit folgenden Meßgrößen in Verbindung gebracht: Wasserstände, Strömungen, Seegang, Salzgehalt, O₂-Gehalt, Temperatur von Luft und Wasser, Niederschläge, Windrichtung und -geschwindigkeit.

Schluff und Ton wird bei auflandigen Windlagen (> 10 m/s aus 190 bis 300°) resuspendiert. Eine Abnahme des Schluffgehalts erfolgt bei diesen Windlagen im Untersuchungsgebiet, solange die Triftstromwege in der Größenordnung von einigen 100 Metern je Tide bleiben. Wesentlich größere Triftstromwege aber führen trotz Erosion am Ort zu Schluffnachschiebung aus benachbarten Gebieten; somit bleibt der Schluffgehalt etwa gleich. Bei ruhigem Wetter und bei ablandigem Wind nimmt der Schluffgehalt zu.

Summary

During 1976 to 1978 sediment samples were taken along two transects of a length of 2 km each, including 39 fixed sampling stations in intervals of 14 days. Transects are located on a tidal flat near the town of Cuxhaven. The contents of silt and clay were measured and compared with similar former dates. The differences were related with the following parameters: Water levels of high and low tides, current velocities, wave climate, wind conditions, salt and oxygen contents, air and water temperatures, and amount of rainfall.

During wind conditions of > 10 m/sec from directions of 190° to 300° mud is resuspended. A decrease of mud content takes place as long as wind induced drift current tracks are only some hundred meters per tide long. When wind induced current tracks grow much longer the content of mud in the upper layers of sediments does not change due to transport of mud floccules from other areas. During calm weather or offshore wind the mud content is increasing.

Inhalt

1. Veranlassung	27
1.1 Klassifizierung der Wattsedimente und Definition von „Schlick“	28
1.2 Lage und Anreicherung von Schlickvorkommen	30
2. Messungen vor Cuxhaven	32
2.1 Zur Festlegung der Testgebiete	32
2.2 Meßprogramm	32
3. Sedimentpetrographische Übersicht	33
4. Meteorologische und hydrologische Daten	33
5. Meßdurchführung	34
5.1 Entnahme und Analyse der Proben	34
5.2 Aufbereitung und Analyse der meteorologischen Daten	35
5.3 Aufbereitung und Analyse der Tidedaten	35
5.4 Berechnung der Seegangsverhältnisse	36

6. Ergebnisse	41
6.1 Veränderung des Schluffanteils	41
6.2 Wirkung des Seegangs auf den Schluffanteil im Oberflächensediment	44
6.3 Zusammenwirken von Orbital- und Tidedrömungen	46
6.4 Veränderung der Watthöhen	48
7. Ausblick	50
8. Schriftenverzeichnis	50

1. Veranlassung

Das Problem der Schlicksedimentation war für das Küsteningenieurwesen schon immer bedeutend. Es ist Thema vieler wissenschaftlicher Untersuchungen und Abhandlungen gewesen. Trotz dieser Aktivitäten ist es aber bisher nicht gelungen, allgemeingültige Kausalzusammenhänge zwischen den verschiedenen involvierten Naturerscheinungen herzuleiten.

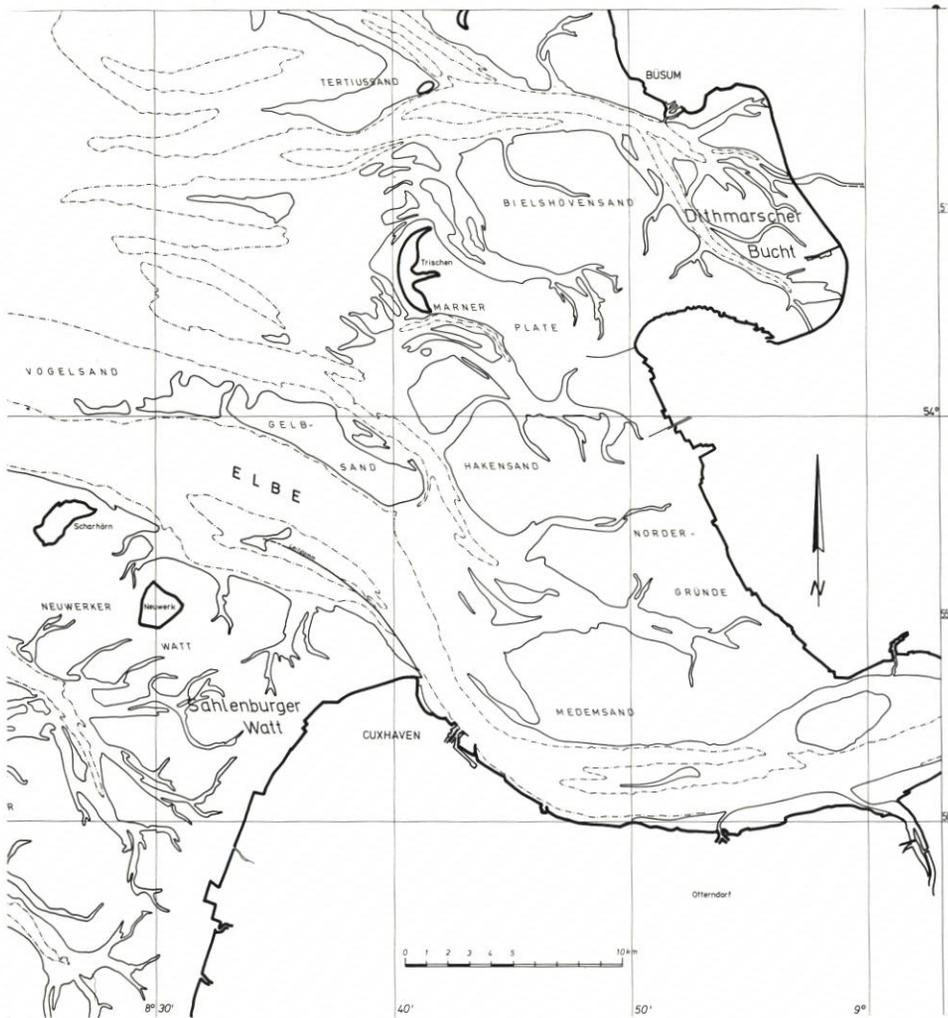


Abb. 1. Elbemündung mit den Untersuchungsgebieten Sahlener Watt und Dithmarscher Bucht

Wegen der komplexen Zusammenhänge zwischen hydrologischen, meteorologischen und sedimentologischen (einschl. chemisch/biologischen) Parametern ist eine umfassende Lösung dieses Problems, das besonders im Zusammenhang mit Bauvorhaben im Wattgebiet von größtem Interesse ist, nur schrittweise zu erreichen. Um auf dem angestrebten Wege voranzukommen, regte das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) 1975 den Entwurf eines Forschungsprogrammes an. 1976 wurden zunächst kleinere Projekte in der Meldorfer Bucht und im Sahlenburger Watt (Abb. 1) beschlossen, und zwar wegen der dort bereits geleisteten Vorarbeiten.

1.1 Klassifizierung der Wattsedimente und Definition von „Schlick“

Es gibt zahlreiche Einteilungen der Wattsedimente (GÖHREN, 1975), die im allgemeinen auf den Verhältnissen von Sand zu Schluff und zu Ton basieren. Das Analyseergebnis wird hierzu am günstigsten in ein Konzentrationsdreieck eingetragen. Dabei ergibt sich, daß die Einteilungen im wesentlichen auf dem Gehalt an Sand beruhen, wobei MÜLLER (1960) und PLATH (1943) noch Unterteilungen innerhalb des Korngrößenbereichs von Sand verwenden.

Tabelle 1
Benennung der Sedimente in den Wattten der Deutschen Bucht

Wattart	Substrat	Sandgehalt in % ^{*)}
Sandwatt	Wattensand	fs > 90
Mischwatt	schlickiger Sand	si'-sifS 90-50
Schlickwatt	(sandiger) Schlick	fs-fsSi 50-15
fettes Schlickwatt	fetter Schlick	fs'tSi-SiT < 15

^{*)} Rest jeweils Schluff und Ton

Erst im fetten Schlick spielt auch der Tongehalt zur Einteilung eine Rolle. Nach den Untersuchungen von SINDOWSKI (1973) und nach eigenen Untersuchungen kann man etwas verallgemeinernd sagen, daß der Tongehalt erst in Sedimenten mit weniger als 15 % Sandgehalt gegenüber dem Schluffgehalt deutlich steigt. Bei einem Sandgehalt über 15 % liegt das Verhältnis Schluff zu Ton bei etwa 7:3. Bei einem Sandgehalt unter 15 % steigt der Tongehalt, so daß sich das Verhältnis Schluff zu Ton zu einem Überhang von Ton verschieben kann. So fette Schlicke sind in Wattten aber nur selten anzutreffen. Zudem sind die Eigenschaften des Substrats in diesen Korngrößenbereichen ganz wesentlich vom Wassergehalt und damit von dem Grad der Setzung und somit der Steife abhängig. Dies gilt vor allem im Hinblick auf die Siedlungswahl von Endobionten. Dagegen richtet sich die Siedlungswahl der Endomionten zu den sandreicheren Substraten stärker nach dem Verhältnis Sand zu Silt und Ton. In einem Benennungsvorschlag des Senckenberg-Instituts wird daher nach den Werten von Tab. 1 eingeteilt.

Nach sinnlicher Wahrnehmung handelt es sich bei Schlick um einen weichen, bindig-schmierigen, stark wasserhaltigen Boden, in den man knöcheltief bis knietief einsinkt. Stärker entwässerten Schlick nennt man Klei.



Abb. 2. Wurster und Cuxhavener Küste mit Gebieten, in denen nach sinnlicher Wahrnehmung Schlick und anschlückiger Sand zu finden sind

1.2 Lage und Anreicherung von Schlickvorkommen

Es gibt eine Reihe von Gebieten, welche für Schlickvorkommen prädestiniert sind:

- a) in einem mehr oder weniger schmalen Streifen längs der Küste,
- b) in Wattbuchten, gleichfalls landnah, vorwiegend an der Westseite,
- c) in Lahnungsfeldern,
- d) im Bereich der Sielaußentiefs,
- e) im Bereich verlandender Priele,
- f) auf hohen Wattflächen im Bereich der Wattwasserscheiden.

Auf Abb. 2 sind beispielhaft die nach sinnlicher Wahrnehmung feststellbaren Gebiete mit Schlick und anschlickigem Sand vor der Wurster und Cuxhavener Küste skizziert.

Der im Tiderhythmus hin und her bewegte Wasserkörper des Wattenmeeres enthält in den Stromspitzen und vor allem bei bewegter See einen hohen Feststoffgehalt. Die Suspensionswolke besteht aus ausgeflockten tonigen und schluffigen Partikeln sowie aus Seston. (Seston stellt die Gesamtheit der Schwebstoffe dar, die aus lebenden [Plankton] und toten [Detritus] Anteilen bestehen.) In den Strömungsspitzen kann auch noch Feinsand suspendiert werden. Die Anreicherung von Schlick findet in solchen Gebieten statt, wo die während des Stauwassers abgesunkenen Ton- und Schluffflocken nicht mehr oder nur selten wieder erodiert werden. Der ufernahe Schlickgürtel vieler Wattbereiche wird von VAN STRAATEN u. KUENEN (1957) durch eine Sedimentationsverzögerung (settling lag) und durch eine Erosionsverzögerung (scour lag) erklärt. Weiterhin führt POSTMA (1961) aus, daß die Stauwasserzeit bei Hochwasser länger anhält als die Stauwasserzeit bei Niedrigwasser. Auch hierdurch wird der landwärts gerichtete Transport von Schlick verursacht.

Bei dem starken Schlickfall im Bereich von Sielaußentiefs dürfte der Brackwassereffekt (Flockung durch Cl-Ionen) von Einfluß sein. Im übrigen ist der Faktor der „Wasserberuhigung“ in allen oben genannten Fällen a) bis f) von ausschlaggebender Bedeutung. Die aktive Landgewinnung durch Lahnungsbau nutzt den Effekt aus, indem durch Anlage kleiner, geschützter Buchten „Beruhigungszonen“ geschaffen werden.

Die meteorologischen Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse spielen eine wichtige Rolle im Haushalt der Wattsedimente: Im allgemeinen sind die normalen Gezeitenströmungen im Watt (außerhalb der Priele) von geringer Intensität, die Fracht an suspendierten feinen Feststoffen ist gering. Durch Windeinfluß wachsen die Strömungsintensitäten, zugleich überlagert von oszillierenden Strömungen der Wellenbewegung. Durch Erosion fossiler Kleihorizonte in Prielen, rezenter Schlickablagerungen oder ungeschützter Vorländer der Küstenmarsch wächst der Suspensionsgehalt des Wattwassers unter Windeinfluß.

Starkwindige Wetterlagen können regional unterschiedliche Auswirkungen auf die Verschlickung haben:

- a) Auf freiliegenden Wattflächen können rezente Schlickablagerungen durch die verstärkten Strömungen erodiert werden. Es verbleibt Misch- bzw. Sandwatt.
- b) In Bereichen, in denen auch bei solchen Wetterlagen relativ (im Vergleich zu den freien, seegangs- und strömungsexponierten Watten) ruhiges Wasser vorhanden ist – z. B. im Lee des Landes –, kann sich der Schlickfall infolge der höheren Suspensionsfracht verstärken.

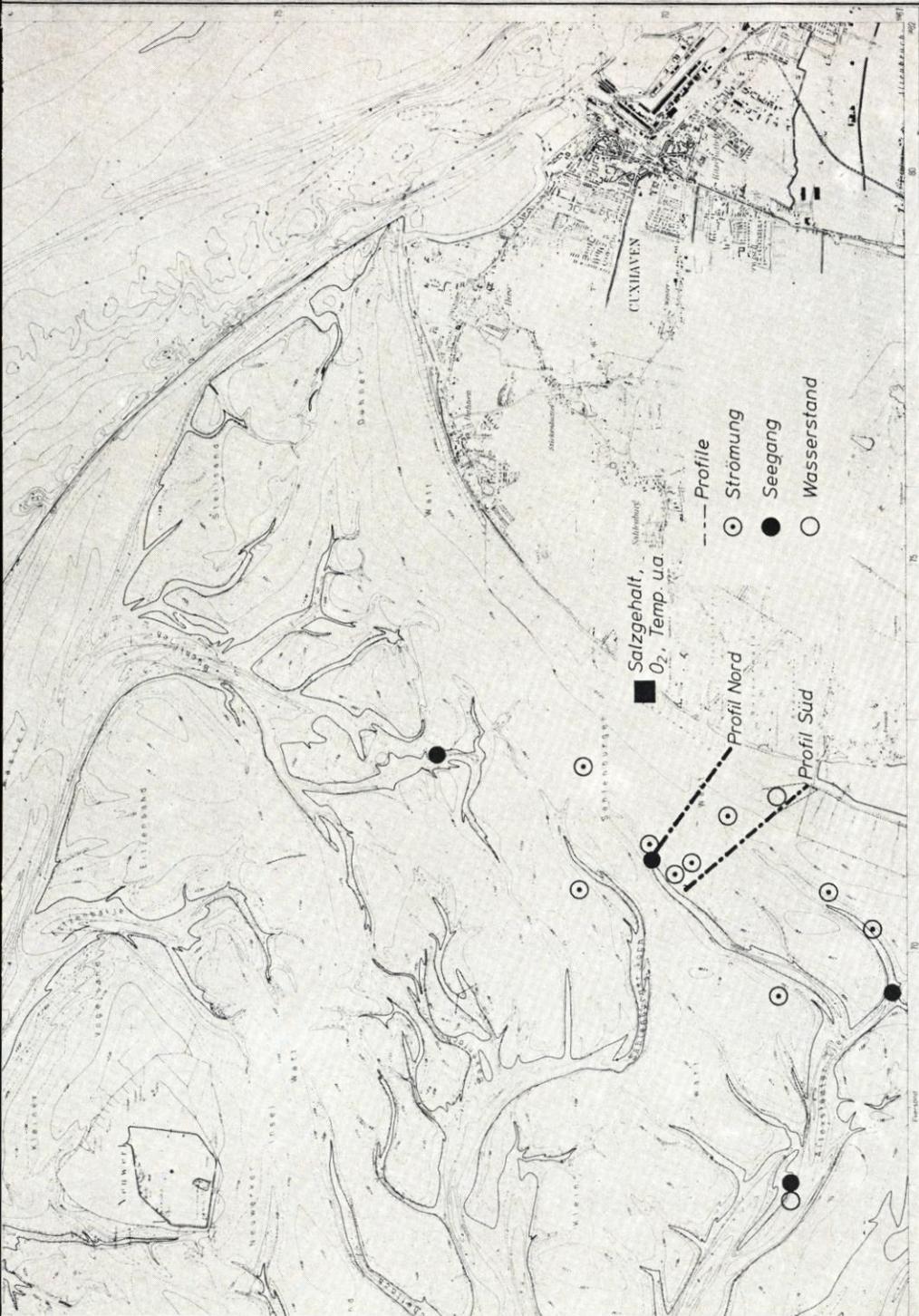


Abb. 3. Untersuchungsgebiet vor Saltenburg mit Meßprofilen und -positionen

2. Messungen vor Cuxhaven

2.1 Zur Festlegung der Testgebiete

Die Schlicksedimentation im küstennahen Teil des Neuwerker Watts ist von GÖHREN (1975) untersucht worden. Seine Untersuchungen ergaben, daß der Schlickgehalt an der Oberfläche im Jahresverlauf starken Wechseln unterworfen ist. Die vierteljährlichen bis monatlichen Entnahmen erbrachten jedoch keine signifikante Abhängigkeit zu monatlichen Mittelwerten von Windintensität oder Monatsmitteln des Elbe-Oberwasserabflusses.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde ein neues Forschungsvorhaben in diesem Gebiet für sinnvoll gehalten, in dessen Rahmen die Schlicksedimentation auf dem landnahen Watt etwas südlich von Sahlenburg zu beobachten war.

Die Auswahl dieses Gebietes für eine intensive, interdisziplinäre Untersuchung bot sich noch aus weiteren Gründen an: 1974 hatte das KFKI drei Gutachter beauftragt, die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuwerker Wattgebiet infolge der damals geplanten Dammbauten des Tiefwasserhafens bei Scharhörn zu untersuchen. So konnten die Ergebnisse dieser Arbeit (HUNDT, KÖNIG u. REINECK, 1977) ebenso wie andere, im Vorfeld dazu entstandene Arbeiten (REINECK, 1975; 1976; SIEFERT, 1974b) mit verwendet werden. Zudem lief seit April 1976 ein Untersuchungsprogramm zur Analyse der küstennahen Sedimente, das in das vom KFKI angeregte Gesamtkonzept paßte und ohne weiteres in das neue Projekt übernommen werden konnte.

Als Ergänzung zu den Messungen im Sahlenburger Watt standen Daten aus zwei Testfeldern bei Neuwerk (Abb. 1) aus den Jahren 1967 und 1969 zur Verfügung, über die GÖHREN (1970) schon kurz berichtet hat. Hier waren auf Flächen von 2,4 bis 3,5 km² mehrmals jährlich Feinnivellements mit einer Auflösegenauigkeit von 1 cm durchgeführt worden. So ließen sich geringfügige Veränderungen des Wattniveaus erfassen.

2.2 Meßprogramm

Es fällt immer wieder auf, daß sich die morphologischen und hydrographischen Gegebenheiten von Schlickgebieten scheinbar nicht von denjenigen benachbarter, aber schlickfreier Gebiete unterscheiden. Bei den Forschungsarbeiten sollten daher durch möglichst simultane Messungen aller Naturvorgänge in Schlickgebieten und z. T. in schlickfreien Vergleichsgebieten versucht werden, die Ursachen des Schlickfalls zu erfassen. Erst dann wird es möglich sein, Prognosen über Art und Umfang des Schlickfalls auch in anderen Gebieten erstellen zu können.

Im einzelnen wurden im Watt vor Sahlenburg in zwei fast senkrecht zur Küste stehenden Profilen in 100-m-Abständen möglichst alle 14 Tage 39 Oberflächenproben entnommen (Abb. 3). Diese Proben wurden auf den Gehalt von Korngrößenanteilen kleiner als 0,063 mm untersucht. An Stichproben wurden das Verhältnis von Schluff zu Ton und der Gehalt an Kotpillen bestimmt. Die Profile hatten eine Länge von 1600 bis 2000 m.

Gleichzeitig wurden in der Nähe der Profile

- kontinuierlich Wasserstände und Strömungen,
- einmal wöchentlich Salzgehalt, Sauerstoffgehalt und Temperatur des Wassers,
- kontinuierlich Windrichtung und -geschwindigkeit (auf Scharhörn),
- täglich Feuchtigkeit und Temperatur der Luft sowie Niederschlag (in Cuxhaven)

gemessen (Abb. 3). Weitere hydrologische Daten konnten über bekannte Beziehungen

berechnet werden (s. u.). Die Profile wurden im Untersuchungszeitraum fünfmal bzw. viermal nivelliert, um eventuelle Erosionen und Sedimentationen festzustellen.

Alle Messungen wurden von April 1976 bis Ende 1978 durchgeführt und ihre Ergebnisse in Beziehung zur Schlicksedimentation bzw. auch Schlickerosion gesetzt, um so den Versuch zu unternehmen, die Parameter des sedimentären Geschehens im pelittischen Bereich erfassen zu können.

3. Sedimentpetrographische Übersicht

Die Schluff- und Tonfraktion nimmt im küstennahen Wattgebiet zwischen Elbe und Weser von Süden nach Norden deutlich ab (GÖHREN, 1975). Im Norden ist das der Küste vorgelagerte Watt bereits reines Sandwatt, wenn man von einem nur schmalen, schlickigen Streifen absieht, der unmittelbar dem Ufer angelagert ist (Abb. 2). Vornehmlich in den Prielsenken dieses Gebietes (zwischen Arensch und Cuxhaven-Döse), aber gelegentlich auch auf den Sandwattflächen, kommt es zur Sedimentation von Schluff und tonreicheren Sedimenten, die nach der Einteilung von Tab. 1 zum schlickigen Sand zu zählen sind (der Gehalt an Korngrößen unter 0,063 liegt zwischen 10 und 50 %). Über solche Schwankungen berichtet schon GÖHREN (1975). Dort wurden die Analysen von 4 bzw. 3 Profilen 1971 und 1973 durchgeführt. Jedoch wegen des zeitlich großen Abstandes blieben die Faktoren, die zu diesem Wechsel führten, verschleiert. Andererseits konnte GÖHREN (1975) jedoch nachweisen, daß der Schlickfall nicht von der Oberwasserführung der Elbe und der durch Windverhältnisse beeinflussten Brackwasserzone in direkte Abhängigkeit gebracht werden konnte. Es wurde daher angenommen, daß u. U. gerade kurzzeitig einwirkende Primärfaktoren zu Schlickfall bzw. zu Erosion führen könnten. Aus diesen Gründen wurde die Sedimententnahme im vorliegend beschriebenen Programm – soweit wie möglich – alle 14 Tage durchgeführt.

4. Meteorologische und hydrologische Daten

Sedimentproben wurden von April 1976 bis Oktober 1978 genommen. Für diesen Zeitraum wurden die übrigen Daten analysiert. Die Winddaten von Scharhörn liegen ab 1965 in Form von Ganglinien für 3-h-Mittel und als statistische Auswertungen vor und wurden schon für frühere Zeiträume veröffentlicht (SIEFERT, 1976). Die übrigen meteorologischen Daten wurden als Tagesmittel freundlicherweise von der Wetterwarte Cuxhaven zur Verfügung gestellt. Um entsprechend Vorlauf zu den ersten Proben zu haben, sind die Daten ab März 1976 zusammengestellt. Zwar wurden sie 15 km nordwestlich bzw. 10 km östlich des Meßgebietes vor Sahlenburg gewonnen, ihre Repräsentanz kann dennoch als gesichert gelten. So haben andere Untersuchungen ergeben, daß die auf Scharhörn gemessenen Windverhältnisse repräsentativ für die innere Deutsche Bucht sind.

Da das Watt im Bereich der Profile recht hoch liegt (Abb. 4 zeigt die Profilschnitte), können die im Meßgebiet gewonnenen Wasserstandsmessungen nur den oberen Teil der Tidekurve erfassen, aber das ist eben auch die vollständige Überströmungsphase des Gebietes. Die Registrierungen am Tidepegel „Punkt X“ (Abb. 3) laufen durchgehend seit 1971.

Schon vor 1976 hatten in diesem Gebiet Strömungsmessungen stattgefunden. Zur synoptischen Messung wurden erneut ab August 1976 Geräte eingesetzt.

Die Messungen wurden in Prielsenken am seeseitigen Ende der Profile an den Standorten

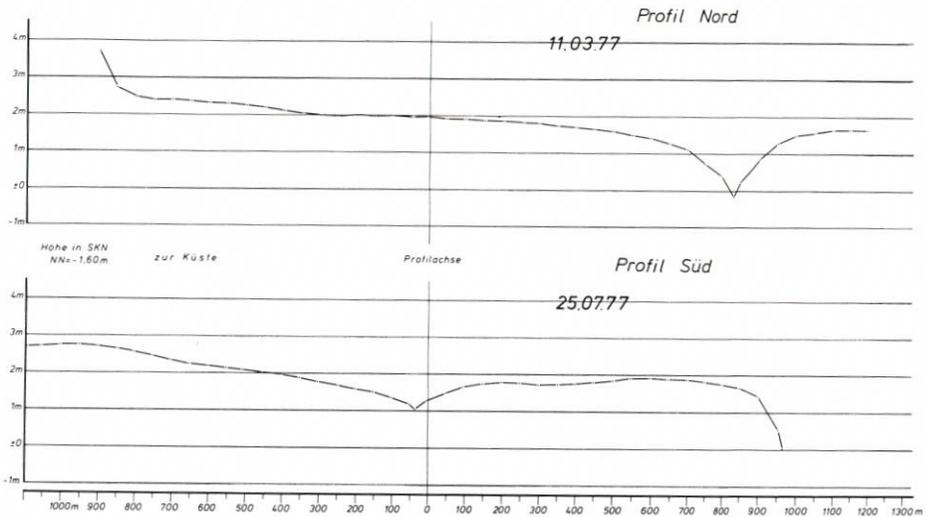


Abb. 4. Schnitte durch die Profile Nord (= Wernerwald) und Süd, 1977

Sahlenburg und Arensch durchgeführt (Abb. 3), um zu gewährleisten, daß bei der gerätetechnisch bedingten Meßhöhe von 30 cm über Grund die Tideströmungen jeweils über möglichst lange Zeiträume registriert werden konnten. Verwendet wurden dazu die seit langem bewährten Wattdauerstrommeßgeräte mit Registrierungen in Abständen von 5 Min.

Die chemisch-physikalischen Wasseranalysen wurden im Rahmen von wöchentlichen Wassergütemessungen am Strand von Sahlenburg vorgenommen, die von 1971 bis Ende 1979 liefen.

Während der Meßkampagne 1976/78 wurden auch Seegangsmessungen am Orte durchgeführt. Sie dienen im wesentlichen dem Nachweis der Kontinuität mit Messungen, die in den Jahren zuvor an drei Stellen in der näheren Umgebung (Abb. 3) vorgenommen und über die in einer ausführlichen Arbeit verwendbare Beziehungen zwischen Topographie, Meteorologie und Seegang hergeleitet worden waren (SIEFERT, 1974).

Die wichtigsten Meßdaten aus dem Untersuchungsgebiet liegen in einer Zusammenstellung vor (SIEFERT, 1979).

5. Meßdurchführung

5.1 Entnahme und Analyse der Proben

Die Proben wurden im Abstand von 14 Tagen an den beiden etwa senkrecht am Ufer stehenden Profilen im Sahlenburger Watt (Abb. 3) entnommen. Es wurden jeweils nur die obersten Zentimeter des Wattbodens einer Sedimentanalyse zugeführt. Die Proben wurden getrocknet, gewogen und auf dem 63- μ -Sieb gewaschen. Der Waschverlust entsprach dem Anteil an Korngröße < 63 μ , also Schluff und Ton. Die schlickigen Proben wurden naß verarbeitet. Nach dem Verfahren von FIGGE wurde an einer getrockneten Parallelprobe der Wassergehalt bestimmt. Damit konnte der Feststoffgehalt der analysierten nassen Probenmenge berechnet werden. Parallelanalysen, die getrocknet und dann zur Analyse wieder aufgeweicht wurden, ergaben identische Werte. Jedoch waren sie arbeitsaufwendiger und unsicherer, da sie entweder nicht vollständig aufgeweicht waren oder leicht Verluste bei der Behandlung mit H_2O_2 eintreten konnten.

5.2 Aufbereitung und Analyse der meteorologischen Daten

GÖHREN (1968) hat die Strömungen im Wattenmeer um Neuwerk und Scharhörn analysiert und festgestellt, daß Windeinfluß sich auf die Strömungen erst ab Stärke 5 Bft (8 bis 11 m/s) bemerkbar macht. Da die Seegangsentwicklung unterhalb dieser Windstärke ebenfalls vernachlässigbar klein ist (s. u.), sind zur Abschätzung der meteorologischen Beeinflussung hydrologischer Vorgänge in den Untersuchungsgebieten nur Windstärken ab 5 Bft interessant. Da zudem das Watt in den Testfeldern bei stärkeren ablandigen Winden kaum oder gar nicht mehr von Wasser bedeckt wird, sind im Hinblick auf Strömungen und Seegang nur folgende Windlagen von Bedeutung:

- Windgeschwindigkeiten ab 10 m/s,
- Windrichtungen zwischen 150° und 360°.

Entsprechende Windlagen sind als Ganglinien auf Abb. 5 bis 10 dargestellt. Es zeigt sich dabei, daß in den Meßzeiträumen etwa gleichmäßig verteilt ein bis zwei Starkwindperioden je Monat aufgetreten sind, wobei die längsten Zeiträume im Nov./Dez. 1976, Okt./Nov. 1977 und Sept./Okt. 1978 lagen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten (als Tagesmittel) wurden im Dez. 1978 und im März 1980 mit rd. 25 m/s (10 Bft) gemessen (Abb. 5 bis 7). Die stärkste auflandige Windperiode wurde jedoch zwischen Aufnahmen der Testfelder bei Neuwerk im Okt./Nov. 1967 über rd. 50 Tage mit Geschwindigkeiten bis zu 30 m/s (11 Bft) erfaßt.

Das Wattensediment ist bei Niedrigwasser der Austrocknung, dem Wind und Niederschlägen ausgesetzt. Die entsprechenden physikalischen Parameter wurden in Form von Ganglinien und Summen- bzw. Mittelwerten zwischen den Probenahmen aufbereitet. Sie sind im folgenden jedoch nicht dargestellt, da eine Analyse keine Verknüpfungen zwischen den Veränderungen des Schluff- und Tongehalts der Sedimente und diesen Parametern erkennen ließ. Sicherlich sind Einflüsse vorhanden, wie z. B. Oberflächenkleinmorphologie, die aber durch eine Sedimentanalyse nicht herausgefiltert werden können. Geochemische, gefügeanalytische und biologische/bakteriologische Untersuchungen mögen hier erfolgreicher sein.

5.3 Aufbereitung und Analyse der Tidedaten

Während der Trockenliegezeiten wirkt der Wind zwar direkt auf den Wattboden und seine Sedimente ein, der größere Einfluß erfolgt aber durch die Übertragung des Windes auf das Wasser. Hieraus resultieren Triftströmungs- und Seegangskräfte, die auf den Boden wirken.

Als integrierender Parameter zur Charakterisierung dieser Kräfte bietet sich zunächst die Höhe des örtlichen Thw an: Höhere Thw als bei Springtiden deuten auf größeren Energieeintrag von der Luft in das Wasser und vom Wasser in den Boden. Entsprechend wurden die Daten vom Pegel „Punkt X“ aufbereitet, und zwar jeweils zwischen verschiedenen Probenentnahmen als

- mittlere Thw-Höhen,
- mittlere Höhen der Thw über verschiedenen Horizonten (alle Thw > 1,1; 1,4; 1,5 m NN; MThw = 1,4 m NN),
- Anzahl der Tiden über verschiedenen Horizonten.

Die nachfolgenden Analysen zeigten, daß diese empirischen, integrierenden Ansätze keine Aussagekraft zur Erklärung der Veränderungen der Oberflächensedimente haben. Damit war gleichzeitig der Weg vorgezeichnet, daß Zusammenhänge nur über die unmittelbar wirkenden Naturvorgänge, nämlich Strömungen und Seegang, sichtbar werden könnten.

Die Strömungsmessungen wurden in Form von Ganglinien und Stromvektoren aufbereitet, wie sie schon GÖHREN (1968) verwendete. Abb. 11 zeigt dazu ein Beispiel, nämlich Ganglinien an der Station Sahlenburg (Abb. 3) bei ruhigen Tiden (26. 09. 77) und bei WSW-Wind 7 bis 8 Bft (29./30. 09.).

Im Neuwerker Wattgebiet liegen die max. Stromgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide zu rd. 70 % unter 40 cm/s, und die Restströmungen liegen zu rd. 80 % unter 2 km/Tide (GÖHREN, 1968). Die 1976/78 im Sahlenburger Watt gemessenen Werte mit

$$V_{\max} = 35 \text{ bis } 40 \text{ cm/s und}$$

$$\text{Reststrom} = 0,4 \text{ bis } 1,1 \text{ km/Tide}$$

entsprechen den üblichen Wattverhältnissen; nur bei Starkwindlagen erreichten die V_{\max} im Meßzeitraum Werte bis rd. 90 cm bei veränderten Strömungsrichtungen (Abb. 11); in dieser Beziehung stellen die Testgebiete also repräsentative Flächen dar.

Um die Strömungsverhältnisse ausreichend genau für die weiteren Bearbeitungen zu definieren, wurde als weiterer Parameter bei Windlagen die Summe aus Rest- und Triftstrom, also die tatsächliche Wasserversetzung am Orte, herangezogen. Da das Untersuchungsgebiet bei Sahlenburg dicht unter der Küste lag, wurden nur die Beträge und nicht die (fast immer gleichen) Richtungen betrachtet.

5.4 Berechnung der Seegangsverhältnisse

Bisherige umfangreiche Seegangsuntersuchungen haben gezeigt, daß sog. „ausgereifte Windsee“ auch im Watt nur selten auftritt und sicher nicht allein als dominierender Faktor für den Charakter der Oberflächensedimentation angesehen werden kann. Von entscheidender Bedeutung ist, ob der Seegang im Watt Grundberührung hat und somit in der Lage ist, durch die Orbitalbewegung auf die Oberflächensedimente einzuwirken. Nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE hat eine Welle Grundberührung, wenn

$$\frac{L}{2} > d$$

(mit L = Wellenlänge und d = Wassertiefe) ist. Für natürlichen Seegang mit seinem breiten Wellenspektrum gibt es einen gleichwertigen Ansatz nicht, man geht bei verschiedenen anderen Problemen (Wellendruck, -auflauf) jedoch vielfach davon aus, daß der Einzelwellenlänge L bzw. deren Höhe H im natürlichen Seegang die Werte der kennzeichnenden Wellen $H_{1/3}$ bzw. $L_{H1/3}$ entsprechen. Werden jedoch die Werte der mittleren Wellen \bar{H} , \bar{L} im natürlichen Spektrum den Einzelwellen gleichgesetzt, so daß in jedem Falle gewährleistet ist, daß die kennzeichnenden Wellen (d. h. etwa jede 3. Welle im Spektrum) bereits deutlich Grundberührung haben, so muß

$$\bar{L} = \bar{T}^2 > 2 d$$

sein.

Der Umweg über die mittleren Perioden \bar{T} ist erforderlich, da nur sie und nicht die Längen als Meßwerte vorliegen. Um die auf das Watt einwirkende Seegangsintensität zu bestimmen, muß die zugehörige Wellenhöhe berechnet werden. Nach den von SIEFERT (1974a) angegebenen Merkmalen ist der Seegang zwischen Cuxhaven und Neuwerk als „brandungsfreier Wattseegang“ anzusprechen. Als Kriterium für grundberührenden Seegang ergeben sich danach mittlere Wellenperioden von mindestens 2 s. Dies ist nach den zitierten Untersuchungen auf jeden Fall gewährleistet bei Windstärken ab 4 Bft, also etwa ab 8 m/s. Der

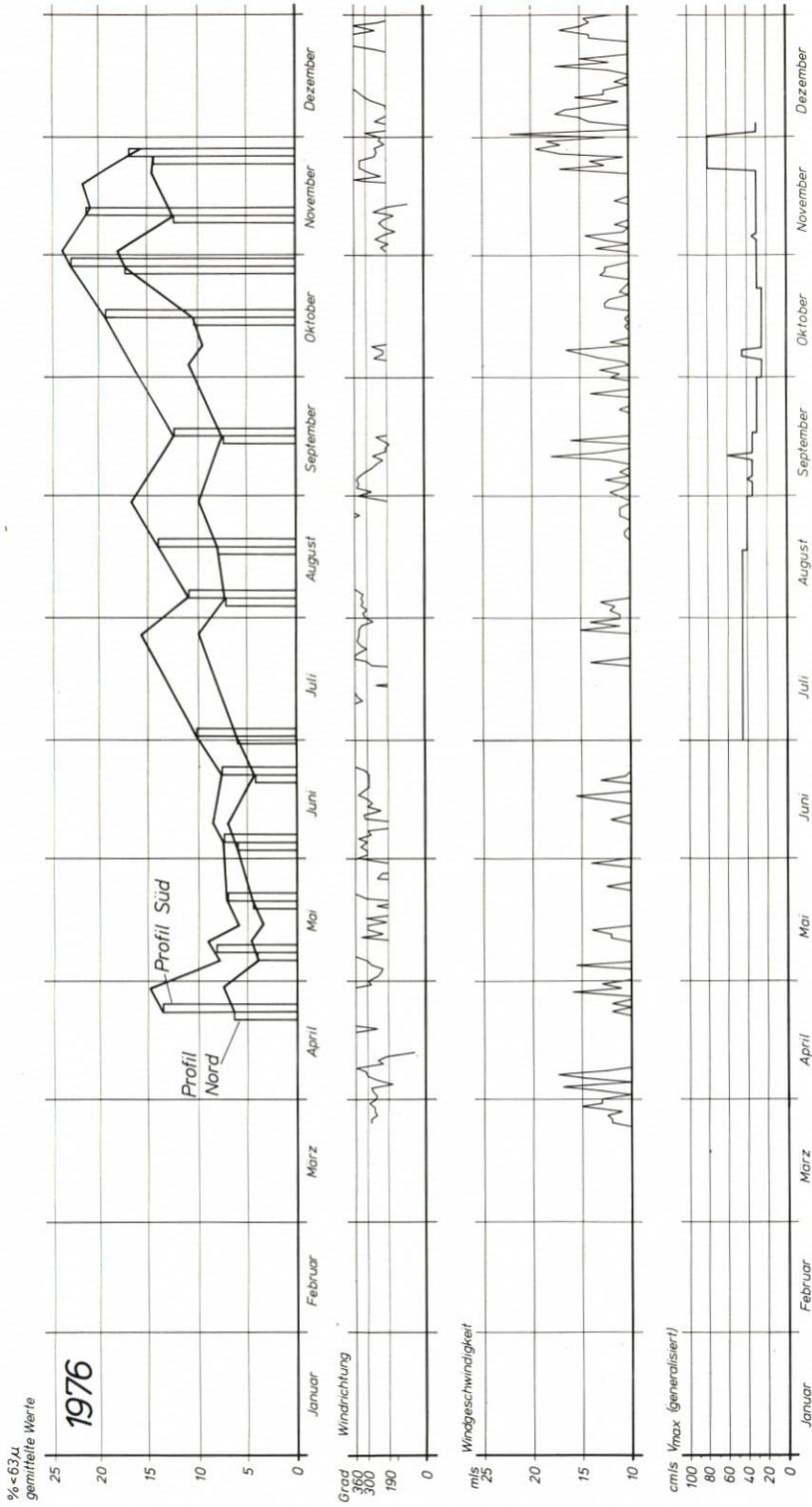


Abb. 5. Ganglinien der Sedimentanteile <math>< 63 \mu</math> im Sahlburger Watt, der auflandigen Winde > 10 m/s und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1976

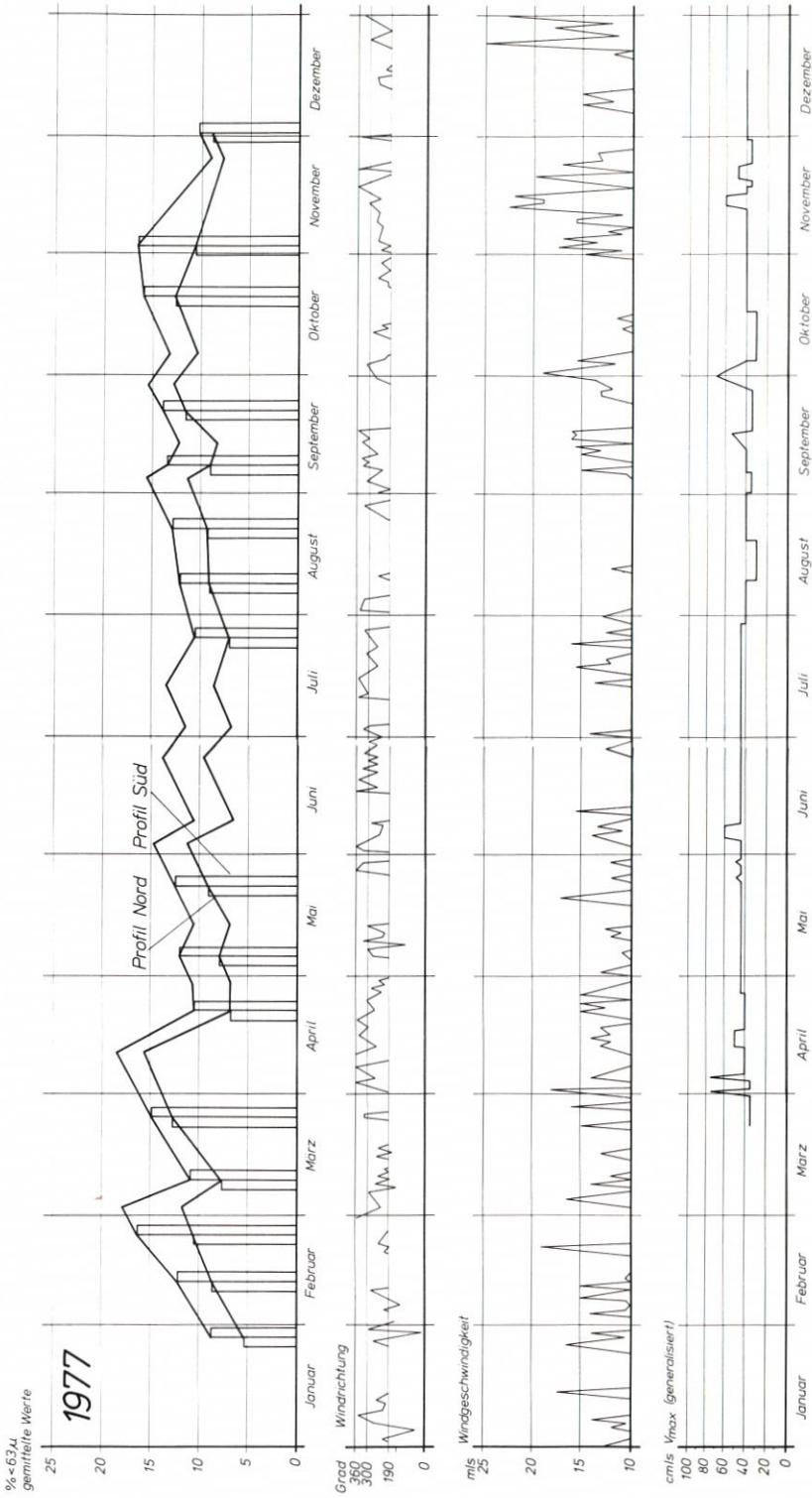


Abb. 6. Ganglinien der Sedimentanteile $< 63 \mu$ im Sahlenburger Watt, der auflandigen Winde $> 10 \text{ m/s}$ und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1977

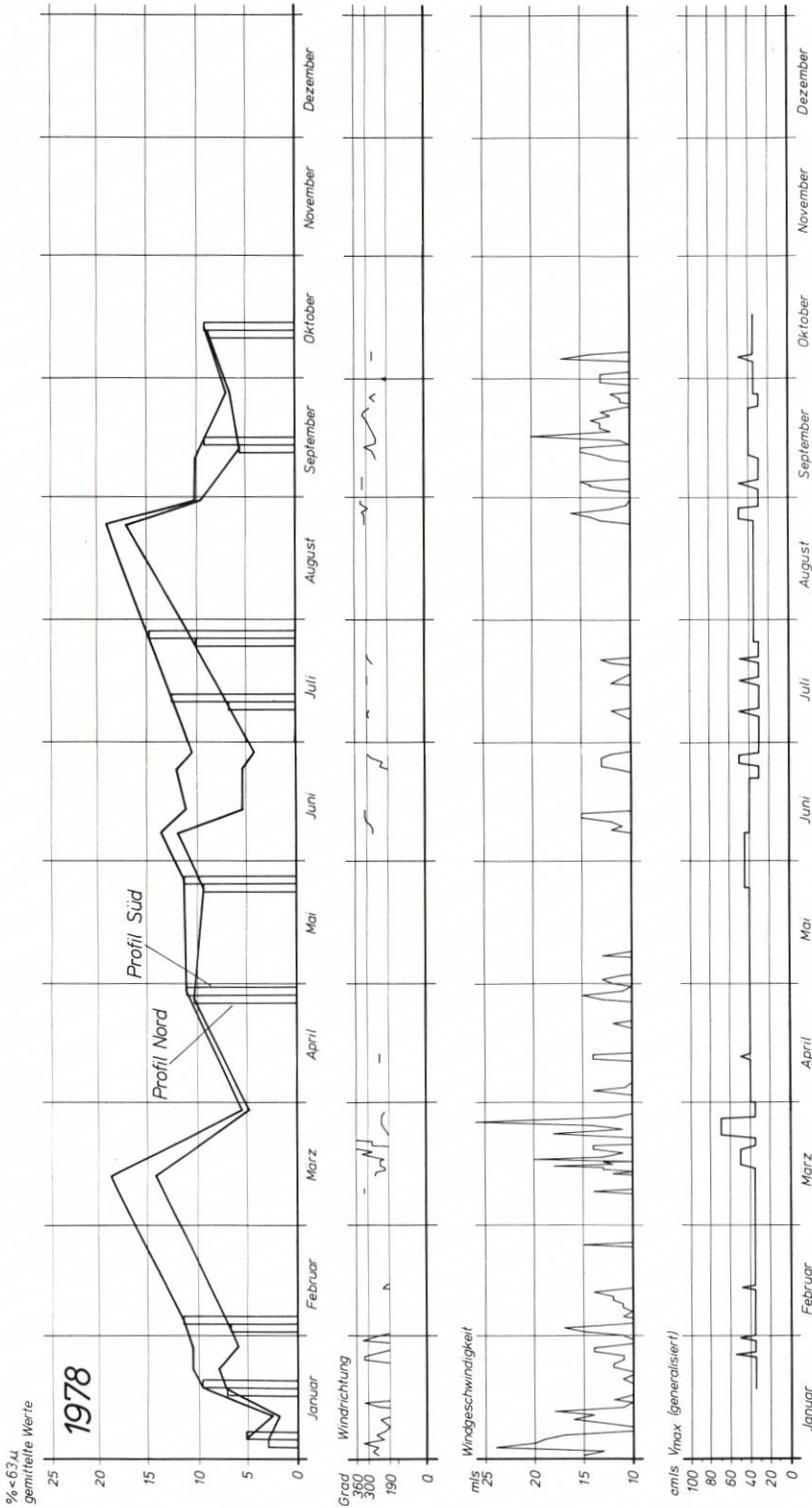


Abb. 7. Ganglinien der Sedimentanteile $< 63 \mu$ im Sahlenburger Watt, der auflandigen Winde $> 10 \text{ m/s}$ und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1978

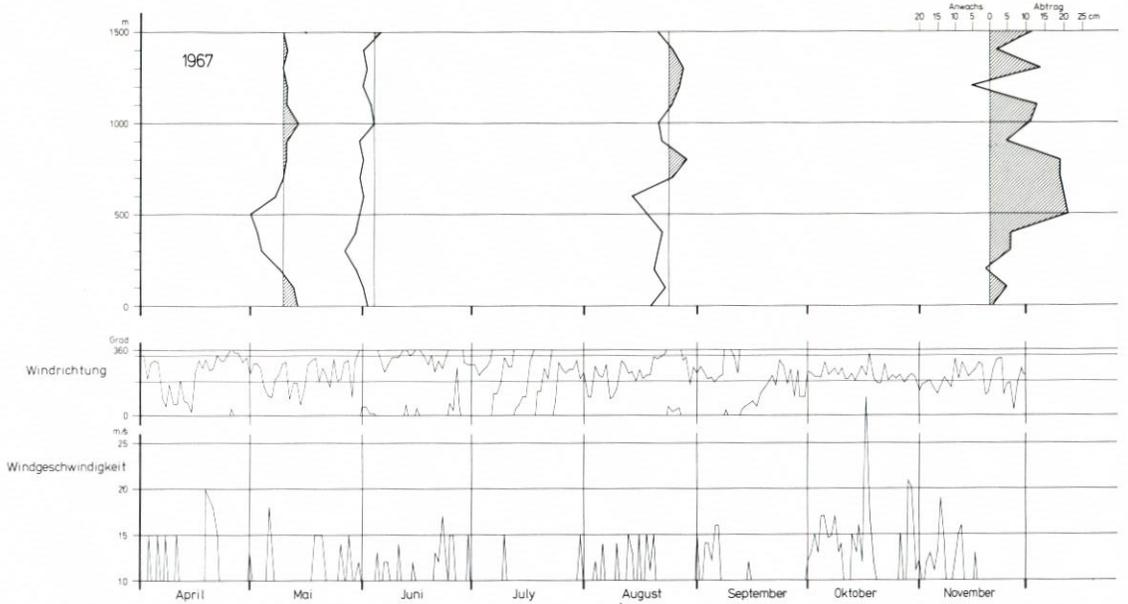


Abb. 8. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 1, südöstlich von Neuwerk, Jahrgang 1967 (vgl. auch Ab. 17)

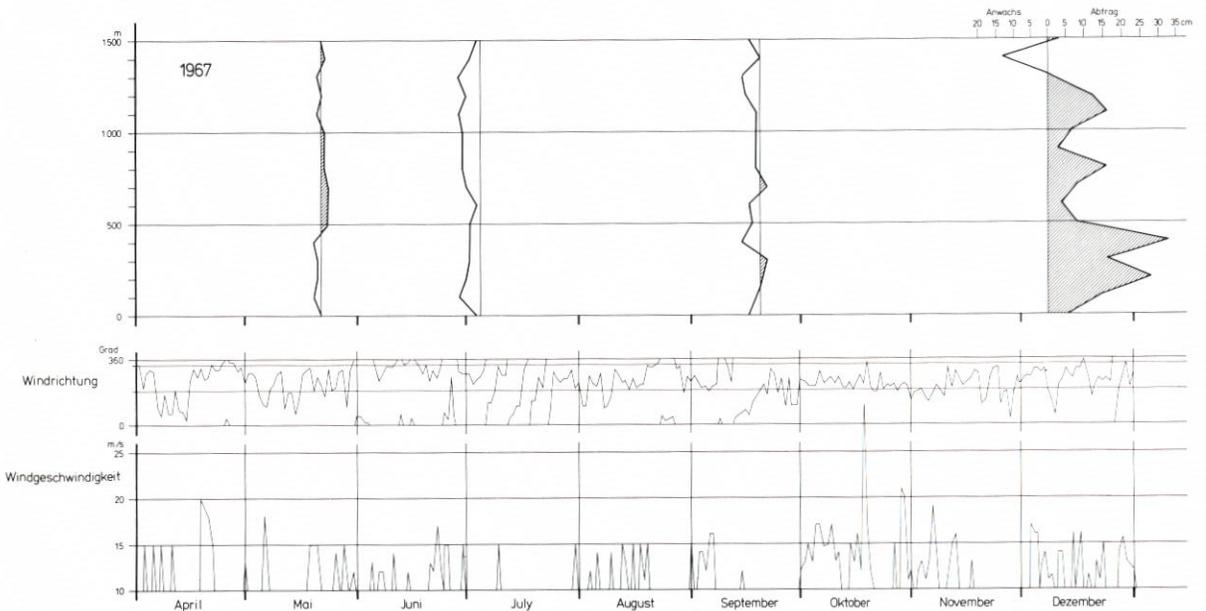


Abb. 9. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 2, zwischen Neuwerk und Scharhörn, Jahrgang 1967 (vgl. auch Abb. 17)

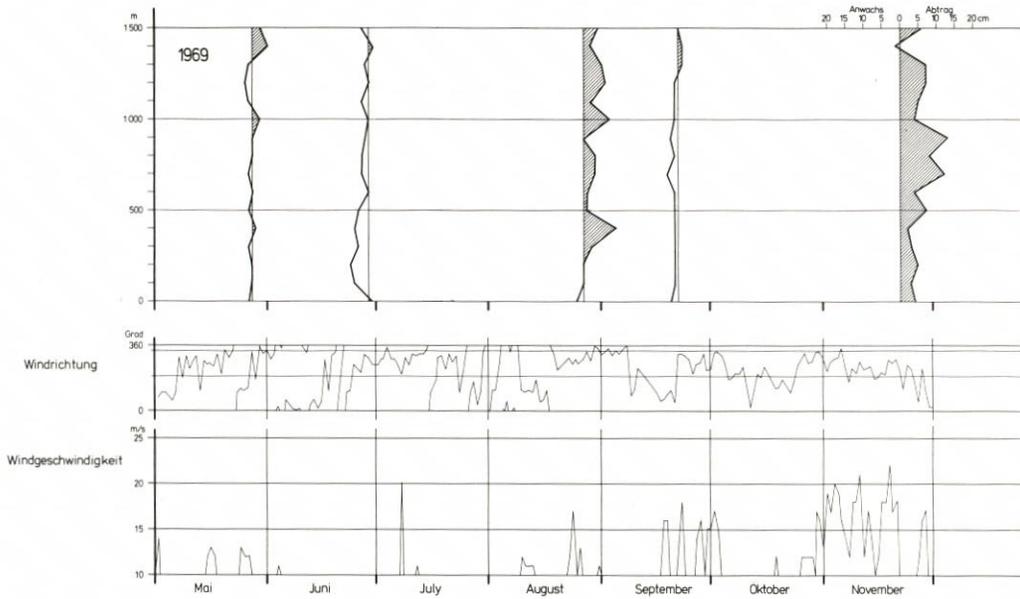


Abb. 10. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 2, zwischen Neuwerk und Scharhorn, Jahrgang 1969 (vgl. auch Abb. 17)

grundberührende Seegang erreicht dann kennzeichnende Wellenhöhen $H_{1/3}$ mit horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten an der Sohle um 0,5 m/s.

Nach den Erläuterungen unter 5.2 und 5.3 wurde die untere interessierende Windgeschwindigkeitsgrenze bei 10 m/s festgesetzt. Es ist also gewährleistet, daß bei den in Abb. 5 bis 10 skizzierten Windverhältnissen grundberührender Seegang herrschte. Über die für dieses Wattgebiet gefundenen Beziehungen zwischen Topographie, Wind und Seegang kann letzterer (zunächst als mittlere Höhen und Perioden \bar{H} , \bar{T}) berechnet werden. Zur Analyse der sedimentologischen Veränderungen sind diese Parameter jedoch nicht gut geeignet. Vielmehr lag es nahe, die zwischen den Entnahmen auf den Boden einwirkende Seegangintensität zu berechnen mit

$$\begin{aligned}
 E^* &= 2 m_0 = 2 \int E(f) df \\
 E^* &= \frac{1}{8} H_{1/3}^2 \\
 \bar{H} &= 0,36 \bar{T} - 0,64 \\
 \text{und } H_{1/3} &= 1,45 \bar{H} \\
 \text{mit } E(f) &= \text{Spektralfunktion}
 \end{aligned}$$

Über ΣE^* können die Veränderungen beurteilt werden.

6. Ergebnisse

6.1 Veränderung des Schluffanteils

Der Schluff- und Tonanteil innerhalb der beiden Profile zeigte je drei Maxima (Abb. 12). Ein Maximum lag unmittelbar am Ufer, die beiden weiteren Maxima in zwei Prielsenken, die

Pos. 02 - 21-08 - 77

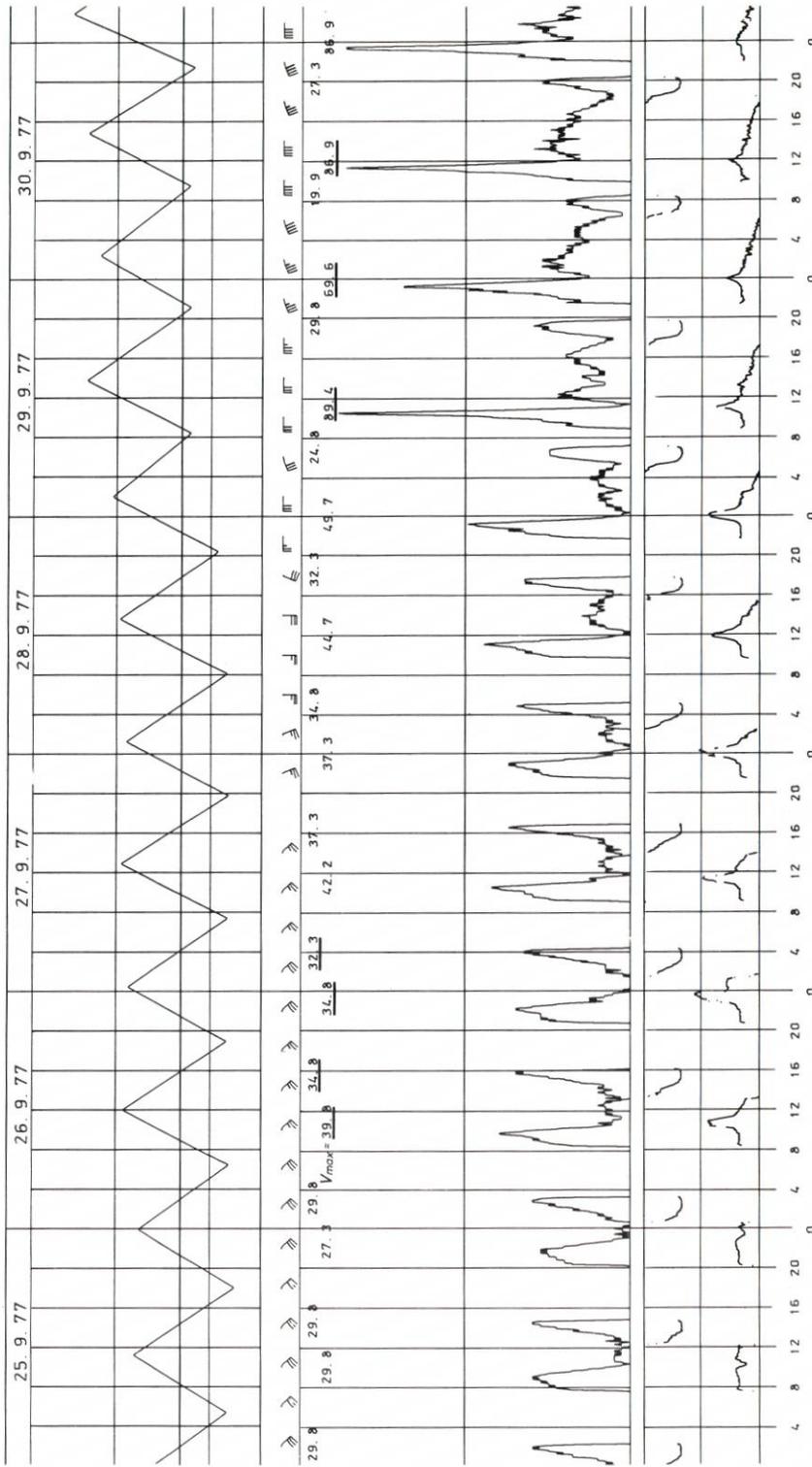


Abb. 11. Beispiel für die Auswertung einer Strömungsmessung (Standort Sahlburg): Schematische Tidekurve, Windfächchen, max. Strömungsgeschwindigkeiten, Geschwindigkeits- und Richtungsganglinien. Die Unterschiede bei ab- und auflandigem Wind werden deutlich.

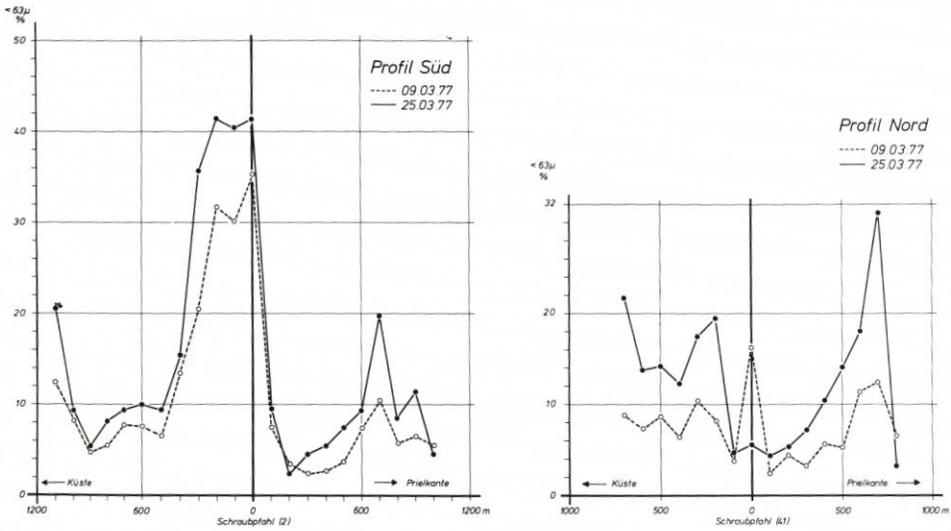


Abb. 12. Der Gehalt an Korngrößen $< 63 \mu$ in beiden Meßprofilen im zeitlichen Abstand von 16 Tagen. Die Küste liegt jeweils links. Es zeichnen sich ab ein Maximum an der Küste und zwei weitere Maxima dort, wo die Profile Prielkenen überqueren. Ein Unterschied, d. h. in diesem Fall eine Zunahme an Verschlickung, ist erkennbar.



Abb. 13. Eine Deckschicht von schlickigem Sand wird abgetragen. Zunächst entstehen Erosionswannen, die laufend erweitert werden, bis die gesamte Deckschicht abgetragen und der darunter liegende Sand freigelegt ist. In der Sedimentation solch schlickiger Decklagen und deren Erosion besteht der gemessene Wechsel am Gehalt von Korngrößen $< 63 \mu$. Profil Süd, Scharhorn-Neuwerker Watt. Aufn. Reineck.

von den beiden Profilen überquert wurden. Dort erreichten die Gehalte an Ton und Schluff vielfach zwischen 20 und 30 %. Die Sedimente der höhergelegenen Wattfläche enthielten davon meist unter 10 %.

Mehrmals wurden die schlickigen Proben auf den Gehalt an Kotpillen untersucht, um sicher zu gehen, daß der Gehalt an Korngrößen $> 63 \mu$ aus sedimentierter Suspension stammt; denn einzelne schlickige Vorkommen bestehen aus zusammengeschwemmten Kotpillen, und zwar vornehmlich aus solchen von der Muschel *Cerastoderma edule* und den Polychaeten *Heteromastus filiformis*. Diese Kotpillen sind so fest, daß sie transportiert werden können. Sie bleiben auch nach der Eindeckung erhalten, im Gegensatz zu dem Kot der Miesmuschel, der nur frisch abgelegt an der Sedimentoberfläche seine bandnudelartige Form behält.

Schon im Abstand der Probenentnahme von 14 Tagen zeigten sich häufig deutliche Unterschiede im Schluff- und Tongehalt. Dies war besonders markant in den Prielsenken (Abb. 12). In beiden Profilen verliefen Zunahme bzw. Abnahme an Schluff- und Tongehalt parallel.

Weiterhin erfolgten Zu- bzw. Abnahmen über längere Zeiträume anhaltend, das bedeutet, daß es Faktoren gibt, die über längere Zeit die Sedimentation feinkörniger Sedimente bewirken bzw. verhindern und diese sogar abtragen. Der Abtrag erfolgt wie bei allen anschlickigen und schlickigen Substraten primär nicht flächenhaft, wie es bei Sanden der Fall ist, sondern in Form von Erosionswannen (REINECK, 1974), deren weitere Entwicklung dann zu Schlickrücken führt (Abb. 13), bis auch diese abgetragen worden sind. Bei den Messungen wurden also die wiederholte Sedimentation einer schlickigen Deckschicht und deren wiederholte Abtragung verfolgt.

6.2 Wirkung des Seegangs auf den Schluffanteil im Oberflächensediment

Die Ganglinien des Schluffanteiles auf Abb. 5 bis 7 wurden zunächst im Hinblick auf eine Eingrenzung derjenigen Windrichtungen analysiert, bei denen eine Abnahme erkennbar wurde. Bisher lag hierzu lediglich die an der Küste allgemein bekannte Faustregel vor, daß nach den ersten kleinen Sturmfluten (also auflandigen Winden) im Herbst die bei ruhigen Wetterlagen im Sommer „angeschlickten“ Watten wieder „fester“ werden. Untersuchungen von GÖHREN (1970) in drei Testfeldern auf dem Neuwerker Watt bestätigten diese Abhängigkeiten von der Windaktivität auch quantitativ.

Es gelang bei der Analyse der Sahlenburger Daten, als maßgebende Windverhältnisse

- Wind aus dem Sektor 190° bis 300°
 - mit Geschwindigkeiten von mindestens 10 m/s
 - und einer Dauer von mindestens 4 Tagen
- zu identifizieren.

Die unter diesen Bedingungen einwirkende Seegangintensität ΣE^* wurde jeweils zwischen zwei Aufnahmen ermittelt und mit der Veränderung des Schluffanteiles in Beziehung gesetzt. Daraus ergibt sich auf Abb. 14 ein deutlicher, etwa linearer Zusammenhang mit der (erwarteten) Tendenz, daß mit zunehmender Seegangintensität die feinen Anteile im Sediment abnehmen. Bezieht man in die Betrachtungen die bei den übrigen Windrichtungen aufgetretenen (ablandigen) Seegangsverhältnisse mit ein, die – wegen niedrigerer Wasserstände und kürzerer Streichlänge des Windes zur Ausbildung von Seegang – ungleich kleinere Seegangintensitäten je Zeiteinheit zeigen, so ergibt sich ein ganz ähnliches Bild, nämlich eine Zunahme der feinen Anteile auf Abb. 15. Es zeigt jedoch auch, daß bei einer Gesamtbetrach-

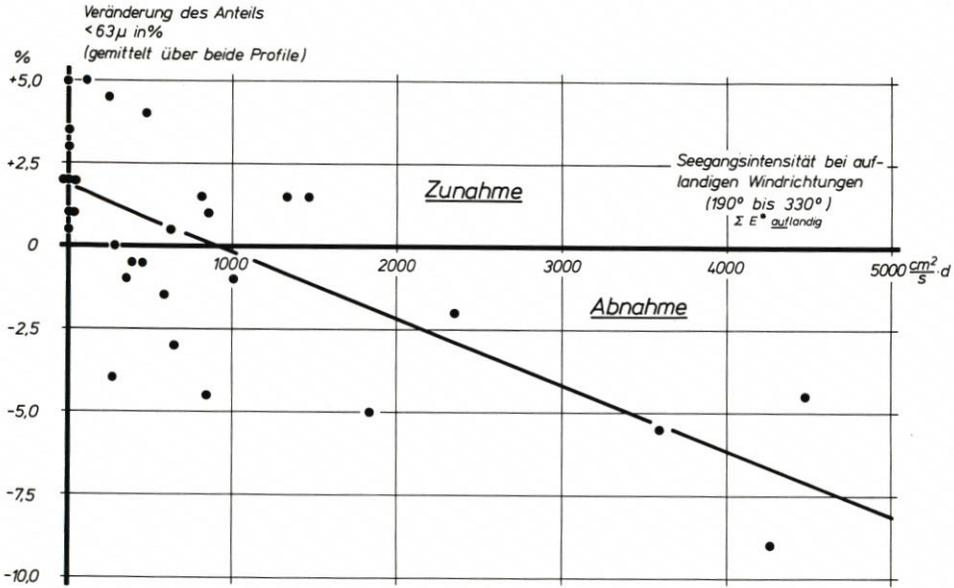


Abb. 14. Veränderungen des Anteils < 63 μ im Sahlenburger Watt als Funktion der Seegangintensität bei auflandigen Windrichtungen

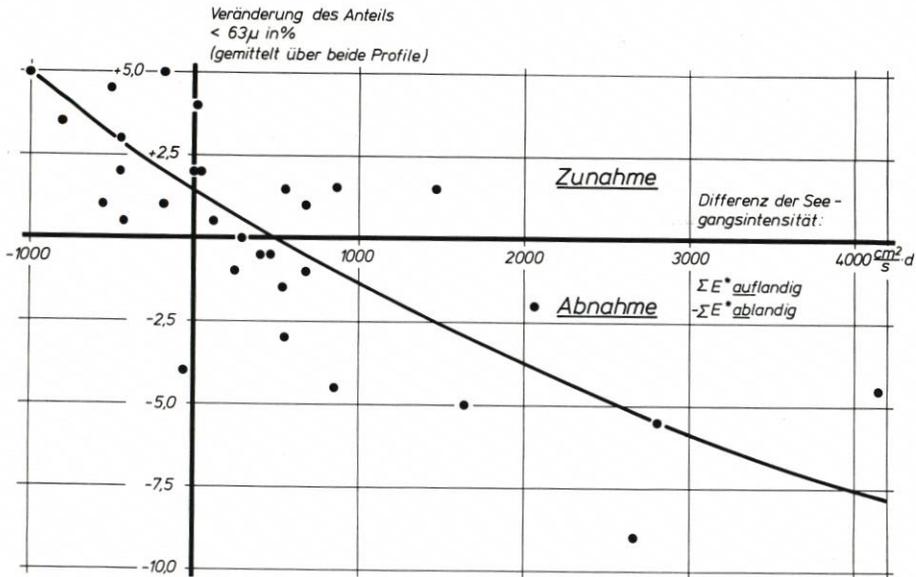


Abb. 15. Veränderungen des Anteils < 63 μ im Sahlenburger Watt als Funktion der Differenz der Seegangintensitäten bei auflandigen und ablandigen Windrichtungen

Tabelle 2
Zunahme des %-Anteils <math> < 63 \mu </math> je Tag in %

	nördliches Profil	südliches Profil
Maximum	0,52	0,35
Minimum	0,01	0,03
Mittel	0,19	0,20

tung die Verhältnisse bei ablandigen Winden nicht außer Betracht gelassen werden können: Sobald die Summe der bei ablandigen Windverhältnissen wirkenden Seegangsintensität größer ist als diejenige bei Wind aus 190° bis 300° , ist mit einer Zunahme des Schluffanteiles im Sediment zu rechnen. Diese Situation ist aber praktisch nur dann gegeben, wenn zwischen zwei Entnahmen so gut wie kein aufländiger Wind auftrat. Daraus folgt, daß die auf das Sediment einwirkenden hydrologischen Kräfte bei ablandigen Windverhältnissen ganz ähnlich denen bei ruhigen Wetterlagen sind, daß jedoch der Suspensionsgehalt des Wassers ungleich größer ist.

Für 10 Zeiträume von je 10 bis 18 Tagen mit Windgeschwindigkeiten nur unter 10 m/s zwischen den Probennahmen ergaben sich die Werte von Tab. 2. In Perioden ohne aufländigen Wind über 10 m/s nimmt der Schluffanteil im Sediment des Sahlenburger Wattes um rd. $2^\circ/00/\text{Tag}$ zu. Entsprechend wurden die Ganglinien auf Abb. 5 bis 7, die nur als Anhalt anzusehen sind, auch für größere Zeiträume zwischen den Probennahmen konstruiert.

6.3 Zusammenwirken von Orbital- und Tideströmungen

Während der Meßkampagne vor Sahlenburg wurden die Tideströmungen gemessen, und auf Abb. 5 bis 7 sind die max. Strömungsgeschwindigkeiten als Ganglinien generalisiert dargestellt. Dabei zeigt sich, daß deutliche Geschwindigkeitserhöhungen und damit auch längere Stromwege des Wassers je Flut oder Ebbe nur während gewisser aufländiger Windlagen eintreten, aber eben nicht bei jeder dieser doch sehr ähnlichen Gegebenheiten. Da man aber durchaus in allen Fällen grundberührenden Seegang – also Orbitalströmungen unmittelbar über der Sohle – voraussetzen kann, ist demnach zu unterscheiden zwischen

- ruhigen Wetterlagen ohne Orbitalströmungen und mit kurzen Flut- und Ebbestromwegen,
- ablandigen Windrichtungen mit geringen Orbitalströmungen und kurzen Stromwegen,
- aufländigen Windrichtungen mit ausgeprägten Orbitalströmungen, mittleren Tideströmungen und daher kurzen Stromwegen,
- aufländigen Windrichtungen mit ausgeprägten Orbitalströmungen, erhöhten Tideströmungen und langen (Trift-)Stromwegen.

Es sind hauptsächlich zwei Vorgänge, die gleichzeitig während der Überdeckungsphase des Wattes mit Wasser wirken, wenn entsprechend starker aufländiger Wind weht:

- Der Seegang erzeugt mit der stark turbulenten Orbitalströmung und den nach oben gerichteten Strömungskomponenten eine starke Zunahme der Suspension, etwa proportional der Seegangsintensität. Der Schluffanteil im Sediment nimmt dann kurzfristig ab, der Nettotransport an feinen Bestandteilen bleibt aber solange klein, wie auch der Reststrom (als Differenz von Flut- und Ebbestromvektoren) klein ist: Es wird zwar viel Material suspendiert und über gewisse Strecken transportiert, aber die Strecken sind so kurz, daß kein feines Material aus benachbarten Schlickgebieten herangeführt werden kann (z. B. Ende Okt. bis Ende Nov. 1976 auf Abb. 5).

- Bei langen Triftstromwegen, die zusätzlich zum Reststrom auftreten, werden größere Mengen suspendierten Materials über größere Strecken über das Watt transportiert, der Nettotransport wird also erheblich. Zugleich wird in das Untersuchungsgebiet Material aus Nachbargebieten eingebracht (z. B. Anfang Sept. bis Ende Okt. 1977 auf Abb. 6).

Hinzu kommt der Einfluß der Wassertemperatur auf den Suspensionstransport. CHRISTIANSEN (1974) hat nachgewiesen, daß die niedrigen Wassertemperaturen im Winter dazu führen, daß bei sonst gleichen äußeren Bedingungen etwa fünfmal soviel Material in Suspension geht wie bei den höheren Temperaturen im Sommer. Diese Tatsache ist an den Ganglinien der Abb. 5 bis 7 mit besonders markanten Abfällen im Nov./Dez. 76 und im Nov. 77/Jan. 78 erkennbar.

Bei der Beurteilung der Wirkung dieser Einflüsse muß die Umgebung des Meßgebietes mit berücksichtigt werden: Die lokalen und regionalen Vorgänge im Meßbereich vor Sahlenburg sind auf Abb. 16 noch einmal erläutert. Die für 10 küstennahe Orte in maßstabgerechten Längen angegebenen Rest- und Triftstromvektoren deuten die geschilderten unterschiedlichen Verhältnisse an. Es wird deutlich, daß nach einer Starkwindperiode die Feianteile aus dem Meßgebiet verfrachten, trotzdem aber der Schluffanteil ähnlich hoch bleibt, weil er aus südlich

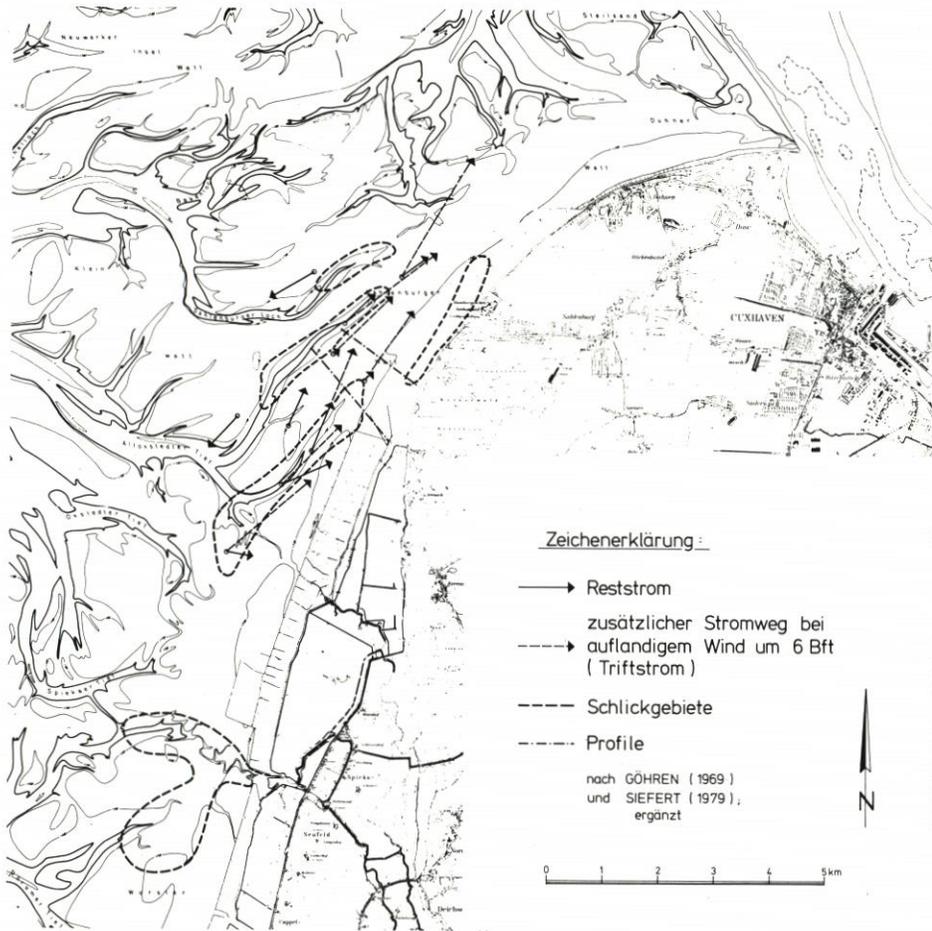


Abb. 16. Reststrom- und Triftstromverhältnisse in der weiteren Umgebung des Meßgebietes

gelegenen Schlickgebieten durch eben diesen Triftstrom neu herangeführt wurde. Man kann also die Entwicklung noch weiter spezifizieren: Da mehr Seegangenergie zum Suspendieren des Feststoffes als zu dessen Abtransport erforderlich ist, muß – ohne Berücksichtigung der küstenparallelen Triftstromeffekte – ein Materialtransport in Ebbestromrichtung, also etwa küstennormal, vorhanden sein. Trotz nur kleiner Reststromvektoren wird dann Material um einige 100 m verlagert werden können. So wird es kurzfristig zu Abnahmen im Schluffgehalt des Untersuchungsgebietes kommen. Dies wird nur dann nicht deutlich, wenn Triftströmungen aus anderen Gebieten neues Material heranzuführen.

Zu demselben Ergebnis kommen noch nicht abgeschlossene Untersuchungen von DÜCKER (1981) über den Suspensionsgehalt an Meßstellen südlich und östlich von Scharhörn: Der Seegangseinfluß ist maßgebend für den Start der Suspension; die an einem festen Ort gemessenen Mengen werden wesentlich durch die Verhältnisse in der näheren und weiteren Umgebung mitbestimmt.

6.4 Veränderung der Watt Höhen

Die Höhenveränderungen in drei Testfeldern im Neuwerker Watt, die im 100-m-Raster in kurzen Zeitfolgen durch Feinnivellement aufgenommen wurden, hat GÖHREN (1970) in einer ersten Analyse der Windaktivität gegenübergestellt (Abb. 17). Es war sein Ziel, seine aus der Analyse zahlreicher Strömungsmessungen und unter Einbeziehung weiterer allgemeiner Wattbeobachtungen entwickelte Hypothese zu belegen, daß die mittlere Höhenlage freier Wattflächen durch das ständige Wechselspiel wattaufbauender Gezeitenströmungen und erodierender Triftströmungen bestimmt und stabilisiert wird. Er kommentiert dazu:

„Zur Erhärtung dieser Hypothese wurden im Jahre 1967 drei Testfelder im Neuwerker Watt abgesteckt, im 100-m-Raster durch dünne Drahtnadeln vermarktet und in kurzen Zeitfolgen durch Feinnivellement aufgenommen. Die Aufnahmegebiete sind in Abb. 17 zusammen mit den Ergebnissen und Angaben über die Windaktivität dargestellt.

Für die Felder 1 und 2, auf dem hohen Watt westlich und östlich von Neuwerk, findet sich eine eindeutige Bestätigung des angegebenen Zusammenhangs. Ausgehend von der mittleren Feldhöhe nach Aufnahmen im Sommer 1966 ist das Watt nach den windreichen Herbst- und Wintermonaten im Mittel aller Aufnahmepunkte um einige Zentimeter abgetragen; in den sehr ruhigen Sommermonaten 1967 höht es sich merklich auf, um dann nach den ersten Herbststürmen erneut in Erosion zu geraten. Anders liegen die Verhältnisse im Feld 3, westlich von Scharhörn. Hier bringen offensichtlich Starkwindwetterlagen Materialablagerungen, während das Watt in der ruhigen Jahreszeit stabil bleibt.

Die Umsatzwerte, die durch die mittleren absoluten Höhenänderungen ausgedrückt werden, lassen für alle drei Felder eindeutig eine Zunahme des Materialumsatzes mit der Windintensität erkennen.“

Die Veränderungen in denselben Feldern wurden erneut über das Jahr 1969 gemessen. Um die Resultate sinnvoll als Ergänzung zu den Meßergebnissen vor Sahlenburg verwenden zu können, wurden aus den Testfeldern 1 und 2 je ein repräsentatives Profil im Bereich der Wattwasserscheiden ausgewählt und die Höhenveränderungen von 1967 und 1969 in Abb. 8 bis 10 dargestellt. Entsprechend den bei Sahlenburg gewonnenen Erkenntnissen wurden hier wiederum die auflandigen Winde ab 10 m/s als Primärparameter verwendet. Für dieses – gegenüber Sahlenburg freier liegende – Wattgebiet wurde als entsprechend wirksamer Windvektor derjenige zwischen 190° und 330° gefunden. Dieser stimmt weitgehend mit dem Sektor überein, der als aufländig aus umfangreichen Seegangsmessungen in diesem Watt ermittelt worden war, nämlich 210° bis 350° (SIEFERT, 1971).

Für die Meßzeiträume wurden dann entspr. dem Ansatz für das Watt vor Sahlenburg die Seegangintensität gemessen und schließlich auf Abb. 18 die mittlere Höhenveränderung über

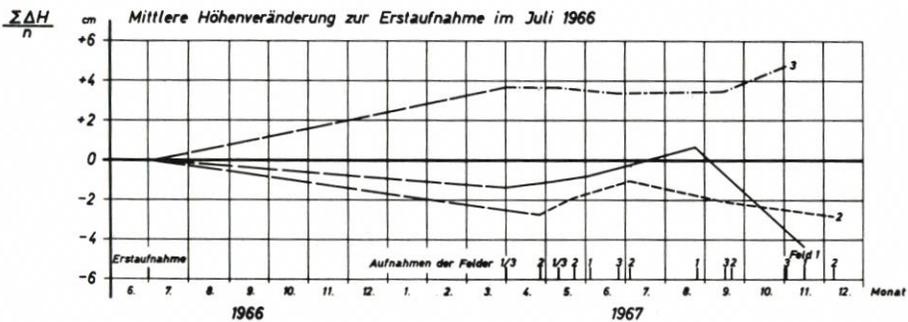
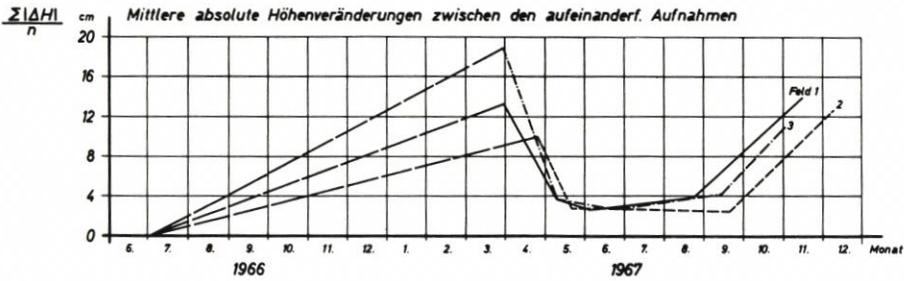
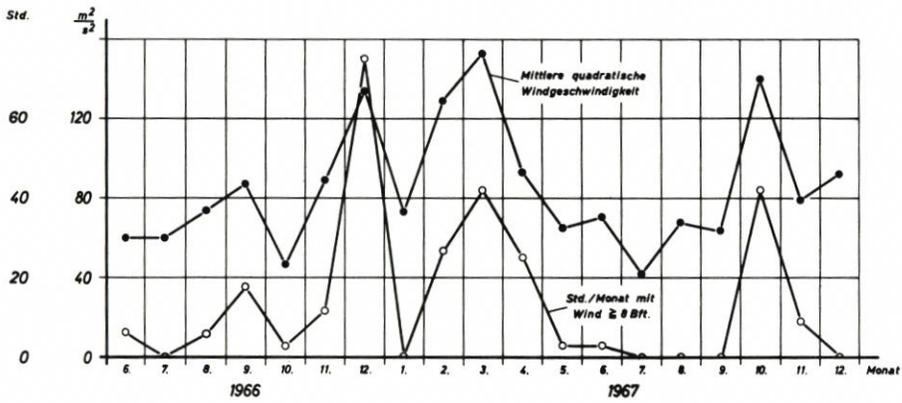
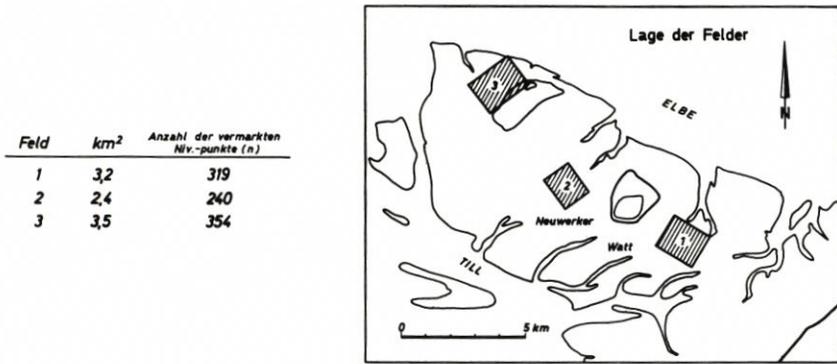


Abb. 17. Höhenveränderungen in 3 Testfeldern im Neuwerker Watt (aus GÖHREN, 1970)

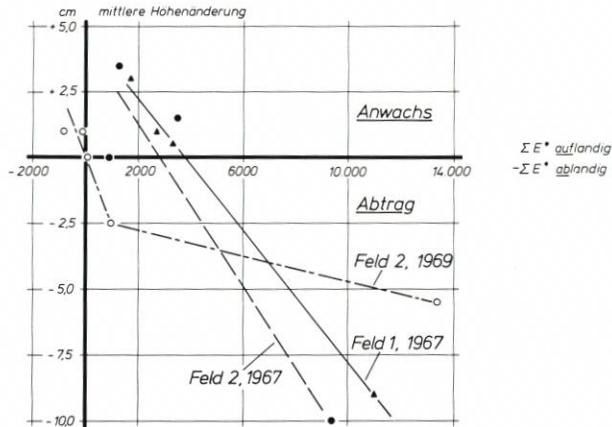


Abb. 18. Mittlere Höhenveränderungen im Neuwerker Watt als Funktion der Differenz der Seegangsin-
tensitäten bei aufländigen und abländigen Windrichtungen

der Differenz von aufländiger und abländiger Intensität aufgetragen. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von GÖHREN (1970) und vor Sahlenburg ist mit zunehmender aufländiger Seegangsin-
tensität mit deutlich auszumachender Erosion zu rechnen. Hiermit ist sogar ein erster Ansatz möglich, der es bei bekanntem Seegangsklima erlaubt, Höhenveränderungen im Watt oder zumindest ihre Variationsbreite vorherzusagen.

7. Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß zur Analyse der Schlicksedimentation in begrenzten Gebieten umfangreiches Datenmaterial über die meteorologischen und hydrologischen Gegebenheiten herangezogen werden muß. Darüber hinaus ist stets zu berücksichtigen, daß es sich hierbei wegen des – in gewissem Umfang immer vorhandenen – Sediment- und Wasseraustausches nicht um lokale, sondern um regionale Vorgänge handelt. Daraus folgt, daß Zustand und Veränderungen der näheren und ferneren Umgebung Bedeutung haben.

In der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, Faktoren der Schlicksedimentation qualitativ und quantitativ nachzuweisen, allerdings nur exemplarisch für zwei Wattbereiche. Letzten Endes liegt es im vitalen Interesse der Küstenforschung, solche Zusammenhänge in allgemeiner Form und für Vorhersagen brauchbar zu erarbeiten. Das ist sicher möglich, aber der Weg dorthin führt nur über weitere umfangreiche Messungen in der Natur.

8. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarrien am Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 28, 1974.
 DÜCKER, H. P.: Über den Suspensionsgehalt in Flachwassergebieten. Hamb. Küstenf., in Vorbereitung für 1981.
 GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
 GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.

- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen Elbe und Weser. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- 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.
- MÜLLER, C. D.: Fauna und Sediment in der Leybucht. Jb. 1959 der Fst. Norderney, 1960.
- PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. Westküste, Kriegsheft, 1943.
- POSTMA, H.: Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 1, 1961.
- REINECK, H.-E.: Schlickrücken auf Sandwattflächen. Senckenbergiana marit., Nr. 6, 1974.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuerker/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- REINECK, H.-E.: Einwirkungen der vier Sturmfluten im Januar 1976 auf die Wattedimente zwischen dem Festland und der Insel Neuerker. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974a.
- SIEFERT, W.: Über die Seegangsintensität im Bereich der geplanten Dämme zwischen der Küste und Neuerker. Forsch. und Vorarb. Stelle Neuerker, Planungsst. Nr. 27, 1974b (unveröff.).
- SIEFERT, W.: Windstatistik Scharhörn 1965 bis 1975. Hamb. Küstenf., H. 36, 1976.
- SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964/77 aus dem Sahlenburger Watt. Forsch. und Vorarb. Stelle Neuerker, Studie Nr. 41, 1979 (unveröff.).
- SINDOWSKI, K.-H.: Das ostfriesische Küstengebiet, Inseln, Watten und Marschen. Samml. geol. Führer, Bd. 57, 1973.
- VAN STRAATEN, L. M. J. U. u. KUENEN, P. H.: Tidal action as a cause of clay accumulation. J. Sedim. Petrol., No. 28, 1957.