Die Küste, 40 (1984), 1-318

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST



Heft 40

1984

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

HERAUSGEBER:
KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

Heft 40 – 1984

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

ISSN 0452-7739
ISBN 3-8042-0332-9

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

BERGHEIM, Volker, Dipl.-Ing., Am Fischereihafen 9, 2242 Büsum; BETTAC, Werner, Dr.-Ing., Bernhard-Nocht-Str. 78, 2000 Hamburg 4; FIGGE, Klaus, Dr. rer.-nat., Bernhard-Nocht-Str. 78, 2000 Hamburg 4; FLADUNG, Bernd, Dipl.-Ing., Am Fischereihafen 9, 2242 Büsum; GAST, Reinhard, Dr. rer.-nat., Riedhorst 12, 3000 Hannover 51; GROSSMANN, Michael, Dipl.-Biol., Zeiseweg 9, 2000 Hamburg 50; KÖSTER, Rolf, Prof. Dr. rer.-nat., Olshausenstr. 40–60, 2300 Kiel; LUCK, Günter, Dr.-Ing., An der Mühle 4a, 2982 Norderney; RECHLIN, Dieter, Dipl.-Geol., Schleuseninsel 22, 2300 Kiel-Holtenau; ROHDE, Hans, Dr.-Ing., Moorweidenstr. 14, 2000 Hamburg 13; RUNTE, Karl-Heinz, Dipl.-Geol., Olshausenstraße 40–60, 2300 Kiel; SPYCHALA, Hubert, Dipl.-Biol., Hammer Landstraße 12–14, 2000 Hamburg 26; SCHLEIDER, Wilfried, Dr.-Ing., Schloßplatz 9, 2960 Aurich; SINDERN, Josef, Dipl.-Ing., Hasselkamp 85, 2300 Kronshagen; THIEL, Hjalmar, Dr. habil. rer.-nat., Zeiseweg 9, 2000 Hamburg 50; WIELAND, Peter, Dr.-Ing., Am Fischereihafen 9, 2242 Büsum.

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich.
Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.
Vorsitzender: Ministerialrat Gerhard KRAUSE,
Geschäftsführer: Bauoberrat Dr.-Ing. Heinz WISMER, Feldstraße 251/253, 2300 Kiel.
Schriftleiter: Dr.-Ing. Harald GÖHREN, Dalmannstraße 1–3, 2000 Hamburg 11.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Inhaltsverzeichnis

ROHDE, Hans, Dr.-Ing.
Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981 bis 1983 1

BETTAC, Werner, Dr.-Ing.
SCHLEIDER, Wilfried, Dr.-Ing.
SINDERN, Josef, Dipl.-Ing.
Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht – Vermessung und Kartographie 13

Projektgruppe HN-Modelle des KFKI
HN-Modellrechnungen und Naturmessungen – ein Vergleich 33

FIGGE, Klaus, Dr. rer. nat.
Das Schlickuntersuchungsprogramm des KFKI – Anlaß und Arbeitskonzept . . . 87

WIELAND, Peter, Dr.-Ing.
Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattforschung 91

WIELAND, Peter, Dr.-Ing.
Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht 107

WIELAND, Peter, Dr.-Ing.
FLADUNG, Bernd, Dipl.-Ing.
BERGHEIM, Volker, Dipl.-Ing.
Tidedynamische und meteorologische Randbedingungen im Bereich des Schlick-Testfeldes Dithmarscher Bucht 139

GAST, Reinhard, Dr. rer. nat.
KÖSTER, Rolf, Prof. Dr. rer. nat.
RUNTE, Karl-Heinz, Dipl.-Geol.
Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht 165

THIEL, Hjalmar, Dr. habil. rer. nat.
GROSSMANN, Michael, Dipl.-Biol.
SPYCHALA, Hubert, Dipl.-Biol.
Quantitative Erhebungen über die Makrofauna in einem Testfeld im Büsumer Watt und Abschätzung ihrer Auswirkungen auf den Sedimentverband 259

RECHLIN, Dieter, Dipl.-Geol.
Dichtemessung im Watt vor Büsum 315

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981 bis 1983

Von Hans Rohde

Zusammenfassung

Anknüpfend an den Bericht über die Forschungsarbeiten des „Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen" (KFKI) von 1979 bis 1981 (veröffentlicht in „Die Küste", H. 37, 1982) wird ein kurzer Überblick über den Stand der gegenwärtig bearbeiteten Forschungsprojekte gegeben, und es werden die für die nahe Zukunft geplanten Projekte genannt.

Summary

Referring to the report about the research projects of the "Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen" (KFKI) from 1979 to 1981 (published in „Die Küste", H. 37, 1982) a brief general view is given of the recent research projects and those, which are planned for the near future.

Inhalt

1. Einführung 1
2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsprojekten 3
2.1 Küstenkartenwerk und Wiederholungsvermessung 3
2.2 Morphologische Analysen Nordseeküste (MORAN) 3
2.3 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) der Deutschen Bucht 4
2.4 Schlicksedimentation in den Ästuaren 4
2.5 Tide- und Sturmflutentwicklungen im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee 6
2.6 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren 7
2.7 Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Gezeitensteuerung 7
2.8 Untersuchungen über den natürlichen Querschnitt von Außentiefs 8
2.9 Restarbeiten aus früheren Vorhaben 8
3. Ausblick 9
3.1 Sedimentumlagerung infolge seegangsinduzierter Strömungen an der Ostseeküste . . . 9
3.2 Wasserstandsmessungen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste 9
4. Schriftenverzeichnis 11

1. Einführung

In Heft 37 der Schriftenreihe „Die Küste" wurde über die Forschungsarbeiten des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) in der Zeit von Mitte 1979 bis Ende 1981 berichtet (Rohde, 1982a). Dieser Bericht wird durch den jetzt vorliegenden fortgesetzt. Er umfaßt den Zeitraum von Ende 1981 bis Ende 1983.

In Organisation und Arbeitsweise des KFKI (Rohde, 1979) haben sich im Berichtszeitraum keine Änderungen ergeben. Turnusgemäß ging der Vorsitz am 1. 1. 1983 von MR Dr. Zanker, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, an MR Krause vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten über. Nach Erreichen der Altersgrenze trat der langjährige Geschäftsführer des KFKI, LBDir. Sindern, in den Ruhestand (s. „Die Küste", H. 38). Seine Nachfolge als Geschäftsführer übernahm mit

Wirkung vom 1. 5. 1983 BOR Dr.-Ing. WISMER von der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord in Kiel.

Jährlich fanden je zwei Sitzungen des KFKI und der „Beratungsgruppe" statt; die einzelnen Projektgruppen haben sich entsprechend der Notwendigkeit für die jeweiligen Forschungsvorhaben mehrmals im Jahr getroffen. Es wurden Kontakte zu anderen Instituten und Institutionen des Küsteningenieurwesens aufrechterhalten.

Die Forschungsarbeiten, die gemeinsam von den Mitgliedsverwaltungen und weitgehend mit Förderung des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) ausgeführt werden, wurden im Berichtszeitraum fortgesetzt. Einige Vorhaben konnten zum Abschluß gebracht werden, einige neue wurden begonnen. Darüber wird in den Abschnitten 2.1 bis 2.8 berichtet. Über Ergebnisse einiger Vorhaben, die bereits abgeschlossen waren, erschienen im Berichtszeitraum weitere Veröffentlichungen (Abschn. 2.9).

Mit der Planung und Vorbereitung neuer Vorhaben wurde begonnen (Abschn. 3). Der Fortgang der Arbeiten wurde zwar durch die Knappheit der Haushaltsmittel bei den Eigenleistungen der beteiligten Verwaltungen beeinflußt, er kann aber aufgrund der finanziellen Förderung durch den BMFT und infolge des engagierten Einsatzes der Mitarbeiter aller beteiligten Dienststellen insgesamt als positiv beurteilt werden. Allerdings mußte 1983 erstmals bei einigen Vorhaben eine Einschränkung der vorgesehenen Förderung des BMFT hingenommen werden.

Ende September 1982 fand in Hamburg der Kongreß INTERMARITEC '82 statt. Auf Anregung des BMFT wurde in das Programm auch ein Abschnitt „Küsteningenieurwesen" aufgenommen, und das KFKI gehörte mit zu den Ausrichtern des Kongresses (ROHDE, 1982 b). An zwei Tagen (29. u. 30. September) wurden 23 Vorträge aus dem Gebiet des Küsteningenieurwesens gehalten, davon fünf über Projekte des KFKI (BECKMANN, 1982; SIEFERT, 1982; STEFFEK, 1982; STEPHAN, 1982; WIESE, 1982b). In einem einführenden Vortrag gab der Forschungsleiter Küste des KFKI einen Überblick über das Küsteningenieurwesen in der Bundesrepublik Deutschland und ging dabei auch auf die Aufgaben des KFKI ein (ROHDE, 1982 c). Da eine Wiederholung der INTERMARITEC nicht übersehbar ist, plant das KFKI in Zusammenarbeit mit der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG), künftig eigene Vortragsveranstaltungen in weniger aufwendigem Rahmen durchzuführen. Ein erster derartiger „Sprechtag" ist für November 1984 vorgesehen.

Am 20. 4. 1983 wurde in Bremen ein Symposium über das KFKI-Forschungsprojekt MORAN abgehalten (siehe Abschn. 2.2), an dem vorwiegend Mitarbeiter aus den im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen teilnahmen. In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) anläßlich der Generalversammlung der International Union for Geodesy und Geophysics (IUGG) 1983 in Hamburg herausgegebenen „National Report on Hydrological Research 1975–1982" fanden das KFKI und die von ihm ausgeführten Forschungsvorhaben Erwähnung.

Eine wesentliche Aufgabe des KFKI besteht auch in der Förderung der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Küsteningenieurwesens. Das KFKI richtete daher im Herbst 1981 die Zusammenkunft der North Sea Coastal Engineering Group (NSCEG) in Heide aus, beteiligte sich an den Zusammenkünften 1982 in Delft (Niederlande) und 1983 in Dragsholm (Dänemark) und förderte die Zusammenkunft der Estuary Study Group im Juni 1983 in Cuxhaven. Außerdem förderte es die Teilnahme von Vertretern der ihm angehörenden Verwaltungen an der 18. International Conference on Coastal Engineering (ICCE) Ende 1982 in Kapstadt (ROHDE, 1983).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsprojekten

2.1 Küstenkartenwerk und Wiederholungsvermessung

Die 1981 begonnene Digitalisierung der Tiefenlinien der Küstenkarten im Maßstab 1 : 25 000 aus der Erstvermessung wurde fortgesetzt und ist inzwischen abgeschlossen. Die Wiederholungsvermessung konnte zu Ende geführt werden, die Ergebnisse der tachymetrischen Vermessung und der Echolotungen liegen als Arbeitskarten vor. Die rechnerische Umsetzung der aus der Luftbildvermessung gewonnenen Wasserlinien in Tiefenlinien ist noch im Gange, ebenso die Digitalisierung der Arbeitskarten der Wiederholungsvermessung.

Mit der Vorbereitung der Kartenherstellung aus der Wiederholungsvermessung wurde begonnen, sie soll 1984 bis 1986 ausgeführt werden. Von einem Mehrfarbendruck wird dabei abgesehen; außerdem sollen nur die Karten des küstennahen Gebietes neu bearbeitet werden. Ein zusammenfassender Bericht „Das Küstenkartenwerk 1 : 25 000 der Deutschen Bucht" ist in dem vorliegenden Heft 40 „Die Küste" veröffentlicht (Bettac, Schleider, Sindern, 1984).

Auf dem MORAN-Symposium (s. Abschn. 2.2) wurde über die angewendeten Vermessungsverfahren berichtet. Bei dem XVII. Kongreß der Féderation Internationale des Geometres (FIG) hat Schleider über „Die synoptischen Vermessungen der deutschen Küstengewässer in der Nordsee" vorgetragen und in den entsprechenden Kongreßberichten (Kommission 4, Hydrographische Vermessungen) veröffentlicht (Schleider, 1983).

2.2 Morphologische Analysen Nordseeküste (MORAN)

Die Arbeiten zu einer morphologischen Analyse des gesamten Vorfeldes der deutschen Nordseeküste sind in vollem Gange. Um Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, wurden für einige Teilgebiete nicht nur die Ergebnisse der vom KFKI ausgeführten Erst- und Wiederholungsvermessung berücksichtigt, sondern noch zahlreiche weitere topographische Aufnahmen aus der Zeit vor 1974 einbezogen. Bei der INTERMARITEC '82 wurden aus dem Vorhaben MORAN zwei Vorträge gehalten (Siefert, 1982; Stephan, 1982); einen zusammenfassenden Überblick über das Vorhaben und die Ergebnisse der Auswertung für das Knechtsandgebiet gibt Siefert (1983).

Am 20. April 1983 fand ein Berichtskolloquium „Morphologische Analysen Nordseeküste" in Bremen statt, bei dem im wesentlichen über Ergebnisse des MORAN-Projekts sowie Folgerungen für Praxis und Forschung vorgetragen wurde. Folgende Fachvorträge wurden gehalten:

- Ziele des Projektes (Dr.-Ing. Renger)
- Vermessungsverfahren (Dr.-Ing. Schleider)
- Digitalisierung der Vermessungsergebnisse (Friedberg)
- TASH-Programm (Klüger)
- Ergebnisse aus dem Testgebiet Knechtsand (Prof. Dr.-Ing. Siefert)
- Morphologische Analysen kleiner Einheiten (Siemssen)
- Überlegungen zur morphologischen Charakteristik (Prof. Dr.-Ing. Siefert)
- Morphologische Vorgänge vor Büsum (Dr.-Ing. Wieland)
- Morphologische Reaktionen eines Watteinzugsgebietes (Dr.-Ing. Schwarze)
- Gestaltungsvorgänge im Bereich der Leybucht (Dr.-Ing. Stephan)

- Gestaltungsvorgänge in der Außenems (Dr. rer. nat. SAMU)
- Materialbilanz und Quertransport in der Unterelbe (Dr. rer. nat. DAMMSCHNEIDER)
- Schlußbetrachtung (Dr.-Ing. WISMER)

Bei den Tagungen der Estuary Study Group und der NSCEG hat SIEFERT in Vorträgen über das MORAN-Projekt berichtet; über eine spezielle Auswertung wurde von der TU Braunschweig eine Diplomarbeit vergeben (JENSEN, 1983).

Die Arbeiten am MORAN-Projekt sind bis einschließlich 1985 veranschlagt. Bis dahin sollen nach Möglichkeit mindestens für die erste Gesamtvermessung und die Wiederholungsvermessung morphologische Vergleiche des gesamten Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste vorliegen.

2.3 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) der Deutschen Bucht

Die Entwicklung der hydrodynamisch-numerischen Modelle wurde abgeschlossen; der Schlußbericht über dieses Vorhaben ist in Heft 38 „Die Küste" veröffentlicht (LUCK et al., 1983). Die Rechenprogramme wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe übernommen und stehen dort den Dienststellen der Wasserbauverwaltungen an der Küste für den Einsatz in der Praxis zur Verfügung.

Wie von ROHDE (1982a) bereits erwähnt, konnte von Mitte September bis Mitte November 1981 das umfangreiche Naturmeßprogramm DEBEX '81 zur Überprüfung der HN-Modelle ausgeführt werden (WIESE, 1982a). Im Anschluß daran erfolgten die Testrechnungen, die gute Ergebnisse brachten. Über DEBEX '81 sowie über die Ergebnisse erster Testrechnungen wurden bei der INTERMARITEC '82 drei Vorträge gehalten (BECKMANN, 1982; STEFFEK, 1982; WIESE, 1982b).

Der Schlußbericht über DEBEX '81 ist im vorliegenden Heft „Die Küste" veröffentlicht (LUCK et al., 1984). Die Projektgruppe wurde inzwischen aufgelöst.

2.4 Schlicksedimentation in den Ästuaren

Über die von ROHDE (1982 a) erwähnten Vorarbeiten, bei denen das bei den Dienststellen an der Küste vorhandene Material über Schlicksedimentation in den Ästuaren erfaßt wurde, hat HÜLSEMANN (1982) berichtet. In dem Bericht über die Forschungsarbeiten des KFKI im Zeitraum 1979 bis 1981 (ROHDE, 1982a) wurde auch bereits erwähnt, daß die zuständige Projektgruppe ein Meßprogramm aufgestellt hatte, um systematische Untersuchungen zur Schlicksedimentation in Ästuaren auszuführen. Grundlage für ein solches Meßprogramm waren die Beschaffung von Geräten sowie die Entwicklung geeigneter Meßsysteme und deren Erprobung. Für die beiden vorgesehenen Testgebiete in der Weser und Elbe wurden inzwischen Meßstationen eingerichtet.

Bei der Meßstation im Brackwassergebiet der Weser handelt es sich um einen Meßpfahl bei Nordenham (Abb. 1), der für zeitlich begrenzte Messungen und Dauerregistrierungen mit Meßsonden ausgerüstet ist. Neben Strömung und Trübung werden Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und pH-Wert gemessen.

Die Meßstation in der Elbe, die sich oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebiets bei Oortkaten, also außerhalb der Brackwasserzone, befindet, ist für Dauermessungen und kontinuierliche Probennahmen eingerichtet. Die Meßsysteme sind in einem Container unter-

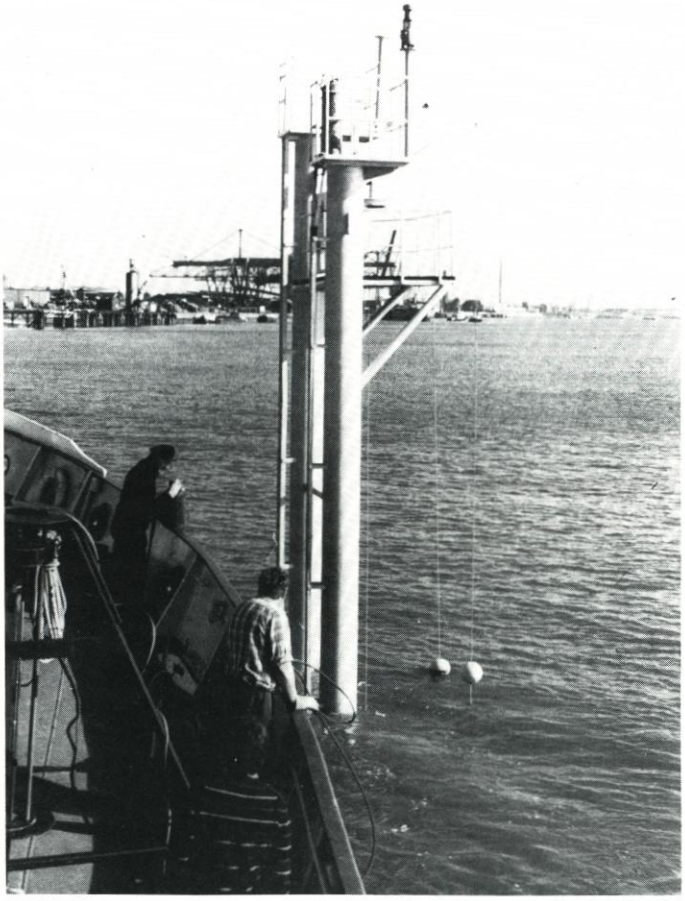


Abb. 1. Meßstation in der Weser bei Nordenham (Neumann phot.)

gebracht, der auf einem an Pfählen liegenden Ponton steht (Abb. 2). Neben der Dauerregistrierung der schon bei der Weserstation erwähnten Parameter sollen zudem kontinuierlich Wasserproben entnommen und auf verschiedene Inhaltsstoffe, insbesondere Schwebstoffe, untersucht werden. Dabei werden eine isokinetische Probennahme sowie eine morphologie- und strömungsadäquate Meßwertaufnahme angewandt, die erst nach langwierigen Entwicklungen der Gerätekonfigurationen erreicht werden konnten. Kontinuierliche Probennahme und Meßwerterfassung sollen eine Bilanzierung der Transporte ermöglichen.

Die Meßsysteme beider Stationen wurden 1983 eingehend getestet. Insbesondere wurde versucht, durch Vergleichsmessungen Bezüge zwischen den ortsfesten Messungen an den Stationen und denen für den gesamten Durchflußquerschnitt, für den die jeweilige Station repräsentativ sein soll, herzustellen. Folgende Fragen sollen anhand der Meßergebnisse geklärt werden:

1. Welche Korrelationen bestehen zwischen der fortlaufend registrierten optischen Trübung und der Suspensionskonzentration sowie zwischen beiden Größen und anderen gemessenen Parametern, einschließlich dem Oberwasserzufluß?



Abb. 2. Meßstation bei Oortkaten/Elbe mit dem Ponton und darauf dem Meßcontainer (Neumann phot.)

2. Welchen Einfluß haben darüber hinaus bestimmte gelöste Wasserinhaltsstoffe auf Schlickbildung und -sedimentation?
3. Lassen sich regional und jahreszeitlich Beziehungen zwischen Schlicksedimentation bzw. -erosion mit den genannten Daten ermitteln? Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit der GKSS eine Transmissionssonde zur Messung der Schlickdichte entwickelt.

Mit den eigentlichen Dauermessungen soll 1984 begonnen werden; die Untersuchungen sind bis einschließlich 1986 veranschlagt.

2.5 Tide- und Sturmflutentwicklungen im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die Aufzeichnungen zahlreicher Tidepegel, die zum Teil nur für kurze Zeit im Küstenvorfeld gestanden haben, ausgewertet (ROHDE, 1982 a). In die Auswertungen wurden auch die Aufzeichnungen der im DEBEX-Programm eingesetzten neuen Hochseepegel einbezogen sowie Aufzeichnungen des Pegels der Forschungsplattform „Nordsee". Unter Einbeziehung der gleichzeitigen Registrierungen der Dauerpegel an der Küste konnten neue Erkenntnisse über die Tide- und Windstauverhältnisse in der Deutschen Bucht gewonnen werden. Es zeichnen sich neue Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse der Tidebewegung in der Nordsee, vor der Küste und in den Ästuaren ab. Um über die damit aufgeworfenen, wissenschaftlich bedeutsamen Fragen weitere Klarheit zu gewinnen, sollte eine entsprechende Auswertung mit den in der Zwischenzeit gewonnenen

neuen Daten in einigen Jahren wiederholt werden, wobei auch Wasserstandsdaten aus den Nachbarländern Dänemark und den Niederlanden einbezogen werden sollten.

Das Vorhaben wurde antragsgemäß von 1982 bis Mitte 1983 bearbeitet. Der Abschlußbericht ist fertiggestellt und soll in einem der nächsten Hefte der „Küste" veröffentlicht werden. Bei der Zusammenkunft der NSCEG in Dänemark hat SIEFERT über die wesentlichen Ergebnisse des Projekts vorgetragen und erste Verbindungen für eine künftige Zusammenarbeit mit den Nachbarländern geknüpft.

2.6 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren

Mit der Bearbeitung dieses Vorhabens wurde Mitte 1983 nach Abschluß des in 2.5 erwähnten Vorhabens begonnen. Die Projektgruppe, die für beide Vorhaben zuständig ist, hat zunächst festgelegt, auf welche Pegel in den Ästuaren und auf welche Sturmfluten sich die Auswertungen erstrecken sollen. Dabei wurde Wert darauf gelegt, Sturmfluten unterschiedlichen Typs zu erfassen. Die Arbeiten an dem Vorhaben sind bis in das Jahr 1985 veranschlagt.

2.7 Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Gezeitensteuerung

Von ROHDE (1982a) sind die Ziele dieses Vorhabens, mit dessen Ausführung 1982 begonnen wurde, kurz dargestellt. Ende 1982 wurde das Spülsiel in Neßmersiel/Ostfriesland mit einer automatischen Steuerungsanlage ausgerüstet, so daß dessen Betrieb über die Pegelwasserstände im Speichersee und im Außentief automatisch gesteuert werden kann.

Zur Erprobung der verschiedenen Meßgeräte und -systeme wurden zunächst – vorwiegend während des Spülbetriebs – an mehreren Stationen des Außentiefs Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und der Schwebstoffkonzentration vorgenommen. Dabei kam ein vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel, entwickeltes Schwebstoffmeßgerät zum Einsatz (RENGER, 1982). Seine Weiterentwicklung für einen automatischen Dauereinsatz hat sich als zweckmäßig herausgestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt wird durch Flügelmessungen erfaßt, für die ein schwenkbarer Meßausleger entwickelt wurde.

Im Juni 1983 konnte mit Dauermessungen der Wasserstände und Strömungen in drei Meßquerschnitten des Außentiefs begonnen werden. Die ersten Messungen zeigten, daß der Prototyp der Siel- und Speicherseeanlage ausreichend bemessen ist. So konnte z. B. eine künstliche Ebbströmung erzeugt werden, die länger als zwei Stunden erheblich über 0,5 m/s lag und eine gute Räumung des Außentiefs bewirkte. Die seit 1981 in regelmäßigen Zeitabständen vorgenommenen Lotungen des Außentiefs ergaben daher bis Oktober 1983 eine Vergrößerung des Querschnitts unter NN −1,0 m um etwa das 3fache im hafennahen und mittleren Bereich des Außentiefs und um das 2fache im Bereich des Leuchtfeuers, das an der Einmündung des Außentiefs in die Neßmersieler Balje in 1,7 km Entfernung vom Spülsiel steht.

Erste automatische Dauermessungen mit dem Schwebstoffmeßgerät konnten im Oktober 1983 ausgeführt werden. Die Sedimentganglinie ergab dabei z. B. Sedimentgehalte zwischen 30 und 100 mg/l bei Flutstrom und 10 bis 50 mg/l etwa zur Zeit des Scheitelwasserstandes. Während der Spülphase erhöhten sich diese Werte auf 700 bis 1500 mg/l, wobei zu berücksichtigen ist, daß das Außentief seit Anfang 1983 durch den automatischen Spülbetrieb ständig

geräumt worden ist. Die Vorbeifahrten der Fähre und sonstiger Boote brachten ebenfalls eine erhebliche Zunahme des Sedimentgehalts, die etwa eine Viertelstunde lang anhielt. Über weitere Meßergebnisse soll nach Auswertung der großen Zahl von Meßdaten und nach weiteren Messungen berichtet werden.

2.8 Untersuchungen über den natürlichen Querschnitt von Außentiefs

Für dieses Vorhaben, dessen Ziele auch bereits von ROHDE (1982 a) dargestellt sind, wie auch für das im vorigen Abschnitt genannte, ist dieselbe Projektgruppe zuständig. Die Erhebung von vorhandenen Daten über die verschiedenen Einflußparameter wurde fortgesetzt, und es wurde mit der Auswertung begonnen. Als ein sehr wichtiger Parameter für die Querschnittsgestaltung eines Außentiefs ist die Schiffahrt anzusehen. Daher wurde auf Anregung des BMFT gemeinsam mit der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau in Duisburg (VBD) ein Meßprogramm konzipiert, durch das der Einfluß des Schiffsverkehrs auf die Strömungsgeschwindigkeiten und den Schwebstofftransport in einem Meßquerschnitt und damit auf dessen Formänderungsverhalten erfaßt werden soll. Die ersten Messungen wurden im Sommer 1983 im Neßmersieler Außentief ausgeführt im Zusammenhang mit dem im Abschn. 2.7 erwähnten Meßprogramm. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, ähnliche Messungen zum Vergleich auch noch in anderen Außentiefs und mit anderen Schiffstypen auszuführen.

2.9 Restarbeiten aus früheren Vorhaben

Einige der von ROHDE (1979 und 1982 a) erwähnten Vorhaben sind im Berichtszeitraum nicht weitergeführt worden; über sie sind aber noch mehrere Veröffentlichungen erschienen, die nachfolgend erwähnt werden sollen.

Aus dem bereits 1980 abgeschlossenen Strömungsmeßprogramm stammen die Auswertungen der „Triftströmungen vor der Küste zwischen Eider und Elbe", über die von SIEFERT et al. (1983) berichtet wird. Weitere Veröffentlichungen aus dem Strömungsmeßprogramm sind auch in Zukunft noch zu erwarten. Ein neues Strömungsmeßprogramm konnte entgegen der von ROHDE (1982 a) ausgesprochenen Erwartung noch nicht begonnen werden.

Über die Seegangsmessungen im Gebiet der ostfriesischen Inseln und Watten (ROHDE, 1979 und 1982a) wurde der umfangreiche Schlußbericht dem BMFT vorgelegt (NIEMEYER, 1983), seine Veröffentlichung wird erwogen. Die schon von ROHDE (1982 a) angekündigte Veröffentlichung des Berichts über das Seegangsmeßprogramm in der Außenweser ist inzwischen erfolgt (BARTHEL, 1982); bei der ICCE 1982 in Kapstadt wurde aus diesem Projekt vorgetragen (BARTHEL, 1983). Eine Fortsetzung der Seegangsmessungen, wie sie ROHDE (1982 a) erwähnt, ist zunächst zurückgestellt worden. In dem Gebiet der ostfriesischen Inseln und Watten wurde mit den vorhandenen Meßgeräten das Seegangsmeßprogramm in den Wintermonaten weitergeführt.

Die abschließenden Berichte über das Projekt „Schlicksedimentation im Wattenmeer" wurden fertiggestellt und sind in diesem Heft der „Küste" veröffentlicht. Zu dem Projekt gehört auch eine Arbeit von WIELAND und FLADUNG (1982).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Aus dem Projekt „Vertikalpendelmessungen zur Sturmflutvorhersage" (vgl. ROHDE, 1979) entstand eine Dissertation (KÜMPEL, 1982). Darin wurden Sturmfluten bis zum Frühjahr 1981 für das Vorhersageverfahren ausgewertet.

Die von ROHDE (1982a) angekündigte Veröffentlichung der vom KFKI angeregten Sturmflutuntersuchungen für die Elbe ist in Heft 38 der „Küste" erfolgt (BERNDT, HARTEN und ROHDE; BOE et al.; PLATE; SÜNDERMANN und ZIELKE, 1982).

3. Ausblick

Mit Ausnahme der in den Abschnitten 2.3 und 2.5 erwähnten, sind die im Abschnitt 2 geschilderten Vorhaben noch nicht abgeschlossen und werden in den nächsten Jahren weitergeführt. Einige Vorhaben, die schon abgeschlossen sind, deren baldige Wiederaufnahme oder Fortführung von ROHDE (1982a) in Aussicht gestellt wurde, sind zunächst zurückgestellt worden. Dagegen wurden zwei neue Projekt- bzw. Arbeitsgruppen eingerichtet, die sich mit der Vorbereitung von neuen, nachfolgend erläuterten Forschungsvorhaben befassen.

3.1 Sedimentumlagerung infolge seegangsinduzierter Strömungen an der Ostseeküste

An der Ostseeküste sind in einem Strandabschnitt der Probstei ostwärts des Schöpfwerks Wendtorf in den letzten Jahren zahlreiche Buhnen gebaut worden; eine Fortsetzung des Buhnenausbaus nach Osten ist für die Zukunft vorgesehen. Bevor weitere Buhnen gebaut werden, sollen umfangreiche Untersuchungen ausgeführt werden, um die in diesem Küstenabschnitt infolge von Seegang und Strömung entstandene Unterwassermorphologie und die dazugehörigen Sedimenttypen zu erfassen und zu quantifizieren. Zu Vergleichszwecken sollen dabei sowohl ein durch Buhnen geschützter Vorstrandbereich als auch ein durch Buhnen unbeeinflußter Strandabschnitt untersucht werden.

Da an der Ostsee die Parameter Tide und Dünung weitgehend fehlen und dadurch die Verhältnisse weniger komplex sind als an der Nordsee, wird eine quantifizierbare Umlagerungsbilanz in Abhängigkeit von der Einwirkdauer bestimmter Seegangsereignisse und bei unterschiedlichen Wasserständen erwartet.

In die Untersuchungen sollen die Ergebnisse von Messungen einbezogen werden, die an einer nahegelegenen Meßstation bereits seit 1975 ausgeführt worden sind. Eine Projektgruppe hat ein Untersuchungsprogramm ausgearbeitet, und das KFKI hat der Ausführung zugestimmt; mit den Arbeiten soll 1985 begonnen werden. Für 1984 sind lediglich einige Gerätebeschaffungen und vorbereitende Arbeiten vorgesehen.

3.2 Wasserstandsmessungen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste

Von ROHDE (1979) war mitgeteilt worden, daß die Errichtung von Wasserstandsmeßstationen, wie sie ursprünglich vom KFKI in Aussicht genommen waren, zunächst nicht weiterverfolgt werden sollte. Da derartige exakte, langjährige Messungen jedoch weiterhin als sehr wichtig anzusehen sind, hat das KFKI auf Vorschlag des Forschungsleiters Küste

beschlossen, die Möglichkeiten für ein solches Meßprogramm durch eine Arbeitsgruppe erneut untersuchen zu lassen.

Bei dem von ROHDE (1979) erwähnten System von Pegelstationen war von 8 bis 10 Bauwerken ausgegangen worden, bei denen die Registriereinrichtungen auf einer sturmflutfrei liegenden Plattform untergebracht werden sollten. Die neue Arbeitsgruppe sollte jetzt Überlegungen anstellen, ob für derartige Meßstationen nicht auch auf dem Meeresboden stehende Pegelgeräte verwendet werden können, wie sie bei dem Programm DEBEX '81 kurzfristig eingesetzt waren (STEFFEK, 1982; WIESE, 1982 b). Dadurch würde zwar der unmittelbare Datenabruf erschwert, die Stationen könnten jedoch wesentlich kostengünstiger gebaut werden. Die Geräte könnten wahrscheinlich 6 bis 12 Monate wartungsfrei auf dem Meeresboden stehen. Um säkulare Wasserstandsänderungen erfassen zu können, muß dabei von einer setzungsfreien Gründung der Geräte und möglichst von einem Höhenanschluß an NN ausgegangen werden.

Die Arbeitsgruppe hat zunächst herausgestellt, für welche Zwecke derartige Wasserstandsmessungen wichtig sind. Größte Bedeutung wird der Erfassung der längerfristigen Entwicklung der Tidewasserstände beigemessen. Besonders wichtig ist für den Küstenschutz die Frage, wie sich in den nächsten Jahrzehnten die mittleren Tidehochwasserstände entwikkeln werden. Dabei ist ein wesentlich stärkerer säkularer Anstieg als er in den letzten Jahrzehnten zu beobachten war, nicht auszuschließen. Andererseits wird in diesem Zeitraum an zahlreichen Pegeln der deutschen Nordseeküste ein Absinken der mittleren Tideniedrigwasserstände beobachtet. Dieses steht zunächst im Widerspruch zu einem eustatischen Wasserstandsanstieg, wie er bei der Entwicklung der mittleren Tidehochwasserstände vermutet wird und kann andere, hydrodynamische Ursachen haben.

Es ist wichtig, die Messungen in größerem Abstand von der Küste auszuführen, um sie von Einflüssen aus der stark veränderlichen Topographie des küstennahen Gebietes frei zu halten. Bei den Untersuchungen reicht es auch nicht aus, nur die Scheitelwerte Thw und Tnw zu erfassen; vielmehr muß der gesamte Verlauf der Tidekurven aufgezeichnet werden. Es ist wichtig, die Verformung der Tidewelle von der See her zur Küste und in die Ästuare hinein zu verfolgen und ihre Änderungen in Verbindung mit Änderungen in der Topographie zu erkennen. Die Bedeutung derartiger Untersuchungen hat sich auch bei den in Abschn. 2.5 geschilderten Arbeiten ergeben.

Auch wenn die augenblicklichen Meßwerte bei den vorgeschlagenen „registrierenden" Pegeln nicht jederzeit abgerufen werden können, sind die Messungen für die Beschickung von Lotungen von Bedeutung, indem sie dazu beitragen, die Beschickungskarten zu verbessern. Dasselbe gilt für die Analyse von Sturmflutabläufen in der Deutschen Bucht. Durch die Verbesserung des Verständnisses des Sturmflutgeschehens lassen sich auch Hinweise für eine Verbesserung der Sturmflutvorhersage gewinnen. Schließlich lassen sich die Meßergebnisse zur Verbesserung der Steuerung von HN-Modellen verwenden, die für verschiedene Zwecke einzelner Anwender entwickelt werden.

Die Projektgruppe ist dabei, Vorschläge für den Ausbau des Meßnetzes, die Gestaltung der einzelnen Meßstationen sowie deren Betrieb und Unterhaltung auszuarbeiten. Wahrscheinlich genügen für die o. a. Zwecke drei Meßstationen im Bereich der Deutschen Bucht.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

4. Schriftenverzeichnis

BARTHEL, V.: Über den Seegang in einem Ästuar. Forschungsbericht M 82 – 001 des BMFT, Bonn, 1982.

BARTHEL, V.: Hight distribution of estuarine waves. Proc. ICCE 1982 (Cape Town), New York, 1983.

BECKMANN, M.: Modellrechnungen zum Naturmeßprogramm DEBEX '81. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982.

BERNDT, D., HARTEN, H. u. ROHDE, H: Hydraulische Modellversuche zum Sturmflutgeschehen in der Unterelbe. Die Küste, H. 38, 1983.

BETTAC, W., SCHLEIDER, W. u. SINDERN, J.: Das Küstenkartenwerk 1 : 25 000 der Deutschen Bucht – Vermessung und Kartographie. Die Küste, H. 40, 1984.

BOE, K. et al.: Untersuchungen über Maßnahmen zum Sturmflutschutz in der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.

FIGGE, K.: Das Schlickuntersuchungsprogramm des KFKI – Anlaß und Arbeitskonzept. Die Küste, H. 40, 1984.

GAST, R., KÖSTER, R. u. RUNTE, K.-H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.

HÜLSEMANN, J.: Dynamics of mud (slick) and suspended matter in estuaries. DHZ 35, H. 2, 1982.

JENSEN, G.: Auswertung von Tiefenänderungen über verschiedene Zeiträume und Flächengrößen hinsichtlich Erosion, Sedimentation und Umsatz. Diplomarbeit, TU Braunschweig, Juli 1983 (unveröffentlicht).

KÜMPEL, H.-J.: Neigungsmessungen zwischen Hydrologie und Ozeanographie. Diss., Univ. Kiel, 1982.

LUCK, G. et al.: Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht – Abschlußbericht. Die Küste, H. 38, 1983.

LUCK, G. et al.: HN-Modellrechnungen und Naturmessungen – ein Vergleich. Die Küste, H. 40, 1984.

NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. Unveröffentl. Bericht der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, 1983.

PLATE, E.: Zeitreihenuntersuchung der Sturmfluten im Mündungsbereich der Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.

RECHLIN, D.: Dichtemessungen im Watt vor Büsum. Die Küste, H. 40, 1984.

RENGER, E.: Dauermessungen des supendierten Feststoffgehalts im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982.

ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.

ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 bis 1981. Die Küste, H. 37, 1982 (a).

ROHDE, H.: Küsteningenieurwesen – ein Thema der Intermaritec '82. Hansa, 119. Jahrg., Nr. 18, 1982 (b).

ROHDE, H.: Küsteningenieurwesen in der Bundesrepublik Deutschland. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982 (c).

ROHDE, H.: 18. Internationale Konferenz über Küsteningenieurwesen in Kapstadt. DGM, H. 1, 1983.

SCHLEIDER, W.: Die synoptischen Vermessungen der deutschen Küstengewässer der Nordsee. Berichte des XVII. Kongr. der Internat. Vereinigung der Vermessungsingenieure (FIG), Sofia, 1983.

SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für kleine Einheiten. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982.

SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsandgebiet (Pilotstudie des KFKI-Projekts MORAN). Die Küste, H. 38, 1983.

SIEFERT, W., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H. u. WIELAND, P.: Triftströmungen vor der Küste zwischen Eider und Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.

SÜNDERMANN, J. u. ZIELKE, W.: Mathematisches Modell zur Simulation von Sturmflutereignissen in der Unterelbe. Die Küste, H. 38, 1983.

STEFFEK, M.: Universelles Offshore-Datenerfassungssystem im Einsatz als Hochseepegel. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982.

STEPHAN, H.-J.: Langfristige Gestaltungsvorgänge an der Wurster Küste als Grundlage für die KFKI-Projektgruppe MORAN (Morphologische Analysen Nordseeküste). INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982.

THIEL, H., GROSSMANN, M. u. SPYCHALLA, H.: Quantitative Erhebungen über die Makrofauna in einem Testfeld im Büsumer Watt und Abschätzung ihrer Auswirkungen auf den Sedimentverband. Die Küste, H. 40, 1984.

WIELAND, P.: Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattenforschung. Die Küste, H. 40, 1984.

WIELAND, P.: Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.

WIELAND, P. u. FLADUNG, B.: Windstatistik Büsum 1969–1974. Wasser und Boden, H. 11, 1982.

WIELAND, P., FLADUNG, B. u. BERGHEIM, V.: Tidedynamische und meteorologische Randbedingungen im Bereich des Schlicktestfeldes Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.

WIESE, H. W.: DEBEX '81 – Ein Meßprogramm zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des HN-Modells „Innere Deutsche Bucht" des KFKI. Jhber. 1981 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Bd. 3, Norderney, 1982 (a).

WIESE, H. W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81 – Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. INTERMARITEC '82, Hamburg, 1982 (b).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht Vermessung und Kartographie

Von Werner Bettac, Wilfried Schleider und Josef Sindern

Zusammenfassung

Die Vermessungsdienststellen des Bundes und der Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben in den Jahren 1974 bis 1976 gemeinsam das gesamte deutsche Küstenvorfeld der Nordsee von der dänischen bis zur niederländischen Grenze vermessen. Neben den herkömmlichen Meßverfahren (Lotung mit Echographen und tachymetrische Aufnahmeverfahren) wurde für das trockenfallende Watt auch die Luftbildvermessung mit dem Wasserlinien-Verfahren angewendet. Die Positionen wurden dabei mit dem günstigsten der jeweils zur Verfügung stehenden Ortungsverfahren ermittelt. Träger dieses gemeinsamen Vermessungsprogramms, das mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie erheblich gefördert wurde, war das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. Als Ergebnis der ersten Vermessung liegen 66 mehrfarbige Kartenblätter im Maßstab 1:25 000 vor. Damit wurde erstmals ein einheitliches Kartenwerk des deutschen Küstenvorfeldes in der Nordsee geschaffen, dessen Grundlagen einer quasi-synchronen Vermessung entstammen. Mittlerweile wurde in den Jahren 1979 bis 1981 – also nach 5 Jahren – die erste Wiederholungsvermessung ausgeführt.

Summary

The entire German North Sea coastal zone, from the Danish to the Netherland borders, was surveyed by the Hamburg, Lower Saxony, Schleswig-Holstein and Federal Survey Departments between 1974–1976. Water line determinations based on aerial photographs were used in combination with standard measurement techniques (echograph soundings and tachymetric traverses) for surveying the intertidal zone. Positioning was determined with the best locally available technique. This program, primarily supported by the Federal Ministry for Research and Technology, was coordinated by the Board for Coastal Engineering Research. The results are presented in 66 multicolored 1:25 000 maps. For the first time a standardized cartography of the German North Sea coastal zone could be produced based on quasi-synoptic surveys. A repeat of this survey effort was conducted between 1979–1981, i.e. 5 years later.

Inhalt

1. Einführung 14
2. Erstvermessung 15
   2.1 Allgemeines 15
   2.2 Vermessung des Jade-Weser-Elbe-Mündungsgebietes 17
   2.3 Vermessung vor der Westküste Schleswig-Holsteins 19
   2.4 Vermessung des Gebietes zwischen Wangerooge und Ems 20
3. Das Küstenkartenwerk der Deutschen Bucht 21
   3.1 Vorarbeiten 21
   3.2 Beschreibung des Kartenwerkes 23
   3.3 Bedeutung und Fortführung des Kartenwerkes 24
4. Wiederholungsvermessung 25
   4.1 Allgemeines 25
      4.1.1 Organisatorische Maßnahmen 25
      4.1.2 Gerätetechnische Maßnahmen 26

4.2 Ausführung der Vermessungen 27
4.2.1 Arbeiten der Küstendienststellen und der Bundesanstalt für Gewässerkunde . . . 27
4.2.2 Arbeiten durch Dritte 28
5. Automatisierung der Wasserlinienaufnahme 29
6. Genauigkeit der Vermessungen 29
7. Ausblick 29
8. Schriftenverzeichnis 32

1. Einführung

Die Küstenforschung ist ein Teil der Meeresforschung und befaßt sich mit den hydrodynamischen und küstenmorphologischen Prozessen im Grenzbereich Meer-Festland. Topographie und geologische Struktur der Küstenregion sind von entscheidendem Einfluß auf die hydrodynamischen Vorgänge, so daß die Küstenforschung stets regional orientiert sein muß.

Die Küste gehört seit jeher zum Lebensraum des Menschen, der von den hier herrschenden Naturvorgängen in vielfältiger Weise betroffen ist. Küstenerosionen oder Sedimentationen, Küstensenkungen, Meeresspiegelhebungen oder Sturmfluten erfordern zum Teil kostspielige Maßnahmen und Bauwerke zum Schutz der Küste und zur Erhaltung und Verbesserung der Schiffahrtswege und Hafenzufahrten. Die Erforschung der Naturvorgänge im Küstenraum ist im Zeitalter der stürmischen gesellschaftlichen, technologischen und industriellen Entwicklung eine Notwendigkeit und bedarf der umfassenden Förderung.

In Verbindung mit den Untersuchungen der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Wasserstände, der Strömungsverhältnisse, von Seegang und Brandung sowie über die Sandbewegung ist zur Verfolgung und Deutung morphologischer Gestaltungsvorgänge sowie für Materialbilanzen größerer morphologischer Einheiten die laufende topographische Erfassung der Untersuchungsgebiete in Erst- und Vergleichsmessungen ein unentbehrliches Hilfsmittel. Eine sowohl räumliche als auch zeitliche Erweiterung der in diesem Sinne bisher betriebenen Arbeiten ist aus folgenden Gründen zwingend notwendig:

a) Die Küste, das Watt und dessen seeseitige Unterwasserhänge stehen mit den wirkenden Kräften in großräumiger Wechselwirkung, die in dem morphologischen Gestaltungswandel ihren sichtbaren Ausdruck findet.
b) Die bisher vorwiegend unter nautischen Gesichtspunkten vorgenommenen räumlich und zeitlich unterschiedlichen topographischen Arbeiten sind im Hinblick auf morphologische Untersuchungen von unterschiedlichem Wert.

Das erklärte Ziel und der Zweck einer topographischen Gesamt- und vergleichenden Wiederholungsaufnahme des deutschen Küstenbereiches ist die Schaffung ausreichenden Grundlagenmaterials für die Beurteilung der Entwicklung und der im Rahmen des Seewasserbaues vorzunehmenden Eingriffe in das Geschehen im Küstenvorfeld und die entsprechende Bilanzierung des örtlichen wie überörtlichen oder gestörten Materialhaushalts.

Topographische Aufnahmen, die hinsichtlich der Genauigkeitsansprüche den Bedürfnissen morphologischer Untersuchungsvorhaben genügen, wurden bisher für das Watt vor der Westküste Schleswig-Holsteins, das Neuwerker Watt und von großen Teilen des niedersächsischen Wattes angefertigt. In Einzelfällen konnten durch gezielt angesetzte Vergleichsmessungen kausale Deutungen für das Geschehen in kleineren morphologischen Einheiten hergeleitet werden. Meist blieben die Untersuchungen nach Umfang und Zeit auf den erkennbaren Einwirkungsbereich technischer Vorhaben, und daher ihre Aussagekraft für größere Räume, begrenzt. Eine großräumige Aussage ist auf der Grundlage dieser Aufnahmen also nicht oder nur sehr begrenzt möglich.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Nachdem im Jahre 1968 in der Denkschrift „Erforschung der Naturvorgänge im Küstenvorfeld als Voraussetzung für alle Aufgaben im Seebau" des damaligen Küstenausschusses Nord- und Ostsee (KA) erstmalig großräumig koordinierte Untersuchungen – u. a. synchrone Vermessungen – herausgestellt wurden, konnte das Untersuchungsprogramm zu dieser Denkschrift bereits im Winter 1968/69 vorgelegt werden. Eine Ad-hoc-Gruppe des KA hat damals bereits die organisatorischen, gerätemäßigen, finanziellen, ja sogar den Fünfjahresturnus der Wiederholungsvermessung behandelt. Die Bereitstellung von Personal und Gerät, insbesondere aber die Finanzierung des Vorhabens, bereitete große Schwierigkeiten. Erst durch die Auflösung des KA und Gründung des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) war es dem Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) möglich, das geplante Vermessungsprogramm in großzügigster Art zu fördern.

2. Erstvermessung

2.1 Allgemeines

Die im Küstenvorfeld tätigen Vermessungsdienststellen des Bundes und der Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben bis zum Jahre 1973 im Vorfeld der deutschen Nordseeküste, abhängig von augenblicklich anliegenden akuten Aufgaben, im allgemeinen verstreut liegende, kleinere Einzelgebiete vermessen. Die Vermessungsergebnisse eines Jahres erstreckten sich über das gesamte Gebiet, bildeten aber keine zusammenhängende Fläche. In einem längeren Zeitraum wurde so zwar auch das gesamte Küstenvorfeld erfaßt, es setzte sich jedoch mosaikartig aus Vermessungen zusammen, die über viele Jahre verteilt waren. Die Wiederholungsvermessungen der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) wurden in den Karten der Jahrespeilungen, zumeist im Maßstab 1:25 000, der Wasser- und Schiffahrtsämter dargestellt, die des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) fanden ihren Niederschlag in nautischen Karten, den „Seekarten". Großräumige Untersuchungen, z. B. Bilanzierungen, konnten aus den Vermessungsarbeiten nicht gewonnen werden, da diese wegen der recht unterschiedlichen Interessen der jeweils tätigen Verwaltungen zeitlich und räumlich uneinheitlich abgewickelt wurden.

Für das Jahr 1974 hatten die Wasser- und Schiffahrtsämter (WSÄ) Cuxhaven, Wilhelmshaven, Bremerhaven sowie die damalige Forschungsgruppe (FGr) Neuwerk (später: Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk) und die Forschungsstelle (FSt) Norderney (später: Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung), abweichend von den bisherigen Gepflogenheiten, geplant, das Mündungsgebiet von Elbe, Weser und Jade gemeinsam in einem Sommerhalbjahr zu vermessen und so eine quasisynchrone Aufnahme zu erhalten. Das gemeinsame Programm erhielt die Bezeichnung JESP (Joint Estuary Surveying Programm).

Da auch die Seekarten die synchrone Neuvermessung möglichst eines gesamten Kartenblattes fordern, ging zur gleichen Zeit das DHI dazu über, das deutsche Küstenvorfeld in drei Gebiete zu unterteilen und jeweils in einem Jahr ein Gebiet zusammenhängend zu vermessen. In einem Umlauf von drei Jahren wurde so das gesamte Vorfeld der deutschen Nordseeküste neu erfaßt.

Auf der Sitzung des KFKI am 12. Dezember 1973 tauchte die Frage auf, ob es nicht sinnvoll sei, das gesamte Gebiet der deutschen Nordseeküste von Sylt bis Borkum innerhalb eines Jahres aufzumessen, um eine vergleichbare Bestandsaufnahme zu haben. Da das aber, wenn überhaupt, nur unter sehr großem finanziellen Einsatz zu erreichen wäre, war man der

Meinung, daß das Gesamtgebiet in drei Abschnitte untergliedert werden solle. Mit dem Herzstück der Inneren Deutschen Bucht (Trischen bis Wangerooge) sei zu beginnen. Das KFKI ging auf dieser Sitzung davon aus, das gesamte Gebiet könne in drei bis fünf Jahren als Grundvermessung erfaßt sein. Anschließend könne mit der ersten Wiederholungsvermessung begonnen werden.

Im Januar 1974 wurde in einer Besprechung der WSÄ Bremerhaven, Cuxhaven, Wilhelmshaven, des DHI, des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel (LaWaKü) und der FSt Norderney die quasi-synchrone Vermessung der deutschen Küstengewässer der Nordsee in groben Zügen festgelegt:

1974

Wasser- und Schiffahrtsämter Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Forschungsgruppe Neuwerk, Forschungsstelle Norderney:

> Das Gebiet zwischen Trischen und Wangerooge, also die Jade, Außenweser und Außenelbe mit den dazugehörigen Watten (JESP).

Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg, Wasser- und Schiffahrtsamt Tönning, Ämter für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum:

> Beginn der Arbeiten an der schleswig-holsteinischen Westküste von der dänischen Grenze bis Trischen.

1975

Fortführung und Abschluß der Vermessungsarbeiten an der schleswig-holsteinischen Westküste durch die vorgenannten Dienststellen.

Deutsches Hydrographisches Institut, Wasser- und Schiffahrtsämter Emden und Norden, Forschungsstelle Norderney:

> Aufnahme des ostfriesischen Küstenvorfeldes von Wangerooge bis zur Ems.

1976

Restmessungen in dem Gebiet zwischen Wangerooge und der Osterems durch die vorgenannten Dienststellen.

Es war den an der Vermessung beteiligten Dienststellen des Bundes und der Küstenländer von vornherein klar, daß die beabsichtigte quasi-synchrone Vermessung der Küstengewässer der deutschen Nordseeküste selbst bei Koordinierung und Einsatz aller verfügbaren Vermessungskapazität mit den herkömmlichen Methoden nicht in zwei Jahren durchführbar sei, selbst wenn man zuließe, daß Restmessungen noch in ein drittes Jahr verlagert würden. Es galt also, neue Verfahren einzusetzen. Hierfür bot sich an:

- den Verlauf der Niedrigwasser-Linie durch eine Befliegung zu erfassen und
- den Verlauf der Gesamtscharen der Tiefenlinien auf dem Watt durch das sogenannte „Wasserlinien-Verfahren" zu erhalten.

Das Verfahren, die Seekartennull-Linie aus Luftbildern zu übernehmen, war schon des öfteren gehandhabt worden: Bei normalen meteorologischen Verhältnissen befliegt man um die Zeit des niedrigsten Wasserstandes das aufzunehmende Gebiet. Die Grenzlinie zwischen Wasser- und trockenfallenden Gebieten zeichnet sich meist recht gut auf Luftaufnahmen ab.

Zur Entzerrung der Luftbilder sind wenige Paßpunkte im Bildstreifen hinreichend, die durch eine Radialtriangulation verbunden werden. Die damit zu erzielende Lagegenauigkeit genügte für den beabsichtigten Zweck. Dieses Verfahren dient nicht nur zur Erfassung der Niedrigwasser-Linie, es erleichtert auch die Auslotung des Gebietes. An Hand der Luftbilder weiß man auch bei Hochwasser, wo Priele verlaufen und sich hohe Stellen auf dem Watt befinden, die sich meist durch einen helleren Farbton auf den bei Niedrigwasser aufgenommenen Luftbildern abzeichnen. Die Lotungen vom Schiff aus können so wesentlich wirtschaftlicher gestaltet werden.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Beim Wasserlinien-Verfahren werden – beginnend mit Tideniedrigwasser – durch wiederholtes Befliegen mit einem Bildflugzeug die Wasserlinien (d. h. die Grenzlinien zwischen Wasser und Watt) ein und desselben Wattgebietes im 12- bis 15-Minuten-Abstand im Luftbild aufgenommen, und zwar so lange, bis das gesamte Watt überflutet ist. Die höhenmäßige Einpassung der Wasserlinien kann mit Hilfe von Pegeln oder über Nivellementszüge geschehen. Da jedoch der Wasserspiegel in stark gegliederten Wattgebieten infolge Längs- und Quergefälle sowie durch Meniskuseinflüsse keineswegs eben ist, wäre ein dichtes Pegelnetz (Pegelabstände mindestens 5 bis 6 km) erforderlich. Das ist wegen der Größe des Wattgebietes nicht realisierbar, zumal die Pegel vor Beginn der Befliegung gesetzt und nivellitisch angeschlossen werden müßten. Es ist daher bei großräumigen Wattflächen – wie im vorliegenden Falle – wirtschaftlicher und genauer, durch lagemäßig fixierte Nivellementszüge (Profilabstand etwa 1 km) die Höhenlage der Wasserlinien zu erfassen. Ein solches Profilnetz kann auch noch nach der Serienbefliegung vermessen werden.

Der Vorteil des Wasserlinienverfahrens besteht in der naturgetreuen Wiedergabe der Wattoberfläche mit seiner Formenvielfalt in einer Genauigkeit, die von keinem anderen Verfahren mit vertretbarem Aufwand erzielt werden kann. Das Nivellement ist daneben auch an sehr flachen Stellen einzusetzen, an denen man mit Booten nicht oder nur zu den Zeiten höchsten Wasserstandes messen kann. Hierbei handelt es sich um ein Flächennivellement mit einem Profillinienabstand von im allgemeinen 100 m.

Die beteiligten Stellen haben in den Jahren 1974 und 1975 das vorgesehene Gebiet fast ganz vermessen, so daß mit Recht von einer quasi-synchronen Vermessung des deutschen Küstenvorfeldes gesprochen werden kann. 1976 waren nur noch einige kleinere Gebiete nachzuholen. In wenigen Bereichen mußten auch Vermessungen früherer Jahre – hauptsächlich aus 1970 und 1971 – mit in die kartographische Darstellung der Vermessungsergebnisse einbezogen werden.

Bei der Ortung konnte zurückgegriffen werden auf die Funkortungsverfahren Hi-Fix, Decca und Mini-Ranger. Im Gebiet Nordergründe, Robbenplate, Busetief und Riffgat benutzte das WSA Norden Doppelwinkelmessungen zur Ortsbestimmung. Bei den Nivellements wurden verschiedene terrestrische Methoden der Ortsbestimmung angewendet.

Die in den einzelnen Gebieten angewendeten Verfahren der Ortung und der Tiefenbestimmung – Lotungen, Wattnivellement, Wasserlinienverfahren – können der beiliegenden Übersichtsskizze entnommen werden (Abb. 1).

Da der BMFT die angeregte Vermessung finanziell unterstützte, war es möglich, zusätzliche Pegel, Material für Rohrfestpunkte, zusätzliche Echolote und eine Datenerfassungsanlage zu beschaffen sowie einen Hubschrauber und Fahrzeuge zum Transport der Meßtrupps anzumieten und die Befliegung für das Wasserlinien-Verfahren durchzuführen. Die ebenfalls vom BMFT finanzierte Hi-Fix-Kette, die sog. Juist-Kette, war leider erst im Sommer 1976 betriebsfertig.

2.2 Vermessung des Jade-Weser-Elbe-Mündungsgebietes

Vom April 1974 bis zum Dezember desselben Jahres haben die WSÄ Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven, die FGr Neuwerk und in der zweiten Jahreshälfte auch die FSt Norderney das Gebiet der Inneren Deutschen Bucht vermessen. Es wird etwa begrenzt von der Insel Wangerooge, dem Großen Vogelsand, dem Gelbsand, dem Spitzsand in der Elbe, der Küstenlinie und seewärts durch die 20-m-Tiefenlinie. Lediglich einige kleinere Gebiete, von denen bekannt war, daß sie nur geringen morphologischen Veränderungen unterliegen, sowie die Wurster Küste mußten 1975 nachgeholt werden.

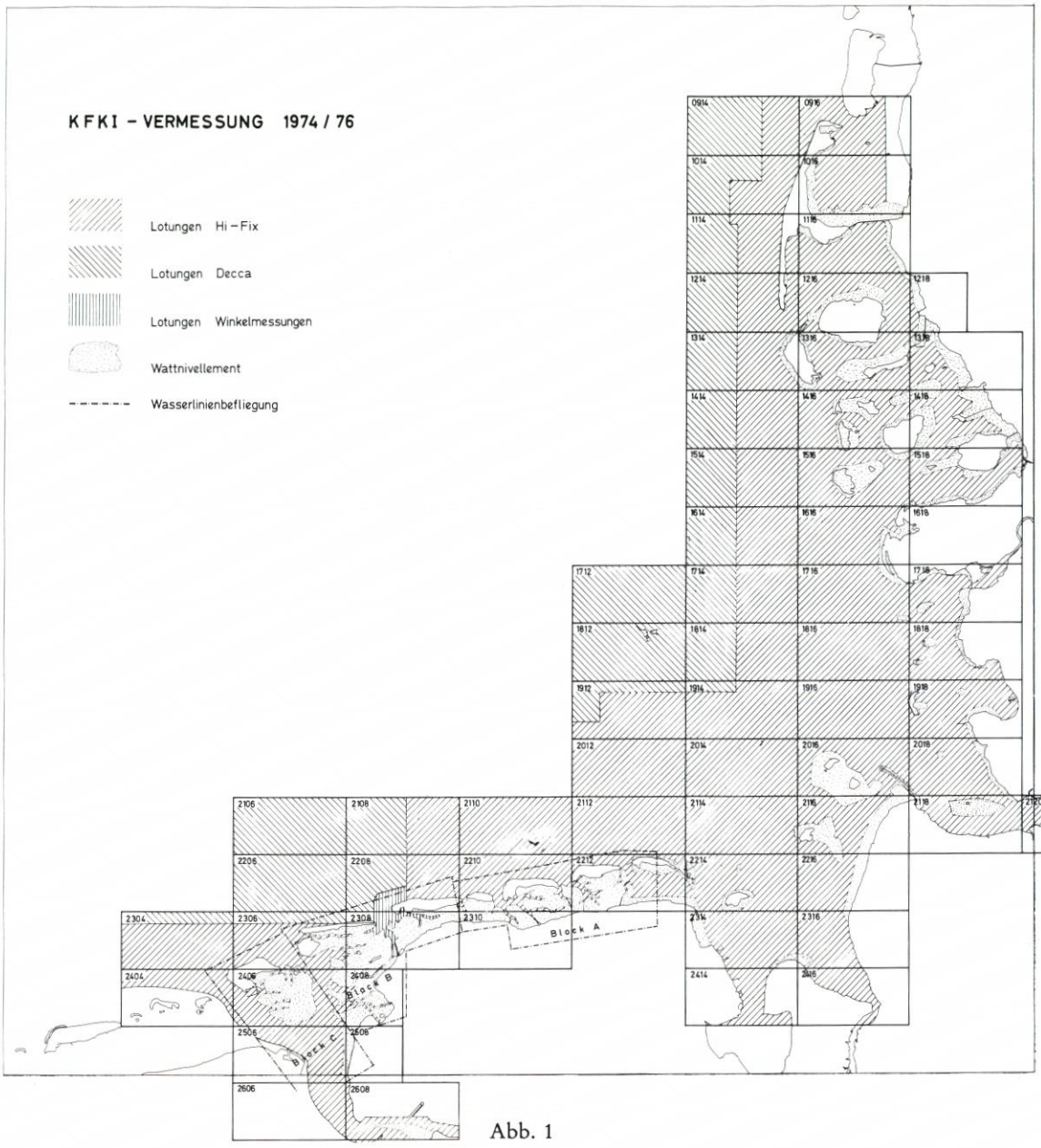


Abb. 1

Die Seegebiete bis zu etwa 1,50 m über Seekartennull wurden von Schiffen oder Booten ausgelotet. Die Positionen wurden mit Hi-Fix bestimmt. Höherliegende Wattflächen wurden nivellitisch erfaßt. Der Abstand der Nivellementlinien betrug 200 m.

Die gegenüber der Lotung sehr viel zeitaufwendigere nivellitische Aufnahme der höherliegenden Watten machte einen erheblichen Anteil der Gesamtarbeit aus. Insgesamt wurden rd. 11 % der Gesamtfläche nivellitisch vermessen. Für einen effektiven und wirtschaftlichen

Einsatz von Meßkolonnen war es erforderlich, diese entweder längere Zeit in der Nähe des landfernen Einsatzortes auf Wohnschiffen unterzubringen oder aber kurze Anmarschwege zu gewährleisten.

Da die Herrichtung von verwaltungseigenen Schiffen zum Zeitpunkt der Mittelzuweisung im Juli 1974 nicht mehr durchgeführt und seegehende Wohnschiffe auch nicht kurzfristig angemietet werden konnten, wurden in verstärktem Maße im Bereich des WSA Bremerhaven und der FGr Neuwerk Hubschraubereinsätze erforderlich. Außerdem konnte vom WSA Wilhelmshaven kurzfristig ein VW-Bus angemietet werden, der einen Meßtrupp in die Nähe seines jeweiligen Einsatzortes transportierte.

Der Einsatz eines kleinen, mit Schwimmern ausgerüsteten Hubschraubers für insgesamt vier Personen mit Instrumenten erwies sich als besonders günstig. Da manche der zu vermessenden Platen bei Niedrigwasser auf großen Flächen oft nur für Stunden trockenfallen, konnte der Meßtrupp mit Hubschrauber abgesetzt werden, die gesamte Zeit zur nivellitischen Aufnahme nützen und bei bevorstehender Überflutung kurzfristig wieder ausgeflogen werden. Dadurch wurde auch die Gefahr der Überraschung durch plötzlichen Wetterumschlag und schneller steigendes Hochwasser erheblich gemindert. Insgesamt fielen während 27 Einsatztagen rd. 84 Flugstunden an.

Ursprünglich war beabsichtigt, die Seevermessung durch Luftaufnahmen des Wattgebietes zu unterstützen. Schlechte Wetterverhältnisse verhinderten jedoch eine rechtzeitige Befliegung, so daß darauf ganz verzichtet werden mußte.

2.3 Vermessung vor der Westküste Schleswig-Holsteins

Von März 1974 bis November 1976 haben das WSA Tönning, die ÄLW Heide und Husum und das DHI das Gebiet vor der Westküste Schleswig-Holsteins fast vollständig vermessen. Während die Tiefwasservermessungen bereits 1974 abgeschlossen waren, konnten einige kleinere hochliegende Flächen erst 1976 gemessen werden. Hierbei handelte es sich um Flächen, die zu nivellieren waren.

Begrenzt wurde das Vermessungsgebiet im Norden durch den 55° 06′N Breitenparallel, im Westen durch den Elbe-Esbjerg-Weg, im Süden durch die nördliche Fahrwasserkante der Elbe und im Osten durch die Küstenlinie. Das Seegebiet bis zu etwa 1,5 m über Seekartennull wurde mit Schiffen und Booten ausgelotet. Im Bereich zwischen Eider und Friedrichskoog lag die Begrenzung etwa 2,5 m über Seekartennull. Zur Positionsbestimmung wurde Hi-Fix und im äußersten Westen Decca benutzt. Die höherliegenden Wattflächen wurden von Meßtrupps nivelliert. Der Abstand der Nivellementslinien betrug je nach Geländeform 100 oder 200 m.

Schlechtes Wetter verhinderte es, 1974 die Vermessung durch eine Befliegung zu unterstützen. 1975 dagegen konnte das Gebiet der Eider mit Luftbildern abgedeckt werden. Das Wasserlinienverfahren wurde nicht eingesetzt.

Der Hauptteil der Vermessung wurde 1974 und 1975 durchgeführt. In einigen Gebieten, in denen sich die Morphologie erfahrungsgemäß nur wenig ändert, wurde auf ältere Vermessungen zurückgegriffen. Das betrifft vor allem den äußersten Westen des Vermessungsgebietes. Hier wurden Vermessungen aus den Jahren 1963, 1965, 1967, hauptsächlich aber aus dem Jahre 1970 herangezogen.

Da das Gebiet der Meldorfer Bucht erst 1973 vermessen worden war, wurden diese Ergebnisse in die quasi-synchrone Vermessung übernommen.

Es hat sich gezeigt, daß die Vermessungen der höherliegenden Wattgebiete sehr zeitaufwendig sind. Um die Arbeiten bei einer Wiederholungsvermessung in annehmbarer Zeit

bewältigen zu können, wird es erforderlich sein, zusätzlich zu den eingesetzten Dienststellen des Bundes und der Länder noch private Vermessungsfirmen mit heranzuziehen.

2.4 Vermessung des Gebietes zwischen Wangerooge und Ems

Die WSÄ Emden und Norden, die FSt Norderney und das DHI haben im Jahre 1975 das Seegebiet zwischen Wangerooge und der Ems vermessen. Die seewärtige Begrenzung bildete in etwa der Breitengrad 53° 54'N, während zum Westen hin der Längengrad 6° 20' O mit Einschluß des Hubertgats, im Osten die Harle und die Westseite der „Precautionary Area" und im Süden die Festlandküstenlinie mit Einschluß des Ems-Mündungsgebietes bis zum Breitengrad 53° 18' N den Abschluß bildet. Ursprünglich hoffte man, auch den Dollart südlich 53° 18' N durch Messungen des Studiedienst Delfzijl der Directie Groningen des Rijkswaterstaat des Königreiches der Niederlande mit erfassen zu können. Andere Aufgaben hinderten den Studiedienst jedoch daran, diese Arbeiten auszuführen.

Wie auch in den beiden anderen Gebieten, wurde das Seegebiet bis etwa 1,5 m über Seekartennull mit Schiffen und Booten ausgelotet. Im gesamten Ems-Mündungsgebiet stand zur Ortung die Groningen-Hi-Fix-Kette und östlich Norderney die Jade-Hi-Fix-Kette zur Verfügung. Die dazwischen klaffende Lücke sollte durch eine neue Kette, die sog. Juist-Kette, geschlossen werden. Die Mittel für Kauf und Installation der neuen Kette wurden auch vom BMFT rechtzeitig zur Verfügung gestellt; die Lieferung verzögerte sich jedoch so erheblich, daß sie erst im Sommer 1976 in Betrieb genommen werden konnte, zu einem Zeitpunkt also, an dem die hier besprochenen Messungen bereits abgeschlossen waren. Dadurch wurde es erforderlich, in diesem Gebiet auf das Verfahren der Doppelwinkelmessung zurückzugreifen. Im nordwestlichen, küstenfernen Teil des Gesamtvermessungsgebietes diente Decca zur Positionsbestimmung.

Etwa 200 km^2 oder 40 % des zu vermessenden Gebietes besteht aus Wattflächen, die nicht von Booten aus gelotet werden können. Da den beteiligten Dienststellen nicht genügend Personal zur Verfügung stand, um das Gebiet nivellitisch zu erfassen, blieb als Lösungsweg nur das Wasserlinienverfahren übrig. Mit ihm wurde das Wattgebiet zwischen Wangerooge und Randzel erfaßt.

Die Befliegung wurde von der Fa. Rüpke, Hamburg, im Aufnahmemaßstab 1 : 50 000 mit einer Überweitwinkelkamera Zeiss RMK 8,5/23 auf Kodak Infrarot-Film ausgeführt. Das Bildflug-Intervall betrug mindestens 11 bis 12 Minuten, die Flughöhe etwa 4300 m. Dank der günstigen Lage des Festlandes am südlichen und der ostfriesischen Inselkette am nördlichen Rand des Befliegungsgebietes waren im Gebiet zwischen Wangerooge und Norderney keine zusätzlichen Paßpunkte für die Entzerrung zu bestimmen. Lediglich auf dem Randzel und dem Kopersand mußten insgesamt vier Paßpunkte im Watt errichtet werden.

Zur Höheneinbindung der Wasserlinien wurden Nivellementszüge in einem Profilabstand von etwa 1 km gemessen. Zum Transport des Meßtrupps wurde wieder auf einen Hubschrauber zurückgegriffen, der sich abermals sehr bewährte. Außerdem sorgten ein Pferdefuhrwerk und ein Unimog dafür, daß die Meßtrupps die durch die Tide vorgegebene Arbeitszeit optimal nutzen konnten.

Für die kartographische Darstellung des Gebietes wurde im äußersten Nordwesten auf Vermessungen der Jahre 1970 und 1971 zurückgegriffen; geortet wurde damals mit dem Decca-Verfahren.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

3. Das Küstenkartenwerk der Deutschen Bucht

3.1 Vorarbeiten

Das KFKI hatte auf seiner Sitzung am 12. Dezember 1973 nicht nur zugestimmt, die synoptische Vermessung des Seegebietes vor der deutschen Küste zu unterstützen, sondern auch beschlossen, die Ergebnisse dieser Vermessung in einem neu zu erstellenden Küstenkartenwerk darzustellen.

Die die Vermessung ausführenden Dienststellen haben für ihre Arbeitsgebiete zunächst Arbeitskarten im Maßstab 1 : 20 000 oder 1 : 10 000 hergestellt. Die Tiefenangaben werden dabei in der bei jeder Dienststelle üblichen Weise beschickt. Bei einigen Dienststellen werden die Tiefenangaben auf ein Kartennull bezogen, das einem örtlichen mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) oder mittleren Springtideniedrigwasser (MSpTnw) entspricht, bei anderen werden die Höhen auf NN bezogen.

Die so gewonnenen Arbeitskarten sind einmal Grundlage für die Herstellung der üblichen, vorwiegend den Interessen der Schiffahrt dienenden Seekarten. Darüber hinaus dienen diese in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum aufgenommenen Arbeitskarten der Herstellung einheitlicher topographisch/morphologischer Karten des Küstenvorfeldes. Dieses Kartenwerk soll eine wichtige Grundlage für die Gewinnung von Materialbilanzen, für alle morphologischen Untersuchungen und für die Herstellung von Rechenmodellen sein.

Bei der ersten Zusammenkunft der Beratungsgruppe Küstenforschung des KFKI im März 1974 in Hamburg wurde die Projektgruppe Küstenkartenwerk gebildet, die die Bearbeitungsrichtlinien für das Kartenwerk erstellen, die Kosten ermitteln und beim BMFT einwerben sowie die Arbeiten vergeben und überwachen sollte. Die Gruppe setzte sich wie folgt zusammen:

VD Dr.-Ing. Dolezal	LaWaKü, Kiel
Dr.-Ing. Luck	FSt Norderney
LVD Dr. Bettac	DHI, Hamburg
VD Dr.-Ing. Schleider	WSD Aurich
Ing. (grad.) Kathage	WSD Kiel

Später wurde sie erweitert um die FGr Neuwerk, Cuxhaven (Dr.-Ing. Göhren, danach Dr.-Ing. Siefert). Die Federführung lag bei Herrn Dr. Dolezal und nach dessen Pensionierung bei Herrn Dr. Bettac. Die Projektgruppe legte fest, daß zunächst Arbeitskarten im Maßstab 1 : 20 000, bezogen auf Seekartennull (SKN) = MSpTnw, erarbeitet werden sollten. Diese Arbeitskarten sollten Tiefenzahlen, Tiefenlinien, das Gauß-Krüger-Netz in PD und die geographischen Koordinaten in ED enthalten. Die Äquidistanzen der Tiefenlinien sollten betragen (bezogen auf SKN):

0 m bis − 2 m	alle 0,5 m
−2 m bis − 6 m	alle 1,0 m
−6 m bis −20 m	alle 2,0 m

Jede Karte sollte außerdem den Unterschied zwischen SKN und NN ausweisen.

Abweichend von diesen Beschlüssen legte die Beratungsgruppe Küstenforschung fest, die Messungen auf NN zu beziehen. Dadurch sollte es leichter sein, sie mit späteren Messungen zu vergleichen und Massenbilanzen herzustellen. Weiterhin wurde beschlossen, die Küstenkarte als gedrucktes, mehrfarbiges Kartenwerk zu erstellen, das 51 Karten im Maßstab 1 : 20 000 umfassen sollte. Das DHI legte daraufhin den Entwurf eines Musterblattes für das mehrfarbig zu druckende Küstenkartenwerk vor.

1975 wurde dann beschlossen, das Küstenkartenwerk nunmehr im Maßstab 1 : 25 000 zu

erstellen. Die einzelnen Karten sollten sich als Gradabteilungskarten – d. h. einheitliches Blattformat über das gesamte Gebiet der Deutschen Bucht – an das Topographische Kartenwerk 1 : 25 000 anschließen, wobei das einzelne Kartenblatt in der Ost-West-Richtung die

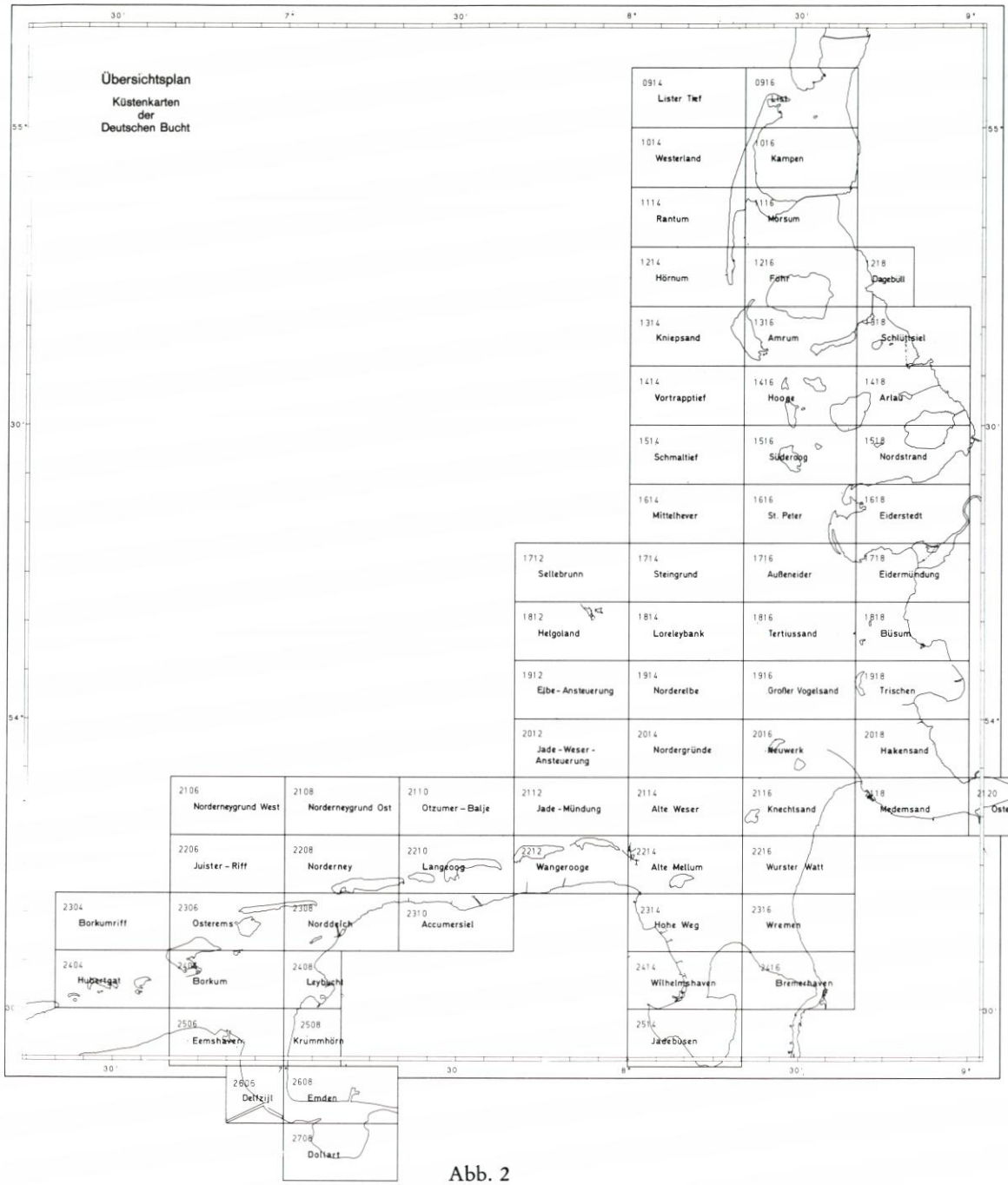
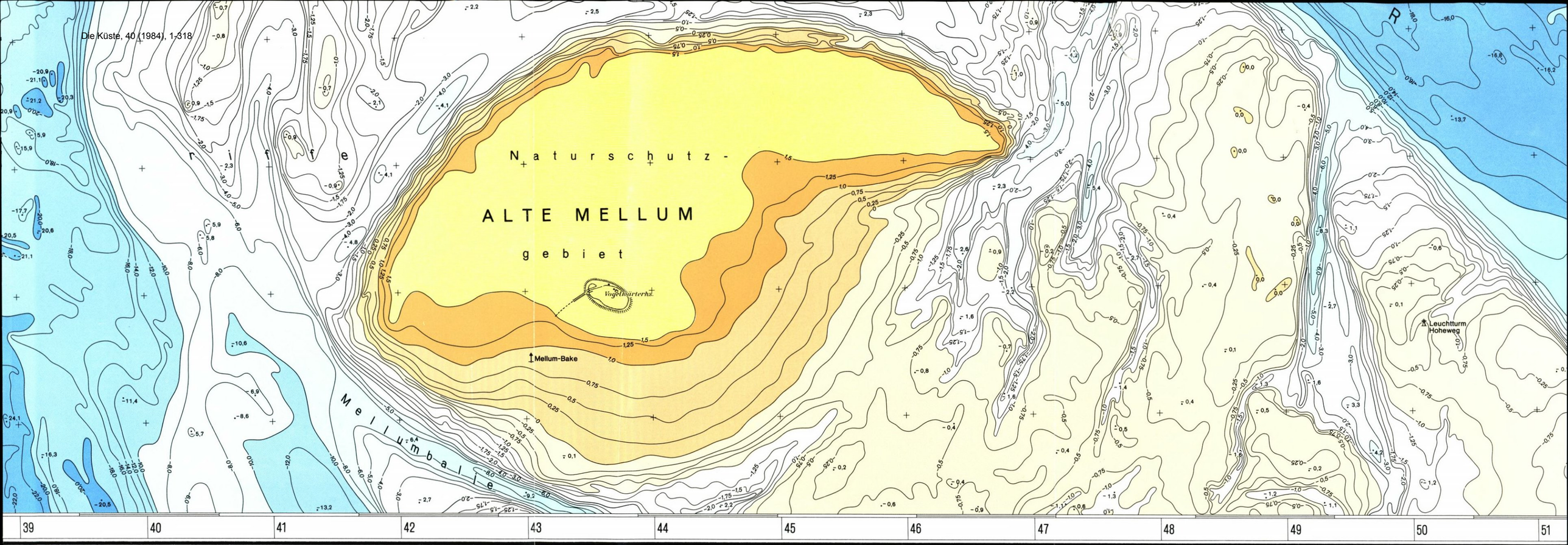


Abb. 2

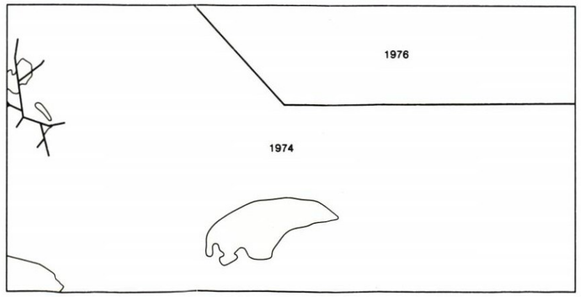
Die Küste, 40 (1984), 1-318



Blattübersicht

2112K	2114K	2116K
2212K	2214K	2216K
	2314K	2316K

Übersichtskarte mit Datum der einzelnen Aufnahmen und deren Umrißgrenzen



Maßstab 1:25000

1000 500 0 1000 2000 Meter

Gauß-Krüger-Abbildung (Potsdamer Datum)

Höhenangaben: Die Höhen sind auf NN bezogen.
SKN (M Sp NW) = NN −1,80 m bezogen auf den Pegel Alte Weser (53° 51' 50" N, 8° 07' 44" O)
SKN (M Sp NW) = NN −1,79 m bezogen auf den Pegel Mellum-Leuchtturm (53° 46' 21" N, 8° 05' 38" O)

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
Feldstraße 251–253, Postfach 4448, 2300 Kiel 1

Diese Karte ist gesetzlich geschützt. Nachdruck oder sonstige Vervielfältigungen nur mit Genehmigung des Herausgebers

Die Karte ist nicht für nautische Zwecke geeignet

Höhenstufen

- höher als +1,0 m
- +1,0 m bis 0 m
- 0 m bis -1,0 m
- -1,0 m bis -2,0 m
- -2,0 m bis -4,0 m
- -4,0 m bis -6,0 m
- -6,0 m bis -10,0 m
- -10,0 m bis -20,0 m
- -20,0 m bis -30,0 m

Struktur

- Festland und Inseln
- Außensand

Zeichenerklärung

- Bake
- Leuchtturm

Die Küste, 40 (1984), 1-318

doppelte Ausdehnung einer normalen topographischen Karte hat, wie schon die Topographischen Wattkarten 1 : 25 000 an der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Zahl der Karten beträgt jetzt 66 Blätter, wie aus dem Übersichtsplan (Abb. 2) zu ersehen ist.

In mehreren Sitzungen und zahlreichen Einzelgesprächen hat die Projektgruppe Küstenkartenwerk das nunmehr vorliegende Kartenwerk in seinen Prinzipien festgelegt. Sie wurde dabei in dankenswerter Weise unterstützt von allen betroffenen Dienststellen des Bundes und der Küstenländer, auch wenn sie nicht unmittelbar berührt waren, wie z. B. der Lehrstuhl für Topographie und Kartographie der Technischen Universität Hannover.

3.2 Beschreibung des Kartenwerkes

Die Küstenkarten 1 : 25 000 sind Gradabteilungskarten und erfassen jeweils ein Gebiet von 6 Minuten in Nord-Süd- und 20 Minuten in Ost-West-Richtung. Dies entspricht der Ausdehnung von zwei normalen amtlichen topographischen Karten 1 : 25 000 in Ost-West-Richtung. Sie enthalten das Gauß-Krüger-Koordinaten-System in der Darstellung von kleinen Kreuzen und die geographischen Koordinaten (ED) mit Randbeschriftung. Außerdem sind die geographischen Koordinaten der Blatteckenwerte an die betreffenden Blattecken gedruckt. Das geographische System ist von Minute zu Minute markiert. Die Küstenkarten führen die Nummern der jeweils entsprechenden linken topographischen Karte. Um sie von diesen zu unterscheiden, ist an die Nummer der Buchstabe „K" angefügt. Außerdem führt jede Karte einen Namen. Dieser stimmt überein mit einem charakteristischen Namen im Kartengebiet.

Höhen- bzw. Tiefenlinien im Seegebiet sind oberhalb NN −2 m in Äquidistanzen von 0,25 m dargestellt, von NN −2 m bis NN −6 m in Äquidistanzen von 1 m und darüber hinaus von 2 m. Markante Höhen und Tiefen werden mit einem Punkt und danebengestellter Zahl gekennzeichnet. Die Farbskala der Tiefen ist in 10 Stufen unterteilt. Sie umfassen die Gebiete

höher als	+ 1,0 m
+ 1,0 m bis	0 m
0 m bis	− 1,0 m
− 1,0 m bis	− 2,0 m
− 2,0 m bis	− 4,0 m
− 4,0 m bis	− 6,0 m
− 6,0 m bis	−10,0 m
−10,0 m bis	−20,0 m
−20,0 m bis	−30,0 m
tiefer als	−30,0 m

Die Skala umfaßt vier Braun- und sechs Blau-Pastelltöne. Die Gebiete höher als +1,0 m zeigen das dunkelste Braun, diejenigen zwischen −1,0 m bis −2,0 m das hellste. Die −2 m-Linie trennt braune und blaue Farbtöne. Anschließend an das hellste Braun zeigt das Gebiet zwischen −2,0 m und −4,0 m das hellste Blau, das mit zunehmender Tiefe in das dunkelste Blau übergeht (Gebiete tiefer als −30,0 m).

Vorland wird in grüner, Außensand in satter gelber Farbe ausgewiesen. Leider weist das Kartenwerk in der Darstellung der Außensände einen Sprung auf zwischen den Ostfriesischen Inseln und dem übrigen Gebiet. Während für das übrige Gebiet der deutschen Küste nach dem Grundsatz verfahren wurde, daß Außensände höherliegend als NN +1,5 m gelb dargestellt werden; sofern sie nicht begrünt sind, zeigen die Karten bei den Ostfriesischen Inseln die Flächen zwischen der Hochwasserlinie und dem Dünenfuß in dieser Farbe und weisen sie in der Legende als Sand aus.

Im Seegebiet sind außer Namen und Tiefen dargestellt:

- Dauerpegel
- Baken
- Rettungsbaken
- Leuchttürme
- Festpunkte im Watt

Das Kartenwerk zeigt in Schwarz:

- Kartenrahmen und Netze
- Legende (soweit nicht in der Farbplatte enthalten)
- Beschriftung
- Höhen- und Tiefenzahlen
- Höhen- und Tiefenlinien
- Topographische Objekte
- Darstellung der Landgebiete und Landgewinnungsanlagen

Für das Landgebiet und die Inseln ist der Inhalt der mitverwendeten amtlichen topographischen Karte 1 : 25 000 der Landesvermessungsämter Schleswig-Holstein und Niedersachsen, des Geodaetisk Institut Danmark sowie den Topografischen Dienst Delft (Niederlande) unverändert übernommen.

Der untere Kartenrand trägt zwei Indexkarten. Die eine gibt die Übersicht über die Nummern der angrenzenden Karten. Aus der zweiten Indexkarte sind für das Gebiet der Hauptkarte die Jahresdaten der einzelnen Aufnahmen und deren Umrißgrenzen zu ersehen.

Unter „Höhenangaben" findet man in der Legende für die in der betreffenden Karte dargestellten Pegel die Namen, die geographischen Positionen und die Höhen des MSpTnw.

Die Karten wurden von der Firma „Atelier für Kartographie, Herbert Neide" kartographisch bearbeitet und vom Landesvermessungsamt Niedersachsen oder Schleswig-Holstein gedruckt. Zu beziehen sind sie über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Feldstraße 251–253, Postfach 44 48, 2300 Kiel 1. Sie kosten pro Blatt DM 6,–. Alle 66 Kartenblätter liegen vor, sind aber z. T. schon vergriffen. Als Muster ist der Ausschnitt einer Küstenkarte eingefügt.

3.3 Bedeutung und Fortführung des Kartenwerkes

Für das Vorfeld der deutschen Nordseeküste mit einer Fläche von rund 15 730 km² liegt damit erstmalig ein einheitliches Kartenwerk im Maßstab 1 : 25 000 vor. Die enge Folge der Tiefenlinien und die zehnstufige Farbskala vermitteln ein sehr eindrucksvolles Bild der Morphologie des dargestellten Gebietes. Die von den topographischen Karten der Landesvermessungsämter übernommene Topographie der Landgebiete und Inseln erlaubt ein schnelles und leichtes Orientieren und kann in einigen Fällen helfen, die Formen im Seegebiet zu erläutern und im Zusammenhang mit der Situation auf dem Festland zu sehen.

Besonders herauszuheben ist, daß das gesamte Kartenwerk in seinen wesentlichen Teilen auf Vermessungen beruht, die nicht mehr als drei Jahre auseinanderliegen. Betrachtet man die einzelnen Kartenblätter, so sind es oft die Vermessungen nur eines Jahres, die der Konstruktion der Tiefenlinien zugrundeliegen. Die genauen Daten können den oben erwähnten Indexkarten entnommen werden. Das Küstenkartenwerk besitzt dadurch eine große Aussagekraft.

Ein Kartenwerk der vorliegenden Art kann immer nur gleichsam eine Momentaufnahme darstellen. Um Veränderungen in zeitlicher Abhängigkeit zeigen und daraus Voraussagen

ableiten zu können, müssen Karten verglichen werden, deren Grundlagen in zeitlicher Aufeinanderfolge gemessen wurden. So war es ursprünglich vorgesehen, das Vorfeld der deutschen Nordseeküste synoptisch alle fünf Jahre zu vermessen und auf Grund der so gewonnenen Daten auch alle fünf Jahre die Küstenkarten neu herauszugeben. Eine erste Wiederholungsvermessung hat bereits in den Jahren 1979 bis 1981 stattgefunden. Die zweite Auflage der Küstenkarten steht bevor. Aus Kostengründen werden jedoch nur die küstennahen Karten neu aufgelegt und diese nur noch einfarbig gedruckt werden.

4. Wiederholungsvermessung

4.1 Allgemeines

Die quasi-synchrone Vermessung des Küstenvorfeldes in den Jahren 1974 bis 1976 und die Ergebnisdarstellung im Küstenkartenwerk im Maßstab 1 : 25 000 geben für sich keine Möglichkeit, vertiefte Kenntnisse über die morphologischen Gestaltungsvorgänge und Materialbilanzen zu gewinnen. Entsprechende Ergebnisse sind nur über die Wiederholungsvermessung zu erhalten.

Das KFKI beschloß auf seiner Sitzung am 26. Oktober 1977 die Bildung einer Projektgruppe „Wiederholungsvermessung", die zu untersuchen hatte, wann mit der Wiederholungsvermessung zu beginnen war und in welchen zeitlichen und räumlichen Abschnitten die Vermessung ausgeführt werden sollte.

Die Gruppe hat folgende personelle Zusammensetzung:

VD Dr.-Ing. Schleider	WSD Nordwest, Aurich (Obmann)
LVD Dr.-Ing. Bettac	DHI, Hamburg
Ing. grad. Kowalski	FSt Norderney
VD Meiswinkel	BfG, Koblenz
Ing. grad. Thiess	ALW Heide, Büsum
BD Zacher	WSA Cuxhaven
Ing. grad. Ziegler	LaWaKü, Kiel

Die Projektgruppe hielt engen Kontakt zum Sonderforschungsbereich 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren" der Universität Hannover, in dem besonders im Teilprojekt R 1 „Topographie und Kartographie im Küstenbereich" Meß- und Auswerteverfahren in der küstennahen Vermessung entwickelt werden.

Die Planung der Vermessung wurde zunächst darauf abgestellt, neben organisatorischen Maßnahmen besonders durch Verbesserung der gerätetechnischen Ausrüstung den zeitlichen Ablauf der Vermessung so zu optimieren, daß die Arbeiten in drei Jahren von 1979 bis 1981 zu bewältigen wären. Der Ablauf wurde gebietlich so gestaltet, daß zwischen Erstvermessung und der Wiederholung ein Zeitraum von fünf Jahren liegt.

An der Vermessung waren wiederum die Küstendienststellen des Bundes und der Länder sowie das DHI Hamburg und die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BfG) beteiligt. In nicht unerheblichem Umfang wurden Arbeiten vergeben.

4.1.1 Organisatorische Maßnahmen

Der Aufgabenumfang wurde nach den Erfahrungen bei der Erstvermessung wie folgt festgelegt:

1979
32 Küstenkarten 1 : 25 000 im Jade-Weser-Elbe-Mündungsgebiet
1980
15 Küstenkarten 1 : 25 000 im Gebiet Emsmündung/Ostfriesische Inseln
12 Küstenkarten 1 : 25 000 im Gebiet Nordfriesische Inseln/Eiderstedt
1981
9 Küstenkarten 1 : 25 000 im Gebiet Nordfriesische Inseln/Sylt.

Nach der Aufstellung von Ablaufplänen und Abstimmung über die anzuwendenden Verfahren bei der Vermessung wurde die örtliche Koordinierung für 1979 Ing. (grad.) LASSEN, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, für 1980 Ing. (grad.) KOWALSKI, Forschungsstelle Norderney, und 1981 Ing. (grad.) PALM, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, übertragen. Diese Art der Organisation der Durchführung hat sich als äußerst positiv für das Gelingen der Aufgabe bewährt.

4.1.2 Gerätetechnische Maßnahmen

Bis zum Beginn der Vermessung konnte das Ziel, eine EDV-gerechte Aufnahme durchzuführen, nur teilweise verwirklicht werden, da besonders das abschließende Konzept der Verarbeitung der Tiefenvermessung als auch für die Beschickung in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und der Länderdienststellen noch nicht vorlag.

Im Vorfeld der Entscheidung wurde zunächst für das Vermessungsschiff „Blaue Balje" des WSA Wilhelmshaven ein Vermessungssystem SEADIG–201 der Firma Navitronic, Dänemark, aus Mitteln des BMFT beschafft, welches durch Geräte zur Ortung und zur Tiefenmessung durch die beteiligten Dienststellen ergänzt wurde. Die Daten wurden auf 8-Kanal-Lochstreifen ausgegeben und beim DHI Hamburg unter Berücksichtigung der Beschickungsdaten verarbeitet. Die Datenaufzeichnung wurde zwischenzeitlich in der WSV auf Magnetband-Cassetten umgestellt.

Die FSt Norderney führte in den Flachwassergebieten Hoher Weg und südlich der Ostfriesischen Inseln die Vermessung im großen Umfang durch Peilung mit flachgehenden Booten durch, um die Leistung in dem erforderlichen Umfang zu erhöhen. Hierfür wurde ein transportabler Echograph ATLAS DESO 20 benötigt, der im Flachwasserbereich größtmögliche Darstellung gewährleistet.

Der Erhöhung der Leistung diente auch die Beschaffung eines Distanzmessers AGA Geodimeter 120 für die Entfernungsmessung. Im Rahmen des Vermessungsprogramms ist die Messung von 170 km Polygonstrecken im Aufgabengebiet erforderlich gewesen.

Die Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk benötigte für den Anschluß von Pegeln ein Zeiss Ni1–Nivellierinstrument. Durch die größeren Zielweiten wurde eine Arbeitsbeschleunigung erreicht.

Für die Beschickung standen zwar fünf feste Schreibpegel des KFKI zur Verfügung, jedoch war nach den Erfahrungen der Erstaufnahme zur Erhöhung der Genauigkeit das Pegelnetz durch vier weitere Schreibpegel zu ergänzen.

Zur Arbeitsbeschleunigung mußten sieben Rohrfestpunkte eingebracht werden.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

4.2 Ausführung der Vermessungen

Die unterschiedliche Struktur des Vermessungsgebietes hatte wiederum die Anwendung verschiedener Verfahren zur topographischen Aufnahme zur Folge.

Im Seegebiet, in den Ästuarien und in den Wattfahrwassern wurde die Topographie durch Quer- bzw. Längspeilungen vorwiegend entlang der Ortungs-Hyperbellinien der Hi-Fix- bzw. Decca-Ketten ermittelt. Dabei sollte im allgemeinen im Watt mit einem Peillinienabstand von 50 bis 150 m, in Ästuarien mit 100 bis 200 m und im Seegebiet mit 200 bis 400 m gearbeitet werden. In morphologisch unruhigen Gebieten, wie z. B. in den Riffbögen, wurden auch Kreuzpeilungen ausgeführt. Soweit vertretbar, sollten Vermessungsprofile so angeordnet sein, daß die Lage der Erstvermessung erreicht wurde.

Die Peilergebnisse wurden auf Arbeitskarten im Maßstab 1 : 10 000 dargestellt, die von den beteiligten Dienststellen auch für eigene Belange benötigt werden.

Für die Aufnahme der Wattflächen von Borkum bis Wangerooge und im nordfriesischen Wattgebiet wurden tachymetrische Aufnahmeverfahren und das Wasserlinienverfahren angewendet.

4.2.1 Arbeiten der Küstendienststellen und der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Die Aufgabe wurde wie folgt übernommen:

1979

Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg:
Peilung der Seegebiete vor den Ostfriesischen Inseln, nordwestlich der Schlüsseltonne, der Norderelbe, Süderpiep, Norderpiep und der Außeneider. Peilung der Priele und der Seegats in diesen Gebieten. Tachymetrische Aufnahmen im trockenfallenden Watt südlich Langeoog und Baltrum für das Wasserlinienverfahren.

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz:
Tachymetrische Aufnahme des Medemsandes und der Nordergründe.

Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney:
Tachymetrische Aufnahmen und Peilungen im trockenfallenden Watt im Bereich Hohe Weg, Solthörner Watt.

Wasser- und Schiffahrtsamt Emden:
Tachymetrische Aufnahme im trockenfallenden Watt südlich von Wangerooge und Spiekeroog für das Wasserlinienverfahren.

Wasser- und Schiffahrtsamt Wilhelmshaven:
Peilung der Bereiche Jadebusen und Jade, der Priele und Seegats in diesen Gebieten.

Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven:
Peilung und tachymetrische Aufnahme im Bereich der Weser.

Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk:
Peilung und tachymetrische Aufnahme im Bereich Großer Knechtsand, Neuwerker Watt.

Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven:
Peilung und tachymetrische Aufnahme im Bereich der Elbe.

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide/Büsum:
Peilungen und tachymetrische Aufnahme Wattgebiet zwischen Nordergründe und Norderpiep.

Rijkswaterstaat, Groningen:
Peilungen und tachymetrische Vermessungen im Dollart.

1980

Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg:
Peilung der Seegebiete vor den Ostfriesischen Inseln bis nördlich Helgoland, vor der nordfriesischen Küste bis zur Höhe Amrum, der Priele und Seegats in diesen Gebieten.

Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney:
Tachymetrische Aufnahme im trockenfallenden Watt südlich von Norderney bis Baltrum für Wasserlinienverfahren. Einmessung und Betreuung von Lage-Paßpunkten.

Wasser- und Schiffahrtsamt Emden:
Peilung der Bereiche Ems und Zufahrt Hafen Norderney. Tachymetrische Aufnahme der trockenfallenden Wattflächen für das Wasserlinienverfahren im Bereich Randzel. Einmessung und Betreuung von Lage-Paßpunkten.

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum:
Tachymetrische Geländeaufnahme der trockenfallenden Watten an der nordfriesischen Küste für Wasserlinienverfahren. Einmessung und Betreuung von Lage-Paßpunkten.

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide/Büsum:
Peilungen und tachymetrische Aufnahmen Wattgebiet zwischen Norderpiep und Eiderstedt.

1981

Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg:
Peilung der Seegebiete vor der nordfriesischen Küste nördlich Amrum, der Priele und Seegats in diesen Gebieten.

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum:
Einmessung und Betreuung von Lage-Paßpunkten.

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide/Büsum:
Peilungen und tachymetrische Aufnahmen Wattgebiet Hakensand-Mittelplate.

4.2.2 Arbeiten durch Dritte

Die beim Wasserlinienverfahren erforderlichen Beschickungsvermessungen waren im Gebiet der nordfriesischen Wattgebiete nur durch Vergabe dieser Arbeiten an Fachfirmen verfahrensgerecht zu erledigen. Der Idealfall, zeitgleiche Befliegung und Beschickungsvermessung, ist allerdings nur in Ausnahmefällen zu realisieren. Es wurde jedoch für vertretbar gehalten, Befliegung und Beschickungsvermessung in einem Zeitraum von etwa einem Jahr abzuwickeln.

Die Lage der Eichprofile wurde in Karten 1 : 25 000 angegeben. Die zeitliche Abweichung der sonst gradlinigen Profile war mit 2 % der Profillänge zulässig. Die Länge der Profile betrug ca. 1000 bis 1500 m. Anfangs- und Endpunkt (MTnw-Linie) waren lagemäßig zu bestimmen. In den Profilen war mindestens alle 50 m ein Höhenpunkt aufzumessen, bei Geländesprüngen auch Zwischenpunkte. Die Höhenpunktbestimmung war mit ±3 cm für den Geländepunkt nivellitisch durchzuführen.

Die Meßergebnisse waren neben einer zeichnerischen Darstellung als Kotenkarte im Maßstab 1 : 10 000 zur Kontrolle der Datenträgerdaten auch auf Datenträgern (Magnetband oder Lochstreifen) zur Verfügung zu stellen. Für jeden gemessenen Punkt waren Punktnummern, Rechts- und Hochwerte im Gauß-Krüger-System sowie die NN-Höhe anzugeben.

Zu vergeben war ebenfalls die Befliegung selbst. Für die Aufnahmen setzte die Fa. Rüpke, Hamburg, eine Reihenmeßkammer mit 8,5 cm Brennweite ein; das Bildformat war mit wenigstens 23 × 23 cm gefordert. Als Filmmaterial war zur besseren Identifizierung der Wasserlinie ein besonders geeigneter Infrarotfilm zu verwenden. Der Aufnahmemaßstab betrug 1 : 50 000. Die Längsüberdeckung der Aufnahmen sollte mindestens 80–90 % sein, um für die durch Paßpunkte begrenzten Entzerrungsteilflächen die Auswahl des optimal liegenden Bildes sicherzustellen. Die Querüberdeckung der parallel verlaufenden Flugstreifen sollte mindestens 30 % sein. Die Lage der Flugstreifen war derart zu wählen, daß durch eine Überfliegung ein Optimum an Festland- und Inselflächen erfaßt wurde, da vorwiegend hier die zur Entzerrung notwendigen Lagepaßpunkte geschaffen werden mußten. Auf die entsprechenden Ausführungen zur Erstvermessung wird verwiesen. Die angewendeten Aufnahmeverfahren der Ortung und der Tiefenbestimmung sind Abb. 3 zu entnehmen.

5. Automatisierung der Wasserlinienaufnahme

In die in Abschn. 7 angesprochenen Fragen der Bildung von digitalen Geländemodellen bzw. der Speicherung der Vermessungsdaten wurde die Aufnahme mit Hilfe des Wasserlinienverfahrens einbezogen. Der Sonderforschungsbereich (SFB) 149 der Universität Hannover übernahm die entsprechende Auswertung der Aufnahme in den Küstenkarten K 2210 Langeoog und K 2212 Wangerooge. Die dabei gemachten Erfahrungen führten dazu, das bisherige Verfahren der graphischen Entzerrung der Luftaufnahmen zugunsten der rechnerischen Entzerrung aufzugeben. Die Vergabe der Wasserlinienbefliegung wurde entsprechend formuliert. Auf die Veröffentlichung von WEGENER wird hingewiesen.

6. Genauigkeit der Vermessungen

Die angewendeten Aufnahmeverfahren haben Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Die entsprechenden Vergleiche zwischen Erst- und Zweitvermessung sind derzeitig noch in Bearbeitung. Es ist beabsichtigt, die Ergebnisse besonders zu veröffentlichen.

7. Ausblick

Die Arbeiten für die Wiederholungsvermessung liefen 1979 an und wurden 1981 beendet. Wiederum wurde innerhalb von drei Jahren das gesamte Küstenvorfeld der Inneren Deutschen Bucht vermessen. Leider verbieten die hohen Kosten der kartographischen Bearbeitung, das Ergebnis der zweiten Vermessung wieder als mehrfarbiges Kartenwerk herauszugeben. Sinn der Vermessungen war nicht allein ihre kartographische Wiedergabe, sondern diese Untersuchungen sollten vor allem Grundlagen für eine Analyse der Veränderungen in einem bestimmten Zeitraum schaffen. 1978 wurde daher im KFKI eine Projektgruppe „Morphologische Analysen Nordseeküste" (MORAN) gebildet, die das vorgenannte Ziel verfolgt. Die vorbereitenden Arbeiten führten zunächst zur Auswahl von drei Testgebieten mit dem Knechtsand als erstem (Siefert, 1983).

Für die weitere Zukunft wird erwogen, auf die kartographische Wiedergabe zu verzichten und dafür aus den Vermessungsdaten ein digitales Geländemodell zu bilden und dieses in einem Rechner bzw. auf Datenträgern abzuspeichern. Für spezielle Untersuchungen könnte

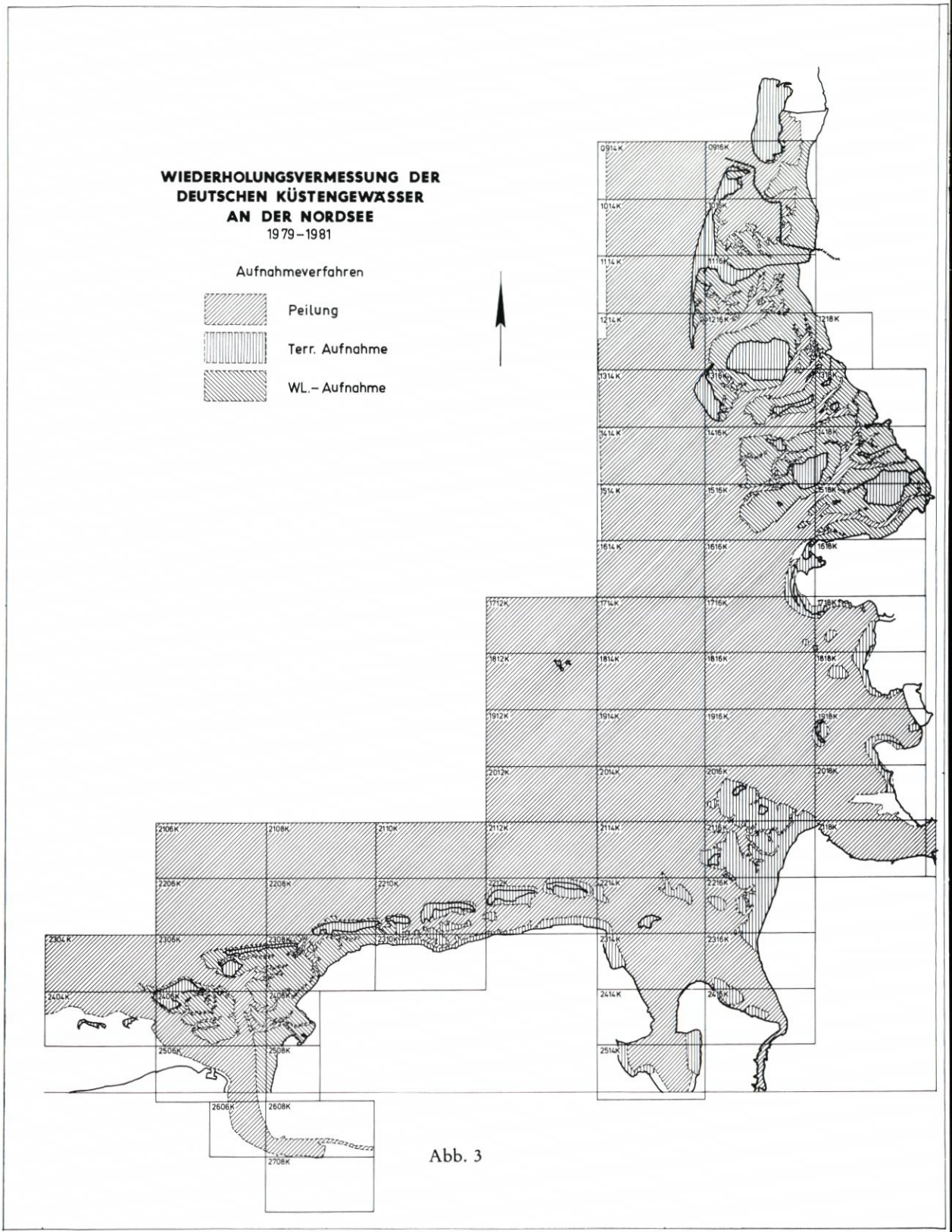

WIEDERHOLUNGSVERMESSUNG DER
DEUTSCHEN KÜSTENGEWÄSSER
AN DER NORDSEE
1979–1981
Aufnahmeverfahren
Peilung
Terr. Aufnahme
WL.– Aufnahme

Abb. 3

Die Küste, 40 (1984), 1-318

man dann von dem Rechner aus den gespeicherten Daten unmittelbar die gesuchten Parameter berechnen und ausgeben lassen, wie etwa einen Massenauf- oder -abtrag.

So vorteilhaft ein solches Verfahren für wissenschaftliche Untersuchungen ist, so sehr wird es sicherlich von allen Benutzern bedauert, die sich ein Bild von der Morphologie des Vorfeldes der deutschen Nordseeküste und deren Veränderungen verschaffen wollen und über keine Anlagen der elektronischen Datenverarbeitung verfügen. Aber auch die auf einem Spezialgebiet arbeitende Wissenschaft, welche die von ihr benötigten Daten unmittelbar von einem Rechner abrufen lassen kann, besitzt keine Übersichtskarte mehr und auch nicht mehr die Möglichkeit, die Ergebnisse ihrer Arbeit unmittelbar mit der Morphologie vergleichen zu können.

Diese Gedanken haben die KFKI-Mitglieder lange bewegt, bis sie zu der einheitlichen Auffassung kamen, daß auch von der Wiederholungsvermessung Karten (mindestens schwarz/weiß) hergestellt werden sollten. Dies gilt besonders für die küstennahen Gebiete, zumal, wenn mit den Karten gearbeitet wird und visuelle Vergleiche möglich sind. In der Herbstsitzung 1980 des KFKI wurde beschlossen, nach Möglichkeit aus den Daten der Wiederholungsvermessung vollständige Küstenkarten zu bearbeiten. Für eine Kostenschätzung war zunächst von zwei Alternativen auszugehen:

1. Neubearbeitung aller Karten (schwarz/weiß und farbig),
2. Bearbeitung nur der Karten in unmittelbarer Küstennähe, also für die Gebiete, in denen die größten morphologischen Änderungen erwartet werden (schwarz/weiß und farbig).

Auch wenn man davon ausgeht, daß die Tiefenlinien bereits in digitaler Form vorliegen, also ohne weiteren Eingriff eines Bearbeiters auf einem numerisch gesteuerten Zeichentisch als transparente Druckvorlage erstellt werden können, ergeben sich für die noch erforderliche karthographische Bearbeitung und Herstellung der transparenten Originale recht hohe Kosten, die für fünffarbige Karten mehr als doppelt so hoch sind wie für einfarbige. Da eine Neuauflage des Küstenkartenwerkes aus BMFT-Mitteln nicht möglich ist – es werden keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse gewonnen – und nach einer Umfrage fast alle Küstendienststellen an transparenten Mutterpausen interessiert sind, wurde entschieden, einen Satz transparenter Folien, mit Ausnahme der küstenfernen Gebiete, der sog. „blauen Karten", herstellen zu lassen. Ende 1983 wird die Digitalisierung so weit fortgeschritten sein, daß ab 1984 erste Karten hergestellt werden können. Der Bund und die Küstenländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg werden die erforderlichen Mittel dazu bereitstellen. Die Kosten werden nach einem entsprechenden Schlüssel aufgeteilt und mit Verpflichtungsermächtigungen in den Jahren 1984 bis 1986 fließen.

In der Zwischenzeit wurde eine neue Projektgruppe gebildet, die sich mit der Herstellung von Küstenkarten aus der Wiederholungvermessung befaßt. Dieser Gruppe gehören folgende Herren an:

LVD Dr.-Ing. Bettac	DHI, Hamburg
Dipl.-Ing. Kowalski	FSt Norderney
VD Dr.-Ing. Schleider	WSD NW, Aurich
Dipl.-Ing. Ziegler	LAWK, Kiel

Für die Herstellung der Karten können u. a. folgende Unterlagen verwendet werden:

- die von der Bundesanstalt für Wasserbau aus digitalisierten „Wasserlinien" ermittelten Tiefenlinien der mit Luftbildmessung aufgenommenen Wattgebiete,
- die aus Arbeitskarten digitalisierten Tiefenlinien der Mündungsgebiete von Jade, Weser und Elbe,
- die für einige küstenfernere Gebiete und größere Priele digital vorliegenden Vermessungser-

gebnisse des DHI – das DHI wird mit Hilfe des TASH-Programmes hierfür Tiefenlinien berechnen –,
- einige Priele und Rinnen („Füllgebiete"), die von anderen Dienststellen vermessen worden sind.

Die Hauptaufgabe der Gruppe wird zunächst sein, festzustellen, wie weit die Bearbeitung der Unterlagen für die einzelnen Kartenblätter gediehen ist. Außerdem wird sie festlegen, in welcher Reihenfolge die Karten hergestellt werden sollen. Anschließend wird die Gruppe die Bearbeitung der Unterlagen für die einzelnen Kartenblätter entsprechend steuern. Anfang 1984 – wenn die Mittel bereitstehen – wird sie dann die Vergabe der Kartenherstellung an eine geeignete Firma vorbereiten, die Arbeiten namens des KFKI vergeben und schließlich die Ausführung überwachen.

Mit der Herausgabe des zweiten Küstenkartenwerkes dürften die Mühe und die Kosten für die Wiederholungsvermessung gekrönt werden. Für viele, die das Kartenwerk als Arbeitsgrundlage oder zur Anschauung benötigen, geht damit ein langgehegter Wunsch in Erfüllung zum Wohle der Erforschung der Naturvorgänge im deutschen Küstenvorfeld der Nordsee.

8. Schriftenverzeichnis

BMBW: Untersuchungsprogramm zur Küstenforschung. Schriftenreihe Meeresforschung, 1, 1971.

Kowalski, H. u. Luck, G.: Mitwirkung der Forschungsstelle Norderney bei der Vermessung des deutschen Küstenvorfeldes durch das KFKI. Forschungsstelle f. Insel- u. Küstenschutz, Jahresbericht 1978, Bd. XXX, 1979.

Lorenzen, J. M.: Das Programm des Küstenausschusses zur Erforschung der Naturvorgänge im deutschen Küstenvorfeld. Die Küste, H. 18, 1969.

Schleider, W.: Zweite synoptische Vermessung der deutschen Küstengewässer der Nordsee. ZfV, H. 10, 1979.

Schleider, W.: Die synoptischen Vermessungen der deutschen Küstengewässer der Nordsee. XVII. FIG Kongreß, Berichtsheft Kommission 4, Sofia, 1983.

Siefert, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsand-Gebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). Die Küste, H. 38. 1983.

Sindern, J. u. Kathage, F.: Das Wasserlinienverfahren (Serien-Einzelbildmessung) – eine neue Art der Wattvermessung. DGM, H. 6, 1966.

Sindern, J. u. Kathage, F.: Das Decca-Hi-Fix-System im Dienste der Küstenvermessung. – Aufbau und Betrieb der Hi-Fix-Eiderkette –. AVN, H. 4, 1968.

Wegener, W.: Automatisierung des Wasserlinienverfahrens zur Vermessung von Wattgebieten. Wasserwirtschaft, 68, H. 10, 1978.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

HN-Modellrechnungen und Naturmessungen – ein Vergleich –

Bericht der Projektgruppe HN-Modelle des KFKI[1)]

Zusammenfassung

Das mathematische Modell der Inneren Deutschen Bucht des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen wurde von September bis November 1981 in einem großräumigen Meßprogramm auf seine Naturähnlichkeit getestet. Der Entwicklung des Modells war eine Normaltide zugrunde gelegt worden. Das Naturmeßprogramm sollte aufzeigen, inwieweit das Modell noch bei stark erniedrigten oder erhöhten Wasserständen einsetzbar ist bzw. in welchen Toleranzbereichen mögliche Fehler vernachlässigbar sind. – Durch einen glücklichen Zufall konnten während der Sturmflut vom 24. November 1981 noch Wasserstandswerte auf dem seeseitigen Rand des Modells gemessen und in die Vergleichsuntersuchungen einbezogen werden.

Die hier mitgeteilten Ergebnisse lassen eine zufriedenstellende Übereinstimmung der gerechneten mit den Naturdaten erkennen. Sie ermutigen dazu, mathematische Modelle stärker als bisher in der Küstenforschung zu verwenden.

Summary

In an extensive measurement program the resemblance to nature of the mathematical model "Inner German Bay" of the Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen was tested from September through November 1981. The model was developed on the basis of a normal tide. The nature measurement program was devised to show the margines of its utilization regarding noticeably hightened or reduced water levels, or within what range of tolerance possible mistakes can be neglected respectively. At the storm tide of November 24, 1981, it was possible by a lucky chance to measure the water levels of the offshore border of the model and to include these values in the comparative measurements.

The here reported findings show a satisfying correspondence of the calculated and the measured data. They encourage to use mathematical models more frequently than hitherto in the coastal research.

Inhalt

1. Einleitung 34
2. Planung und Durchführung 35
   2.1 Vorüberlegungen 35
   2.2 Planungsphase 35
   2.3 Das Meßnetz (Abb. 1) 37
   2.4 Vorbereitung und Ablauf der Messungen 38
   2.5 Praktische Erfahrungen 39
3. Datenerfassung und Datenaufbereitung 41
   3.1 Datenregistrierung 41
   3.2 Meteorologische Parameter 41

[1)] Mitglieder der Projektgruppe: Dr. Luck (Obmann), Norderney; Dr. Renger, Kiel; Prof. Dr. Siefert, Cuxhaven; Dr. Wismer, Kiel; Dr. Wundes, Bremen, in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Beckmann, Hamburg; Dipl.-Ing. Liebig, Norderney; Dr. Rohde, Hamburg; Dipl.-Oz. Schäfer, Hamburg; Dipl.-Ing. Wiese, Hamburg.

3.3 Wasserstände 41
3.4 Stromgeschwindigkeiten 44
4. Vergleich Natur – Modell 46
4.1 Das HN-Modell INDB 46
4.2 Modellrechnungen 46
4.3 Modellsteuerung 47
4.3.1 Wasserstände an den offenen Rändern 47
4.3.2 Windschub an der Wasseroberfläche 47
4.4 Ergebnisse des Vergleichs 47
4.4.1 Wasserstände 47
4.4.2 Strömungen 50
5. Zusammenfassende Beurteilung 51
6. Schriftenverzeichnis 53

1. Einleitung

Die in den Jahren 1977 bis 1981 hergestellten Hydrodynamisch-Numerischen Modelle (HN-Modelle) des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), die damit verbundenen Absichten und der organisatorische Rahmen der Arbeiten sind bereits mehrfach beschrieben worden (Luck u. Schäfer, 1980; HN-Gruppe, 1983). Der Erarbeitung der Modelle war damals das Tidegeschehen vom 8. und 9. Juli 1976 zugrunde gelegt worden (Normaltide).

Schon zu Beginn der Arbeiten wurde erwogen, die Modelle späterhin durch vergleichende Naturmessungen auf ihre Anwendbarkeit auch bei nicht durchschnittlichen Verhältnissen zu testen bzw. jene Grenze aufzuzeigen, bis zu welcher die Modelle ohne Modifikation noch sinnvoll eingesetzt werden können. Diese Überlegungen nahmen im Laufe der Jahre 1979 sowie 1980 Gestalt an und führten zu dem 1981 abgewickelten Programm DEBEX (Deutsche Bucht Experiment). Über die praktische Ausführung dieses vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) sehr stark geförderten Programmes ist von Wiese (1983) berichtet worden. Seine Betreuung oblag der „Projektgruppe HN-Modelle" des KFKI, die Federführung der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney.

Das Naturmeßprogramm DEBEX mußte sich an jenen Grenzen orientieren, die vor allem durch den zur Verfügung stehenden Schiffs- und Gerätepark der im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen gezogen waren. Auch aus diesem Grunde wurden daher nicht alle Modelle, sondern lediglich das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht" in die Untersuchungen einbezogen. Auch die Betreuung der Pegel und Strömungsmeßgeräte mußte in einem Rahmen gehalten werden, der mit dem vorhandenen Personal und ohne Vernachlässigung anderer Aufgaben auszufüllen war. In Abb. 1 ist das schließlich betriebene Meßnetz lagemäßig dargestellt.

Die Vorbereitung und Ausführung von DEBEX (Gerätebeschaffung, Schiffseinsätze, Organisation usw.) konnten von der HN-Projektgruppe allein nicht mehr wahrgenommen werden. Aus diesem Grunde ist für die Koordination, Erarbeitung der Detailprogramme, Beschaffungen u.ä. ein technischer Angestellter eingestellt worden. Die Schiffseinsätze wurden vom Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven organisiert. Bei der Ausführung des Naturmeßprogrammes wirkten mit:

- Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, (Federführung),
- Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Hydrologie Unterelbe, Cuxhaven,
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide,
- Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven,

Die Küste, 40 (1984), 1-318

- Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven,
- Wasser- und Schiffahrtsamt Tönning,
- Wasser- und Schiffahrtsamt Wilhelmshaven,
- Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg,
- Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste, Hamburg,
- Seewetteramt Hamburg.

Mitte September 1981 waren die Geräte – mit Ausnahme einiger Hochseepegel, die erst Ende des Monats angeliefert wurden – aufgebaut und meßbereit. Die zwei folgenden Monate erbrachten unterschiedliche Wetterlagen mit erhöhten und erniedrigten Tiden. Am 24. November 1981 – also nach dem planmäßigen Meßzeitraum – stellte sich eine sehr schwere Sturmflut ein, die an verschiedenen noch auf dem Rand und im Gebiet des Modells liegenden Pegeln gemessen werden konnte. Damit waren – wenn auch lückenhaft – erstmals Sturmflutwasserstände im Zusammenhang mit HN-Modellen gemessen worden.

Die Auswertung der Meßdaten setzte sofort nach Abschluß der Außenarbeiten ein. Gleichzeitig wurden die Modelle mit den nun zur Verfügung stehenden Daten beschickt und im Laufe des Jahres 1982 die Vergleiche Natur/Modell vorgenommen. Die wissenschaftliche Planung, die letzthin erzielten Ergebnisse und deren Bewertung werden nachfolgend mitgeteilt.

2. Planung und Durchführung

2.1 Vorüberlegungen

Es zeigte sich relativ früh, daß die Modelle bei Normaltiden, für die sie zunächst auch ausschließlich geeicht waren, sehr gute bis befriedigende Ergebnisse liefern konnten. An einer Verwendung bei Sturmflutuntersuchungen bestanden erhebliche Zweifel, da die Modelle nicht für solche Abläufe geeicht waren. Die Bedenken richteten sich gegen die verwendeten Reibungsansätze, die Unkenntnis über den Ansatz des Windfeldes über den Modellen und eine unnatürliche Reproduktion des Triftstromes, der nach Größe und Richtung sowie über die Tiefe anderes Verhalten als die mittleren Strömungsverhältnisse zeigt.

Zwar lagen aus dem Modellgebiet bereits viele diesbezügliche Untersuchungen vor, aber sie bezogen sich stets nur auf Teilaspekte und kleinere Regionen. Damit waren sie nicht gut geeignet zum Nachweis der Naturähnlichkeit der KFKI-Modelle. Ein Ausweg wurde allein in einem Meßprogramm gesehen, das gezielt Vergleiche Natur – Modell gestatten sollte, und zwar durch ein möglichst genau definiertes Windfeld mit den dadurch erzeugten Tidekurven und Strömungsganglinien. Bei letzteren wurden insofern Schwierigkeiten erwartet, als im Modell an jedem Ort nur ein Geschwindigkeitsvektor berechnet wird, dieser aber verschieden von einem an demselben Ort in bestimmter Höhe über der Sohle in der Natur gemessenen Vektor sein muß. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten sollten an einigen Stellen Vertikalprofile der Strömungen gemessen werden.

Da es ein Meßprogramm solcher Zielsetzung und solchen Umfangs bis dahin noch nicht gegeben hatte, lag es nahe, es rechtzeitig mit allen Beteiligten und Interessierten zu diskutieren.

2.2 Planungsphase

Von vornherein war klar, daß ein Vergleich Modell – Natur nicht an allen insgesamt 5800 Punkten der drei Regionalmodelle möglich sein würde. Beschränkungen waren durch die

verfügbaren Gerätezahlen, Betreuungs- und Auswertekapazitäten auferlegt, ferner durch die Tatsache, daß die Verhältnisse in der Deutschen Bucht ohnehin über größere Flächen einheitlich sind und daß die topographischen Gegebenheiten in Küstennähe – bedingt durch den Gitterpunktabstand von 1,8 km – zwangsweise im Modell generalisiert worden waren und somit völlige Übereinstimmung mit der Natur hier gar nicht erwartet werden konnte. Das wiederum konnte auch Messungen außerhalb der Modell-Gitterpunkte erlauben.

Mit diesen Überlegungen war ein erstes Meßkonzept entworfen worden. Die vorgegebenen Beschränkungen hatten zur Konzentration aller Aktivitäten auf das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht" (INDB) als Beispiel geführt. Es stellte einen Kompromiß zwischen dem Erwünschten und dem Machbaren dar. Die Diskussionen dieses Meßkonzeptes haben mit den bewirkten Modifikationen dazu beigetragen, auch einen Kompromiß zwischen dem Bedarf des Küsteningenieurwesens und dem der Ozeanographie zu finden in dem gemeinsamen Ziel, Datenmaterial aus der Natur zu erhalten, das nicht nur für das KFKI-Modell, sondern auch für alle weiteren Modelle als Maßstab für die Naturähnlichkeit dienen sollte, handele es sich nun um Ein- oder Mehrschichtenmodelle, Sedimentbewegungs-, Sturmflut- oder Seegangsmodelle. Zielsetzung sollte dabei bleiben, beispielhaft das INDB-Modell – insbesondere in den morphologisch stark gegliederten Küstengebieten – hinsichtlich der Übereinstimmung von Wasserständen sowie der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit den Naturdaten zu überprüfen und evtl. zu verbessern. Für eine Normaltide konnte eine solche Übereinstimmung – zumindest hinsichtlich der inneren Logik des Modells – bereits nachgewiesen werden (Luck u. Schäfer, 1980). – Des weiteren waren jene Tidewasserstände zu ermitteln, bei welchen das vorhandene – an einer Normaltide geeichte – Modell ohne Modifikation noch angewendet werden konnte. Der Test sollte auch erstmals die Möglichkeit bieten, ein Modell in dieser Weise mit synchron gemessenen Naturdaten zu vergleichen, da auch die Wasserstände am offenen Rand meßtechnisch erfaßt werden sollten. Bei windbeeinflußten Tiden mit erniedrigten (östliche Winde) oder erhöhten (westliche Winde) Wasserständen sollten die Windwerte in das Modell eingeführt und entsprechende Modellrechnungen vorgenommen werden. Der Einfluß des Windes im Modellgebiet (lokaler Wind) war als Windschub aus stündlichen Windfeldern zu berücksichtigen. Der meteorologische Einfluß von außen auf die hydrodynamischen Vorgänge im Gebiet des Regionalmodells war in den gemessenen Randwerten enthalten.

Es war bekannt, daß zur Simulation der meteorologisch bedingten Bewegungsvorgänge des Wassers ein ausreichend dichtes Meßnetz erforderlich ist. Der Wind ist örtlich in Richtung und Stärke sehr unterschiedlich und kann nur näherungsweise erfaßt werden. Für die Modellrechnungen ist der Wind – zerlegt in seine Komponenten – in jedem Gitterpunkt anzusetzen. Da Landstationen für das Küstenvorfeld nur bedingt repräsentative Daten liefern, im tiefen Wasser kaum Stationen vorhanden sind und zusätzliche nicht aufgebaut werden konnten, mußte das Schwergewicht der Messungen zwangsläufig im Küstenvorfeld liegen.

Die Messungen sollten im Herbst 1981 stattfinden, da während dieser Jahreszeit unterschiedliche Wetterlagen zu erwarten sind sowie die meteorologischen Experimente Kontur (Konvektion und Turbulenz) und PUKK (Projekt zur Untersuchung des Küstenklimas) ausgeführt werden sollten, deren umfangreiches Datenmaterial für spezielle Untersuchungen dann mit zur Verfügung stehen konnte.

Der Meßzeitraum wurde im Laufe der Planungsphase auf die Zeit vom 15. 9. bis 15. 11. 1981 festgelegt. Da einige Geräte erst später geborgen werden konnten, gelang es erstmals, auch den Ablauf einer sehr schweren Sturmflut (24. Nov. 1981) im Küstenvorfeld zu erfassen (Beckmann, 1982; Wiese, 1982).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

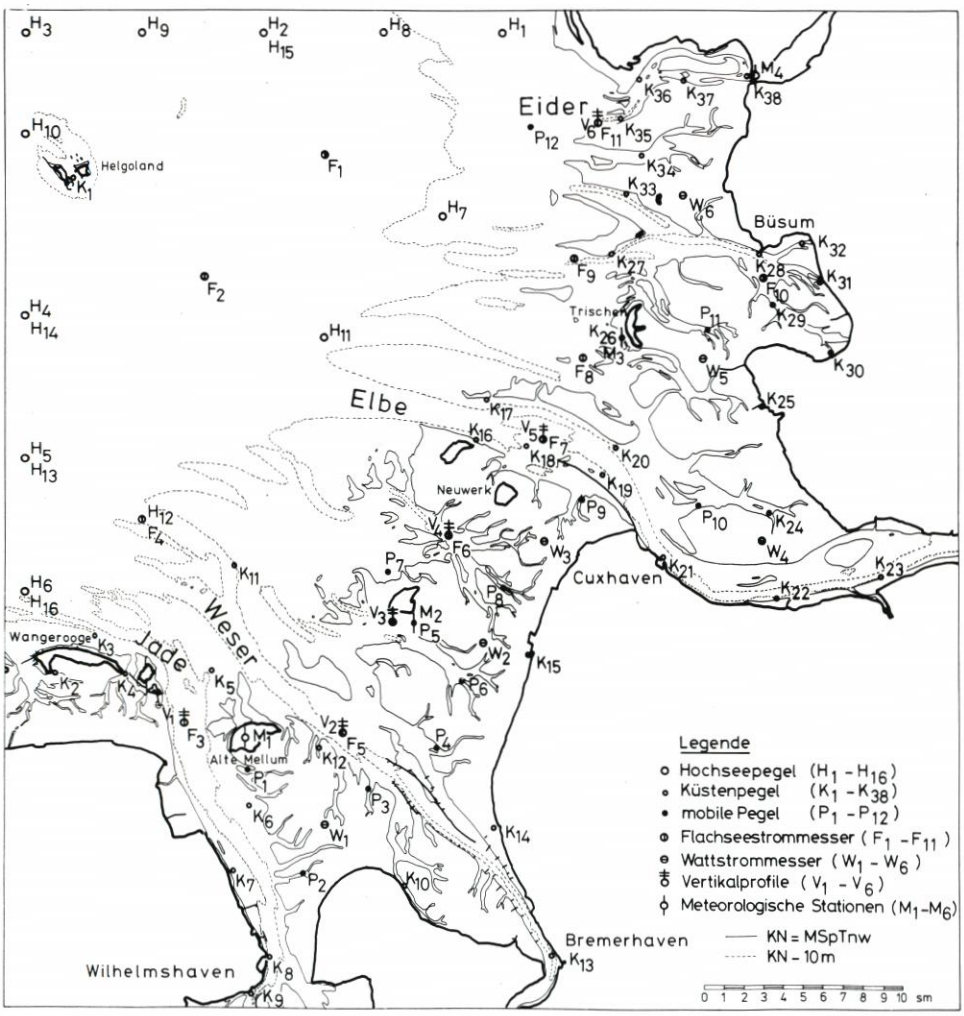


Abb. 1. Meßnetz

2.3 Das Meßnetz (Abb. 1)

Das Meßprogramm war der Funktionsweise des gewählten Modells INDB anzupassen. Ferner war zu bedenken, daß ein Meßnetz zu entwickeln war, das von den beteiligten Dienststellen bewältigt werden konnte.

Von den seeseitigen Rändern des INDB-Modells wurde als Vorgabe zur Steuerung der Modellrechnungen gemessene Wasserstandskurven benötigt. Daher wurden hier insgesamt 13 Hochseepegel ausgelegt. Weitere drei Geräte wurden im Modellgebiet verankert. Die Stationierung erfolgte in Gitterpunkten des Modells, um für die Modellrechnungen möglichst viele gemessene Naturdaten als unmittelbare Eingangswerte zur Verfügung zu haben. Auf der Diagonalen von Wangerooge nach Eiderstedt wurden ebenfalls Hochseepegel ausgelegt. Dadurch sollte ermöglicht werden, das Modell im Bedarfsfall auch von dieser Diagonalen aus

zu steuern, wie es bereits in der Anfangsentwicklung der Modellrechnungen für die Normaltide mit gutem Erfolg ausgeführt wurde (LUCK u. SCHÄFER, 1980).

In Küstennähe und am geschlossenen Rand des zu vergleichenden Modells stehen 38 ständig vorhandene Küstenpegel zur Verfügung. Das Meßnetz wurde durch 12 zusätzlich aufgestellte und eingemessene Schwimmertidepegel verdichtet. Da es sich bei Wasserständen um Parameter mit relativ kleinen örtlichen Unterschieden handelt, waren die Meßpunkte so gewählt, daß eine Interpolation für die Angabe der Wasserstände in den Gitterpunkten des HN-Modells zulässig blieb.

Die stark von der Örtlichkeit bestimmten Tideströmungen wurden in topographisch sinnvollen, in Natur und Modell gut übereinstimmenden Punkten gemessen, also an Orten, die repräsentativ für ihre weitere Umgebung sind. Im tiefen Wasser vor und in den Ästuaren sowie in den großen Rinnen und auf den Watten wurden insgesamt 17 Strömungsmeßstationen betrieben. Dabei wurden die bewährten Geräte eingesetzt (GÖHREN, 1964; MIESSNER, 1979). An sechs Stationen wurde zusätzlich die Vertikalverteilung der Tideströmung über jeweils eine Tide mit vier übereinander ausgebrachten Geräten erfaßt, da über den gesamten Testzeitraum nur Punktmessungen ausgeführt werden konnten, die Strömungsgeschwindigkeiten von HN-Modell (über die Tiefe gewichtet) und Natur aber möglichst direkt verglichen werden sollten.

Meteorologische Messungen wurden während DEBEX in verstärktem Maße vorgenommen: Das stationäre Netz des Deutschen Wetterdienstes wurde im Küstenvorfeld um drei Wind- und eine Luftdruckmeßstation erweitert.

2.4 Vorbereitung und Ablauf der Messungen

Da die Meßstationen von den an der Küste ansässigen Dienststellen der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg und des Bundes aufgebaut und betreut werden sollten, wurden – soweit möglich – die dort schon vorhandenen Meßgeräte eingesetzt. Zusätzlich wurden zehn neu entwickelte Hochseepegel sowie drei Windmeßgeräte gekauft und betrieben.

Alle Hilfspegel in Küstennähe wurden vor Beginn des Meßzeitraumes genau nach Höhe und Lage eingemessen. Vor dem Abbau wurde die Höhenlage kontrolliert. Eigentümer dieser Pegel sind die an der Küste ansässigen Dienststellen und das KFKI.

In der offenen See wurden die Wasserstandsschwankungen mit Hochseepegeln, die den Druck am Meeresboden messen, registriert. Das Deutsche Hydrographische Institut stellte sechs Pegel der norwegischen Firma Aanderaa zur Verfügung. Diese Geräte (Höhe 510 mm, Durchmesser 128 mm, Gewicht ca. 14 kg) messen in konstant einstellbaren Zeitabständen für kurze Zeit den Druck am Meeresboden und registrieren diesen auf Magnetband. Gesteuert wird das Meßsystem über eine eingebaute Quarzuhr.

Als Geräteträger wurden auf alte Eisenbahnräder geschweißte Eisenkäfige benutzt. Diese wurden über jeweils etwa 100 m lange Grunddrähte mit einem weiteren Eisenbahnrad als Ankerstein für die Markierungstonne mit Radarreflektor und Leuchte verbunden.

Auch die während des Meßprogramms erstmals eingesetzten neuen Hochseepegel der Firma Johne & Reilhofer, die für Wassertiefen von 0 bis 6000 m im Auftrag des BMFT entwickelt worden waren, messen den Gesamtdruck am Meeresboden mit einem Quarz-Druckaufnehmer (WIESE, 1982). Im Gerät (Höhe 710 mm, Durchmesser 220 mm, Gewicht ca. 90 kg) können die Anzahl der Messungen pro Stunde und die Dauer jeder Einzelmessung eingestellt werden. Die Meßwerte werden in Halbleiter-Speichern festgehalten, gesteuert

durch eine Quarzuhr. Die Einsatzdauer hängt von der Integrationszeit bzw. von der Kapazität der Batterien ab und beträgt bis zu 300 Tagen.

Für die Verankerung am Meeresboden wurden spezielle Gestelle aus korrosionsbeständigem Material gebaut, in die die Pegel hineingestellt und festgeschraubt wurden. Diese waren über lange Grunddrähte mit einem schweren Ankerstein und über eine Kette mit einer Leuchttonne verbunden.

Dauermeßstationen zur Aufzeichnung von Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen gibt es im Gebiet des INDB-Modells nicht. Die Erfassung dieser Parameter sollte auf den Watten, in den Rinnen und im tiefen Wasser mit selbstregistrierenden Dauermeßgeräten erfolgen. Die Geräte der Firmen Hydrowerkstätten und Aanderaa wurden je nach Örtlichkeit in verschiedenen Geräteträgern montiert, an den Flachwasserstationen und in den Prielen, zum Teil auch auf dem hohen Watt, vom Schiff aus in korbförmigen Geräteträgern mit einer Meßhöhe von 0,3 bis 1,0 m über Grund abgesetzt. Auf den Wattstationen wurden neben diesen hauptsächlich dreipfählige, leicht an Ort und Stelle zusammensetzbare Träger verwendet. Beide Gerätetypen registrieren in konstant einstellbaren Zeitabständen (hier 10 Minuten) Strömungsrichtung und -geschwindigkeit auf Magnetband bzw. Film über einen Zeitraum von ungefähr sechs Wochen.

Die Vertikalprofilmessungen wurden mit vier übereinander ausgebrachten Aanderaa-Strömungsmeßgeräten vorgenommen. Als Meßhöhen wurden für das unterste Gerät Abstände von 1 m zur Sohle und für das oberste Gerät 2 m bis zur Wasseroberfläche festgelegt. (Abb. 2).

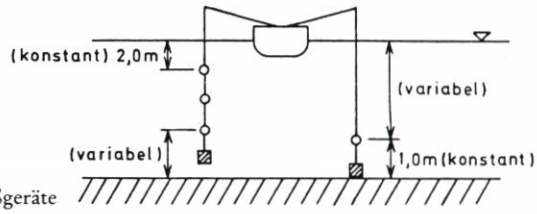


Abb. 2. Vertikalmessung, Anordnung der Meßgeräte

Die beiden anderen Geräte wurden so über die Tiefe verteilt, daß der gegenseitige Abstand aller vier Geräte bei Tidehochwasser etwa gleich war. Um die festgelegte Meßhöhe von 1 m über Grund möglichst gut einzuhalten, mußte entsprechend dem Wasserstand etwa alle zehn Minuten diese Höhe kontrolliert und nachreguliert werden.

Zur Ermittlung des Luftdruckes stehen für die Stationen Norderney, Bremerhaven, Cuxhaven und Helgoland Luftdruckablesungen von Quecksilber-Stationsbarometern bzw. Luftdruckregistrierungen von Aneroid-Barometern zur Verfügung. Auf dem Eidersperrwerk errichtete das Seewetteramt (SWA) eine zusätzliche Station. Durch Mittelwertbildung wurden vom SWA stündlich Luftdruckwerte für das Zentrum des INDB-Modells errechnet. Diese Genauigkeit reichte aus, da die örtlichen Luftdruckunterschiede im Testgebiet klein sind. Zur Gewinnung weiterer Daten wurden die Tonnenleger der WSV und sonstige für DEBEX '81 im Einsatz befindliche Fahrzeuge für die Meßperiode vom SWA mit Aneroid-Barometern ausgerüstet, womit während der Fahrten auf See alle drei Stunden eine Ablesung ausgeführt werden sollte. Das stationäre Netz für Windregistrierungen wurde durch die zusätzlich für DEBEX '81 eingerichteten Stationen Alte Mellum, Knechtsand und Trischen ergänzt (Abb. 1). Sie wurden aus Mitteln des BMFT beschafft.

Die Sensoren der Lichtschranken-Anemometer und der Windrichtungsanzeiger wurden auf mobilen pneumatisch ausfahrbaren 10 m langen Masten montiert. Versorgt wurden die Anlagen mit Batterien.

Die Betreuung der Naturmessungen erfolgte dezentralisiert unter regionaler Verantwortung für übersehbare zusammenhängende Gebiete. Daher wurde das Untersuchungsgebiet in entsprechende Bereiche aufgeteilt. Hiervon unberührt blieb die Betreuung des festen Pegelnetzes, die von den jeweils zuständigen Behörden vorgenommen wurde. Ebenso wurden die meteorologischen Daten für das gesamte Gebiet vom SWA gesondert gesammelt und dann nach der Auswertung unmittelbar an die HN-Gruppe des KFKI weitergegeben.

Der Aufbau der für DEBEX '81 erforderlichen zusätzlichen Geräte, das Einmessen, die Betreuung und der Abbau erfolgten durch die in einem Organisationsplan genannten Dienststellen, die nach eigenem Zeitplan die erforderlichen Arbeiten veranlaßten.

2.5 Praktische Erfahrungen

An den Messungen waren zehn Dienststellen gleichzeitig beteiligt, und etwa 15 Schiffe wurden eingesetzt. So konnten viele Erfahrungen auf dem Gebiet der Organisation gesammelt werden. Absprachen auf dem „kurzen Dienstweg" waren stets problemlos, und nur die gute Zusammenarbeit aller Beteiligten hat zum Gelingen des Projektes geführt. Man half sich gegenseitig mit Schiffen und Geräten aus und erreichte das gesetzte Ziel trotz knapper gewordener finanzieller Mittel und Einschränkungen im personellen Bereich.

Verschiedene Schwierigkeiten und Ausfälle haben erkennen lassen, daß für derartige Meßprogramme die Stationen doppelt besetzt werden sollten, um bei den später vielleicht festgestellten Abweichungen von Natur und Modell eine Absicherung der Naturmessungen zu ermöglichen. Spätere Interpretationsschwierigkeiten könnten somit auf ein Minimum begrenzt werden. Um Meßfehler möglichst klein zu halten, sollten die Geräte in kurzen Abständen überwacht werden (Überprüfung der Funktionsfähigkeit und Wechseln des Datenträgers). Damit wäre auch eine genaue Registrierung des Naturgeschehens während Sturmperioden – die Geräte können dann nicht betreut werden – gewährleistet.

Um längere durchgehende Zeitreihen der Tidewasserstände im Küstenvorfeld zu erhalten, ist die hier verwendete flache Gründung zum Abstellen der Pegel in Gestellen auf dem Meeresgrund nicht ausreichend. Die Pegel sind während schwerer Stürme mit hohem Seegang zum Teil mehrere Dezimeter abgesackt (eingesandet). Für zukünftige Messungen ist daher eine andere Gründung unumgänglich.

Bei einigen Schwimmerpegeln traten wiederholt Störungen und Ausfälle auf, z. B. durch Reißen des Schwimmerseiles, Stehenbleiben der Uhr, fehlerhafte Schreibfeder, so daß die Auswertung nicht für alle Zeiträume lückenlos erfolgen konnte. Die Fehlzeiten betrugen etwa 5 %.

Die Johne & Reilhofer-Hochseepegel haben überwiegend gut funktioniert. Nur ein Pegel ist ganz ausgefallen, drei hatten einige Fehlmessungen, die restlichen sieben Geräte haben einwandfrei gearbeitet. Von den sechs Aanderaa-Hochseepegeln sind zwei verlorengegangen, und zwei haben nicht funktioniert. Der Vergleich der Messungen beider Hochseepegeltypen an einer Position zeigte gute Übereinstimmung.

Die Dauerstrommeßgeräte erfordern durch die vielen sich bewegenden Teile eine intensive Betreuung durch sachverständiges und erfahrenes Personal. Dennoch konnten häufige Störungen nicht ausgeschlossen werden. Es traten sowohl bei den Aanderaa- als auch bei den Hydrowerkstätten-Geräten Fehler in der Richtungs- und Geschwindigkeitsmessung auf. Zwei Geräte gingen ganz verloren, zwei Messungen waren unbrauchbar. Etwa 25 % der Geräte sind ganz oder teilweise ausgefallen.

Auch bei den Windmeßanlagen gab es – bedingt durch den nur einwöchigen Probebetrieb

der Anlagen – Störungen, die aber immer sofort wieder behoben werden konnten, so daß die Geräte zufriedenstellend funktioniert haben. In einigen Fällen konnte wegen des schlechten Wetters die geplante zweiwöchige Betreuung der Pegel nicht erfolgen, so daß auf einem Pegelbogen bis zu 50 Tidekurven geschrieben waren. Dies machte eine Digitalisierung unmöglich.

3. Datenerfassung und Datenaufbereitung

3.1 Datenregistrierung

Ein Teil der Naturmeßdaten wurde zur Steuerung des HN-Modells benutzt, der andere Teil wurde zum Vergleich mit den Modellergebnissen herangezogen. Da die Meßgeräte nach verschiedenen Erfassungs- und Speichersystemen arbeiteten, mußten auch die Aufbereitungen nach unterschiedlichen Verfahren vorgenommen werden. Insgesamt waren vier voneinander abweichende Registrierarten eingesetzt. Der Luftdruck, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Wasserstände an der Küste und an den mobilen Stationen wurden mit Hilfe einer analogen Schreibregistrierung erfaßt. Die Ermittlung der Wasserstände an den seeseitigen Modellrändern erfolgte durch die bewährten Aanderaa-Pegel, die die Meßwerte auf digitalen Magnetbandkassetten speichern, und durch die neuentwickelten BMFT-Pegel, deren Speicher aus Halbleiterelementen bestehen. Aanderaa-Geräte mit Kassettenregistrierung wurden auch zur Messung der Strömung verwendet. Die vierte aufzubereitende Art der Meßwertaufzeichnung war die photographische. Nach dieser Methode arbeiten die Strommesser der Hydrowerkstätten. Die Umsetzung aller Daten auf rechnerkompatible Datenträger erforderte einen erheblichen Aufwand an Auswerte- und Prüfsoftware.

3.2 Meteorologische Parameter

Das HN-Modell benötigt meteorologische Daten in Form von Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Steuerung, da die dynamischen Vorgänge in einem Meeresgebiet hierdurch stark beeinflußt werden. Parameter wie Lufttemperatur, Niederschlag und Strahlung werden nicht benötigt.

Für den Zeitraum des Meßprogramms DEBEX stellte das Seewetteramt Hamburg errechnete Zeitreihen des Luftdrucks für vier Punkte und der Komponenten der Windgeschwindigkeit für 20 Punkte in der Inneren Deutschen Bucht zur Verfügung. Grundlage hierfür waren das allgemeine Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes und die Daten der zusätzlich aufgestellten Stationen. Die Werte jeder Zeitreihe lagen in stündlichen Abständen auf Magnetband gespeichert vor und konnten so nach geeigneter zeitlicher und räumlicher Interpolation direkt als Steuerwerte für die Modellrechnung verwendet werden.

3.3 Wasserstände

Die kontinuierliche Aufzeichnung der Wasserstände durch die stationären und mobilen Pegel als Kurvenzug erforderte zur rechnerkompatiblen Aufbereitung eine Umsetzung in diskretisierte, digitale Werte. Dies geschah mit Hilfe eines Digitalisierers und eines Elektronenrechners. Beide Geräte wurden von der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz,

Norderney, zur Verfügung gestellt. Die Abspeicherung der Werte der einzelnen Pegelkurven erfolgte in einem Zeitabstand von zehn Minuten mit zusätzlicher Berücksichtigung der Hoch- und Niedrigwasserstände.

Die Daten wurden zunächst auf ein Magnetband gegeben und dann unter Verwendung einer speziellen Umsetzsoftware in den Magnetplattenspeicher des Großrechners Siemens 7.760 der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe eingespeist. Danach erfolgte noch eine

Tabelle 1
Zusammenstellung der Zeiträume der digitalisierten und aufbereiteten Wasserstandsaufzeichnungen der Küstenpegel und mobilen Pegel

Helgoland	14. 9.	13.10 Uhr	–	25. 11.	24.00 Uhr MEZ
Wangerooge N	9. 9.	6.20 Uhr	–	25. 11.	23.20 Uhr MEZ
Bremerhaven	14. 9.	23.00 Uhr	–	25. 11.	24.00 Uhr MEZ
Blauort	11. 9.	13.50 Uhr	–	25. 11.	24.00 Uhr MEZ

	Zeitraum			
	2.–5. 10.	9.–14. 10.	23.–25. 11.	Bemerkungen
Wangerooge W	×	×	×	
Wangerooge O	×	×	×	
Mellumplate	×			Pegelausfall
Voslapp	×	×	×	
Wilhelmshaven 4. E.	×	×	×	
Alte Weser	×	×	×	
Hohe Weg	×	×		Pegelausfall
Scharhörn	×	×	×	
Großer Vogels.	×	×	×	
Cuxhaven	×	×	×	
Otterndorf				Pegelausfall, Pegeluhr stand
Osteriff	×	×	×	
Bullenloch	×		×	Pegelausfall
Friedrichskoog-Hafen	×	×	×	
Trischen-W	×	×	×	
Tertiussand	×		ab 24.11. 14.20 h	Pegelausfall, Schwimmernadelabriß
Büsum	×	×	×	
Steertloch	×	×		Pegelabbau 5. 11.
Speicherkoog N	×	×		Pegelausfall
Wesselburener Loch	×	bis 11.10. 24.00 h		Pegelausfall
Linnenplate	×	×		Pegelabbau 12. 11.
Eidersperrwerk	×	×	×	
Mellumbalje	×	×	×	
Sengwarder Südbalje	×	×		Pegelausfall, Pegeluhr stand
Hundebalje	×	×	×	
Wurster Arm	×			Pegelausfall
Robinsbalje	×	×		Pegelausfall ab 4. 11.
Dorumer Tief	×	×		Pegelabbau 16. 11.
Knechtsand	×	×		Pegelabbau 17. 11.
Sahlenburg. Tief	×	×		Pegelabbau 17. 11.
Buchtloch	×	×		Pegelabbau 16. 11.
Außeneider	×			Pegelausfall
Hohe Weg Watt	×		×	Pegelausfall, Abriß des Schwimmerseils

×: Messungen liegen vor

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Überprüfung auf Plausibilität und offensichtliche Meß- bzw. Ablese- oder Übertragungsfehler. So konnte es z. B. passieren, daß beim Digitalisieren hinter Kurvenschnittpunkten oder nach dem Pegelbogenende ein falscher Kurvenast abgefahren wurde. Auch der einheitliche Zeitbezug, bedingt durch den Wechsel von Sommer- auf Winterzeit Ende September, erforderte besondere Aufmerksamkeit.

Trotz des hohen Zeitaufwandes wurden die Pegelkurven von Helgoland, Wangerooge-Nord, Blauort und Bremerhaven für die gesamte DEBEX-Meßperiode digitalisiert, um eine Absicherung der Hochseepegelmessungen zu gewährleisten. Eine Zusammenstellung und Angaben über Zeitpunkt, Dauer und festgestellte Ursachen von Ausfällen der übrigen Pegelregistrierungen finden sich in Tab. 1. Von den vier geborgenen Aanderaa-Hochseepegeln enthielten nur zwei Kassetten verwertbare Aufzeichnungen (Tab. 2). Diese Geräte wurden

Tabelle 2
Zeiträume der Auslegung der Hochseepegel

H1	Gerät nicht gefunden	
H2	Registrierung unbrauchbar	
H3	14. 9. 81–28. 12. 81	
H4	Registrierung unbrauchbar	
H5	8. 9. 81–23. 12. 81	
H6	Gerät nicht gefunden	
H7	Registrierung unbrauchbar	
H8	22. 9. 81–19. 11. 81	
H9	22. 9. 81–19. 11. 81	
H10	22. 9. 81–19. 11. 81	
H11		} nicht ausgewertet
H12		
H13	29. 9. 81– 2. 12. 81	
H14	23. 9. 81– 2. 12. 81	
H15	22. 9. 81– 2. 12. 81	} Niedrigwasser teilweise verzerrt
H16	24. 9. 81– 2. 12. 81	

erst so spät gefunden, daß die Meßwerte nur teilweise als Steuerdaten für die Modellrechnung verwendet werden konnten. So wurden die Werte des Pegels H3 nur zur Simulation der sehr schweren Sturmflut vom 24. November 1981 herangezogen. Die Position des Pegels H5 war auch mit dem BMFT-Pegel H13 besetzt, so daß ein Vergleich der Registrierungen beider eingesetzter Systeme möglich war. Abb. 3 zeigt diese Gegenüberstellung für den Zeitraum vom 11. 10. bis 13. 10. 1981.

Die Umrechnung der von den Aanderaa-Pegeln gemessenen Druckdaten in Wasserstandsdaten übernahm das DHI. Die dabei erzeugten Zeitreihen mit einem Meßwertabstand von zehn Minuten wurden auf Magnetband gespeichert und zur Weiterverarbeitung an die BAW in Karlsruhe gegeben. Diese Aufbereitung bestand noch in der Berücksichtigung des zeitlich veränderlichen Luftdrucks und in der Beseitigung von offensichtlichen Meßfehlern.

Der Bearbeitungsweg für die Daten aus den BMFT-Pegeln verlief etwas anders. Nach dem Bergen der Geräte wurden die gesammelten Daten in der BAW-AK in Hamburg mit Hilfe einer PEDS-Einheit und einem angeschlossenen Tischrechner (HP 85) aus den Halbleiterspeichern ausgelesen und auf Minikassetten überspielt. Dabei konnte schon eine grobe Sichtung vorgenommen werden. Diese ergab, daß die Meßwerte des Pegels H7 gar nicht und die von H11, H15 und H16 nur teilweise auszuwerten und zu interpretieren waren. Eine Ursache der fehlerhaften Registrierung ließ sich bisher noch nicht ermitteln. Die fertig

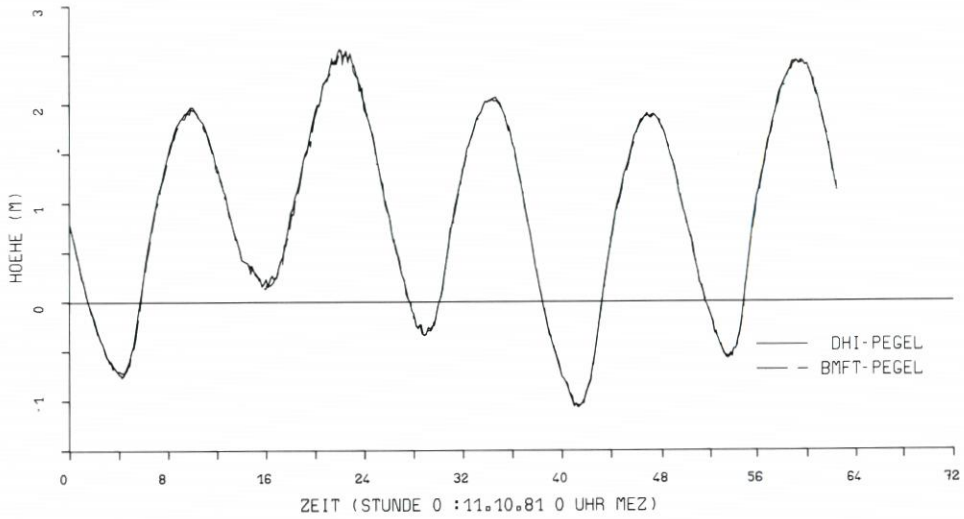


Abb. 3. Vergleich DHI – BMFT-Pegel

beschriebenen Kassetten wurden dann in den Plattenspeicher des BAW-Großrechners in Karlsruhe eingelesen. Bei einer graphischen Darstellung des gesamten Meßzeitraumes wurde erkennbar, daß sich das Bezugsniveau der einzelnen Geräte wegen meteorologischer und hydrologisch-morphologischer Einflüsse durchaus unterschiedlich verändern konnte, worauf noch eingegangen wird.

3.4 Stromgeschwindigkeiten

Die beiden Meßgerätetypen für die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit unterscheiden sich nicht nur in der Bauart; sie haben auch verschiedene Registriertechniken, die entsprechend andere Auswertemethoden erfordern.

Die Aanderaa-Strommesser speichern neben dem Betrag und der Richtung der Geschwindigkeiten auch die Temperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit in einer Magnetbandkassette. Beim WSA Cuxhaven ist ein Programm vorhanden, mit dem die Daten dieser Kassette gesichtet und aufbereitet werden können (Miessner, 1979). Diese Arbeit wurde mit Hilfe eines speziell programmierten Tischrechners und einer angeschlossenen Ploteinheit bewältigt.

Nach der Übertragung der Meßwerte von den Kassetten auf den Plattenspeicher des BAW-Großrechners war aus technischen Gründen ein zusätzlicher Arbeitsgang erforderlich. Für das Zeichenprogramm, über das der graphische Vergleich zwischen Naturmessung und Modellrechnung erstellt wurde, mußten die Daten als in Form und Inhalt einheitliche Zeitreihen vorliegen. Daher wurden die Daten der gewählten Zeiträume an einem Sichtgerät zunächst einer Kontrolle und dann einer „manuellen" Anpassung unterzogen, so daß ein glatter Kurvenverlauf in allen Meßgrößen entstand. Dieser Eingriff bezog sich durchschnittlich auf jeden zehnten Meßwert.

Die auf einem photographischen Film festgehaltenen Meßwerte der Hydrowerkstätten-Strommesser wurden bei der BAW-AK aufbereitet. Die automatische Ablesung der Filme, die durch den verwendeten Code bedingte Diskretisierung der Meßwerte und deren Genauigkeit

sind von SIEFERT et al. (1980) beschrieben worden. Die Korrektur der Ablesefehler, die ihre Ursache in einer unzureichenden oder ungleichmäßigen Filmbelichtung hatten, konnte aufgrund eines Erstausdrucks vorgenommen werden. Die so bearbeiteten Werte wurden dann, nach benötigten Zeiträumen getrennt, in gesonderte Dateien überschrieben, wo sie für den Vergleich mit den Modellrechnungen zur Verfügung standen.

In Tab. 3 sind alle Zeiträume der Strömungsmessungen zusammengestellt, die für den Vergleich mit den Modellergebnissen aufbereitet worden sind.

Tabelle 3
Ausgewertete und verglichene Zeiträume der Geschwindigkeitsmesser

	2.–5. 10.	9.–14. 10.	23.–25. 11.
F1	×	×	×
F2	×	×	×
F3	unbrauchbare Aufzeichnung		
F4	Messung unbrauchbar		Gerät verloren
F5	×	×	Gerät eingezogen
F6	nur B	nur B	Gerät eingezogen
F7	×	×	Gerät eingezogen
F8	×	unbrauchbar	nur R
F9	×	×	Gerät eingezogen
F10	unbrauchbare Aufzeichnung		Gerät verloren
F11	×	×	Gerät eingezogen
W1	×	×	nur R
W2	×	×	Gerät abgebaut
W3	×	×	Gerät abgebaut
W4	×	×	×
W5	×	Gerät nicht aufgebaut	
W6	×	Gerät nicht aufgebaut	

B: Betrag der Strömung
R: Richtung der Strömung

Die Vertikalprofilmessungen wurden alle mit je vier Aanderaa-Geräten vorgenommen. Der Ablauf der einzelnen Auswerteschritte vollzog sich in der bereits beschriebenen Reihenfolge. Die Messungen erfolgten an verschiedenen Terminen und umfaßten etwa eine Tide. Nur an Station V3 lagen die Geräte über drei Tiden mit einer Unterbrechung von ungefähr 1,5 Stunden aus (Tab. 4).

Tabelle 4
Zeiträume der Vertikalprofilmessungen mit je 4 Aanderaa-Geräten

V1	15. 10.	7.00–20.00 Uhr	alle Aufzeichnungen fehlerhaft
V2	29. 09.	7.40–20.40 Uhr	
V3	28./30. 09.	18.00/ 8.00 Uhr	keine Messung am Boden
V4	15./16. 10.	18.40/10.10 Uhr	keine Messung an der Oberfläche
V5	29. 09.	7.00–22.00 Uhr	
V6	19. 10.	10.10–16.40 Uhr	keine Messung in $^1/_3$ Höhe

4. Vergleich Natur – Modell

4.1 Das HN-Modell INDB

Das zweidimensionale numerische Modell für die Innere Deutsche Bucht basiert auf den hydrodynamischen Differentialgleichungen, die mit einem expliziten Differenzenverfahren (HANSEN, 1956) gelöst werden. Dieses Modell gehört zu dem KFKI-Modellsystem für die Küsten der Deutschen Bucht, das bereits beschrieben worden ist (HN-Gruppe, 1983). Der Ortsschritt beträgt etwa eine Seemeile (= 1852 m) und der Zeitschritt 50 Sekunden.

Das Trockenfallen und Überfluten der Wattflächen wird im Modell durch bewegliche Ränder simuliert, die sich mit der Verlagerung der Wasserlinie ändern. Ein Wassertransport von einem Gitterpunkt zum anderen wird hierbei nur zugelassen, wenn der Wasserspiegel oberhalb des Wattniveaus liegt. Bei tiefer liegendem Wasserspiegel bildet die jeweilige Wasserlinie einen geschlossenen Rand, über den hinweg kein Wassertransport erfolgen kann (BECKMANN, 1981).

4.2 Modellrechnungen

Aus den während des Meßzeitraumes von DEBEX '81 registrierten rund 100 Tiden wurden Zeiträume ausgewählt, in denen die verschiedenen Typen der Tiden ausgeprägt auftraten und für die dann eine Modellrechnung mit anschließendem Naturvergleich vorgenommen wurde. Den Rechnungen für die Vergleichszeiträume wurden jeweils zwei Einschwingtiden vorgeschaltet.

Gezeitenverhältnisse mit geringem meteorologischen Einfluß herrschten am 2./3. Oktober 1981. Der Wind wehte am 2. 10. von Mittag bis Mitternacht mit 1 Bft aus Südost, später mit 3 Bft, ab 3. 10. morgens aus Süd 4 bis 5 Bft.

Erniedrigte Tiden traten in der Deutschen Bucht bei Winden aus östlichen Richtungen auf. Am 3. 10. 1981 trat das zweite Niedrigwasser am Pegel Cuxhaven rund 50 cm niedriger als vorhergesagt (Gezeitentafel) ein. Anschließend, am 4. 10. 1981, drehte der Wind plötzlich von Süd mit 5 Bft auf West mit 6 bis 7 Bft, wodurch sich der Tidenfall in Cuxhaven auf 1,86 m verringerte (vorhergesagt: 2,80 m).

Die drei Typen, Normaltide, erniedrigte Tide und Tide bei starker Winddrehung, sind im Vergleichszeitraum vom 2. 10. 1981 bis 5. 10. 1981, 14.00 MEZ, enthalten.

Für den Typ erhöhte Tiden bzw. leichte Sturmfluten wurde der Vergleichszeitraum vom 9. 10. 1981, 13.00 MEZ, bis 14. 10. 1981, 24.00 MEZ, ausgewählt. Für diesen Zeitraum wurde auch eine Modellrechnung ohne Berücksichtigung des Windschubes an der Wasseroberfläche ausgeführt, um die Wirkung des lokalen Windes zu untersuchen.

Durch wetterbedingte Verzögerungen beim Einholen der Meßgeräte lagen während der Sturmflut am 24. November 1981 noch einige Hochseepegel auf dem Rand des INDB-Modells aus, so daß erstmals die Möglichkeit bestand, eine Sturmflut mit Werten des offenen Randes modellmäßig zu behandeln. Diese schwere Sturmflut erreichte am Pegel Hamburg-St. Pauli mit NN + 5,81 m den zweithöchsten je gemessenen Wasserstand. Die Berechnung der Sturmflut vom 24. November 1981 erfolgte für die Zeit vom 23. 11. 1981, 16.00 MEZ, bis 25. 11. 1981, 24.00 MEZ.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

4.3 Modellsteuerung

4.3.1 Wasserstände an den offenen Rändern

Auf den offenen Rändern des Modells (Seeränder, Flußmündungen) werden Wasserstände vorgegeben (Abb. 1). Die mit den Hochseepegeln erfaßten Daten sind Druckwerte am Meeresboden. Durch Berücksichtigung der Dichte der Wassersäule und des zeitlich veränderlichen Luftdruckes an der Wasseroberfläche werden die Druckkurven in Wasserstandskurven umgerechnet. Die Umrechnung erfolgte unter der Annahme einer mittleren Dichte von 1023 kg/m^3 und der Verwendung von stündlichen Luftdruckwerten, die vom Seewetteramt Hamburg anhand von Messungen berechnet wurden.

Die aus den Druckaufzeichnungen der Hochseepegel errechneten Wasserstandswerte mußten für die Modellsteuerung noch auf ein einheitliches Referenzniveau bezogen werden, das mit Hilfe der Aufzeichnungen der drei Küstenpegel Wangerooge, Helgoland und Blauort bestimmt wurde, deren Höhenlage bekannt ist. Der Höhenanschluß der übrigen Hochseepegel erfolgte durch Mittelwertbildung der Wasserstände gleicher Tideabschnitte und der Annahme einer linearen Verteilung des mittleren Windstaus zwischen Wangerooge-Nord und Helgoland sowie zwischen Helgoland und Blauort. Der mittlere Windstau ist hier definiert als Differenz des mittleren Wasserstandes über einen bestimmten Zeitabschnitt und der entsprechenden Höhenlage des mittleren Wasserstandes der Normaltide. Die auf dem Westrand des INDB-Modells zwischen Wangerooge-Nord und Helgoland „eingepaßten" Hochsee-Pegelmessungen H10, H13 und H14 sind in Abb. 4 für eine Tide am 2. Oktober 1981 dargestellt. An den Flußmündungen der Weser und Elbe wurden die gemessenen Wasserstände der Pegel Bremerhaven und Osterriff vorgegeben.

4.3.2 Windschub an der Wasseroberfläche

Vom Seewetteramt Hamburg zur Verfügung gestellte Zeitreihen der stündlichen Windkomponenten in 20 Punkten der Inneren Deutschen Bucht (Abb. 5) bildeten die Basis für die Berechnung des Windschubes an der Meeresoberfläche für jeden wasserführenden Punkt. Diese stündlichen Windfelder wurden auf der Grundlage des allgemeinen Meßnetzes des Deutschen Wetterdienstes erstellt, das während des Meßzeitraumes von DEBEX '81 durch zusätzliche meteorologische Meßstationen verdichtet wurde.

4.4 Ergebnisse des Vergleichs

Für den Vergleich der Modellergebnisse mit Naturmessungen wurden die Wasserstände durch 16 Hochseepegel, 38 Küstenpegel und 12 mobile Pegel registriert. Die Strömungen wurden durch 11 Flachsee-Strommesser, 6 Wattstrommesser und durch 6 Vertikalprofilmessungen erfaßt (Abb. 1). Eine Zusammenstellung der verwendbaren Aufzeichnungszeiträume an den Meßstationen ist in den Tabellen 1 bis 4 enthalten.

4.4.1 Wasserstände

Die gemessenen und errechneten Wasserstände für die Vergleichszeiträume sind für ausgewählte Pegel in Ganglinienform in den Abbildungen 6 bis 18 und 21 bis 30 dargestellt.

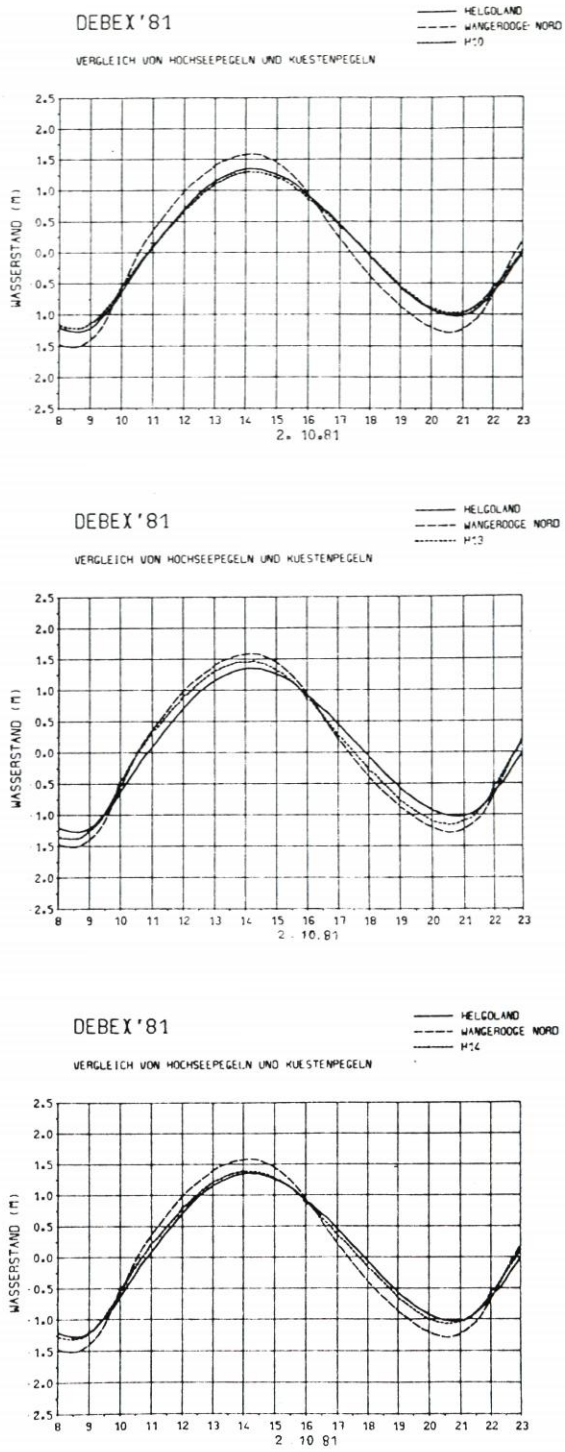


Abb. 4. „Eingepaßte" Hochseepegelmessungen am Westrand des Modells

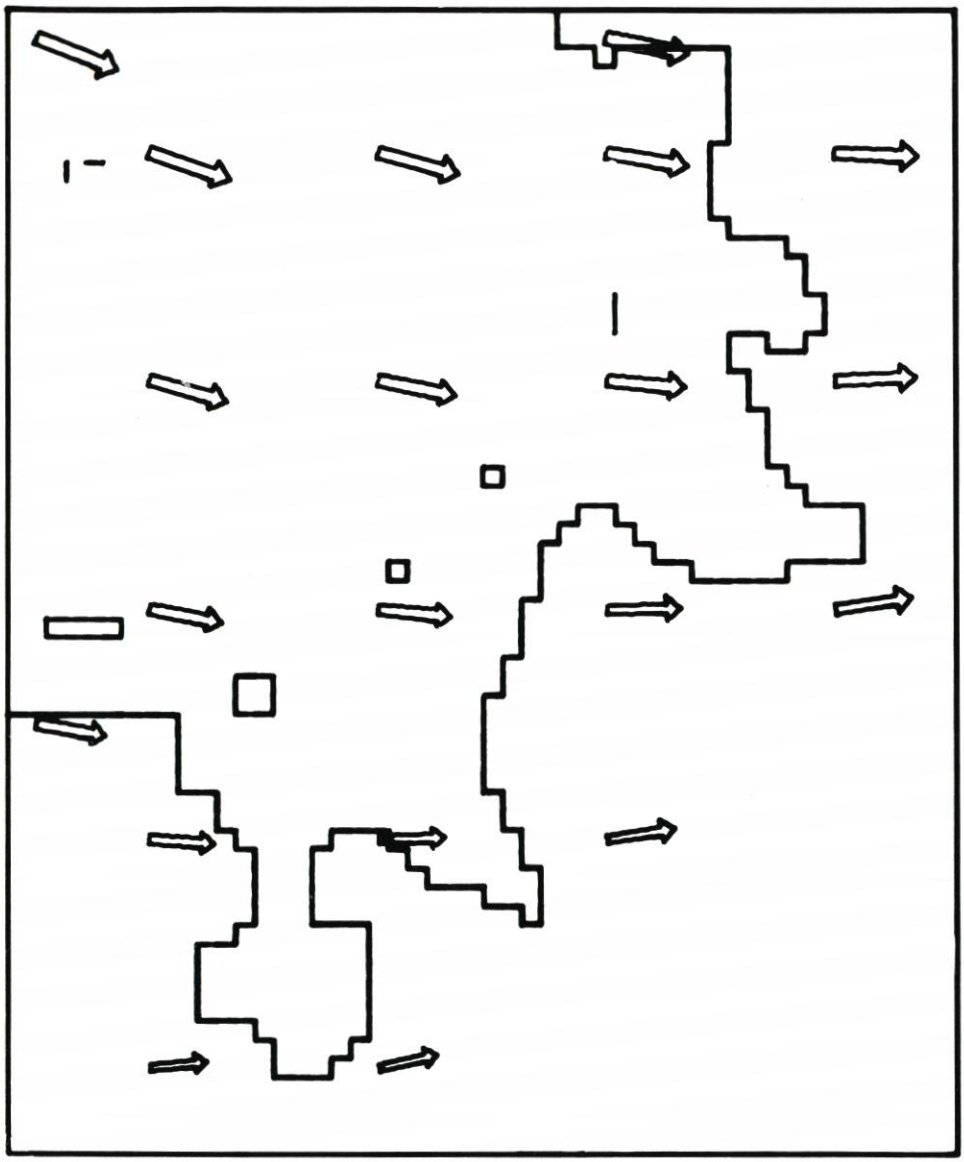


Abb. 5. Windverteilung in der Inneren Deutschen Bucht am 24. 11. 1981, 14.00 (nach SWA)

Für den Zeitraum vom 2. 10. bis 5. 10 1981, der die Typen Normaltide, erniedrigte Tide und Tide bei starker Winddrehung enthält, läßt sich eine im allgemeinen gute Übereinstimmung der Scheitelwerte in Höhe und Zeit feststellen (Abb. 6 bis 10). Nur bei den Pegeln vor der Dithmarscher Küste und bei den Pegeln an schmalen Rinnen sind größere Abweichungen in den Eintrittszeiten der Niedrigwasser erkennbar. Dies dürfte an dem besonders bei tieferen Wasserständen sich bemerkbar machenden erschöpften Auflösungsvermögen des Modellgitters für die vorhandenen Bodenstrukturen liegen. Durch Verfeinerung des Gitters in solchen

Gebieten, wie es für die Lokalmodelle vorgesehen ist, können diese Differenzen sicherlich verringert werden.

Bei erhöhten Wasserständen, die im Vergleichszeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 auftraten (Abb. 11 bis 18), gewinnt die richtige Erfassung der Windwirkung an der Wasseroberfläche für die Reproduktionsgüte der Bewegungsvorgänge an Bedeutung. Andererseits können an das Auflösungsvermögen des Modellgitters geringere Anforderungen gestellt werden. Dies ist beim Vergleich der Abbildungen 9 und 17 bei den Eintrittszeiten der erhöhten Niedrigwasser erkennbar.

Die Wirkung des lokalen Windes sei durch zwei Modellrechnungen anhand der Pegel Wilhelmshaven 1. Einfahrt (K9) und Eidersperrwerk Außenpegel (K38) aufgezeigt (Abb. 19 u. 20). Die Rechnung für den Zeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 wurde zum einen mit und zum anderen ohne Berücksichtigung des Windschubes an der Wasseroberfläche ausgeführt. In den Abbildungen 11 bis 18 sind die Ergebnisse mit den Messungen verglichen. Es zeigt sich z. B., daß durch Berücksichtigung des lokalen Windes am Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8) das zweite Hochwasser verspätet und etwas erniedrigt eintritt, während am Pegel Eidersperrwerk Außenpegel (K38) das zweite Hochwasser um mehr als 50 cm erhöht wird. Diese Untersuchung läßt erkennen, welch große Bedeutung dem meteorologischen Input für die Modellrechnung von Sturmfluten zukommt.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserstände der Sturmflut vom 24. November 1981 (Abb. 21 bis 30) stellt überzeugend die hohe Leistungsfähigkeit des HN-Modells für Sturmflutuntersuchungen dar. Insbesondere wird die Möglichkeit erschlossen, durch Variation der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen fundierte Aussagen über die räumliche Verteilung der Wasserstandsänderungen zu erhalten und durch Kombination ungünstiger Ereignisse die örtliche Verteilung hoher Wasserstände herauszuarbeiten.

4.4.2 Strömungen

In den Abbildungen 31 bis 46 sind die Ganglinien der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten an einigen Stationen für die Vergleichszeiträume gegenübergestellt. Da beim Vergleich der Strömungen zu berücksichtigen ist, daß die gemessenen Geschwindigkeiten Punktmessungen, die berechneten aber die mittleren Geschwindigkeiten in einer Wassersäule mit der Grundfläche einer Masche des Rechengitters sind, sind für einige Meßstationen, an denen auch Vertikalprofile gemessen wurden, die gewonnenen Strömungsganglinien in vier Tiefenhorizonten mit dargestellt. Es ist allerdings zu beachten, daß die Vertikalprofilmessungen, die etwa eine Tideperiode erfassen, nicht innerhalb der Vergleichszeiträume liegen.

Der Strömungsvergleich für eine Normaltide, eine erniedrigte Tide und eine Tide bei starker Winddrehung ist in den Abbildungen 31 bis 36 für den Zeitraum vom 2. 10. bis 5. 10. 1981 vorgenommen. Im tiefen Wasser (Stationen F1 und F2) stimmen die gemessenen und errechneten Geschwindigkeiten und Richtungen gut überein. Abweichungen sind darin begründet, daß die Strömung in Bodennähe gemessen wurde, wo durch Bodenreibung im allgemeinen geringere als über die Vertikale gemittelte Geschwindigkeiten auftreten. Besonders bemerkenswert ist die Übereinstimmung im Verhältnis des Flutstroms zum Ebbstrom. Das Auflösungsvermögen des Modells für die topographischen und hydrodynamischen Verhältnisse ist offensichtlich auch für hohe Ansprüche voll ausreichend. In den tiefen Rinnen der Weser und Elbe (Stationen F5 und F7) wird die Strömung stark durch die Bodenstrukturen geprägt, wodurch höhere Anforderungen an das Auflösungsvermögen des Modells gestellt

werden. Da bei der Diskretisierung der Tiefen der Verlauf der Rinnen im Modellraster berücksichtigt werden muß, können örtliche Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Strömungsrichtungen auftreten, wie dies bei der Station F5 der Fall ist. Es können die in Bodennähe gemessenen Geschwindigkeiten größer sein, als die über die Maschenweite (Gitterabstand) gemittelten. Mit Einbeziehung der in den Abbildungen 33 und 34 dargestellten Vertikalprofilmessungen an den Stationen F5 (V2) und F7 (V5) kann auch hier in den tiefen Rinnen gute Übereinstimmung festgestellt werden. An den Strömungsmeßstationen auf dem Watt (W1 und W3) fällt der Vergleich zufriedenstellend aus. Die gegenüber der Rechnung kürzere Überflutungszeit bei der Messung ist durch die Gerätehöhe über dem Wattboden bedingt.

Die Strömungen bei erhöhten Tiden, wie sie für den Zeitraum vom 9. 10. bis 14. 10. 81 an den Stationen F1, F2, F5, F7, W1 und W3 berechnet bzw. gemessen wurden, sind in den Abbildungen 37 bis 42 dargestellt. Sie zeigen, daß das Modell die Strömungsverhältnisse in der Natur in ihrem charakteristischen Verlauf durchaus zufriedenstellend wiedergeben kann.

Während der schweren Sturmflut am 24. November 1981 lagen nur noch wenige Geräte in ihren Positionen und lieferten brauchbare Aufzeichnungen. Die Abbildungen 43 bis 46 zeigen die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Strömungen für die Zeit vom 23. 11. bis 25. 11. 1981 an den Stationen F1, F2, F8 und W4.

In den Abbildungen 47 bis 51 wird ein Überblick der berechneten Strömungsverteilung in der Inneren Deutschen Bucht für verschiedene Tidephasen während einer Normaltide (2. 10. 81) gegeben. Um 13.00 Uhr (Abb. 47) herrscht in der gesamten Inneren Deutschen Bucht Flutstrom. Drei Stunden später, um 16.00 Uhr (Abb. 48), hat der Ebbstrom im seewärtigen Bereich und in der Jade eingesetzt, während in der Weser bei Bremerhaven und im Elbeästuar das Wasser noch aufläuft. Es strömt von der Jade über den Rücken des Hohen Weges in die Weser. Um 19.00 Uhr (Abb. 49) herrscht überall Ebbstrom. Um 21.00 Uhr (Abb. 50), zur Zeit des Niedrigwassers, sind große Wattflächen trockengefallen. Um 22.00 Uhr (Abb. 51) setzt dann erneut vom Westrand her der Flutstrom ein.

5. Zusammenfassende Beurteilung

Die im vorherigen Abschnitt für eine Reihe von Vergleichen dargestellte gute Übereinstimmung von Naturmessung und HN-Rechnung berechtigt zu der Aussage, daß das hier entwickelte HN-Modell zur Berechnung von Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten auch bei einer Sturmflut gut geeignet ist. Die HN-Rechnung führt zu Lösungen, die sich von den gemessenen Ganglinien der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten nur wenig unterscheiden. Dies gilt insbesondere für die Wasserstände. Die Abweichungen von gemessenen und gerechneten Ganglinien können verschiedene Ursachen haben, die von Fall zu Fall gesondert zu ergründen sind.

In der Nähe der Einsteuerung und im tiefen Wasser werden für die Zeit vom 2. 10. bis 5. 10. 1981 – Normaltide, erniedrigte Tide und Tide mit Winddrehung – sowie für die leichte Sturmflut vom 9. 10. bis 14. 10. 1981 für Wasserstand und Strömung sehr gute Ergebnisse erzielt. Auch die Sturmflut vom 24. 10. 1981 zeigt für die Wasserstände sehr gute Ergebnisse im tiefen Wasser. Diese gute Übereinstimmung auch in der Nähe des Wattgebietes läßt auf gute Ergebnisse in den Watten schließen.

Es ist somit festzustellen, daß im tiefen Wasser und an den Einsteuerrändern das Modell naturähnlich ist. – Im Wattgebiet zeigt der Vergleich der Wasserstände für die Normaltide als auch für die leichte sowie die schwere Sturmflut erstaunliche Ergebnisse: Es ist teilweise kein

Unterschied zwischen gemessener und berechneter Kurve festzustellen. Die Ganglinien der Strömungsbeträge zeigen im Wattgebiet befriedigende Übereinstimmungen. Es zeigt sich z. B., daß die berechneten Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeiten im allgemeinen etwas höher liegen als die gemessenen. Das ist auch richtig, da die Meßgeräte die Strömungsgeschwindigkeit am Boden messen, während das HN-Modell eine über die Tiefe gemittelte Geschwindigkeit liefert, die im allgemeinen höher ist als der Naturmeßwert. Der Vergleich der Richtungen führt zu weniger guten Ergebnissen, weil sie – je nach Lage des Meßgerätes – von Natur aus ziemlich instabil sind. Wird die Ganglinie der in der Natur gemessenen Richtungen geglättet, so stimmt diese dann gut mit der errechneten überein. Bei der Sturmflut konnte nur der Wattstrommesser W4 zum Vergleich herangezogen werden.

Selbst im Wattengebiet, wo das Modell nur eine geringe Auflösung hat, zeigt sich bei Normaltide und bei der leichten Sturmflut eine gute Übereinstimmung der Wasserstände und eine befriedigende der Strömungen. Hier bewährt sich die genaue und überlegte Darstellung der Morphologie im HN-Modell.

Insbesondere die Stromkarten zeigen auf, daß das Modell zumindest bezüglich der inneren Logik naturähnlich ist. Quantitativ läßt sich zu den Stromkarten wenig sagen, da nicht in allen oder mindestens annähernd allen Gitterpunkten des Modells die Strömung gemessen werden konnte.

Insgesamt ist festzustellen, daß es gelungen ist, für eine Normaltide, erniedrigte Tide sowie eine leichte Sturmflut die Wasserstände und Strömungen mit guter bis sehr guter Genauigkeit durch ein HN-Modell zu berechnen. Die guten Ergebnisse lassen vermuten, daß sich auch mit den beiden anderen Regionalmodellen – Ostfriesisches Wattenmeer und Nordfriesland sowie dem Basismodell Deutsche Bucht – ähnlich gute Ergebnisse erzielen lassen. Damit steht ein Modellsystem für die Deutsche Bucht zur Verfügung, mit dem z. B. Vorhaben von Wasserbauverwaltungen behandelt werden können.

Durch das Meßprogramm DEBEX steht erstmalig ein großes Kollektiv von Wasserstands- und Strömungsdaten für eine Normaltide, leichte Sturmflut und – mit Einschränkungen – auch für eine schwere Sturmflut in einem größeren Gebiet innerhalb der Deutschen Bucht zur Verfügung. Diese wertvolle Ansammlung von Daten kann für verschiedene Zwecke weiterverarbeitet werden. Die auf dem Rand des Gebietes liegenden Hochseepegel H1 bis H16 könnten z. B. weiterhin zur Steuerung für eine konkrete Anwendung sowie zur Weiterentwicklung des HN-Modells benutzt werden.

Für Aufgaben innerhalb der Wattengebiete sind allerdings gegenüber den Regionalmodellen feiner struktuierte Lokalmodelle erforderlich. Zur Steuerung, Überprüfung und Entwicklung solcher Lokalmodelle können die von den mobilen Pegeln P1 bis P12 und den Wattstrommessern W1 bis W16 gelieferten Daten, als auch diejenigen in den verschiedenen Dienststellen der Wasserbauverwaltungen des Bundes und der Länder mitverwandt werden.

Im Programm DEBEX '81 konnte nachgewiesen werden, daß die hydrodynamischen Vorgänge mit HN-Modellen gut erfaßt werden können. Diese Feststellung ermutigt dazu, bei Bauvorhaben im Seegebiet, aber auch für grundsätzliche Untersuchungen im Zusammenhang etwa mit der Tidephysik, der Ausbreitung von Schadstoffen sowie zur Ergänzung übergeordneter morphologischer Vorgänge, sich stärker als bisher dieses Verfahrens zu bedienen. Die Güte der KFKI-Modellfamilie sollte Veranlassung geben, sie – dem wissenschaftlichen Fortschritt folgend und mit Berücksichtigung möglicher Änderung der Randbedingungen – auf dem jeweils gültigen Stand zu halten. Die im Zusammenhang mit der Entwicklung der Modelle und mit DEBEX gewonnenen Erfahrungen, die im einzelnen darzustellen den Rahmen dieser Arbeit gesprengt haben würde, werden auch bei anderen Modellen befruchtend wirken können. Wenn auch die Modelle bisher für konkrete Aufgaben möglicher

Anwender noch nicht genutzt worden sind, so haben sie schon jetzt neue Einblicke in die Naturvorgänge der Deutschen Bucht erbracht.

6. Schriftenverzeichnis

Beckmann, M.: Numerical Modelling of Shallow Water Areas. Mitt. d. Institus f. Meereskunde d. Universität Hamburg, 26, 1981.

Beckmann, M.: HN-Modellrechnungen zum Naturmeßprogramm DEBEX '81. INTERMARITEC, Hamburg, 1982.

Göhren, H.: Ein neues Dauerstromgerät für den Einsatz im Flachwasserbereich. Kurzbericht, Die Wasserwirtschaft, H. 8, 1964.

Hansen, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus. Vol. 8, 3, 1956.

HN-Gruppe: Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht. – Abschlußbericht der Projektgruppe HN-Modelle des KFKI. Die Küste, H. 38, 1983.

Luck, G. u. Schäfer, P.: Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Küste, H. 35, 1980.

Miessner, F.: Fortschritte beim Messen und Auswerten gewässerkundlicher Daten. Kurzbericht, DGM, H. 1, 1979.

Rohde, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.

Rohde, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 und 1981. Die Küste, H. 37, 1982.

Siefert, W., Fahse, H., Miessner, F., Richter, H.-H., Taubert, A. u. Wieland, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 35, 1980.

Wiese, H.-W.: Messungen der Wasserstände in der Deutschen Bucht während DEBEX '81 – Erste Ergebnisse mit neuen Hochseepegeln. INTERMARITEC, Hamburg, 1982.

Wiese, H.-W.: DEBEX '81 – Ein Meßprogramm zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des HN-Modells „Innere Deutsche Bucht" des KFKI. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1981, Bd. XXXIII, 1983.

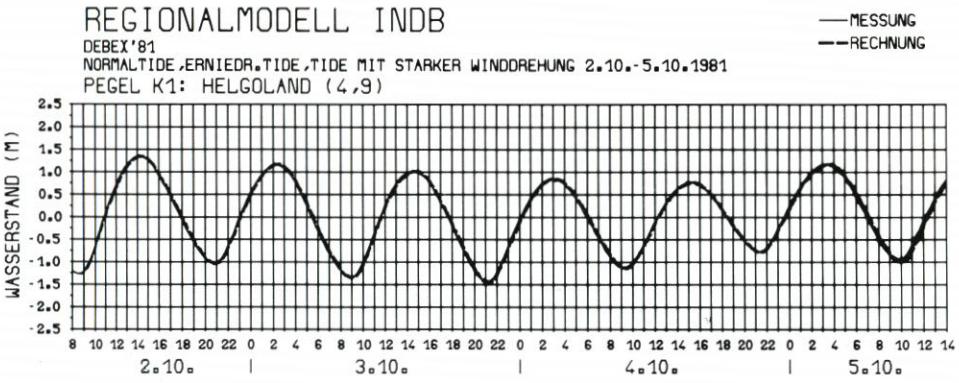


Abb. 6. Pegel Helgoland (K1)

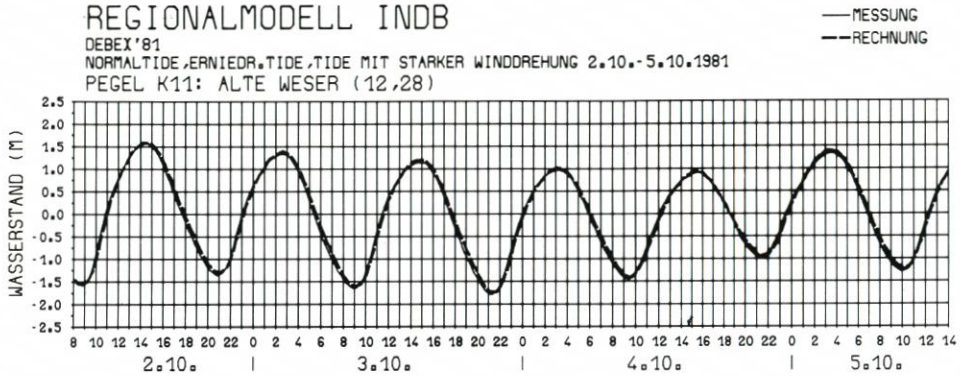


Abb. 7. Pegel Alte Weser (K11)

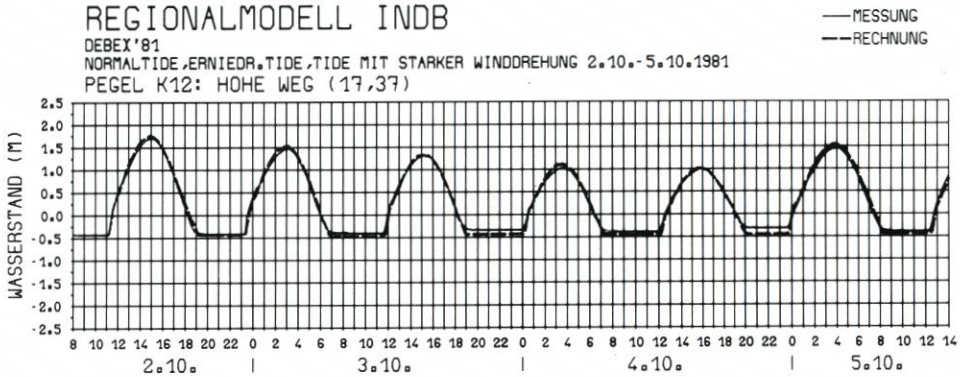


Abb. 8. Pegel Hohe Weg (K12)

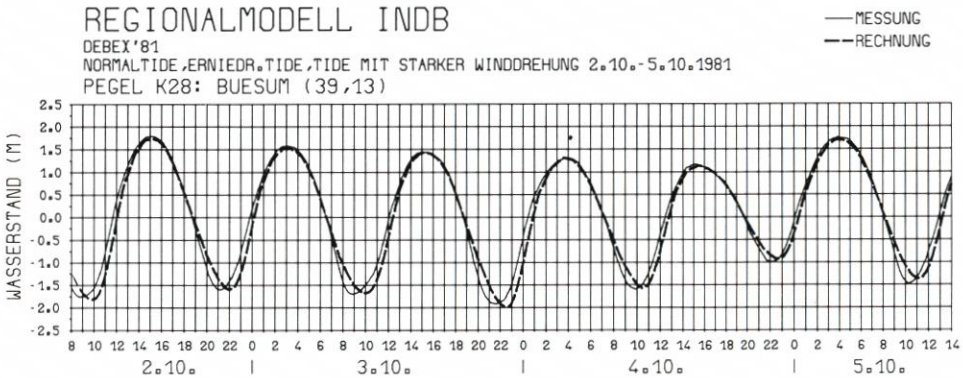


Abb. 9. Pegel Büsum (K28)

Die Küste, 40 (1984), 1-318

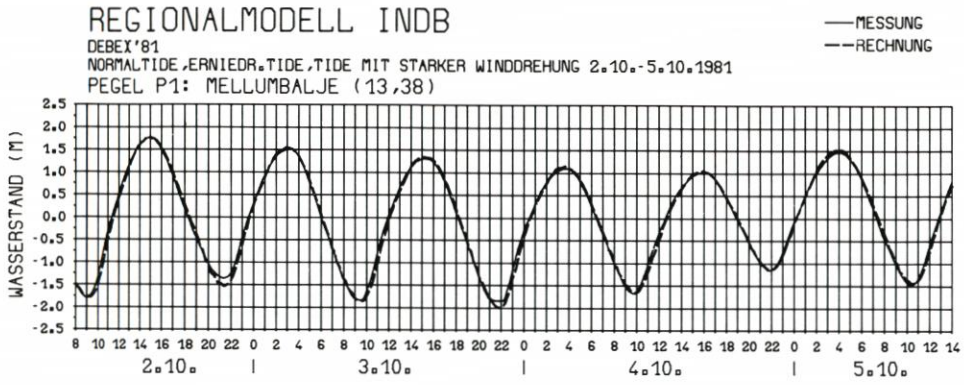


Abb. 10. Pegel Mellumbalje (P1)

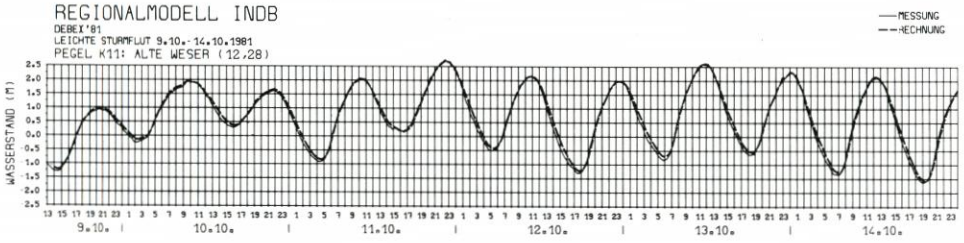


Abb. 11. Pegel Alte Weser (K11)

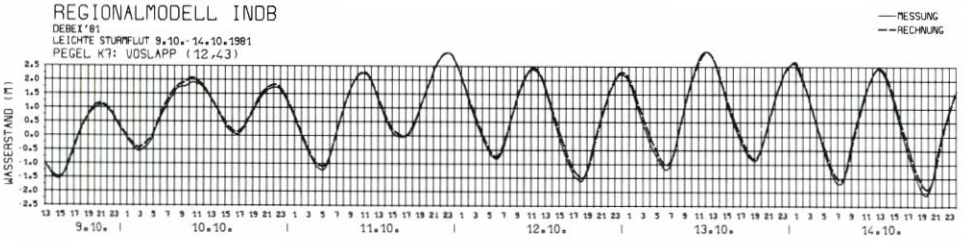


Abb. 12. Pegel Voslapp (K7)

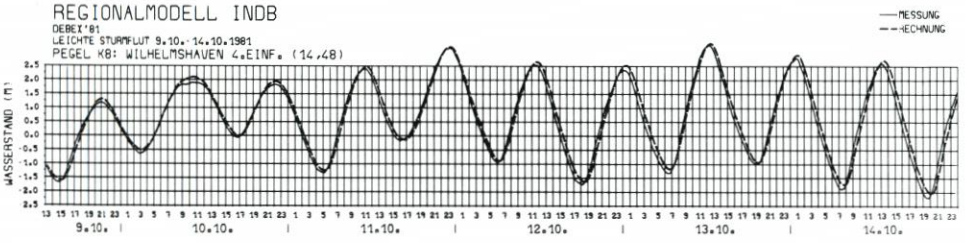


Abb. 13. Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8)

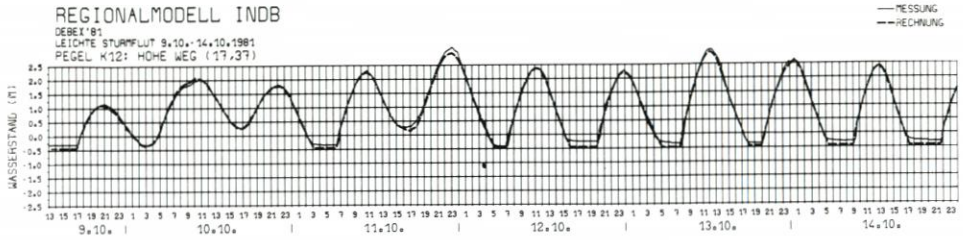


Abb. 14. Pegel Hohe Weg (K12)

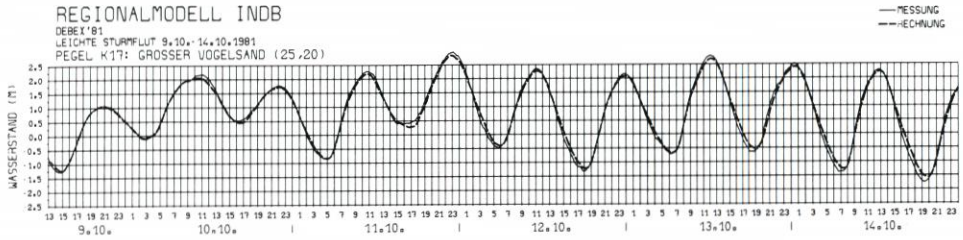


Abb. 15. Pegel Gr. Vogelsand (K17)

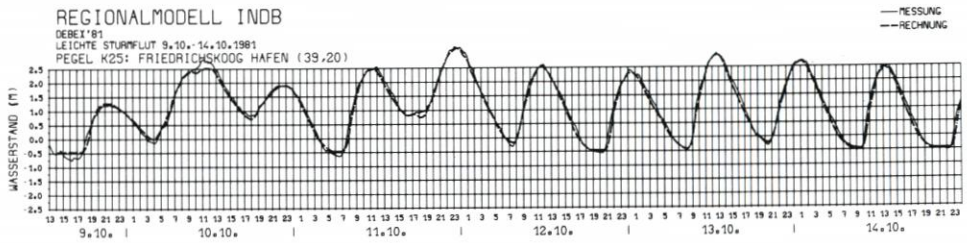


Abb. 16. Pegel Friedrichskoog Hafen (K25)

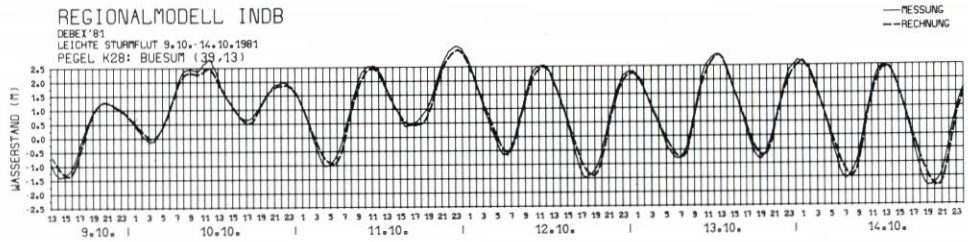


Abb. 17. Pegel Büsum (K28)

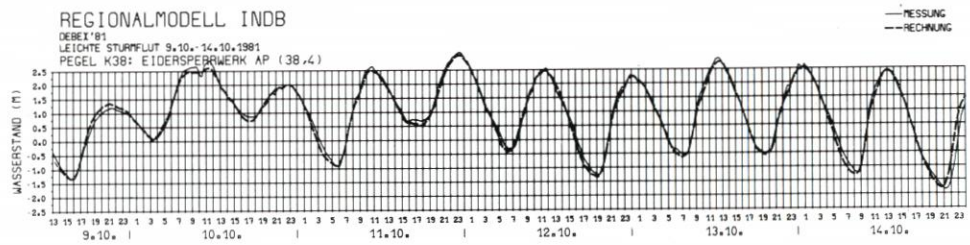


Abb. 18. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)

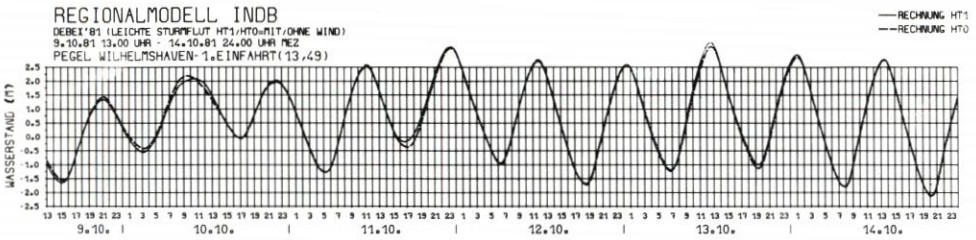


Abb. 19. Pegel Wilhelmshaven 1. Einfahrt (K9)

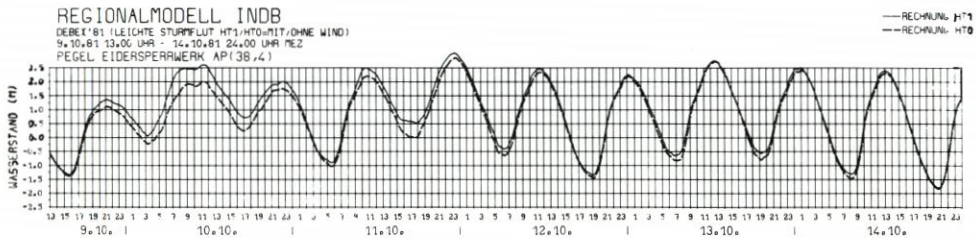


Abb. 20. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)

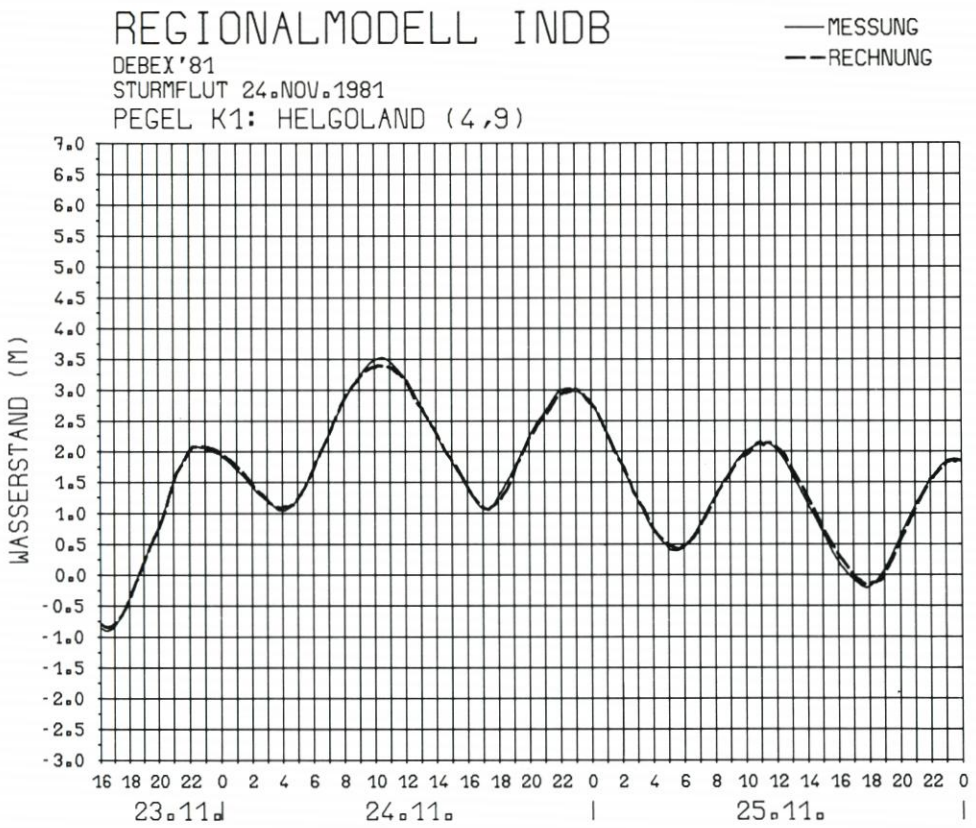


Abb. 21. Pegel Helgoland (K1)

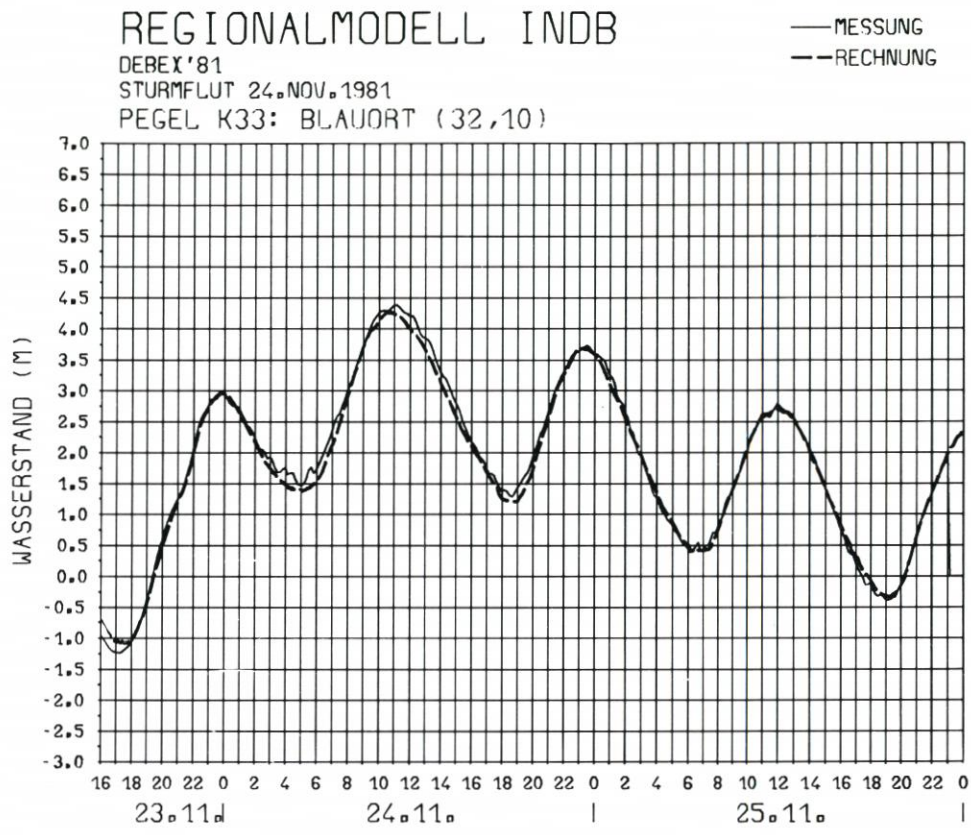


Abb. 22. Pegel Blauort (K33)

Die Küste, 40 (1984), 1-318

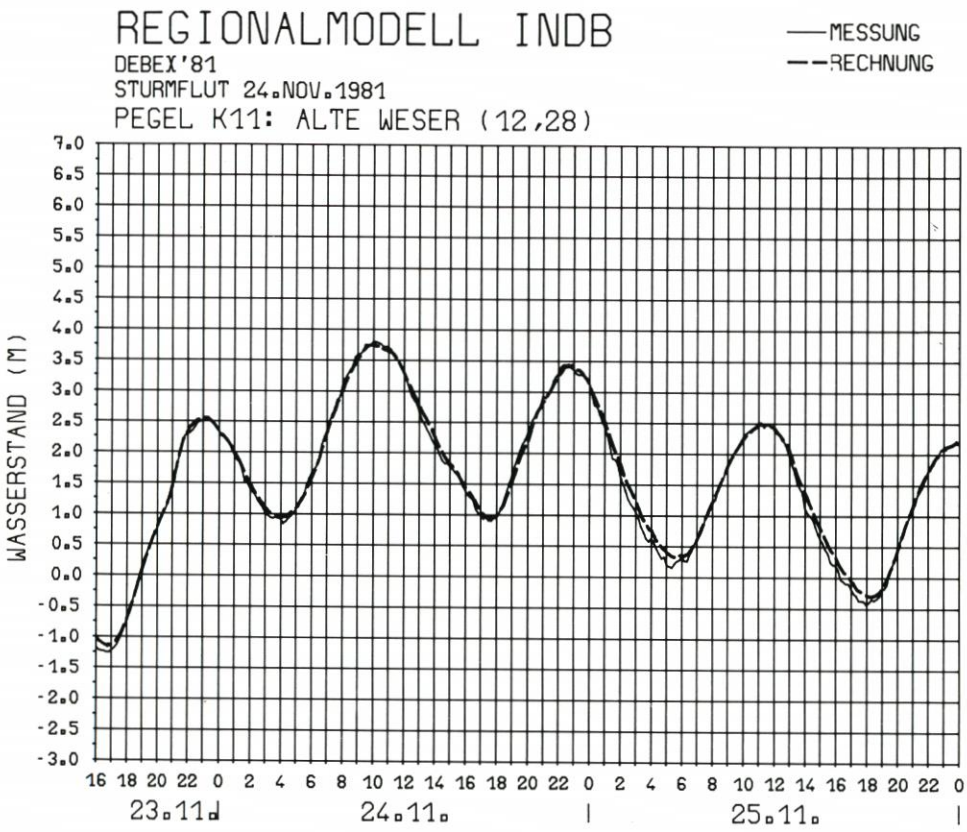


Abb. 23. Pegel Alte Weser (K11)

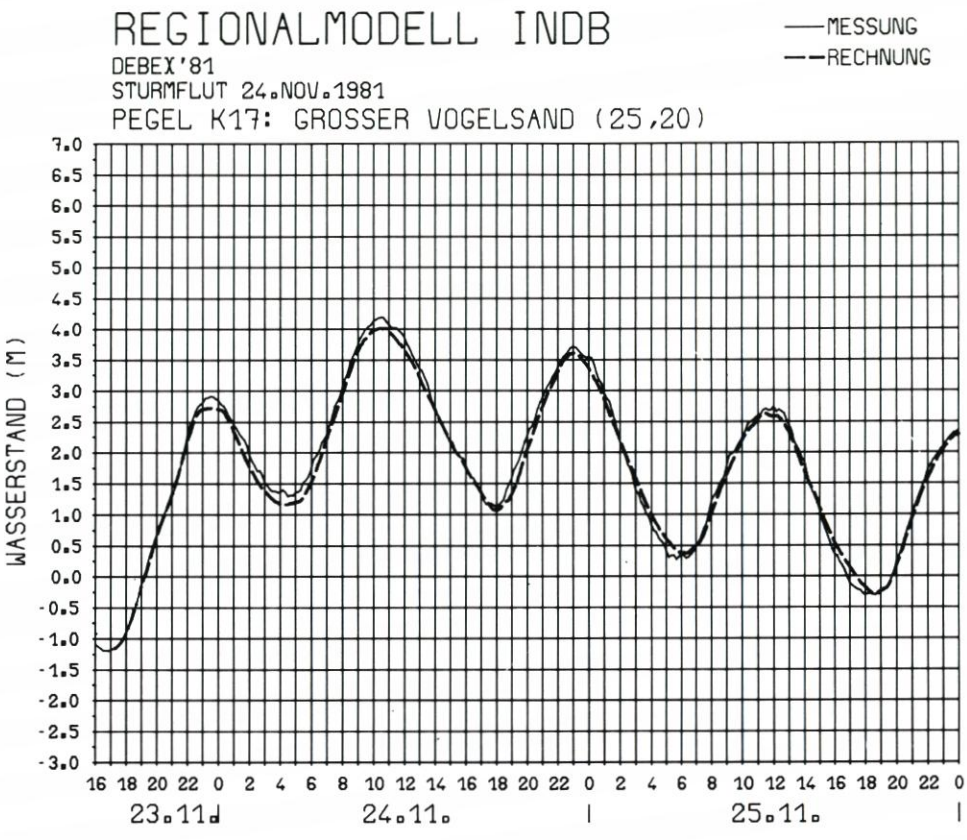


Abb. 24. Pegel Gr. Vogelsand (K17)

Die Küste, 40 (1984), 1-318

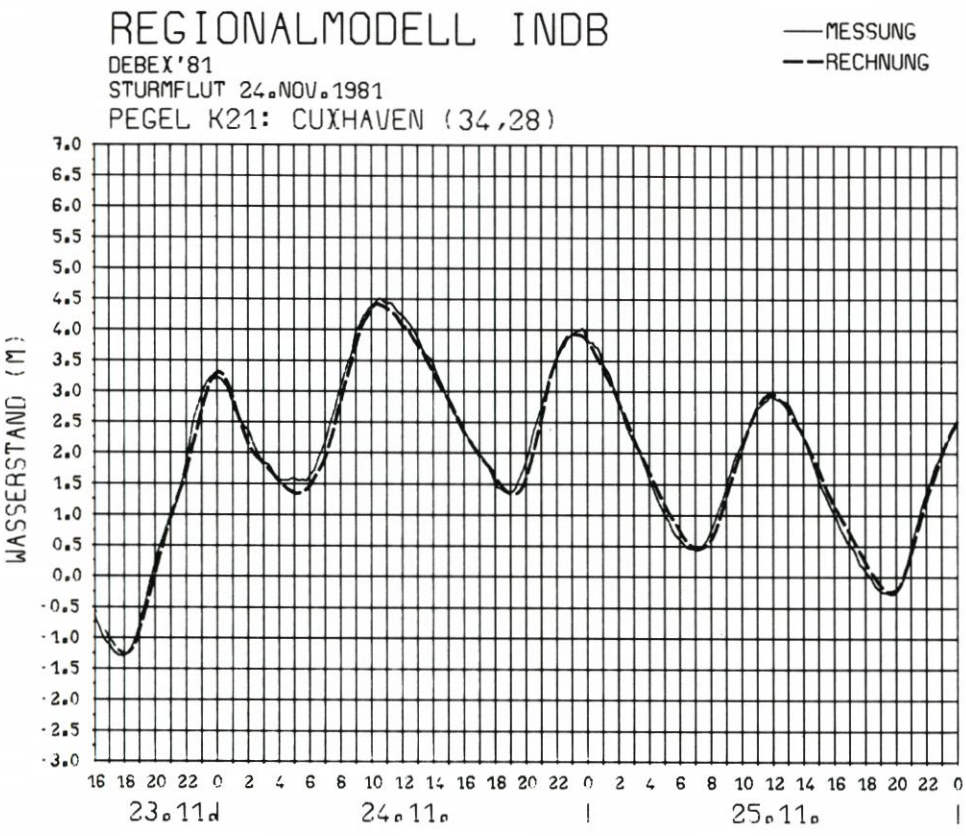


Abb. 25. Pegel Cuxhaven (K21)

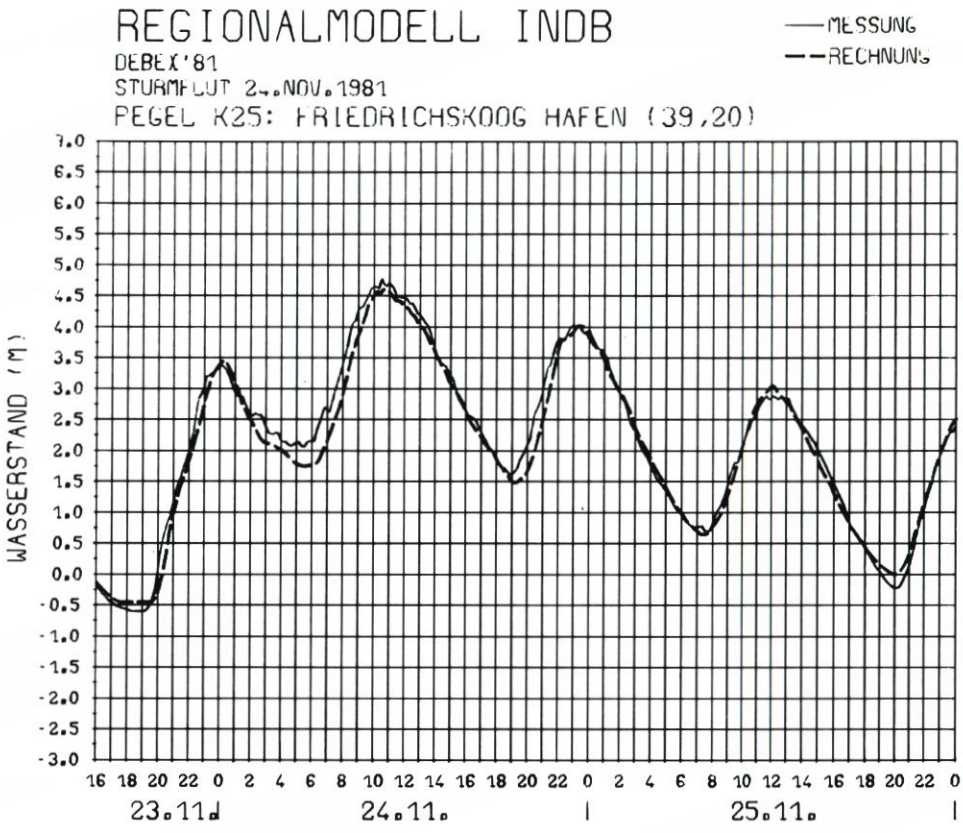


Abb. 26. Pegel Friedrichskoog Hafen (K25)

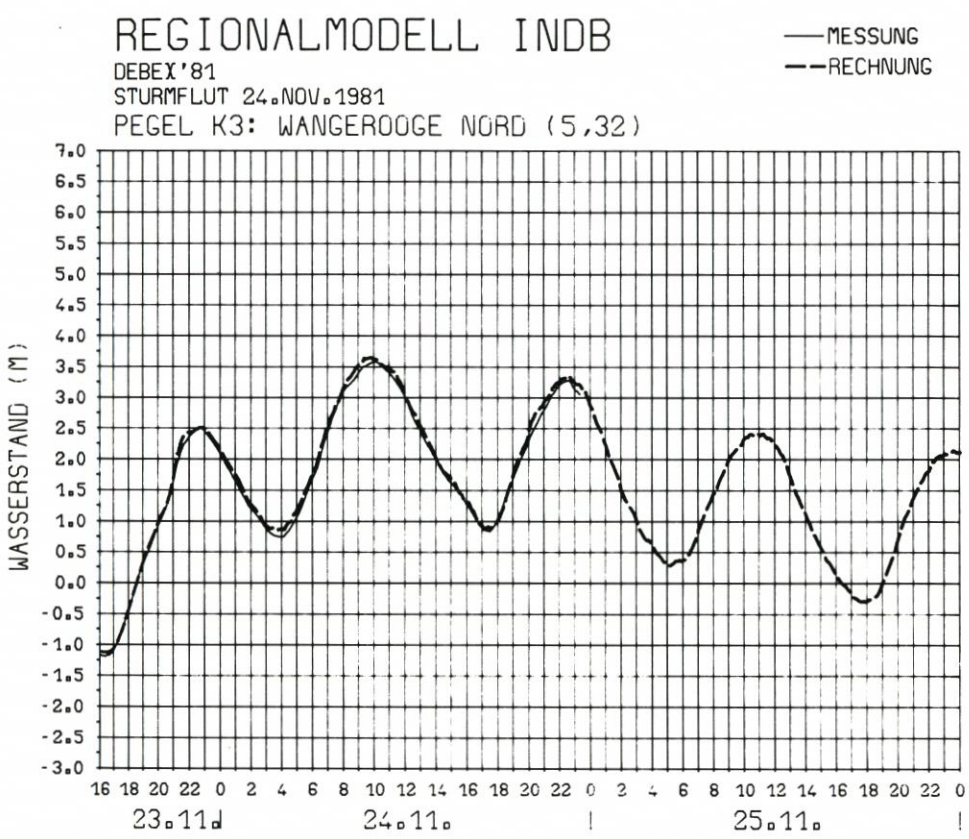


Abb. 27. Pegel Wangerooge Nord (K3)

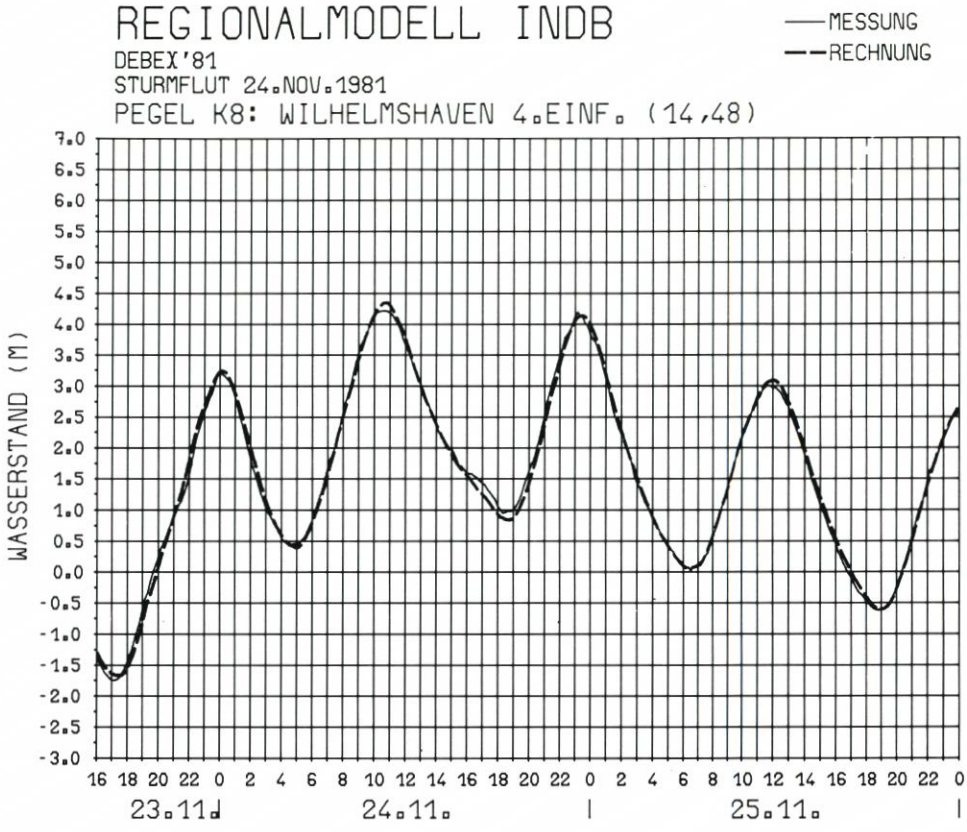


Abb. 28. Pegel Wilhelmshaven 4. Einfahrt (K8)

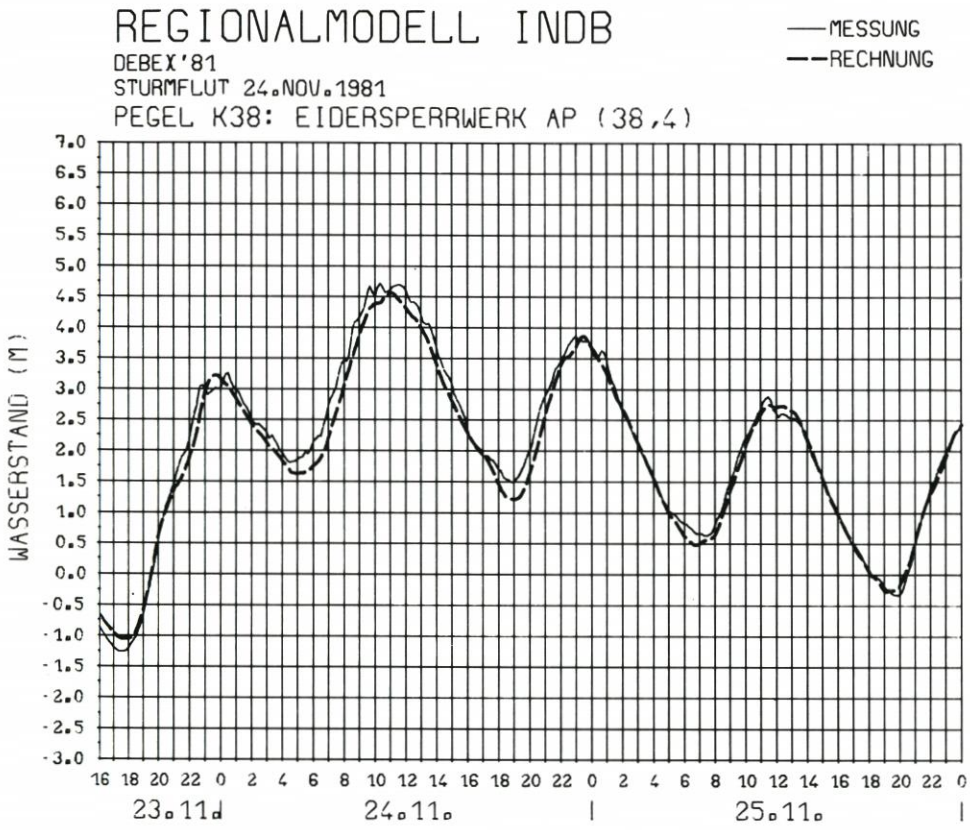


Abb. 29. Pegel Eidersperrwerk AP (K38)

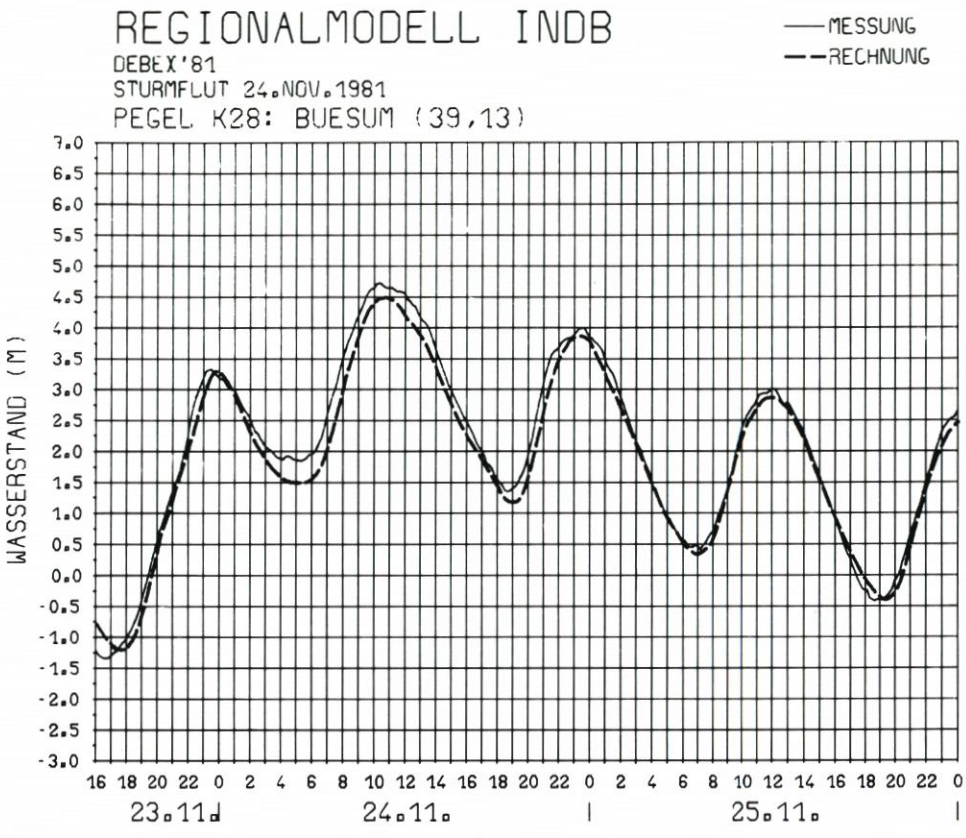


Abb. 30. Pegel Büsum (K28)

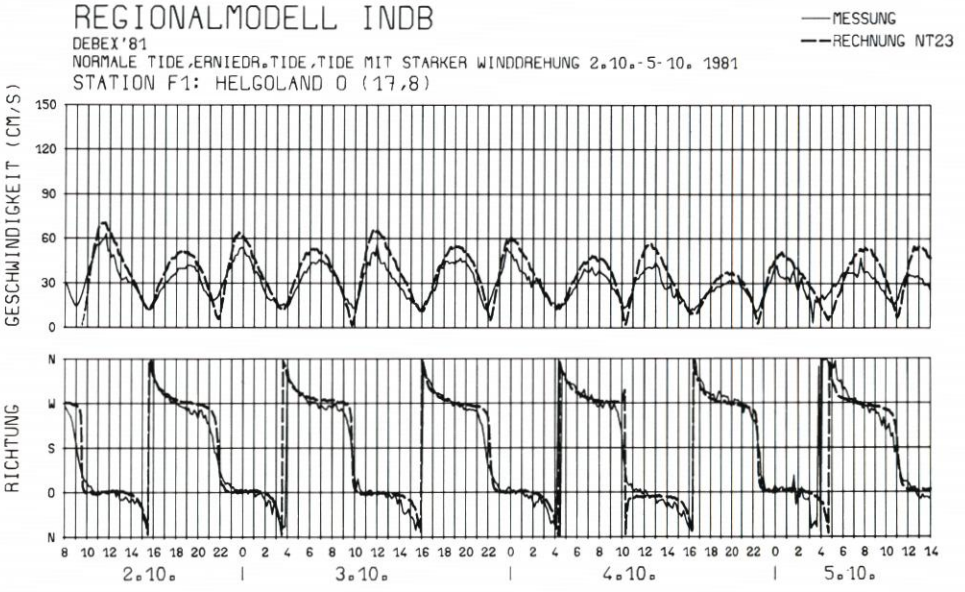


Abb. 31. Station F1

Die Küste, 40 (1984), 1-318

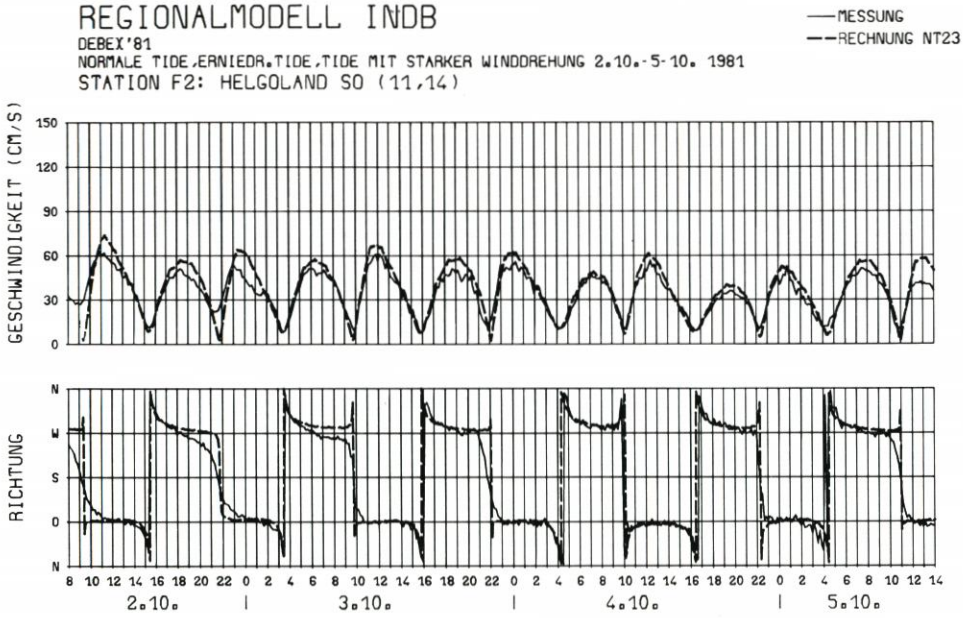
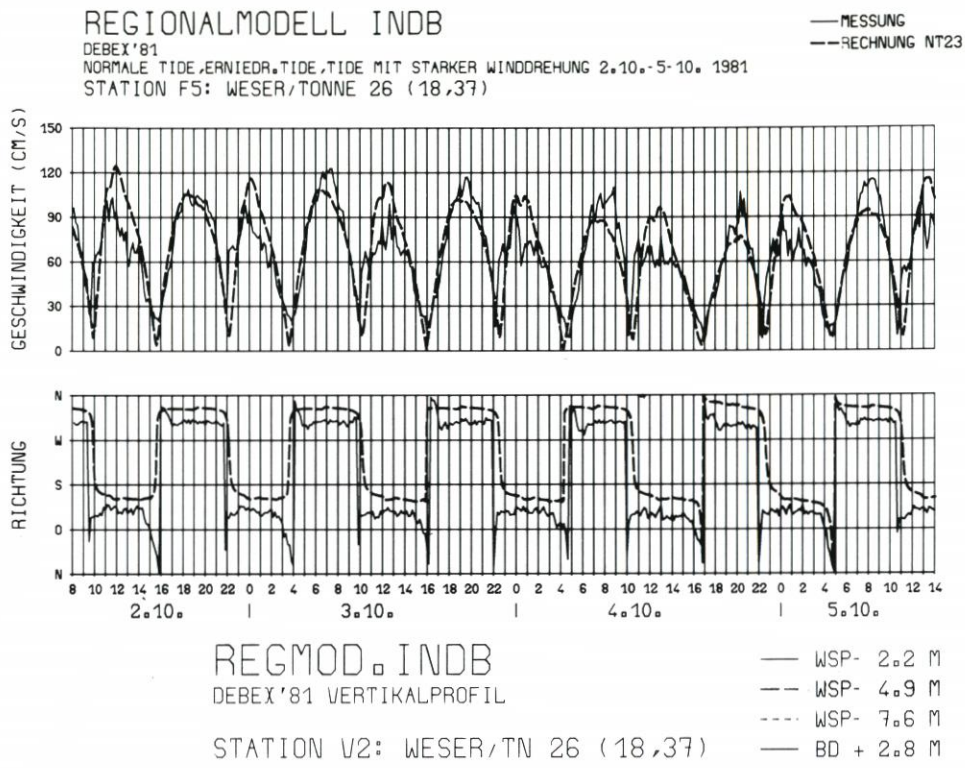


Abb. 32. Station F2



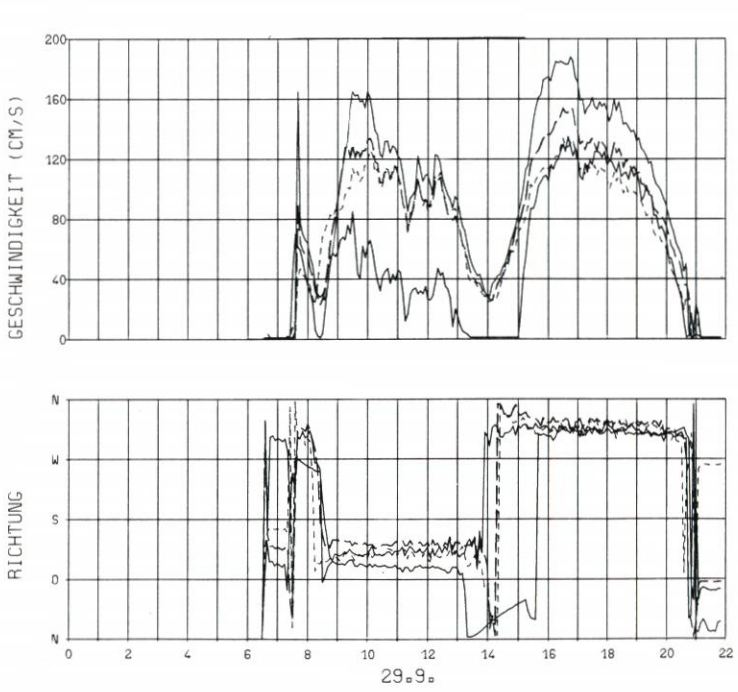


Abb. 33. Station F5 und Vertikalprofil V2

Die Küste, 40 (1984), 1-318

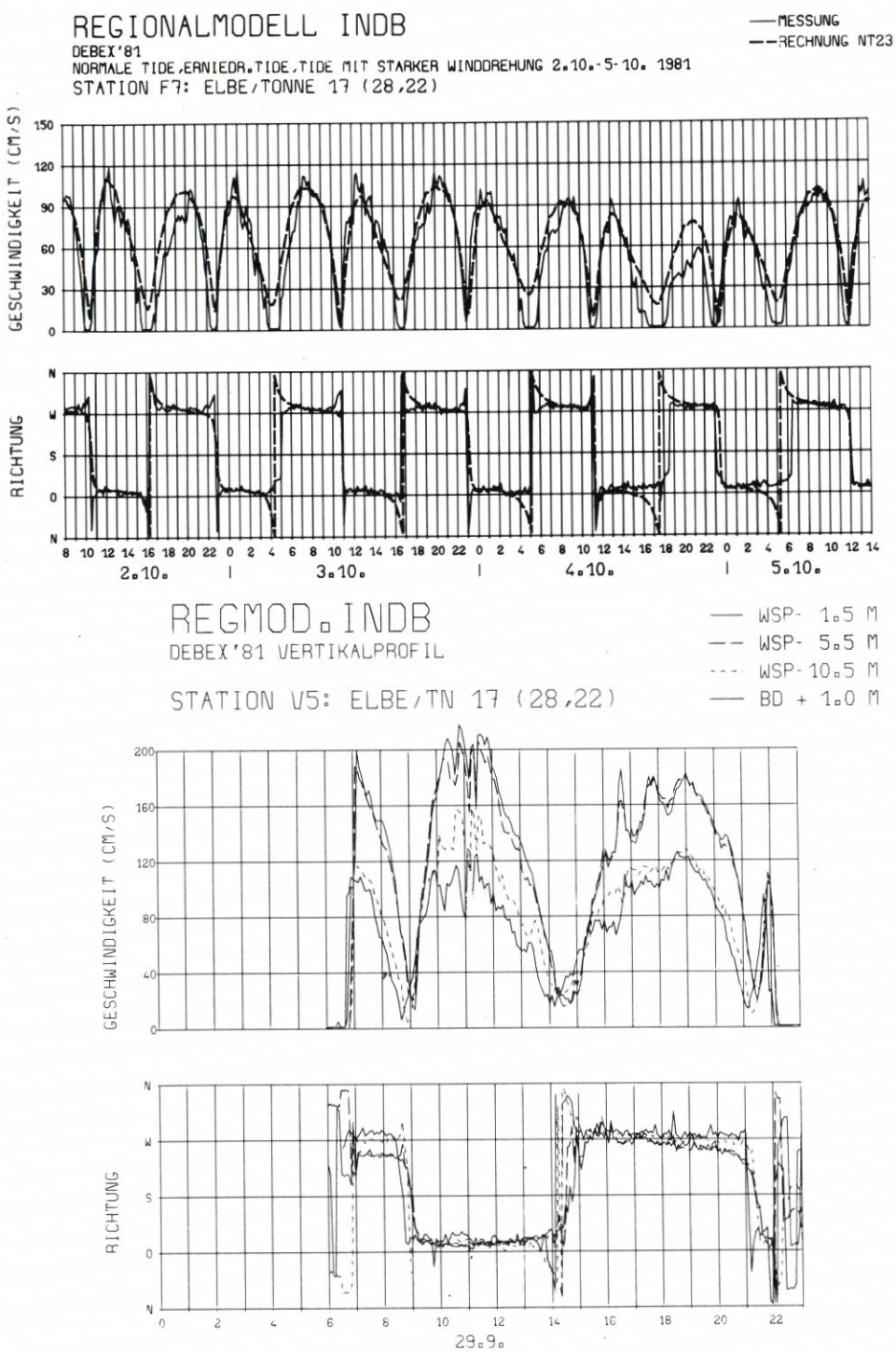


Abb. 34. Station F7 und Vertikalprofil V5

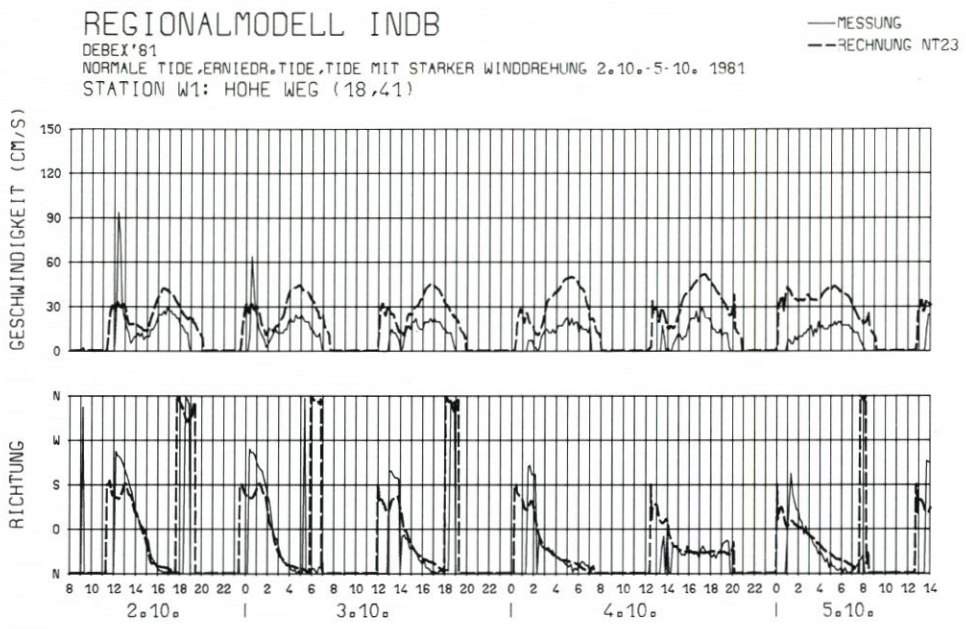


Abb. 35. Station W1

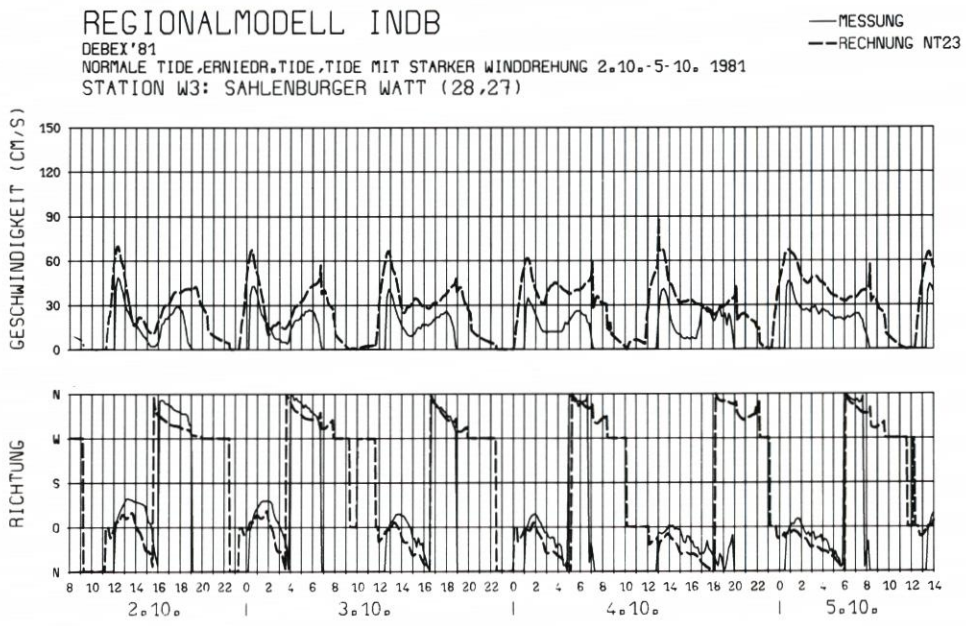


Abb. 36. Station W3

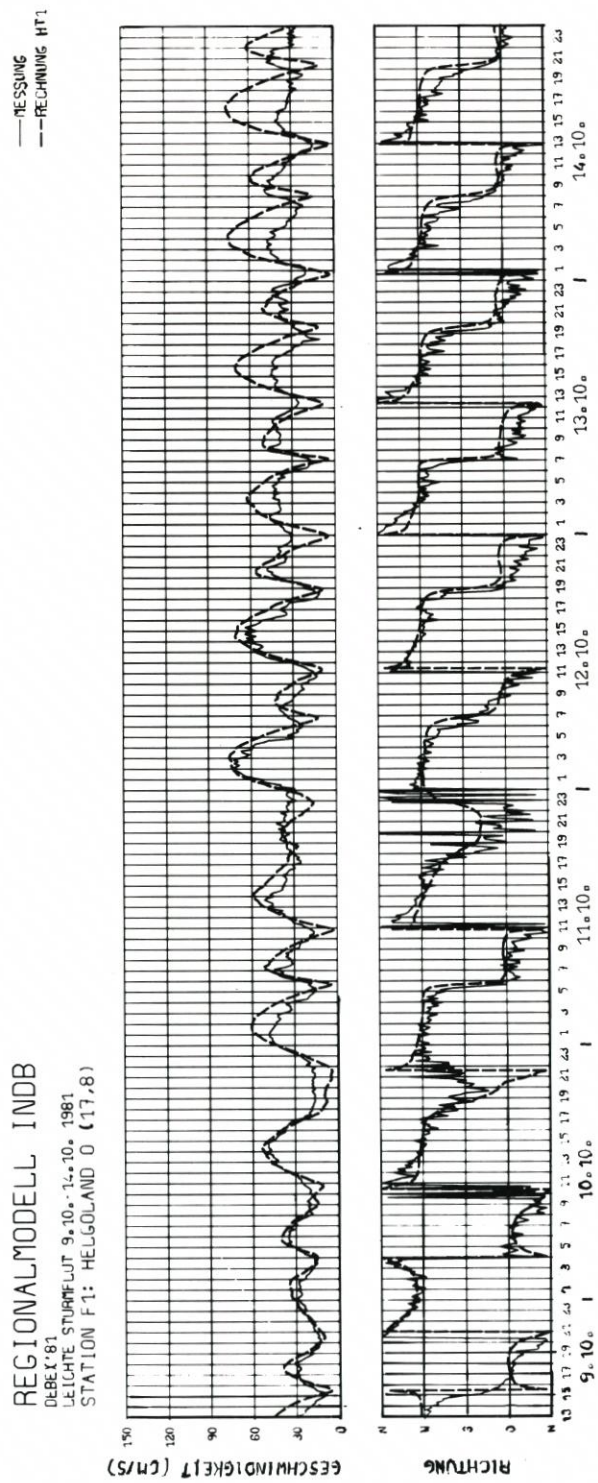


Abb. 37. Station F1

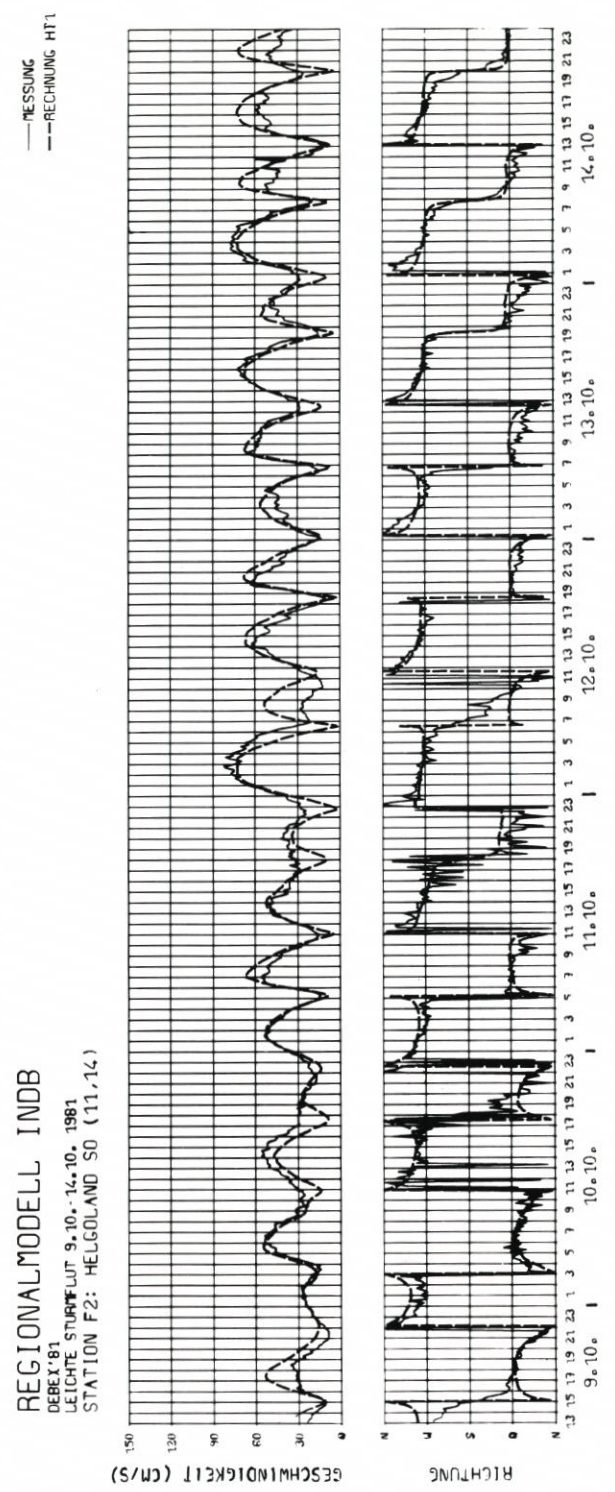


Abb. 38. Station F2

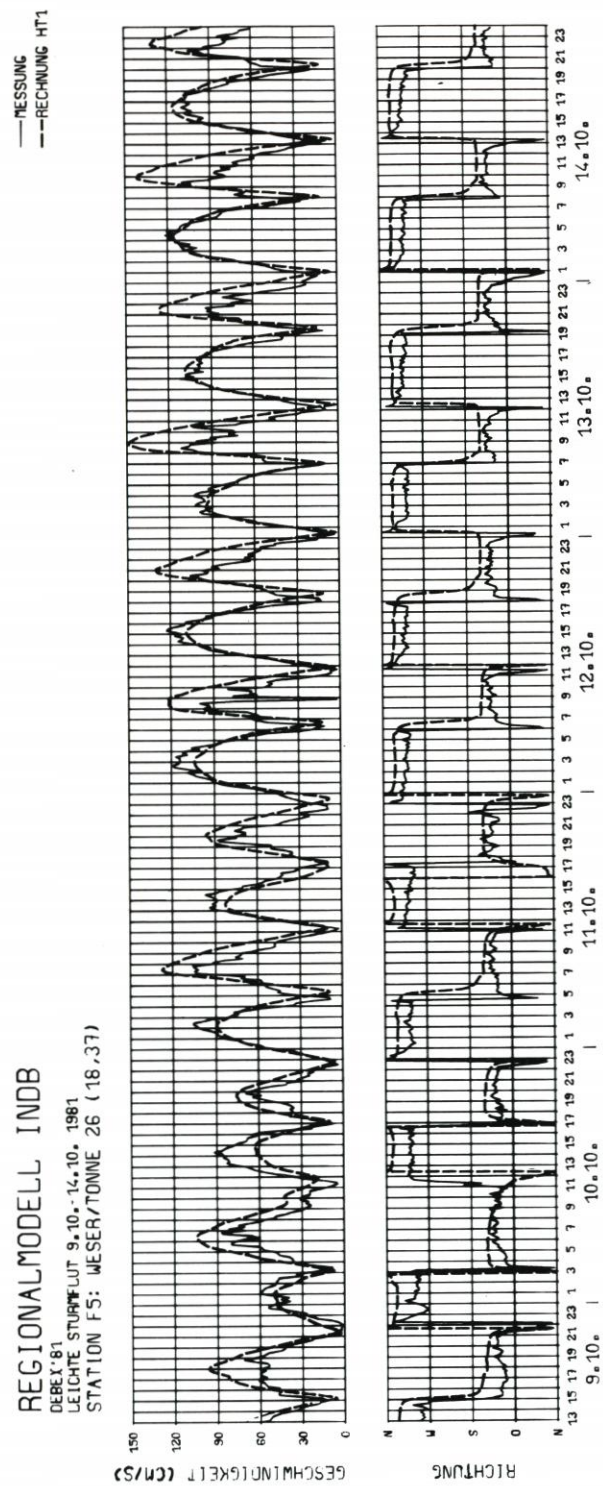


Abb. 39. Station F5

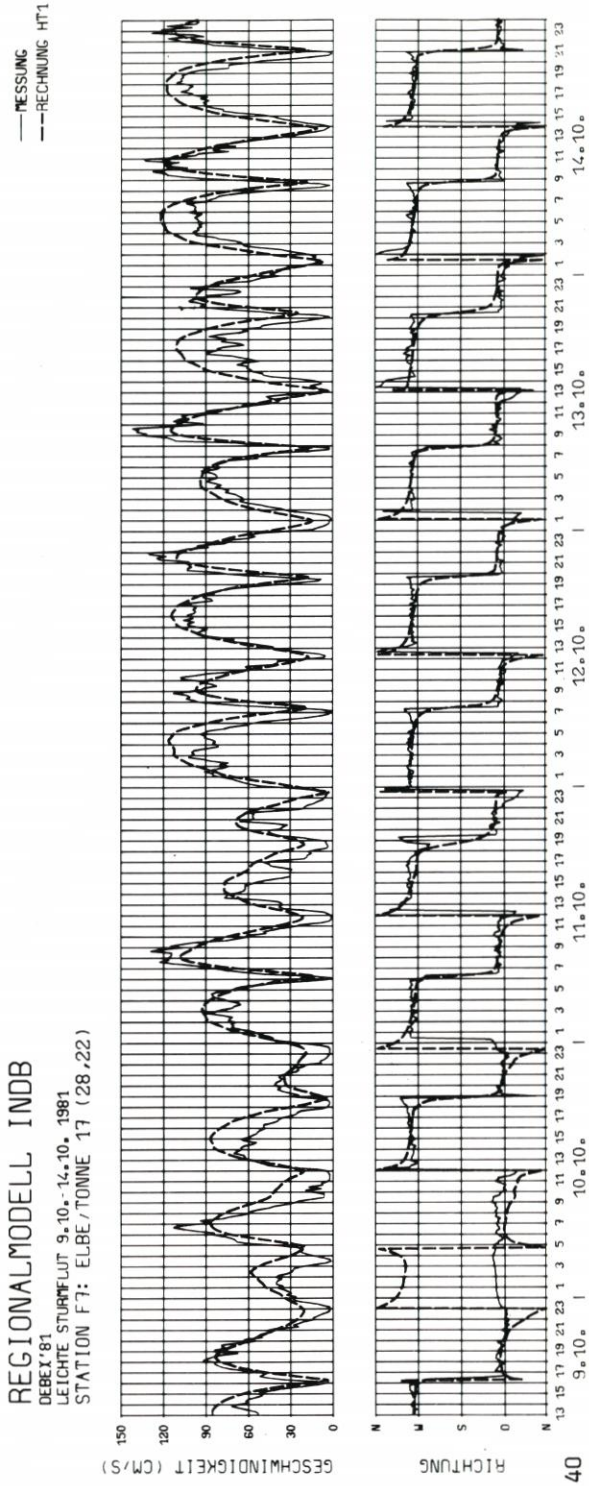


Abb. 40. Station F7

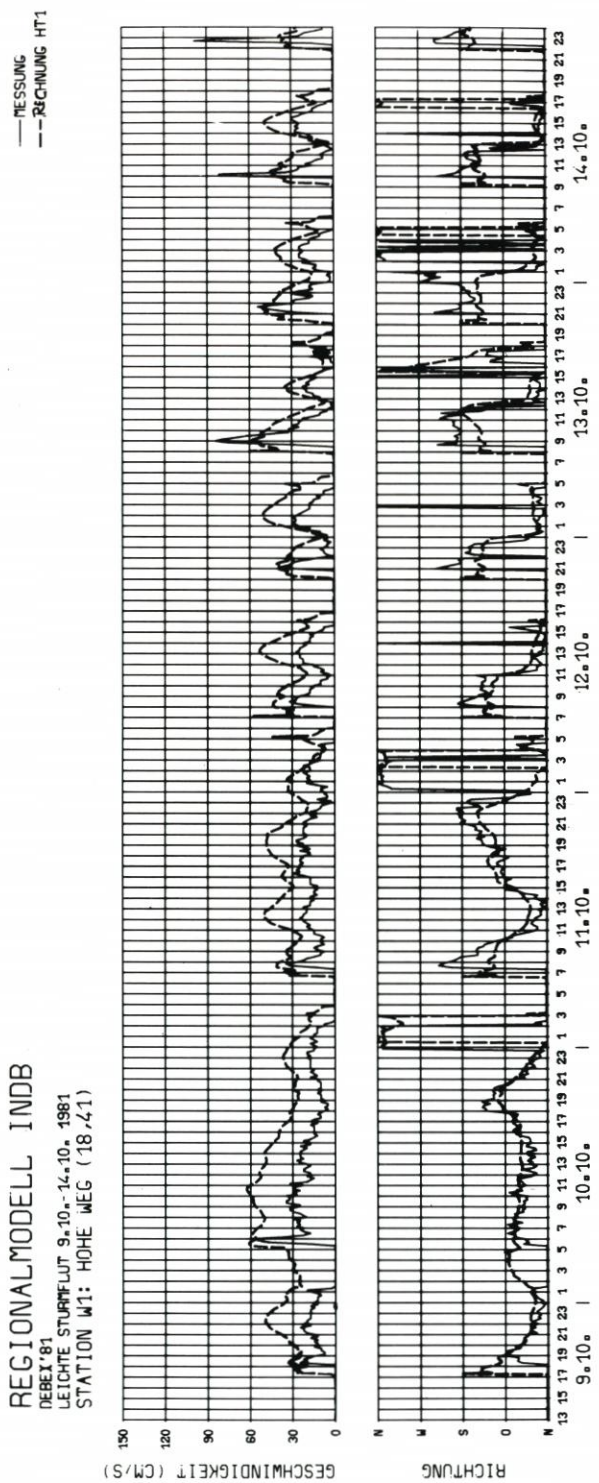


Abb. 41. Station W1

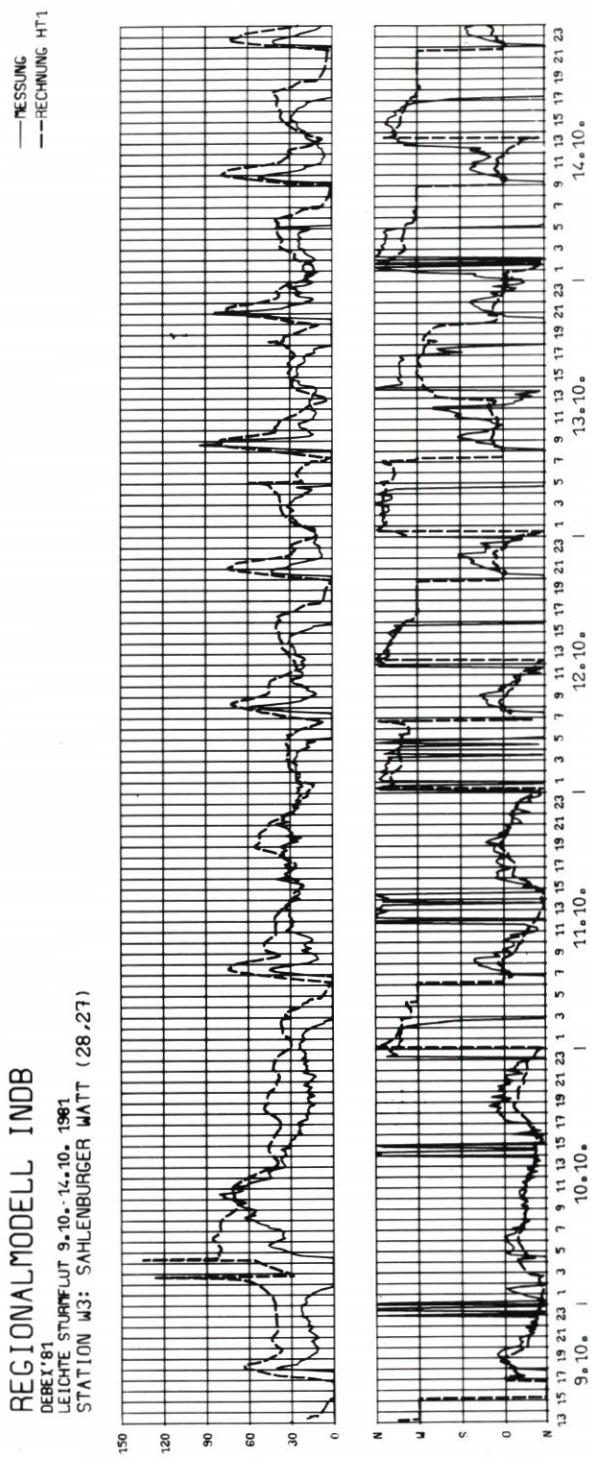


Abb. 42. Station W3

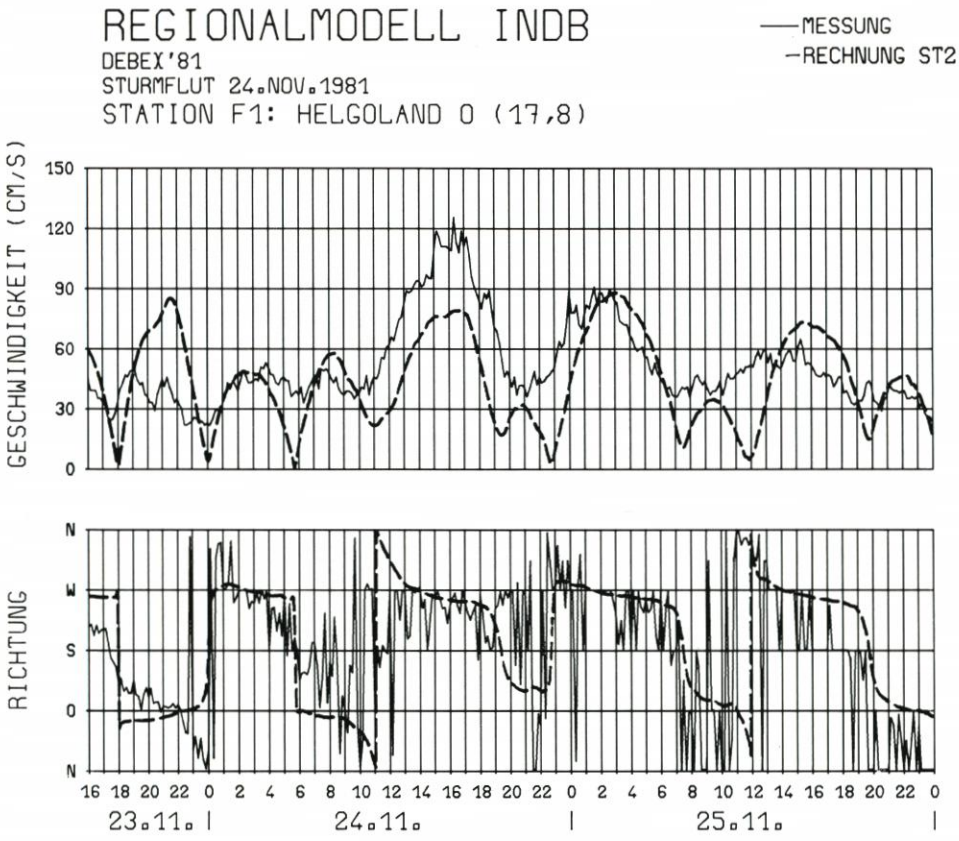


Abb. 43. Station F1

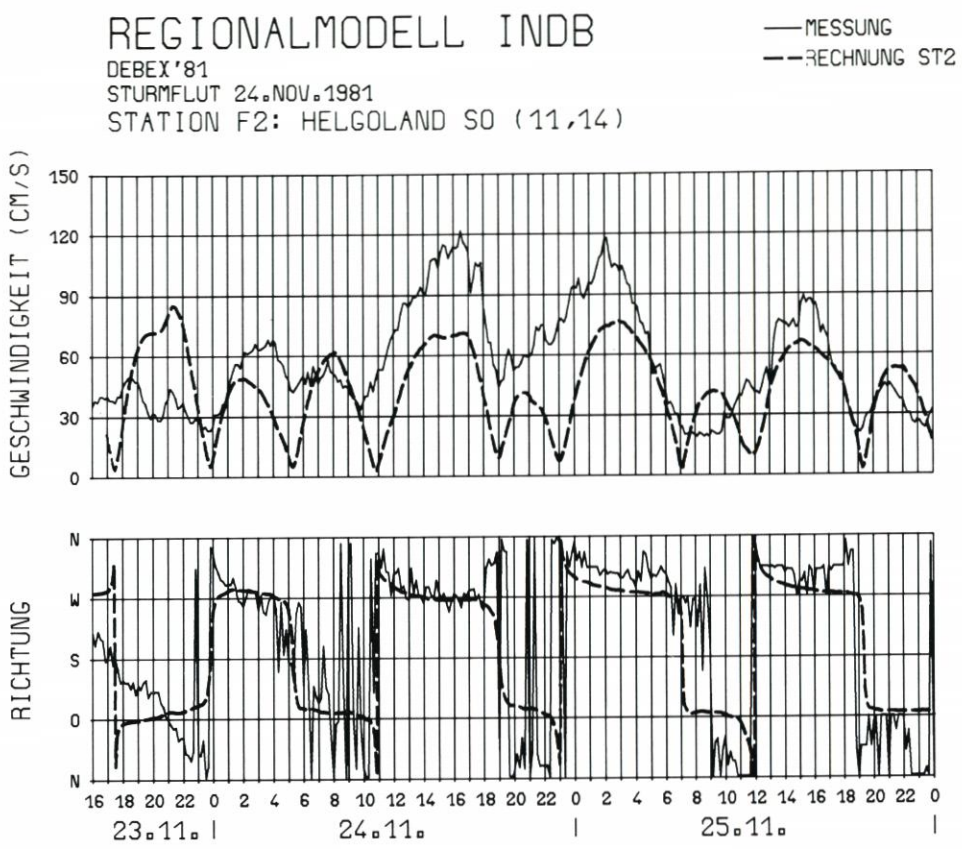


Abb. 44. Station F2

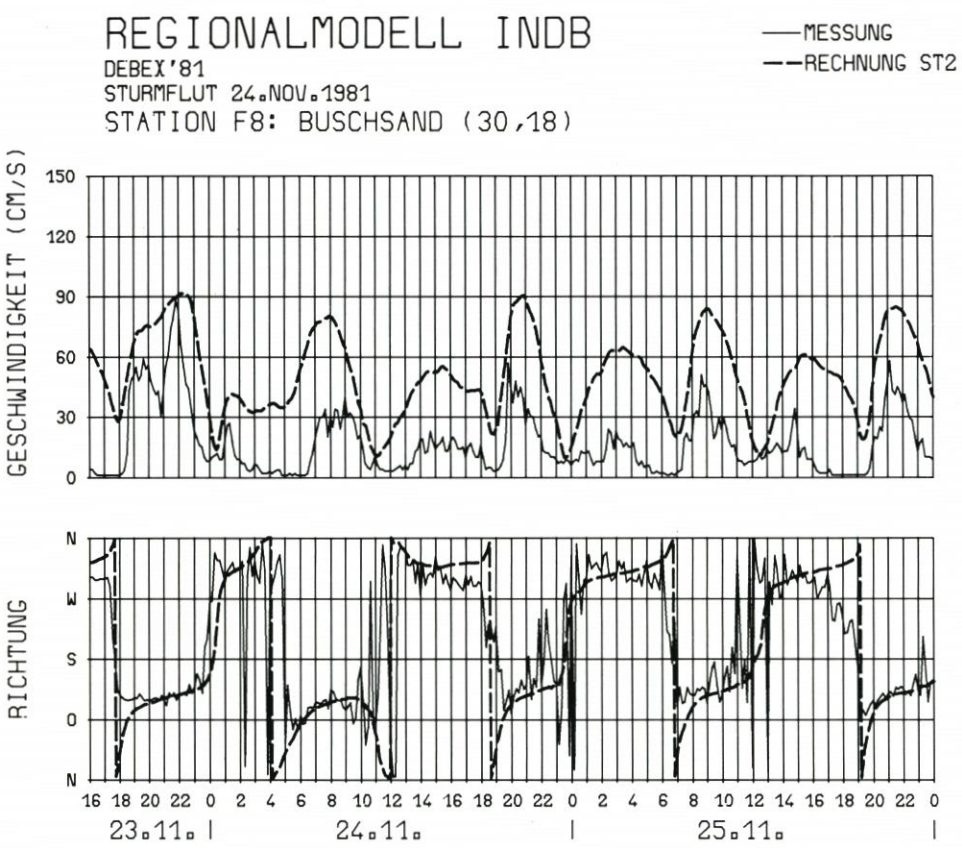


Abb. 45. Station F8

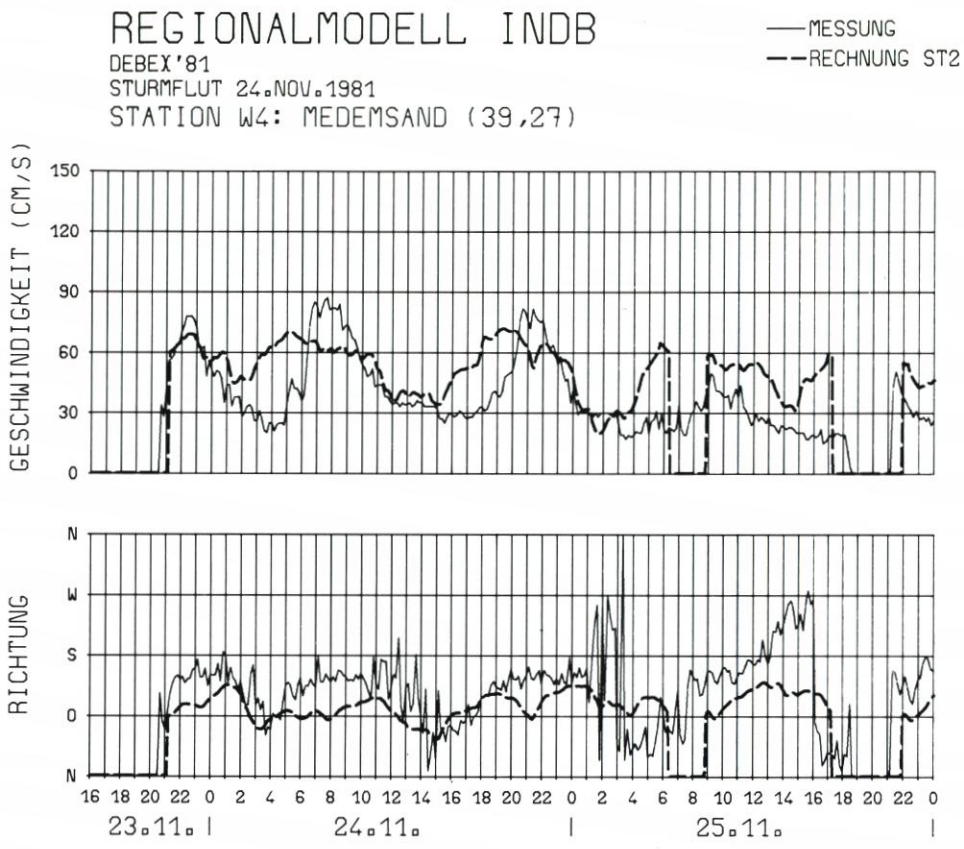


Abb. 46. Station W4

Die Küste, 40 (1984), 1-318

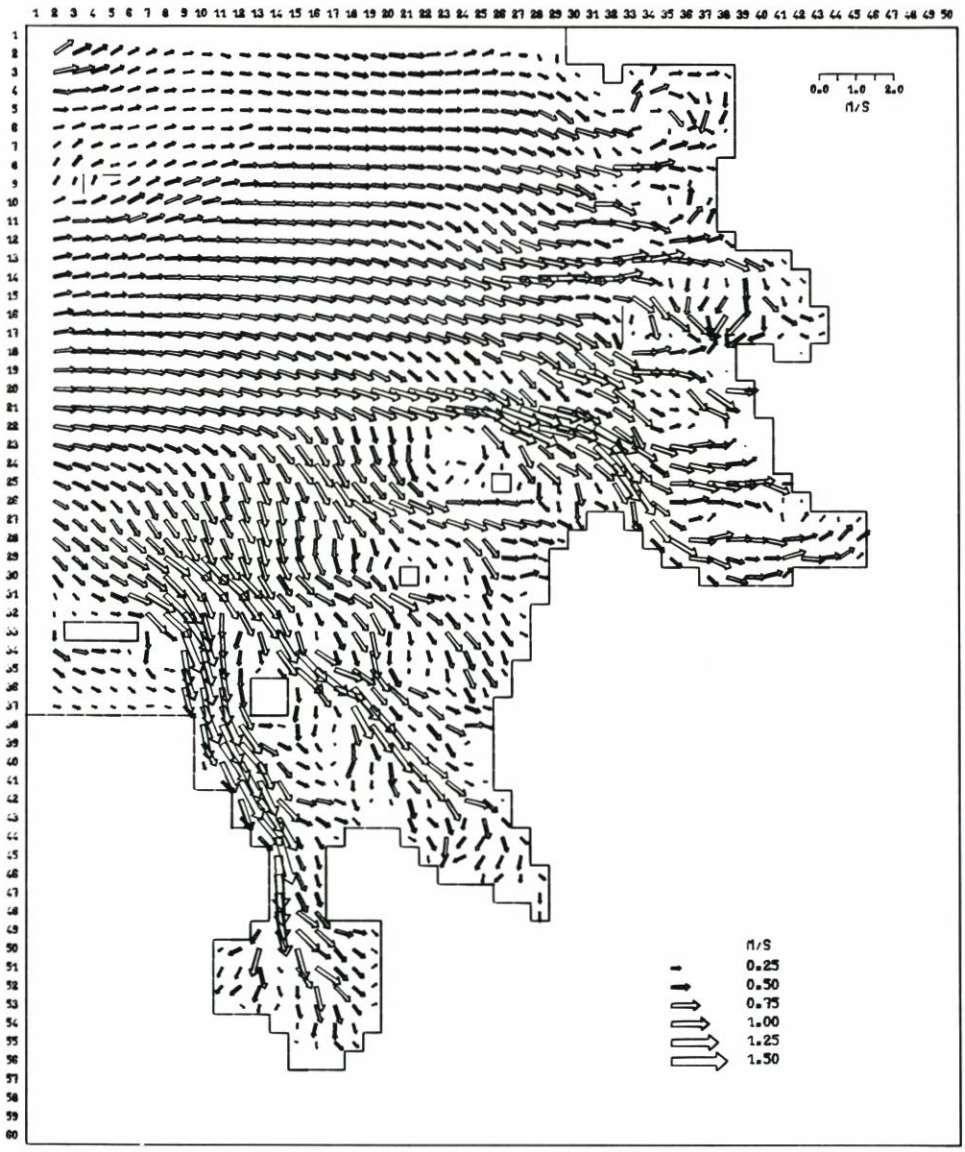


Abb. 47. Stromkarte 2. 10. 81, 13.00

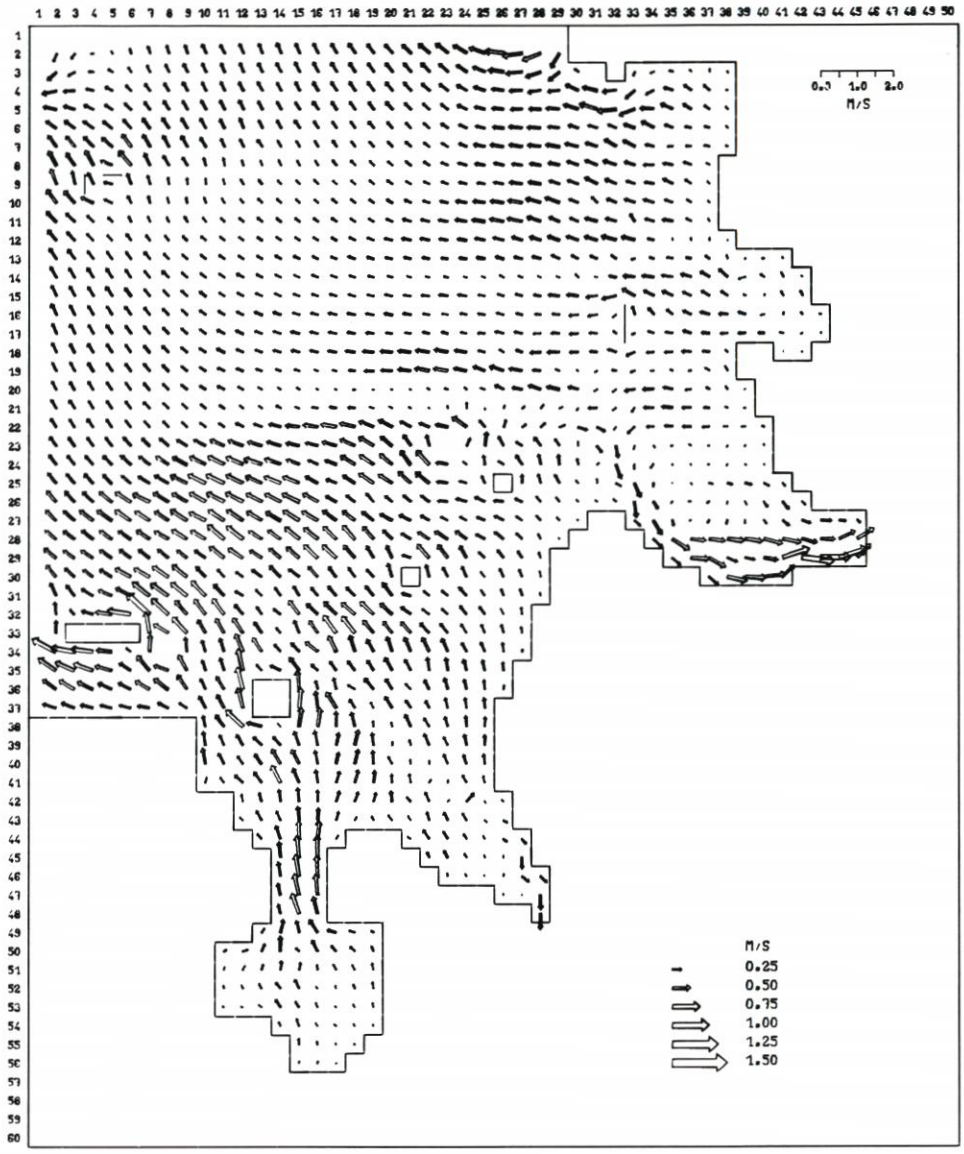


Abb. 48. Stromkarte 2. 10. 81, 16.00

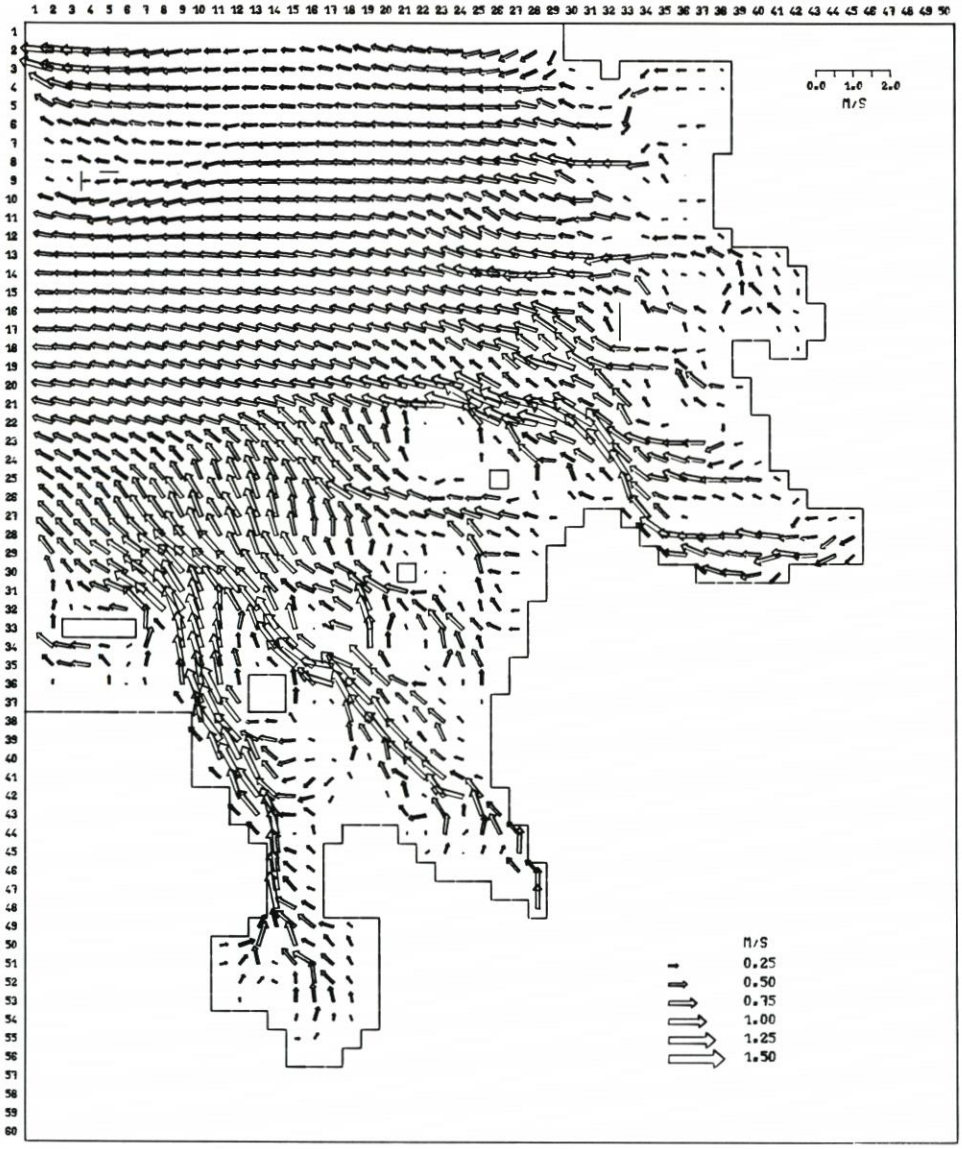


Abb. 49. Stromkarte 2. 10. 81, 19.00

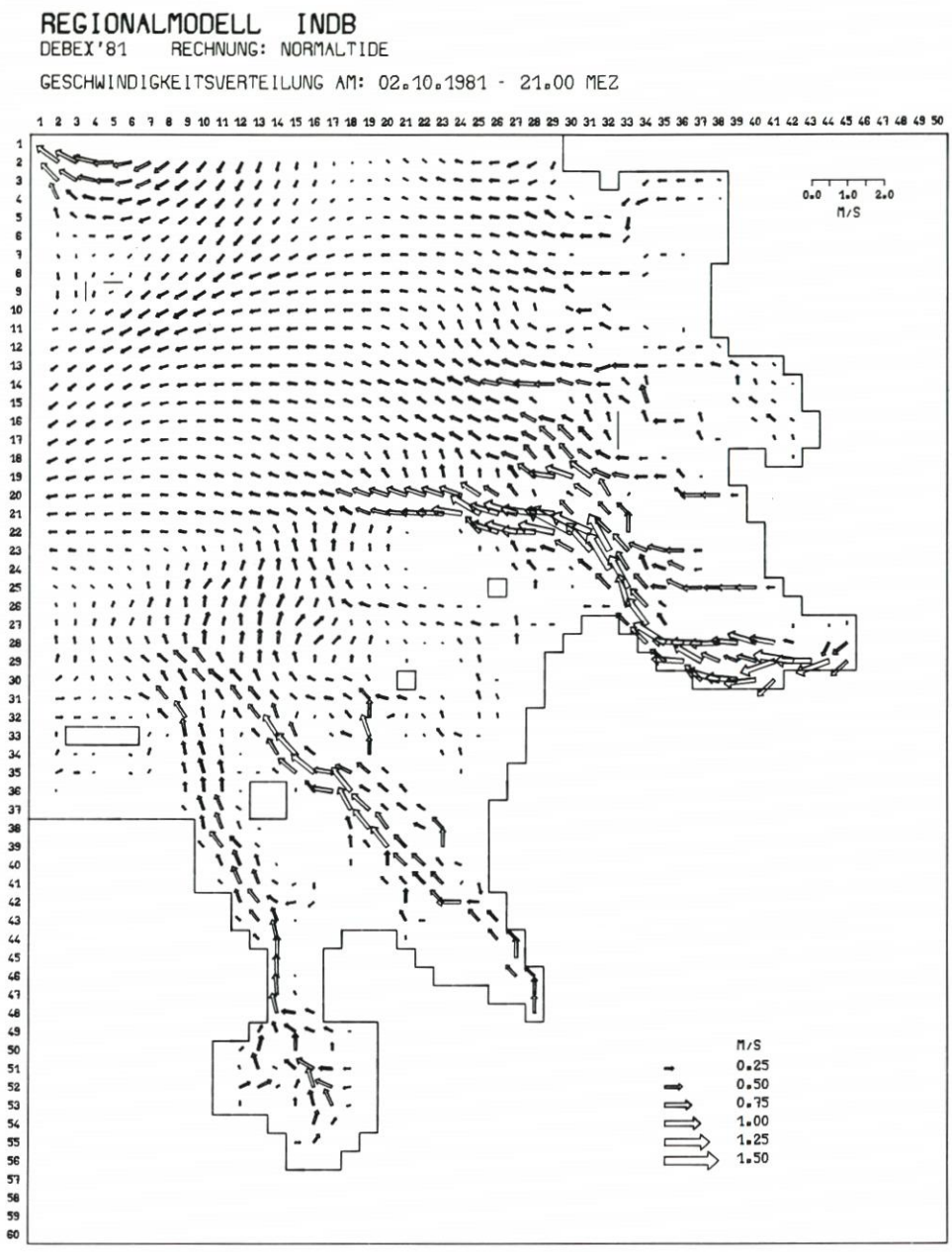


Abb. 50. Stromkarte 2. 10. 81, 21.00

Die Küste, 40 (1984), 1-318

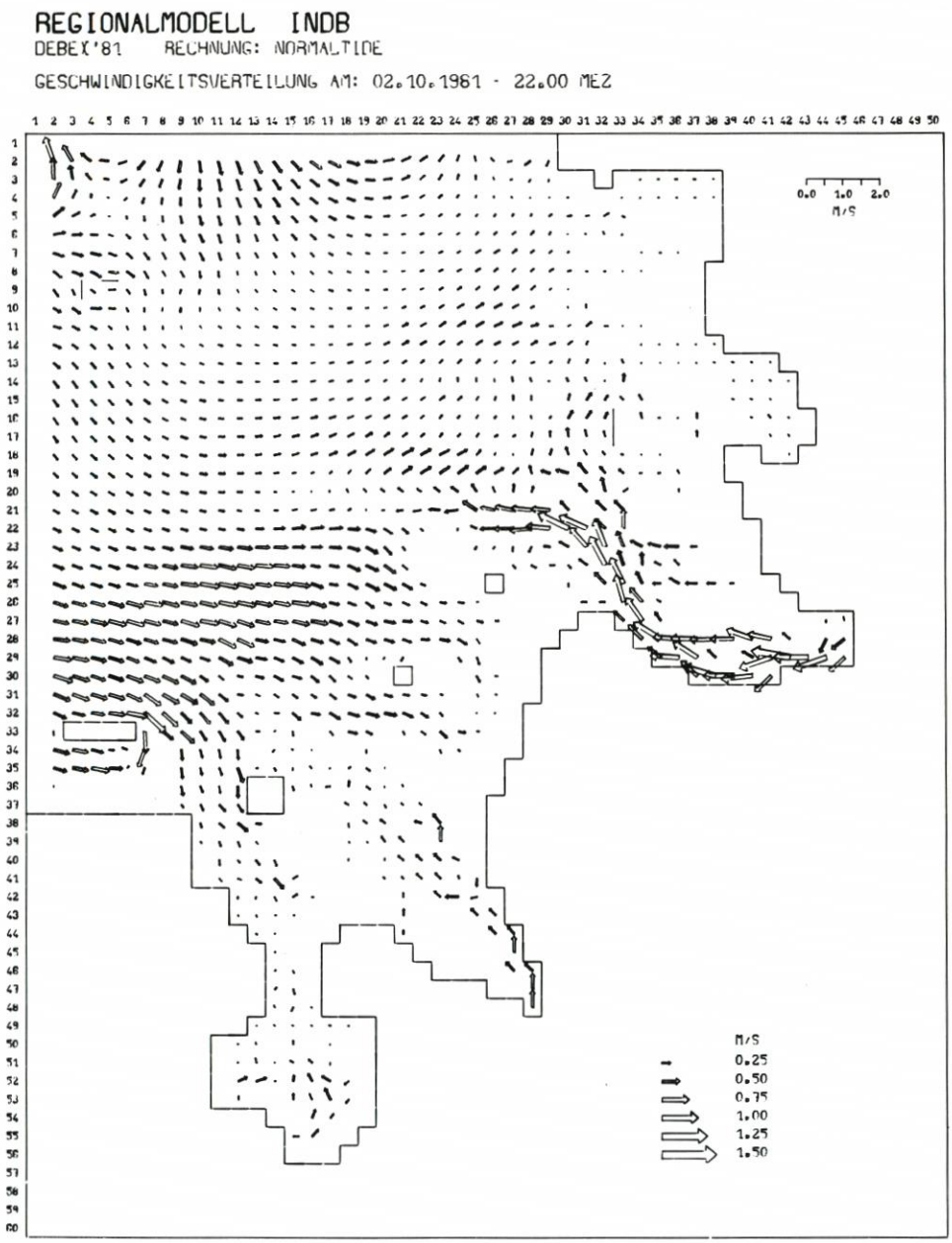


Abb. 51. Stromkarte 2. 10. 81, 22.00

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Das Schlickuntersuchungsprogramm des KFKI Anlaß und Arbeitskonzept

Von Klaus Figge

Zusammenfassung

Das KFKI hatte 1975 eine Projektgruppe beauftragt, ein Arbeitsprogramm für die Untersuchung der Schlicksedimentation und -erosion an der deutschen Nordseeküste auszuarbeiten. Um den Aufwand in vernünftigen Grenzen zu halten, empfahl die Gruppe, zwei als repräsentativ angesehene Gebiete, die Dithmarscher Bucht und das Sahlenburger Watt, über einen Zeitraum von drei Jahren mit hoher Wiederholungsfrequenz detailliert nach morphologischen, hydrologischen, chemischen und biologischen Gesichtspunkten zu untersuchen. Die Geländearbeiten fanden in der Zeit von 1977 bis 1980 statt. Ein Teil der Ergebnisse wird in den nachfolgenden Arbeiten dargestellt.

Summary

In 1975, the Board for Coastal Engineering Research (KFKI) authorized a project group to develop a programme of research for investigating the sedimentation of fine particles and the erosion of mud on the German North Sea coast. The group recommended frequently repeated detailed morphological, hydrological, chemical and biological investigations of two regions considered to be representative – Dithmarsh Bay and the Sahlenburger tidal flats – during a three year period in order to keep the study effort within realistic limits. Field investigations were conducted between 1977–1980. Some of the results are presented in the following papers.

Unter den rezenten Sedimenten nimmt der Wattenschlick eine besondere Stellung ein. Das gilt nicht nur in bezug auf sein Vorkommen als Sediment eines ungewöhnlichen und weltweit wenig verbreiteten Lebensraumes, sondern auch für seine noch weitgehend ungeklärte Entstehung.

Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, die Ablagerungsbedingungen des Schlicks zu erforschen, und als Folge dieser Anstrengungen ist eine große Anzahl beachtenswerter Publikationen erschienen, die die komplizierten Wechselbeziehungen der beteiligten Einflußgrößen beschreiben und zum Teil auch die Lösung von Einzelproblemen liefern. Dennoch steht eine befriedigende Antwort auf die Frage nach den Transport- und Ablagerungsbedingungen des Schlickmaterials noch ebenso aus wie die nach der Resuspendierung des einmal abgelagerten Sedimentes. Gerade in der jüngsten Zeit wurde immer deutlicher, daß unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet dringend vertieft und erweitert werden müssen.

Während es jedoch in der Vergangenheit in erster Linie das wissenschaftliche Interesse war, das immer wieder Anstöße zu Forschungsaktivitäten gab, stehen heute ökologische und praktische Gesichtspunkte im Vordergrund. Nicht zuletzt als Ergebnis der umfangreichen früheren Forschungen hat man erkannt, welche herausragende Bedeutung das Wattenmeer mit seinen Schlickablagerungen für das Ökosystem der Nordsee hat und daß seine Pflege und Erhaltung eine wichtige Aufgabe ist. Besondere Gefahren entstehen aus der Belastung der Umwelt mit toxischen Substanzen, vor allem mit Schwermetallen, sieht man in diesem Zusammenhang von den Folgen einer Ölkatastrophe einmal ab. Denn feinkörnige Sedimente

weisen von Natur aus nicht nur einen höheren Gehalt an Schwermetallen auf als gröbere, sondern sie sind darüber hinaus in der Lage, diese Substanzen in besonderem Maße zusätzlich zu adsorbieren.

Auf der anderen Seite sind im Interesse des Küstenschutzes und der Fahrwasserunterhaltung Maßnahmen erforderlich, die die derzeitigen Schlickgebiete verändern und Auswirkungen auf die Sedimentation und Erosion von Schlick haben können. Da es sich um ein feinkörniges, sehr mobiles Material handelt, können die Orte des menschlichen Eingriffs und der daraus resultierenden Auswirkungen oft sehr weit auseinander liegen; in Einzelfällen dürfte es sogar schwer sein, bestehende Zusammenhänge zu erkennen.

Um für die Praxis bessere Grundlagen bereitzustellen, veranlaßte das KFKI 1975 eine Projektgruppe, ein Forschungsprogramm mit dem Ziel aufzustellen, den Schwebstofftransport und die Kausalitäten der Schlickablagerungen und -erosion zu untersuchen und nach Bereitstellung der dafür notwendigen Mittel durchzuführen. Die Gruppe nahm unverzüglich ihre Arbeit auf und kam sehr schnell zu folgenden Überlegungen:

1. Es ist zweckmäßig, die großräumigen Transportfragen von der Sedimentation getrennt zu behandeln. Selbstverständlich kann nicht bestritten werden, daß die Anlieferung feinkörnigen Materials die erste Voraussetzung für die Bildung von Schlick ist und daß seine Ablagerung ein Nachlassen der Transportkräfte voraussetzt. Dies sind jedoch fast ausschließlich hydrodynamische Probleme, die besser in einem gesonderten Projekt behandelt werden sollten. Für die Schlicksedimentation in einem bestimmten Gebiet genügt es zunächst, die lokalen Bewegungsgrößen zu erfassen.
2. Der Begriff „Schlick" ist nicht klar definiert. Unter den Projektgruppenmitgliedern bestand lediglich Einigkeit darüber, daß damit ein feinkörniges Sediment mit hohem Gehalt an organischer Substanz und speziellen bodenmechanischen Eigenschaften (Bindigkeit) beschrieben wird. Unterschiedliche Auffassungen bestanden schon darin, in welchem Umfang der Wassergehalt eine Rolle spielt. Der Begriff „Feinkörnigkeit", d. h. der Anteil der feinen Fraktionen am Korngrößenspektrum, blieb ebenso offen wie die Frage nach den Gründen der Bindigkeit. Es muß daher vordringliche Aufgabe sein, zunächst eine klare und eindeutige Begriffsbestimmung herbeizuführen.
3. Es ist nicht ohne weiteres vorauszusetzen, daß die feinkörnigen Sedimente an den verschiedenen Küstenabschnitten ähnliche Zusammensetzungen und Eigenschaften besitzen, auch wenn sie alle als Schlick bezeichnet werden. Denkbar ist, daß sich die verschiedenen Lieferquellen bemerkbar machen. Daher wäre es angebracht, wenn nicht alle, so doch eine hinreichend große Anzahl von Schlickvorkommen zu untersuchen. Angesichts des hierfür erheblichen finanziellen und personellen Aufwandes, der nicht zu realisieren gewesen wäre, wurden lediglich zwei Gebiete ausgewählt: das Sahlenburger Watt links der Elbe und die Dithmarscher Bucht rechts der Elbe. Die Gefahr, untypische Gebiete zu erfassen, mußte in Kauf genommen werden.
4. Ein so komplexes Sediment wie der Schlick kann nur im Rahmen einer interdisziplinären Arbeitsgruppe, die aus Geologen, Biologen, Chemikern und Hydrographen besteht, untersucht werden, worauf bereits in einem Zwischenbericht (FIGGE et al., 1980) hingewiesen wurde. Daher mußten mehrere Universitätsinstitute für die Mitarbeit gewonnen werden. An dem Projekt waren folgende Dienststellen und Forschungsinstitute beteiligt:

   Deutsches Hydrographisches Institut

   Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, Büsum

   Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Küste, Fachgruppe Geologie, Kiel

   Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk (heute: Referat Hydrologie Unterelbe)

Die Küste, 40 (1984), 1-318

des Amtes Strom- und Hafenbau, Hamburg

Forschungsinstitut für Meeresgeologie und Meeresbiologie Senckenberg, Wilhelmshaven

Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel

Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Hamburg

Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften der Universität Hamburg

Um dem eigentlichen Ziel des Forschungsvorhabens, die Kausalitäten der Schlickbildung zu erkennen, näher zu kommen, wurde das Untersuchungsprogramm in drei Phasen angelegt:

Phase 1:

Einmalige, möglichst vollständige Aufnahme bzw. Messung aller topographischen, sedimentologischen, biologischen, chemischen, hydrographischen und meteorologischen Eigenschaften und Einflußgrößen in beiden Untersuchungsgebieten nach einheitlichen Verfahren. Bodenmechanische Messungen in nur einem Gebiet (räumliche Beschränkung wegen der Kosten). Versuch, die Kartierung mit einer Fernerkundungsaufnahme, die von einem Flugzeug der DFVLR vorgenommen wird, in Übereinstimmung zu bringen.

Phase 2:

Wiederholung der sedimentbezogenen Untersuchungen entlang ausgewählter Profile an festgelegten Stationen in sehr kurzen, regelmäßigen Abständen über einen Zeitraum von drei Jahren, nach Möglichkeit ohne Unterbrechung im Winter.

Wiederholungsuntersuchungen und Übersichtsbegehungen im übrigen Gebiet oder in ausgesuchten kleineren Testfeldern, je nach personeller Kapazität in größeren zeitlichen Abständen. Dabei ist besonders zu prüfen, ob die ausgewählten Profile tatsächlich repräsentativ sind und die Entwicklung in dem jeweiligen Gebiet widerspiegeln.

Über den gesamten Zeitraum von drei Jahren nach Möglichkeit Dauermessungen der dynamischen Einflußgrößen (Wasserbewegung, Meteorologie), wobei ein enger räumlicher Zusammenhang mit den Profilen anzustreben ist.

Phase 3:

Darstellung der Einzelergebnisse und deren Zusammenfassung zu einem Gesamtergebnis durch die Gruppe. Versuch, daraus eine Definition für den Schlick abzuleiten (s. o., Ziff. 2). Prüfung, ob diese Definition in beiden Untersuchungsgebieten Gültigkeit hat und ob sie mit der notwendigen Vorsicht aufgrund des allgemeinen Kenntnisstandes auch auf andere Gebiete übertragen werden darf (s. o., Ziff. 3).

Versuch, solche Parameter zu benennen, die in besonderem Maße zur Schlickbildung oder auch zur Erosion von Schlick beitragen. Vorschlag für ein Folgeprogramm, in dem diese Parameter gezielt untersucht werden können.

Wie oben erwähnt, setzt die Erforschung des Schlicks das Zusammenwirken verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen voraus, wobei besonderer Wert auf gegenseitige Abstimmung und Koordination gelegt werden muß. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit war während der ersten Phase noch gering, da die einzelnen Bearbeiter zunächst ihr fachspezifisches Material sammeln mußten. Im Laufe des Arbeitsfortschritts wurde sie immer enger, und in der zweiten Phase fanden gemeinsame Geländeuntersuchungen und simultane Messungen statt. In dieser Phase wurde auch in Hamburg ein Symposium abgehalten, auf dem die bis dahin erreichten Ergebnisse einem breiteren Publikum vorgestellt und gemeinsam diskutiert wurden. Damit begann auch zugleich die dritte Phase, die sich naturgemäß zeitlich nicht deutlich von der zweiten abgrenzen ließ, sondern sich langsam aus ihr entwickelte.

Es muß leider erwähnt werden, daß das hochgesteckte Ziel, die Kausalitäten der Schlicksedimentation als allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aus den Untersuchungen abzuleiten,

nicht erreicht worden ist. Andererseits darf man aber nicht übersehen, daß die vorliegenden Teilergebnisse ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zu diesem Ziel sind, da sie für das jeweilige Untersuchungsgebiet die Ursachen der Schlickbildung und -erosion beschreiben und viele wesentliche Einflußparameter quantifizieren. Eine Verallgemeinerung ist jedoch nicht möglich, und es ist keineswegs auszuschließen, daß der Schlick, der heute an einem Ort gefunden wird, sich an derselben Stelle ebenso durch eine Kombination anderer Umwelteinflüsse hätte bilden können. Es wurde auch davon abgesehen, die Einzelergebnisse in einer Arbeit zusammenzufassen; sie werden vielmehr im folgenden als in sich abgeschlossene Arbeiten dargestellt. Dazu gehört auch die früher erschienene Publikation von REINECK und SIEFERT (1980): Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt.

Zusätzlich wurde noch eine Anzahl weiterer Berichte angefertigt, die im Schrifttum aufgeführt sind. Auf die Nennung von Teilberichten und Zwischenberichten wird verzichtet, da sie in den Abschlußberichten und Publikationen enthalten sind. Kopien der unveröffentlichten Arbeiten befinden sich in der Bibliothek des KFKI.

Schriftenverzeichnis

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Dichtemessungen im Watt vor Büsum. Bericht, unveröffentl., 1981.

DEGENS, E. T. u. KEMPE, S.: Geochemische und elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt. Abschlußbericht, unveröffentl., 1980.

FIGGE, K.: Korngrößenverteilungen und ihre Änderungen entlang mehrerer küstennormaler Profile in der Dithmarscher Bucht. Bericht, unveröffentl., 1983.

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.

GAST, R.: Die Sedimente der Meldorfer Bucht (Deutsche Bucht): Ihre Sedimentpetrographie und Besiedlung, Typisierung und Schwermetallgehalte. Dissertation, Univ. Kiel, 1980.

KÖSTER, R.: Bericht der Gruppe Küstengeologie des Geologischen Institutes der Universität Kiel über die geologischen Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens: Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste. Abschlußbericht, unveröffentl., 1981.

LAMADE, S.: Die räumliche Verteilung der Foraminiferenarten *Nonion depressulum, Elphidium excavatum* und *Elphidium selseyense* im Gezeitenbereich der Meldorfer Bucht. Diplomarbeit, Univ. Hamburg, 1978.

MYCKE, B.: Organisch-geochemische Charakterisierung rezenter Wattsedimente: 2.: Zucker als Indikatoren für Herkunft und Umsetzungen organischer Substanzen im Watt. Diplomarbeit, Univ. Hamburg, unveröffentl., 1980.

REINECK, W.-E. u. SIEFERT, W.: Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. Die Küste, H. 35, 1980.

SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1969/77 aus dem Sahlenburger Watt. Strom- und Hafenbau Hamburg, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Studie Nr. 41, 1979.

THIEL, H., GROSSMANNN, M., MEIN, B. u. SPYCHALA, H.: Einwirkung von Organismen auf Wattsedimente. Abschlußbericht, unveröffentl., 1981.

VOGT, H. H.: Organisch-geochemische Charakterisierung rezenter Wattsedimente: 3.: Aminosäuren-Adsorptionsmechanismen und frühdiagenetische Effekte. Diplomarbeit, Univ. Hamburg, unveröffentl., 1980.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattenforschung

Von Peter Wieland

Zusammenfassung

Zur Ergründung der natürlichen Gesetzmäßigkeiten bei der Schlicksedimentation im Wattenmeer sind extrem umfangreiche Feldaufnahmen erforderlich, die heute personell kaum mehr zu bewältigen sind. Kurzfristige Veränderungen an der Wattoberfläche während der zeitaufwendigen Probeentnahmen bleiben außerdem oft unerfaßt. Deshalb ist anhand einer Test-Befliegung in der Dithmarscher Bucht und vor Sahlenburg die Eignung der Fernerkundung als wesentliches Hilfsmittel hierbei generell untersucht und dabei bestätigt worden. Die Methode und Möglichkeiten werden dargelegt.

Summary

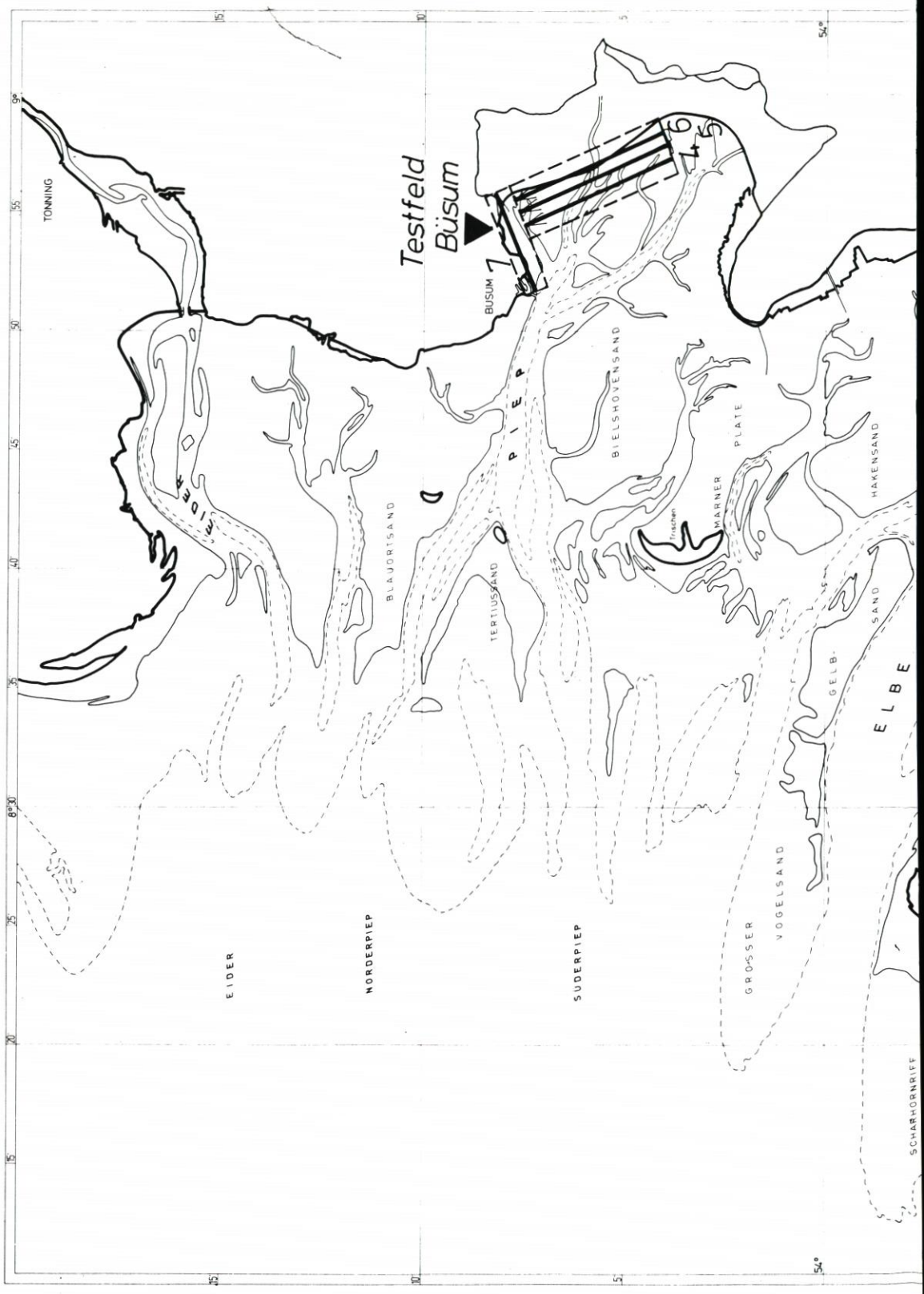
Extensive field surveys are necessary in order to investigate the basic phenomena associated with the formation of mud due to sedimentation in the intertidal zone. These studies can, however, rarely be conducted because they are too personnel intensive. In addition, short term changes of the intertidal surface during the sampling period often remain undetected. For these reasons, the applicability of aerial surveys for investigating the intertidal zone was tested on Dithmarsh Bay and near Sahlenburg. The results were positive. The technique and possibilities are presented here.

Inhalt

1. Anlaß und Aufgabe 91
2. Methode der Fernerkundung 94
2.1 Allgemeines 94
2.2 Erfassung von Fernerkundungsdaten 94
2.3 Digitale Bildverarbeitung 97
2.3.1 Aufbereitung der Daten 99
2.3.2 Auswertung der Daten 99
2.3.3 Interpretation 101
3. Ergebnis und Schlußfolgerung 102
4. Schriftenverzeichnis 105

1. Anlaß und Aufgabe

In einer ersten Phase des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) im Zeitraum vom 1. 10. 1977 bis zum 31. 12. 1981 geförderten Forschungsvorhabens „Schlicksedimentation Wattenmeer" (Figge et al., 1980) war u. a. die Methodik des Erfassens und Interpretierens von Zuständen und Vorgängen zu ergründen. Dabei sollte ein laufendes Befliegungsprogramm der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) genutzt werden, um mit demzufolge geringem zusätzlichem Kostenaufwand auch die Möglichkeiten und Eignung der Fernerkundung als Hilfsmittel in einem solchen Forschungsvorhaben zu untersuchen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die gezielte


Testfeld
Büsum
1
2
3
4
5
6
7
8
BUSUM
TÖNNING
EIDER
NORDERPIEP
SÜDERPIEP
BLAUORTSAND
TERTIUSSAND
BIELSHÖVENSAND
MARNER PLATE
Trischen
HAKENSAND
GELB. SAND
GROSSER VOGELSAND
SCHARHÖRNRIFF
ELBE
9°
8°30
54°

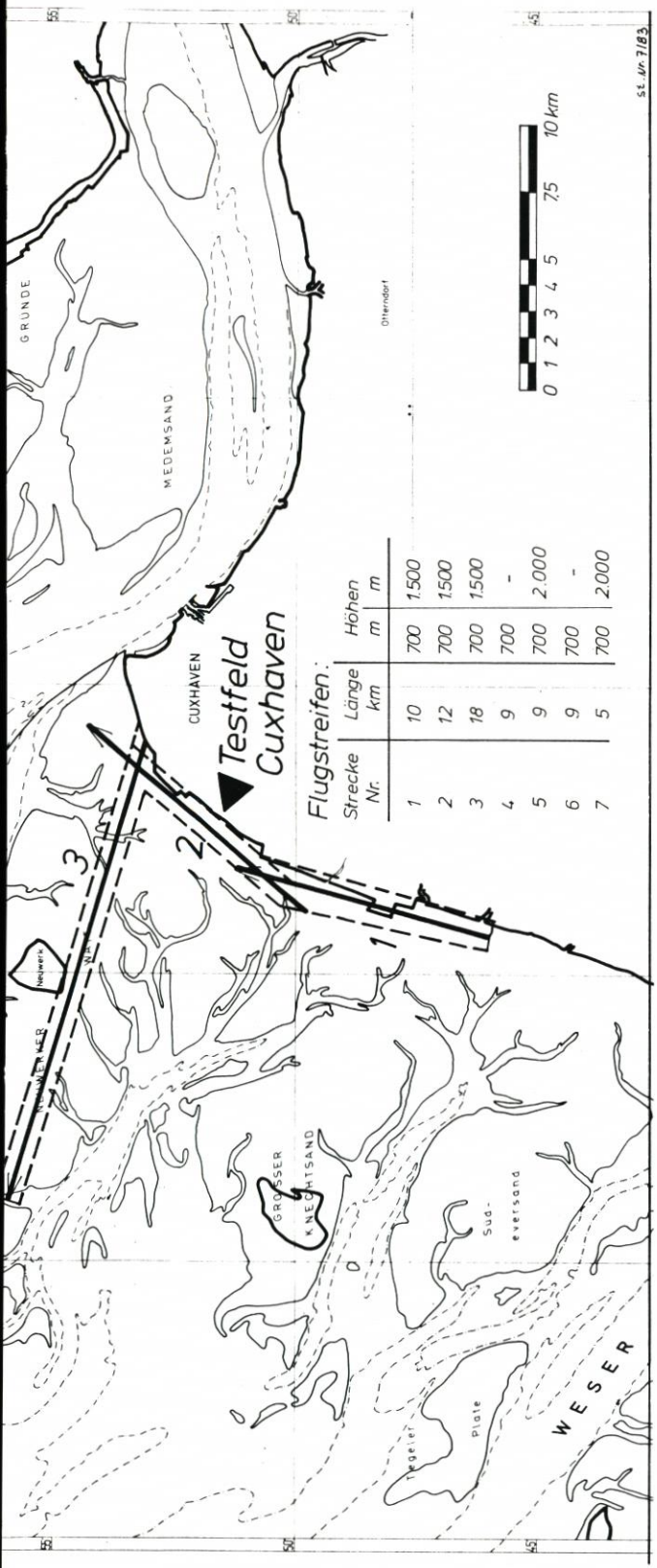


Abb. 1. Übersichtskarte Innere Deutsche Bucht mit den Testfeldern Büsum und Cuxhaven

großräumige, vertiefte Fortführung der Gesamtuntersuchung Schlicksedimentation Wattenmeer.

Nachfolgend wird das Fernerkundungsverfahren erläutert, und es werden die in den beiden Testfeldern Cuxhaven und Büsum (Abb. 1) damit durchgeführten Arbeiten sowie als Ergebnis die Anwendbarkeit der Fernerkundung zusammenfassend dargelegt.

2. Methode der Fernerkundung

2.1 Allgemeines

Durch die Fernerkundung können aus der Distanz „Informationen über die Qualität, den Zustand oder Veränderungen der Landoberfläche, der Atmosphäre oder der Ozeane vornehmlich mit Hilfe der Analyse des von diesen Objekten ausgehenden elektromagnetischen, spektral aufgelösten Strahlungsfeldes" gewonnen werden (SCHNEIDER, 1980). Dies wird mit den Sensoren sog. „passiver Systeme", wie Luftbildkammern, Scanner und Radiometer, erreicht. Außerdem werden mit sog. „aktiven Systemen", besonders Seitwärtsradar, unabhängig von Tageslicht und Bewölkung, durch Mikrowellenimpulse ausgesendete Signale wieder empfangen.

Wesentliche, durch die Fernerkundung gewonnene Auswertungsgrundlage ist das fotografische, panchromatische Luftbild. Es kann direkt zur Auswertung herangezogen werden, weil es die jeweilige Erdoberfläche so wiedergibt, wie es das menschliche Auge erfaßt. Das ist der Bereich zwischen den Wellenlängen des Ultraviolett und des nahen Infrarot (Abb. 2). Dabei ist für die Interpretation die Kenntnis der Grauverteilung des Bildes (Abb. 5) bzw. der Erdoberfläche, z. B. Land, Watt, Meer (= Klassen), also der fotografisch gewonnenen Helligkeitswerte, entscheidend (Abb. 3). Ihre Unterscheidbarkeit ist jedoch optisch begrenzt auf 14 bis 15 Stufen. Weil die große Datenfülle auf Filmen nicht unterzubringen ist und um die hohe Informationsdichte überhaupt bewältigen zu können, wird die digitale Bildverarbeitung angewendet, wobei die im multispektralen Scanner auf Magnetband erfaßten Signale bis zu 63 Werte haben.

2.2. Erfassung von Fernerkundungsdaten

Das Aufnahmesystem gliedert sich in Meßgeräteträger und Sensoren. Als Meßgeräteträger werden am meisten verwendet zweckmäßig einrichtbare und gut navigierbare zweimotorige Flugzeuge mit Bodenluke, Hubschrauber, seit 1972 auch Erderkundungssatelliten wie z. B. LANDSAT, und daneben noch die aufwendigen, bemannten Raumfahrzeuge wie SKYLAB und SPACELAB. Besonders die Erderkundungssatelliten sind für eine kontinuierliche Überwachung von Veränderungen an der Erdoberfläche geeignet. Sie umkreisen die Erde in etwa 915 km Höhe in 103 Minuten auf einer sommersynchronen polaren Umlaufbahn. So macht LANDSAT innerhalb eines Tages 14 Umläufe von Nord nach Süd mit einem Aufnahmestreifen zwischen 81° nördlicher und 81° südlicher Breite, das gleiche Sichtfeld der Erde alle 14 Tage wieder erreichend. Die Raumfahrzeuge folgen in 435 km Höhe einer um 50° zum Äquator geneigten Flugbahn mit einer Umlaufdauer von etwa 93 Minuten, wobei die gleiche Bahn alle 5 Tage wieder erreicht und ein Aufnahmestreifen zwischen nur 50° nördlicher und 50° südlicher Breite erfaßt wird (SCHNEIDER, 1980).

Im Rahmen des Schlickforschungsvorhabens Watten ist von der DFVLR als Meßgeräte-

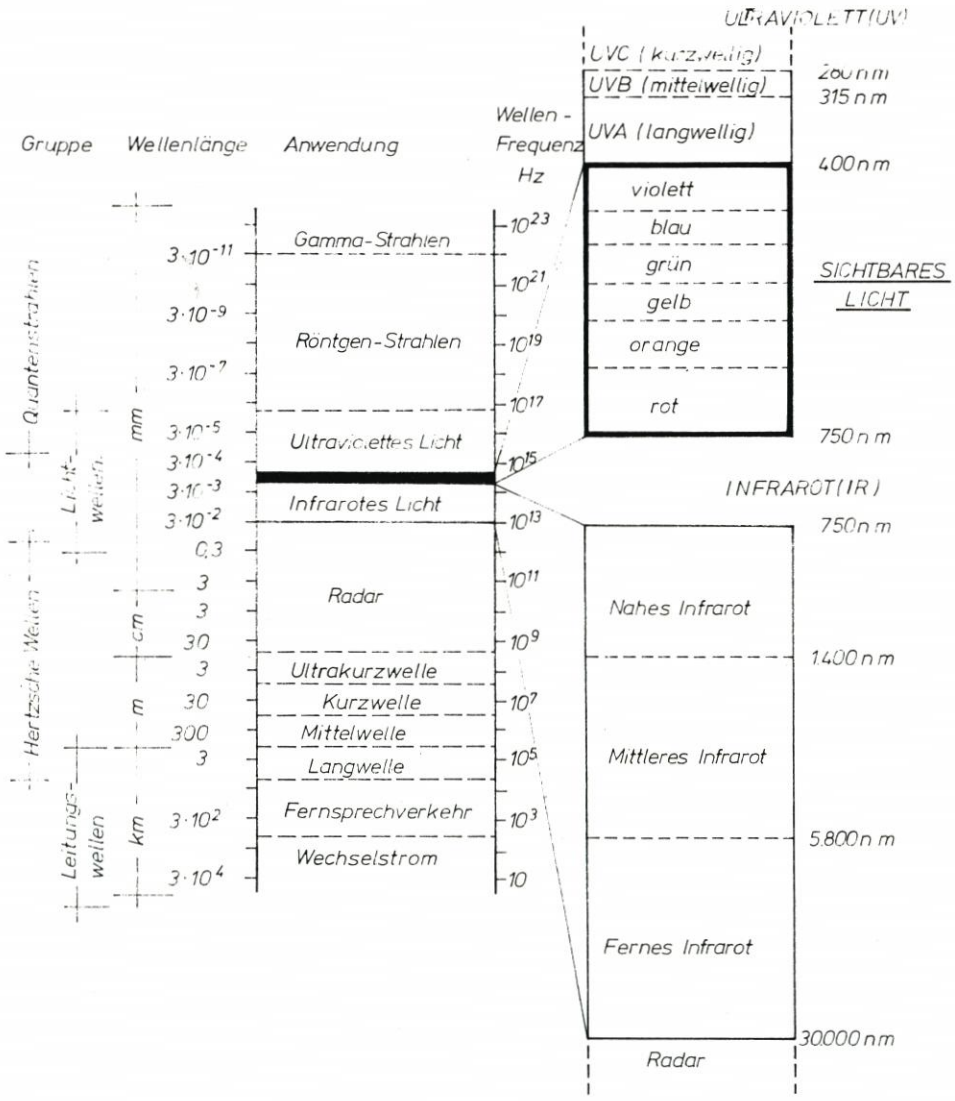


Abb. 2. Elektromagnetisches Wellenspektrum

träger ein Flugzeug des Typs Dornier DO 28 D2 „Skyservant" eingesezt worden. Es hat einen offenen Kameraschacht von 1,5 × 0,5 m Größe, über dem die Sensoren montiert waren. Die Leistungsdaten dieses Flugzeugs sind folgende (STÄTTER, 1982):

Besatzung: 3 (Pilot, Meßingenieur, Navigator)
Fluggeschwindigkeit: ca. 120 Knoten (rd. 220 km/h)
Flughöhe: 300 bis 5000 m
Reichweite: ca. 700 km (ca. 3,5 h)

Als Sensoren dienen Luftbildkammern, spezielle Filme sowie Multispektralscanner.

Für Aufnahmen im sichtbaren Wellenbereich werden an erster Stelle Luftbildkameras,

und zwar Reihenmeßkammern, verwendet. Sie liefern eine gute, flächenhafte und stereoskopisch auswertbare Bilddeckung, wie sie für die qualitative Luftbildinterpretation gebraucht wird. Reihenmeßkammern unterscheiden sich nach Bildformat und Objektivbrennweite. Darüber hinaus werden z. B. für besonders schwierig interpretierbare Erdoberflächen Spezialkammern eingesetzt wie Panoramakammer, Streifenkammer oder für die Erfassung desselben Flächenteiles in verschiedenen Spektralbereichen auch die mehrlinsige Multispektralkammer. Im Rahmen der Schlickforschung Watten sind folgende Luftbildkammern eingesetzt worden (STÄTTER, 1982):

1. Für Aufnahmen in sog. Fliegerfilmformat über Intervallrechner und Überdeckungsregler eine Reihenmeßkammer als Weitwinkelkamera des Typs RMK A 15/23, Brennweite f = 15 cm, Gesichtsfeld 75°, horizontal, Blende 1 : 4 bis 1 : 11, Belichtungszeit $^1/_{100}$ bis $^1/_{1000}$ s, Filmformat 24 cm Breite, Bildgröße 23 × 23 cm, Bildwiederholungsrate max. 2 s und Bildmaßstab bei 1500 m Flughöhe m = 1 : 10 000.
2. Für Multispektralaufnahmen mit verschiedenen Filmen, Filterkombinationen, variablem Bildmaßstab und verschiedenen Objektiven bestückt, ein System aus gekoppelten 70-mm-Kameras bei gleichzeitig auslösbarer Belichtung des Typs Hasselblad der Serien 500/EL und MK 70, Filmformat 70 mm Breite und 55 × 55 mm Bildgröße.

Bei den Filmen ist die Bildqualität von der Empfindlichkeit der Filmemulsion abhängig. Der in der Schwarzweiß-Fotografie meistens verwendete panchromatische Film (380 bis 680 nm) gibt die Farbunterschiede der Erdoberfläche nach dem Augenempfinden tonwertrichtig wieder. Oft sind jedoch die in schwer differenzierbaren Graustufen liegenden Einzelheiten nicht zu identifizieren. Denn die Remission (Zurückwerfen von Strahlen an undurchsichtigen Flächen) der verschiedenen Objekte ist in den Spektralbereichen unterschiedlich: Zum Beispiel liegt das Maximum bei Wasser im violetten Bereich (400 nm), Sand im gelben (600 nm), lebendes Blattgrün einmal im grünen (560 nm) und außerdem im nahen Infrarot. Im langwelligen Bereich absorbiert das Wasser also die Strahlung, es erscheint im infraroten Bereich (800 nm) schwarz. Lebendes Blattgrün wird dagegen in diesem Bereich stark reflektiert, je nach Chlorophyllgehalt bilden sich Wiesen, Laub und Grünpflanzen sehr hell ab (Abb. 2 u. 3). Durch diesen Chlorophylleffekt sind z. B. deutliche Unterscheidungen auch im amphibischen Wattenmeergebiet möglich (SCHNEIDER, 1980).

Der Farbfilm hat eine ähnliche spektrale Empfindlichkeit wie der panchromatische Schwarzweißfilm, ist diesem jedoch durch die natürliche Farbwiedergabe überlegen. Zur bestmöglichen Nutzung aller Spektralbereiche werden deshalb unterschiedliche Film-Filter-Kombinationen angewendet, wie beim Fernerkundungstest der DFVLR in der Schlickforschung in Batterien mehrerer Kammern oder speziellen mehrlinsigen Multispektralkammern zur Multispektralfotografie zusammengefaßt. Die DFVLR verwendete die für Luftbildaufnahmen aus größeren Höhen wegen der Filtrierbarkeit von Fehlern infolge des atmosphärischen Dunstes die gut geeigneten Filme s/w panchromatisch von Kodak Nr. 2402 und 2405, von Agfa PAN 30 und außerdem als Farbfilm von Kodak „false color infrared" Nr. 2443. Als Zusatzinformationen wurden in jede Aufnahme eingeblendet (STÄTTER, 1982):

Laufende Bildnummer (Zählerstand)
Horizontale Ausrichtung der Kamera (Libelle)
Barometrische Höhe
Seriennummer der Meßkammer
Datum und Uhrzeit der Aufnahme

Der schließlich als Sensor eingesetzte Multispektralscanner ist ein optomechanischer Abtaster, der die von der überflogenen Erdoberfläche empfangene Strahlung mit Hilfe eines geneigten Spiegels durch Eigenrotation zeilenweise auf lichtempfindliche Zellen abtastet

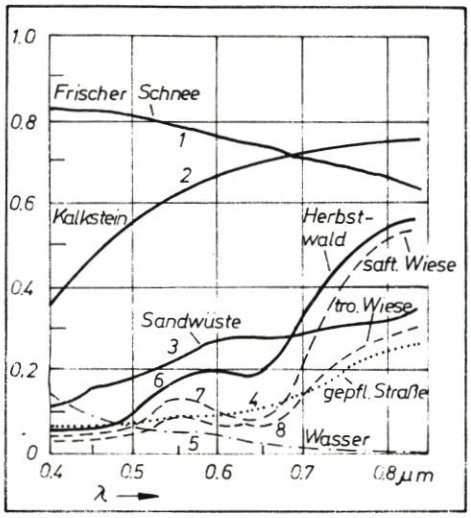


Abb. 3. Remission verschiedener Erdoberflächen

und zugleich registriert, so daß sich in Verbindung mit der Fortbewegung des Flugzeugs in seiner Flugbahn der Zeilenvorschub und aus Einzelbildpunkten zusammengesetzte Bilder der Erdoberfläche ergeben. Dabei wird je nach Bauart des Scanners die Strahlung zur Erhöhung des Unterscheidungsvermögens der Helligkeiten in mehreren Spektralbereichen (Kanälen) erfaßt (Abb. 4). Die Einzeldaten werden korrigiert (Drift-, Nick- und Rollwinkel des Flugzeugs), durch Umwandlung des unterschiedlichen Strahlungsintensitäten entspringenden Lichtes der einzelnen Bildpunkte in elektrische Signale digitalisiert, auf einem Mehrspurenmagnetband aufgezeichnet und schließlich im vorgegebenen Grauwertebereich abgebildet. Außer im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums können auch „Wärmebilder" im infraroten Bereich aufgezeichnet werden. Die DFVLR verwendete im Forschungsvorhaben Schlick den

Multispektralscanner Bendix M^2S
Nutzbarer Scanwinkel: 90° (± 45° von Nadir)
Scanstreifenbreite am Boden: zweifache Flughöhe
Geometrische Auflösung: bei 1000 m Flughöhe 2,5 × 2,5 m
Datenaufzeichnung auf 14-Spur-Analogband
Radiometrische Auflösung des Meßsignals: 1 bit = 256 Grauwerte
Meßwerterfassung in 11 Kanälen: 10 im sichtbaren bzw. nahen infraroten Spektralbereich, 1 im thermalinfraroten Bereich (Abb. 2)
Zur Einstellung des thermal-infraroten Meßbereichs des Scanners verwendet die DFVLR den die Strahlungsequivalent- oder Oberflächentemperatur registrierenden Infrarotradiometer BARNES PRT-5 mit einem von −20 °C bis +60 °C einstellbaren Meßbereich.

2.3 Digitale Bildverarbeitung

Mit der Verfügbarkeit von Luftbildaufnahmen des schleswig-holsteinischen Wattenmeergebiets seit 1935 (WIELAND, 1982) wurden die topografischen Unterlagen (Watthöhenkarten) für eine Überwachung von Formänderungen der Priele, Watten, Außensände und Inseln

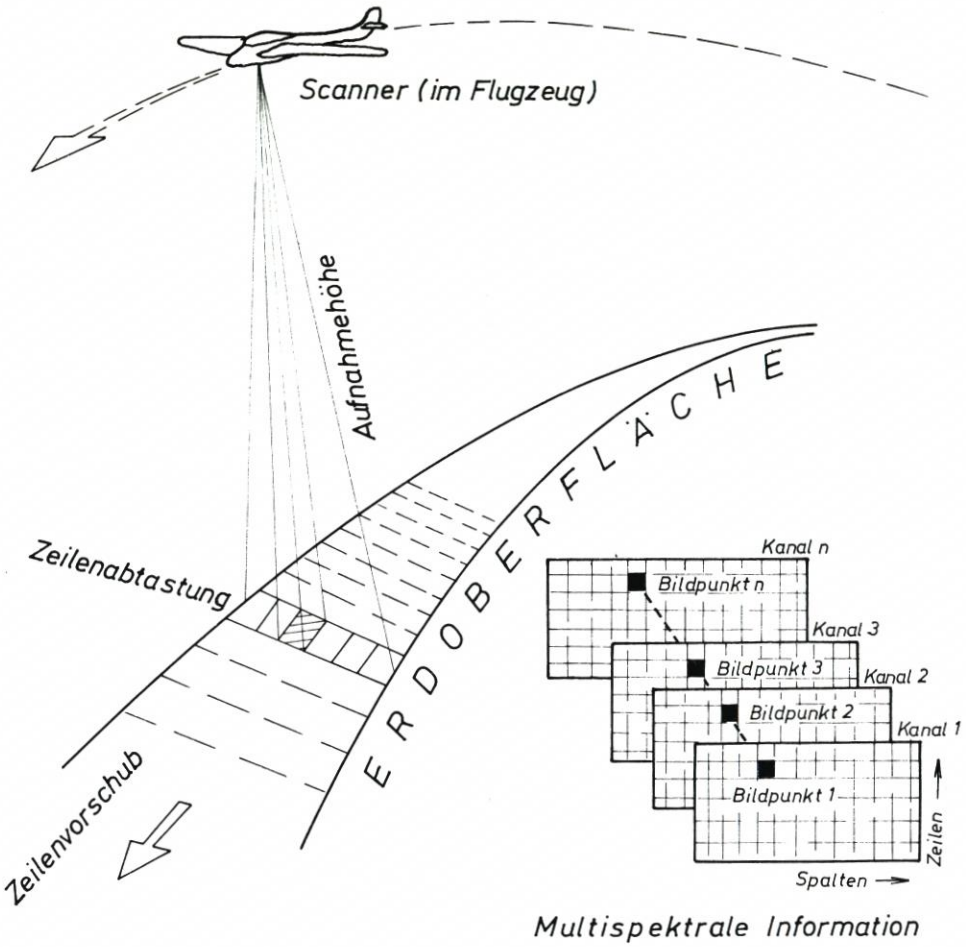


Abb. 4. Prinzip der Scanner-Aufnahme

wesentlich ergänzt. Durch die bildlichen Momentaufnahmen wurden möglich:
– synoptische Beobachtung großer Areale zum Erkennen überregionaler Zusammenhänge,
– wiederholte periodische Aufnahme gleicher Gebiete zur Erfassung von Veränderungen.
Die optische Aussagekraft der so zunächst gewonnenen schwarz-weißen Senkrechtfotos wurde mit Einführung der Farb- und Infrarotfarbfotografie wesentlich verbessert.

Durch ständige Verbesserungen der Filmemulsionen, Objektive, Aufnahmeplattformen (Meßgeräteträger) und Auswertegeräte, hier insbesondere der Computertechnik, wurde es möglich, Methoden zu entwickeln, mit denen die außerordentlich große Menge an Informationen, die bei Berücksichtigung feinster, mit dem Auge nicht mehr unterscheidbarer Helligkeitsnuancen in einem Bild enthalten sind, ausgewertet werden kann.

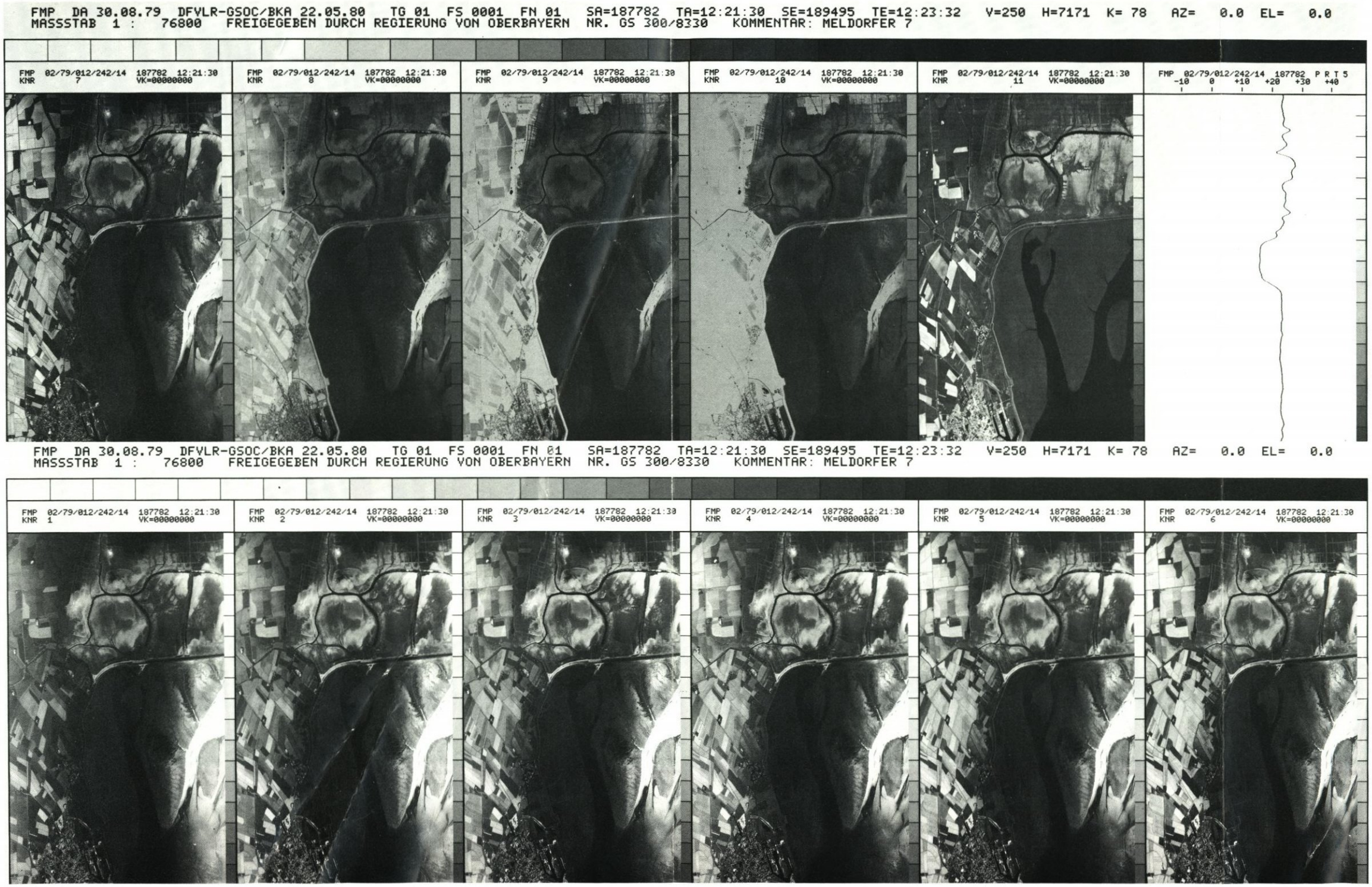


Abb. 5. Bildausgabe der Scanner- und Radiometerdaten, Beispiel Dithmarscher Bucht Nord

2.3.1 Aufbereitung der Daten

Die Einzelinformationen werden als Fotos aufgenommen und danach digitalisiert oder bereits bei der Aufnahme computergerecht aufbereitet. Bei allen optisch erzeugten Bildvorlagen erfolgt die Digitalisierung durch Auflicht-Abtaster (Papierbilder) und Durchlicht-Abtaster (Dias), wobei die einzelnen Bildpunkte zeilenweise abgetastet, die Helligkeiten von einer Fotozelle gemessen, Zahlenwerten zugeordnet und in eine im Rechner weiterverarbeitbare Zahlenmatrix umgesetzt und gespeichert werden.

Zur Digitalisierung der Informationen schon bei der Aufzeichnung werden in Satelliten und Flugzeugen Multispektral-Scanner eingesetzt. Dabei werden die durch ein rotierendes Spiegelsystem von jedem Bildpunkt der Erdoberfläche empfangenen Strahlungsintensitäten, die den unterschiedlichen Helligkeiten und Farbtönen im sichtbaren Bereich sowie dem Thermoeffekt im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums entsprechen, auf lichtempfindlichen Zellen erfaßt, in elektrische Signale umgesetzt und quantifiziert. Nach Bestimmung und Zuordnung der mittleren Grauwerte innerhalb der Gesamtscala entsteht auch hier die Zahlenmatrix zur Weiterverarbeitung in Rechnern mit Hilfe spezieller Programme.

Die an der Schlickforschung beteiligte DFVLR bereitete das erflogene Datenmaterial fast ausschließlich im eigenen Hause auf. Schwarzweiß-Filme und Farbfilme wurden entwickelt, kopiert und als Vorlage für Vergrößerungen hergestellt, wobei Farbfilme nach dem Cibachrome-Prozeß bearbeitet wurden. Auf Magnetband aufgezeichnete Daten wurden in drei Schritten aufbereitet:

1. Kontrolle der Datenqualität durch Rückspielung der Analogdaten des Scanners auf Film (Quicklook).
2. Umsetzung auf Rechnerband mit 9 Spuren und 1600 Byte pro Inch. Dieses „Computer Compatible Tape" (CCT) enthält alle Scanner- und Radiometerdaten sowie die Zusatzinformationen.
3. Bildaufbereitung und Bildausgabe, wobei vom Rechnerband über einen Fotoscanner ein Bild der Scanner- und Radiometerdaten erzeugt wird (Abb. 5).

Rechenbänder, Bildausgaben und Flugprotokolle werden an die Experimentatoren zur Weiterverarbeitung gegeben. Zur fotografischen Bildaufbereitung gehört auch die Umbildung der projektiven Verzerrung auf dem Luftbild in das einer Karte geometrisch ähnliche Bild. Die Korrektur dieser Panorama-Verzerrung kann z. B. auf mathematischem Wege erfolgen (Methode der strengen Abbildungsgleichungen) oder durch Vergleich mit einem Referenzbild (z. B. topografische Karte) mit Hilfe von Paßpunkten (BÄHR et al., 1981).

2.3.2 Auswertung der Daten

Um die Vielfalt der mit den modernen Datenerfassungssystemen gewinnbaren Einzelinformationen im Sinne einer optimalen Bildinterpretation hinsichtlich des jeweiligen Erkundungszieles auch voll ausnutzen zu können, ist die Konfiguration der Hardware, und für dessen Betrieb insbesondere die Flexibilität des Software-Pakets, von entscheidender Bedeutung. Demzufolge erscheint die vollautomatische Bildauswertung, bei der alle Entscheidungen dem Rechner überlassen werden, weniger geeignet. Deshalb hat die DFVLR das „digitale interaktive Bildauswertungssystem" DIBIAS entwickelt und auch im Fernerkundungstest für die Schlickforschung Watten angewendet. Hierbei ist wesentlich die Kopplung zwischen dem subjektiv, aber synoptisch erkennenden und interpretierenden Menschen und dem schnell und

objektiv, aber seriell arbeitenden Rechner. Der Nachteil des bei dieser schrittweisen Bearbeitung geringeren Datendurchsatzes wird durch eine höhere Qualität der erzielten Ergebnisse ausgeglichen. Einige wichtige Merkmale dieses experimentellen, forschungsorientierten Bildverarbeitungssystems sind folgende (HABERÄCKER, 1978):

F l e x i b i l i t ä t : Möglichkeit des Anwenders, die Prozesse zu aktivieren, zu steuern und zu überwachen. System jederzeit auf einfache Weise erweiterbar. Simultanarbeit verschiedener Verarbeitungsprogramme möglich.

E i n f a c h e H a n d h a b u n g : Nach nur kurzer Einarbeitungszeit auch vom EDV-unerfahrenen Fachwissenschaftler selbständig anwendbar. Alle Systemteile präsentieren sich im Klartext. Streng modulare Gliederung der Software. Ergebnisse nach jedem Verarbeitungsprozeß sofort auf Farbbildschirm beurteilbar.

Die H a r d w a r e - Konfiguration von DIBIAS besteht im Kern aus dem Prozeßrechner INTERDATA M 85 und neben der üblichen Peripherie aus den 15 in Abb. 6 wiedergegebenen Geräten, worin das Datensichtgerät dem Anwender als Bedienungskonsole zur Kommunikation mit dem System dient. Dabei sind folgende Kategorien von Anwender-Interaktionen möglich (HABERÄCKER, 1978):

- Aktivierung von einzelnen Bildverarbeitungsprogrammen
- Eingabe von modulspezifischen Parametern
- Kontrolle des DIBIAS-Systemstatus
- DIBIAS-Systemmeldungen an den Anwender

Das S o f t w a r e - System von DIBIAS besteht neben den Datenträgern (Bild, Film, Magnetband) aus den registrierenden Teilen (Drucker, Zeichner), den Kommunikationsteilen (Sichtgerät, TV-Farbschirm), den Ein- und Ausgabeeinheiten sowie den Verarbeitungsmoduln (Abb. 7). Um größeren Programmieraufwand, Zeit- und Speicherbedarf bei der Verarbeitung

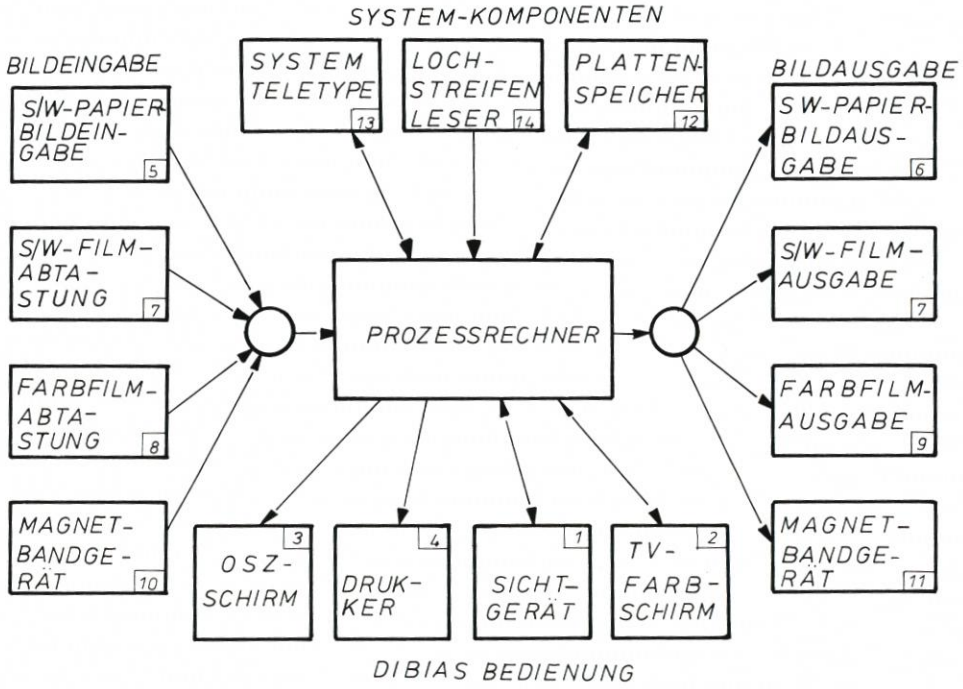


Abb. 6. Die DIBIAS-Hardware-Konfiguration

Die Küste, 40 (1984), 1-318

der Bildinformationen verschiedener Informationsträger und folglich unterschiedlicher Datenformate zu vermeiden, wurde ein einheitliches DIBIAS-internes Datenformat gewählt. Zur weitgehenden Ausschöpfung des gesamten Grauton-Spektrums wird jedes Bild mit den in der Regel aus 256 möglichen Graustufen pro Bildelement bestehenden Videodaten versehen und mit Zusatzinformationen, die das Bild genau identifizieren und die Entstehungsgeschichte (Bildgeschichte) dokumentieren sollen. Letztere enthält eine Protokollierung aller bisher erfolgten Verarbeitungsschritte. Die Verarbeitungsmoduln sind die eigentlichen Bildverarbeitungsprogramme. Bereits Anfang 1978 hatte DIBIAS etwa 150 verschiedene Programme.

2.3.3 Interpretation

Die Luftbildinterpretation ist in zwei Erkenntnisprozesse aufgliederbar:

1. Identifikation der Bildinhalte
2. Deduktion eines Schlüssels aus dem Erkundungsmaterial

Wichtiger Teil der Analyse, Synthese und Ergebnisdarstellung, z. B. in einer farbig-thematischen Karte, ist die digitale multispektrale Klassifizierung. Dabei werden als Endprodukte die im Original abgebildeten einzelnen Objektklassen (z. B. Vorland, Quellerzone, Schlickwatt, Sandwatt, Wasser) symbolisch und einheitlich durch Farbtöne dargestellt. Eine solche Klassifizierung wird dadurch ermöglicht, daß die Bildobjekte in den einzelnen Spektralbereichen unterschiedlich hell erscheinen.

Bei der Klassifizierung unterscheidet man grundsätzlich die „unüberwachte" und die „überwachte" Verfahrensgruppe. Letztere, der ersteren weit überlegen (Bähr et al., 1981), arbeitet im wesentlichen nach folgendem Schema:

- Festlegen der unterscheidenden Klassen,
- Auswahl von Trainingsgebieten für jede Klasse,
- Berechnung statistischer Parameter, die als repräsentativ für die jeweilige Klasse gelten,
- Klassifizierung: Einsetzen der stat. Parameter in einen Entscheidungsmechanismus, der über die Zugehörigkeit jedes Merkmalvektors zu einer Klasse entscheidet oder ihn als unklassifizierbar zurückweist.

Im Bestreben, bei der digitalen multispektralen Klassifizierung eine hohe Genauigkeit zu erzielen, also den Anteil der in den einzelnen Klassen als richtig erkannten Bildelemente gegenüber den unklassifizierbaren möglichst hoch zu erreichen, werden die Grauwerte mehrerer Spektralkanäle gleichzeitig herangezogen, so daß der Merkmalsraum mehrdimensional wird. Als zusätzliche Hilfe werden verschiedene Filter verwendet. Zur Auswahl der geeigneten Spektralbereiche dient die Hauptkomponentenanalyse verschiedener Bildausschnitte. Das Festlegen der Klassen erfolgt in Abhängigkeit von der Fragestellung des Anwenders. Beispielsweise können Oberflächenstrukturen bzw. Watt-Typen im Küstenvorfeld interessieren wie

Sandwatt,
trockene Außensände,
dunkles (feuchtes) Sandwatt,
Schlickwatt,
Vorland,
Wasser.

Es kann der Bewuchs und das Oberflächensediment von Interesse sein, z. B.

Quellerzone,

Andelzone,
Diatomeensiedlungen,
Miesmuschelfelder,
Korngrößenverteilungen.

Oder es sollen thermische und hydrodynamische Parameter erkundet werden, wie z. B.

Wasseroberflächentemperaturverteilung,
Tideströmungsverhältnisse.

Diese genannten Klassen sind heute durch Fernerkundung bestimmbar. Die Auswahl der Trainings- und Kontrollgebiete mit Elementen möglichst nur einer Klasse spielt für die Klassifizierung eine zentrale Rolle, weil die den Entscheidungsalgorithmus bestimmenden statistischen Parameter aus Trainingsgebieten geschätzt werden. Da die Oberflächen z. B. der verschieden strukturierten und besiedelten Watten keine klar definierten Grenzen aufweisen, sondern fließend ineinander übergehen, und weil außerdem kaum genügend große, absolut homogene Flächen aufzufinden und Grenzen zwischen Mischformen (z. B. Schlickwatt, schlickiges Sandwatt) auch von der Definition her noch nicht eindeutig markiert sind, ist die Auswahl und sichere Abgrenzung von Trainingsgebieten für die einzelnen Klassen im Watt besonders schwierig. Unproblematisch in der Unterscheidung sind dagegen z. B. die zur Parameterschätzung genügend viele Bildelemente enthaltenden, wegen der deutlichen Unterschiedlichkeit der mittleren Grauwerte in den beiden Spektralbereichen leicht zu erkennenden und groß genug verfügbaren Klassen „trockenes Sandwatt" und „Wasser".

Zur Qualitätssteigerung der Klassifizierungsergebnisse dienen Einzelpunktvergleiche der transformierten und berechneten Werte mit den am Boden direkt gemessenen Parametern. Dazu werden Bodenkontrollmessungen zur Kalibrierung zeitparallel zu den Befliegungen durchgeführt. Außerdem wurden zeitstimmige thematische Karten herangezogen. Hierzu sind im Jahre 1974 an der Technischen Universität Hannover im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell geförderten Sonderforschungsbereichs 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren" in den Teilprojekten S 1 „Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen von Küstengewässern" und S 2 „Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen aus Wattgebieten" (SFB 149, 1982) umfassende Untersuchungen begonnen worden. Als Testgebiete wurden die Watten im Jadebusen und in Nordfriesland gewählt. Die Fernerkundungsbefliegungen der Testfelder Cuxhaven und Büsum im Rahmen des Forschungsvorhabens Schlicksedimentation Watten sind durch Wattoberflächen-Sedimentproben-Entnahmen aus Trainingsgebieten zur Klassifizierung begleitet worden.

3. Ergebnis und Schlußfolgerung

Im Rahmen der vom BMFT von Ende 1977 bis 1981 geförderten ersten Stufe des Forschungsvorhabens „Schlicksedimentation Wattenmeer" sind zusätzlich Befliegungen durchgeführt worden, um zu ergründen, ob die Fernerkundung hierbei als wesentliches Hilfsmittel dienen kann. Dazu wurden von den Testfeldern Büsum und Cuxhaven durch die DFVLR multispektrale Scanneraufnahmen aus 700 m, 1500 m bzw. 2000 m Höhe bei jeweils 60 % Überlappung in Flugrichtung gemacht (Abb. 1). Die Niedrigbefliegung in 700 m über Grund bei sämtlichen Streifen war aufgrund der Erkenntnisse aus den Arbeiten im Sonderforschungsbereich 149 in der Jade (Bähr et al., 1981, und SFB 149, 1982) gewählt worden, wonach dabei eine besonders für Wattuntersuchungen wichtige hohe Detailerkennbarkeit erreicht wird. Als Sensoren wurden neben der Reihenmeßkammer von Zeiss und der Hasselblad-Kamera (siehe Abschn. 2.2) der Bendix-M²S-Scanner eingesetzt mit den 11 Kanälen

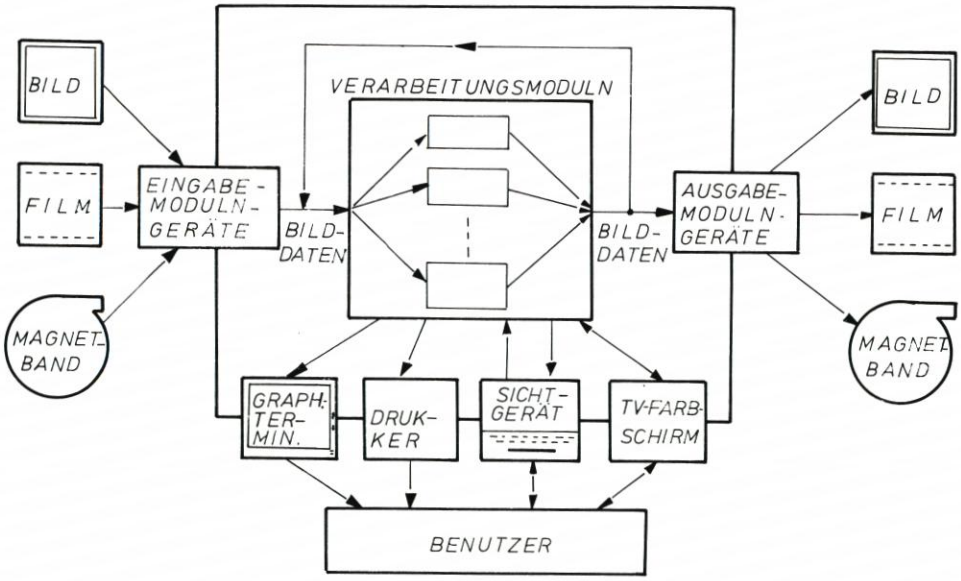


Abb. 7. Das DIBIAS-Software-System

K 1 = 0.380–0.440 µ
K 2 = 0.440–0.490 µ
K 3 = 0.495–0.535 µ
K 4 = 0.540–0.580 µ
K 5 = 0.580–0.620 µ
K 6 = 0.620– 0.660 µ
K 7 = 0.660– 0.700 µ
K 8 = 0.700– 0.740 µ
K 9 = 0.760– 0.850 µ
K 10 = 0.970– 1.060 µ
K 11 = 9.000–11.000 µ (Thermal)

Das Testfeld Cuxhaven wurde am 7. 9. 1978 von 10.30 h bis 11.30 h (MEZ) bei einem Niedrigwasser-Scheiteleintritt um 10.30 h am Pegel Cuxhaven vom Flugplatz Nordholz aus bei dunstigem Wetter sowohl in 700 m als auch in 1500 m Höhe in drei Streifen von 10, 12 und 18 km Länge beflogen (Abb. 1). Die Befliegung des Testfeldes Büsum war wegen einer Nato-Manöversperrung im Sommer 1978 erst 1979 vom Flugplatz Westerland/Sylt aus möglich. Sie erfolgte am 30. August bei klarem Wetter von 10.55 h bis 15.05 h (MEZ) in vier Streifen aus 700 m und Streifen 5 und 7 auch aus 2000 m Höhe (Abb. 1). Der Scheitel des Tideniedrigwassers trat an dem Tag am Pegel Büsum um 10.44 h mit 324 cm PN ein, die Hochwasserscheitel um 4.39 h mit 649 cm PN und um 16.04 h (MEZ) mit 648 cm PN, insgesamt mit maximal nur 4 cm Abweichung fast genau im zehnjährigen mittleren Tidegang liegend.

Von den Befliegungen sind aus dem Testfeld Cuxhaven 8 Blatt Positiv-Papierbilder und die Magnetbänder der vom Scanner aufgezeichneten Daten ausgeliefert worden. Aus dem Testfeld Büsum wurde an Datenmaterial 70-mm-Dias, einige Cibachrome-Farbvergrößerungen von daraus ausgewählten Dias, Fliegeraufnahmen 23 × 23 cm vom Kodak-2448-Farbumkehrfilm und 70-mm-Falschfarben-JR-Film Kodak 2443 JR-FC zur Verfügung gestellt (Abb. 8). Die Auswahl und Auswertung bestimmter Scannerszenen wurden in der DFVLR in Oberpfaffenhofen gemeinsam von den Mitarbeitern im Schlickforschungsprojekt, den Herren R. Stätter (DFVLR), R. Gast (Univ. Kiel) und B. Fladung (ALW Heide, Dezernat Gewässerkunde Büsum), vorgenommen.

Als Ergebnis kann zusammengefaßt gesagt werden, daß es durch die Fernerkundung mit Hilfe der heute verfügbaren leistungsstarken Geräteträger, Sensoren und speziellen Datenverarbeitungssysteme möglich geworden ist, neben den relativ gröberen Oberflächenstrukturen auch bereits sehr feine Bildelemente zweiter Dimension, wie z. B. Zusammensetzung und thermischer Zustand der Erdoberfläche, zu erfassen. So können im einzelnen mit Hilfe genügender spezifischer Paßpunkte und zeitgleicher In-situ-Messungen bei sorgfältiger Auswahl von Trainingsgebieten und Klassifizierung u. a. folgende, für Fragen der Schlickforschung relevante thematische Karten gewonnen werden:

Bewuchskarten (z. B. *Zostera, Salicornia, Spartina, Puccinellia, Festuca, Diatomeen*, Muschelfelder)
Wattypenkarten (Sandwatt, Mischwatt, Schlickwatt)

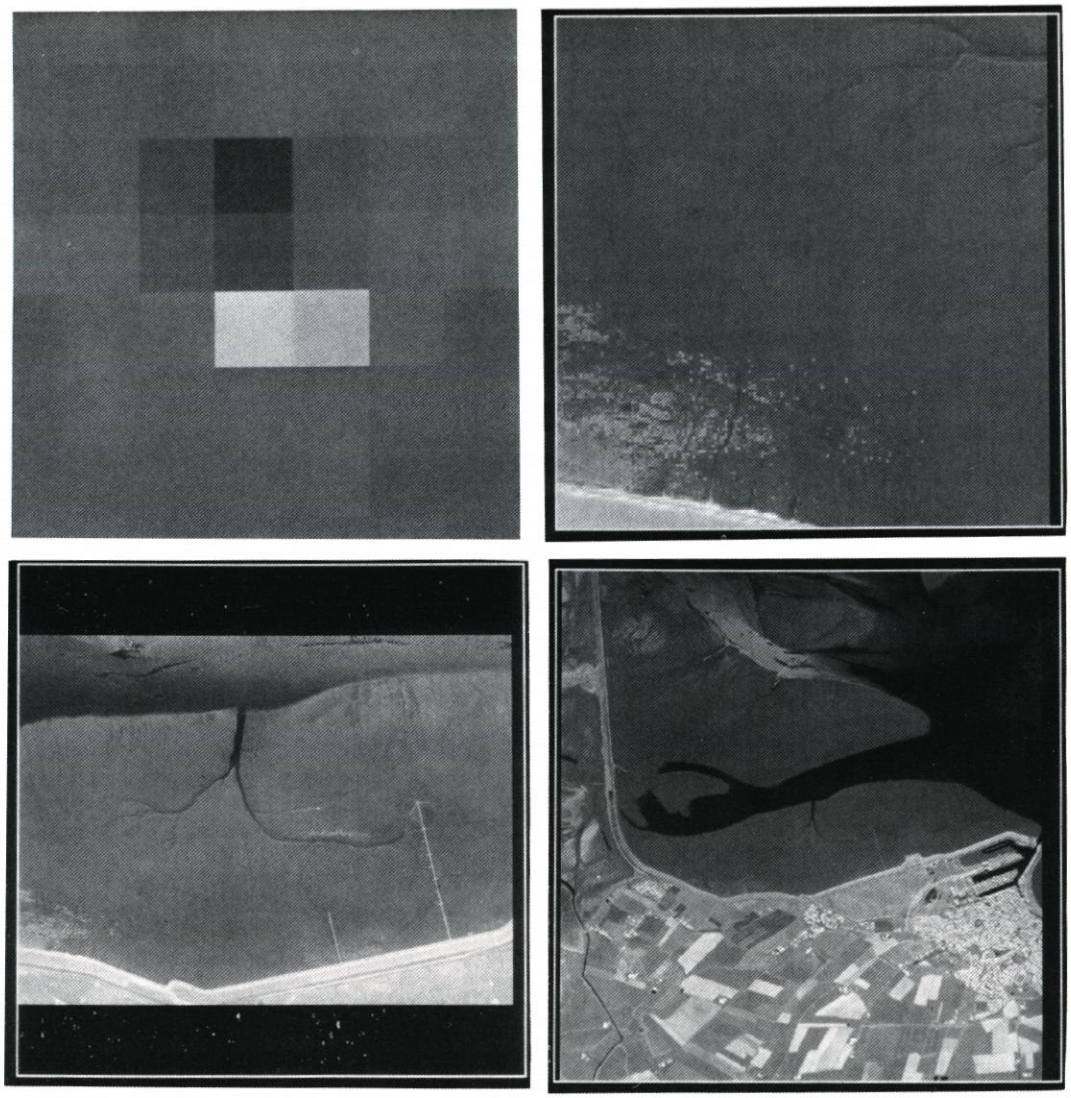


Abb. 8. Falschfarben-Bildausgaben vom Testfeld Büsum

Sedimentklassenkarten (Einteilung der Wattoberfläche nach prozentualem Feinkornanteil bis 0.063 mm ∅), z. B. nach SFB 149, 1982:
Kl. 1 = 0 % bis 5 % Feinanteil
Kl. 2 = 5 % bis 10 % Feinanteil
Kl. 3 = 10 % bis 25 % Feinanteil
Kl. 4 = 25 % bis 50 % Feinanteil

Isothermalkarten: Oberflächentemperaturverteilung des Meerwassers durch Bildfarbstufungen bis auf $^1/_{10}$ °C (BECKER, 1978; SCHNEIDER, 1979, u. SFB 149, 1982)

Strömungslinienkarten: Erfassung und Darstellung von Tidestromrichtungen und -geschwindigkeiten auf der Grundlage der Sedimentaufwirbelung verschieden stark konzentrierter Wasserkörper, die im Kanal 5 des Multispektralscanners besonders hohe Kontraste bilden (SFB 149, 1982)

Watthöhenkarten mit Hilfe des Wasserlinienverfahrens (WEGENER, 1979, u. WIELAND, 1982)

Es zeigt sich also, daß die Fernerkundung in der „Schlickforschung Watten", für die das auch künftig unersetzbare menschliche Informationssystem, vor allem der Gesichtssinn, ein wesentliches Hilfsmittel darstellt und im Hinblick auf die besonders für ineinandergreifende, großräumige Vorgänge unerläßliche synoptische und kurzperiodische Datenerfassung unentbehrlich ist, nicht zuletzt wegen der personell und gerätemäßig dazu unverhältnismäßig aufwendigen Feldmessungen. Noch verlangt dieses Verfahren einen hohen apparativen Aufwand und umfangreiche Aufbereitungsprozeduren. Die dynamische Entwicklung im letzten Jahrzehnt ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Zunehmend bessere und mehr Möglichkeiten der Fernerkundung bestehen durch die ständige Weiterentwicklung der elektronischen Datenverarbeitung sowie durch spezielle Objektive, Aufnahmeplattformen, Sensoren und Filmemulsionen auch für den nichtsichtbaren Infrarot- und Mikrowellenbereich.

4. Schriftenverzeichnis

BÄHR, H.-P.; DENNERT-MÖLLER, E.; EHLERS, M.; KOLOUCH, D. u LOHMANN, P.: Digitale Verarbeitung von Fernerkundungsaufnahmen. Zeitschrift für Vermessungswesen, H. 3/1981.

BECKER, G.: Infrarot-Scanner-Aufnahme der Wassertemperatur um Helgoland. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, H. 3/1978.

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.

HABERÄCKER, P.: Untersuchungen zur Klassifizierung multispektraler Bilddaten aus der Fernerkundung. Dissertation, TU Berlin, 1978.

HABERÄCKER, P.: Digitale Bildverarbeitung. Die neue Dimension der Photographie. Bild der Wissenschaft, H. 10/1978.

SCHNEIDER, S.: Die Interpretation von Fernerkundungsdaten zur Beurteilung der Umweltsituation und Umweltbelastung. Handbuch für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt, Bd. 3, von Buchwald/Engelhardt (Hrsg.). BLV Verlagsgesellschaft München – Wien – Zürich, 1980.

SCHNEIDER, S. (in Zusammenarbeit mit KROESCH, V.; RÜPKE, N.; SERWATZKY, G. und WÖLPERT, D.): Gewässerüberwachung durch Fernerkundung. Digitale Aufbereitung und Auswertung von Thermalaufnahmen der Unterelbe und des Oberrheins. Schriftenfolge der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, H. 14, 1979.

SFB 149 (Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren): Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen von Küstengewässern und aus Wattgebieten. Jahresberichte über die Teilprojekte S_1 und S_2 in den Jahren 1977 bis 1981. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 81/1979, 87/1979, 96/1980, 103/1981, 109/1982.

STÄTTER, R.: Möglichkeiten der optischen Erderkundung in der DFVLR. Unveröffentl. Bericht „Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V.", Oberpfaffenhofen, März 1982.

WEGENER, B.: Rechnergestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien im Verfahren der Wattvermessung. Dissertation. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, H. 91, 1979.

WIELAND, P.: Umfang und Häufigkeit topografischer und fotografischer Erfassung des Wattenmeergebietes zwischen Hever- und Elbemündung von 1934 bis 1981. Büsumer Gewässerkundliche Berichte Nr. 45/1982 des ALW Heide. Büsum, 1982.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht

Von Peter Wieland

Zusammenfassung

Anhand historischer Karten, überlieferter Berichte und jüngerer Watthöhenkarten von insgesamt sechs zeitverschiedenen topografischen Aufnahmen seit 1934 sind die Entwicklung der Küstenlinie sowie der Watten und Priele in der Dithmarscher Bucht flächig, räumlich, lage- und höhenmäßig untersucht worden. Die Methode wird aufgezeigt und die gefundenen Veränderungen, auch im Einfluß technischer Eingriffe in das Tideregime durch eine Vordeichung, werden im einzelnen dargestellt. Aus erkennbaren Tendenzen zu erwartende künftige Entwicklungen werden gedeutet.

Summary

The areal, volumetric and topographical evolution of the coastline, the intertidal zone and channels of Dithmarsh Bay were investigated based on historical maps, reports and recent topographical charts for a total six different time periods since 1934. The analysis technique is described and a detailed discussion given of the changes which were determined to have occurred both naturally and due to construction associated with initial diking measures in the tidal zone. Further developments are induced from clearly apparent trends.

Inhalt

1. Anlaß und Aufgabe 107
2. Historische Entwicklung des Küstenraumes 109
   2.1 Geologischer Einblick 109
   2.2 Entwicklungen im Wattenmeer 110
   2.3 Landgewinn seit Beginn des Deichbaus 114
3. Jüngere morphologische Veränderungen 115
   3.1 Grundlagen und Methode 115
   3.2 Entwicklung der Tidescheitelwasserstände 119
   3.3 Veränderungen der Wattwasserläufe 123
   3.4 Flächen- und Volumenbilanz 126
4. Schlußanmerkungen 133
5. Schriftenverzeichnis 137

1. Anlaß und Aufgabe

Im Zuge der Ausführung des Generalplanes Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein wurde in den Jahren 1970 bis 1978 im Wattenmeergebiet der Dithmarscher Bucht durch das Land im Abstand von 2 bis 4 km vor der alten Küstenlinie zwischen Warwerort im Norden und Kaiserin-Auguste-Viktoria-Koog im Süden ein neuer Seedeich errichtet (Abb. 1). Dadurch wurde der natürliche Überflutungsraum der Dithmarscher Bucht um insgesamt 31 km² verringert. Dieser Eingriff in das Tideregime des Wattstro-

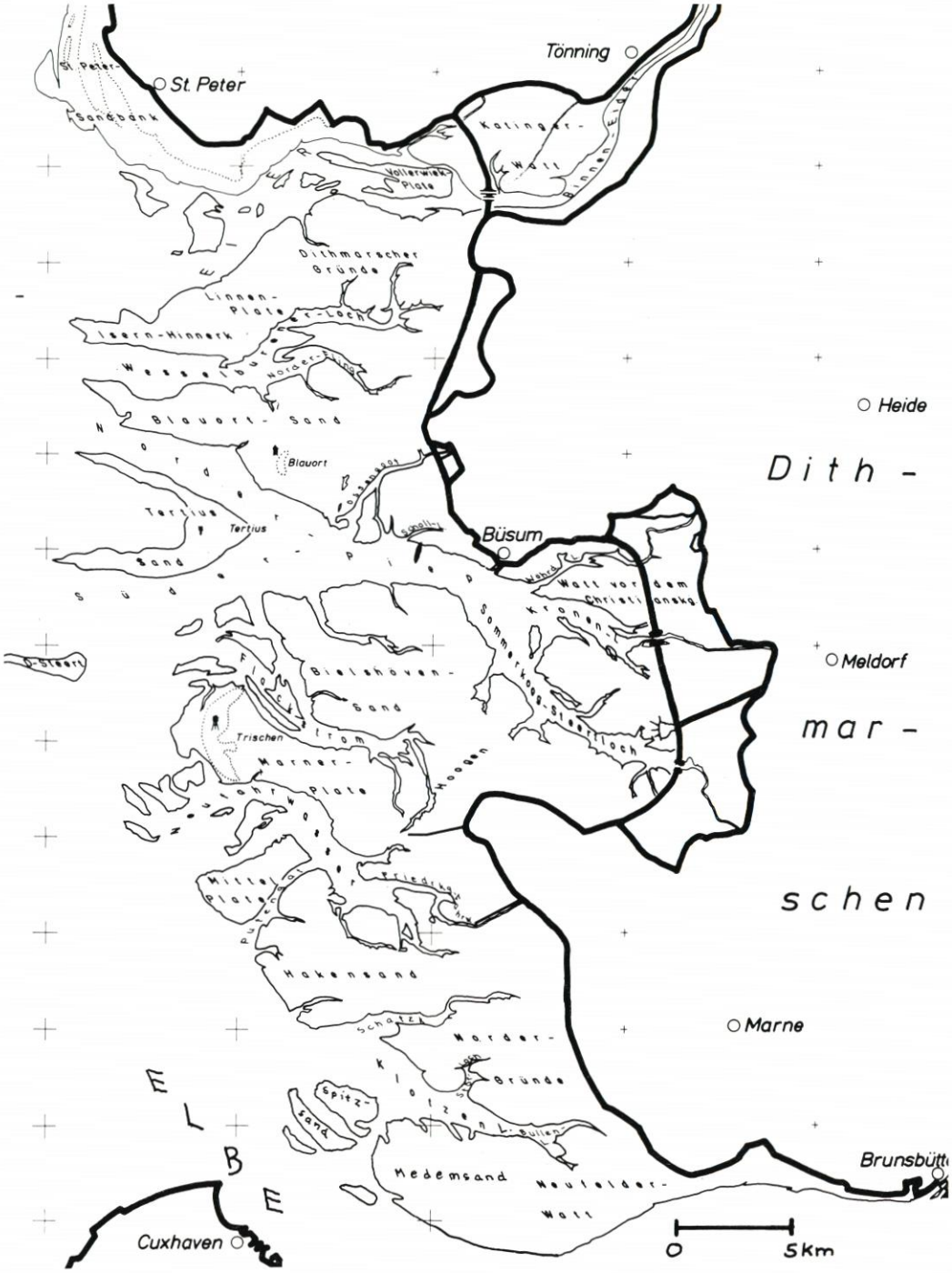


Abb. 1. Übersichtskarte südliche Nordseeküste Schleswig-Holstein

mes Piep mit seinen Quellprielen Wöhrdener Loch, Kronenloch mit Außenmiele sowie Sommerkoog-Steertloch kann hydrologische, sedimentologische und morphologische Veränderungen insbesondere im landnahen Bereich zur Folge haben. Um etwaigen nachteiligen Entwicklungen rechtzeitig begegnen zu können, die den Küstenschutz, die Wasserwirtschaft, Schiffahrt, Fischerei, die Erholungswirtschaft und das ökologische Gleichgewicht in irgendeiner Weise berühren, werden als Grundlage die Naturzustände und -vorgänge seit 1970, unmittelbar vor Beginn des Seedeichbaues, nach einem speziellen Programm (ALW Heide, 1981) kontinuierlich beobachtet, festgehalten und beurteilt.

Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hat Ende 1977 in der inneren Deutschen Bucht das Forschungsvorhaben „Schlicksedimentation Watten" begonnen. Bis Anfang 1982 sind in einer ersten Stufe in zwei Testfeldern, nämlich Sahlenburger Watt und Dithmarscher Bucht, vor allem sedimentologische, geologische und biologische Untersuchungen zunächst zur Standortcharakterisierung, Begriffsbestimmung und Methodik durchgeführt worden (Figge et al., 1980). Dafür stellte das Bundesministerium für Forschung und Technologie zusätzliche Mittel zur Verfügung.

Im Rahmen dieser Untersuchungen sind als Basis zum Erfassen vorausgegangener natürlicher Umformungen und etwaiger Auswirkungen des technischen Eingriffs der Bedeichung sowie zum Einordnen sedimentologischer Veränderungen an der Wattoberfläche die geomorphologischen Veränderungen im gesamten Einflußraum bis zum Beginn der Vordeichung sowie während der acht Jahre dauernden Baumaßnahme zu ermitteln. Dazu ist zunächst die historische Entwicklung des Küstenraumes etwa westlich der Linie Marne–Meldorf–Wesselburen anhand geologischer Untersuchungsergebnisse und älterer archivalischer Quellen, insbesondere Karten und Segelanweisungen etwa vom 16. Jahrhundert bis heute, zusammenfassend nachzuzeichnen. Dann sind die morphologischen Veränderungen des Küstenvorfeldes seit Beginn der topografischen Wattvermessungen im Jahre 1936 flächig und räumlich zu bilanzieren und die Tendenzen aufzuzeigen.

2. Historische Entwicklung des Küstenraumes

2.1 Geologischer Einblick

Der Dithmarscher Küstenraum ist geprägt durch die pleistozänen Moränenwälle etwa in der Linie Burg–Meldorf–Heide, mit den Nehrungshaken vor allem südlich Meldorf bei St. Michaelisdonn und nördlich Heide bis Lunden, sowie durch den westlich davorgelegenen holozänen Ablagerungsraum (Abb. 1, 2). Der Geestrand wurde vor rd. 200 000 Jahren während der Saale-Vereisung aufgebaut (Wohlenberg, 1968). Vor knapp 8000 Jahren, nachdem während der Flandrischen Transgression, beginnend im frühen Atlantikum ca. 6000 Jahre v. d. Z., der Meeresspiegel von rd. − 25 m NN auf − 2 m NN angestiegen war, reichte die Nordsee bis an die Geest heran (Dittmer, 1937). Von da an tritt an die Stelle des Eises das Meer als landschaftsgestaltende Kraft. Das Mittelalluvium ist die Zeit der Kliff- und Nehrungsbildungen mit Materialabbruch vom Geestrand und küstenparalleler Versetzung nach Norden und Süden. Maßgebend waren Brandungskräfte, da die Watten noch nicht bestanden. Sedimentation fand bis dahin kaum statt. Erst an der Wende von der Jungsteinzeit zur Bronzezeit, ca. 1600 v. d. Z., beginnt in Dithmarschen eine starke Sedimentation, mit der schließlich der Meeresspiegelanstieg nicht mehr Schritt hält, so daß die Brandungskräfte abnehmen. In der Folge klingt die Geestrandabrasion aus, und über dem eiszeitlichen Niveau des Nordseebeckens bilden sich Watten und Sände mit einer Mächtigkeit von heute bis zu

36 m (Insel Trischen). Schließlich entstanden von etwa 800 v. d. Z. bis 1000 n. d. Z. aus feinsten marinen und brackischen Sedimenten landnah neben vereinzelten Torfen und Mooren die „Alte Marsch", und, in einem Prozeß fortgesetzten Anhäufens von Sedimenten bis zur Gegenwart, darüber die „Junge Marsch" (DITTMER, 1937 u. 1960). Das so bereits in frühgeschichtlicher Zeit in Dithmarschen entstandene feste Land war im Westen begrenzt etwa durch die Linie Brunsbüttel–Marne–Meldorf–Wöhrden–Wesselburen–Hemme einschließlich der Insel Büsum. Es ist gleichzeitig der Gürtel der ältesten Gemeinschaftswarften (Abb. 3), die etwa ab 300 n. d. Z. errichtet wurden und von wo die Besiedlung der Marsch ausging (FISCHER, 1955).

2.2 Entwicklungen im Wattenmeer

Das allein schon durch die erhebliche Veränderung der Küstenlinie gewandelte Bild des Wattenmeeres ist mangels genauer Karten und Aufzeichnungen aus früherer Zeit bis hinein ins 18. Jahrhundert nur lückenhaft und grob nachzuzeichnen. Immerhin ergeben sich wertvolle Anhalte zum besseren Verständnis der Entwicklung des Raumes insgesamt.

Die bedeutenden, heute bekannten Wattströme waren bereits Anfang des 16. Jahrhunderts nachweisbar vorhanden. Weil sie seit jeher den wechselnden Kräftewirkungen unterlagen, veränderten sie sich jedoch in Lage und Form zum Teil erheblich. Zu diesen dominierenden Fahrwassern gehören die Piep mit Norderpiep und Süderpiep, die Miele und der Flackstrom (Abb. 1).

Nach den Segelanweisungen, den ältesten überlieferten Dokumenten über das Küstenvorfeld, mit Beschreibungen vor allem von WAGHENAER (1592, 1596, 1600), HAEYEN (1585) und BLAEU (1608), waren Norder- und Süderpiep wechselnd weit voneinander getrennt, teils parallel West-Ost verlaufend, aber zunächst bis zum Ende des 16. Jahrhunderts sich unmittelbar westlich der damaligen Insel Büsum, etwa in nördlicher Verlängerung des damals Süd-Nord gerichteten Flackstromes, vereinend. Sie gabelten sich am seeseitigen Kopf des sich von Büsum westwärts erstreckenden Sandes De Hondt, später Hodemer Sandt und danach Blauort-Sand, mit den hochwasserfreien Sänden Blauort und zeitweise, nach ZARTMANN (1846), Koegs-Hinnerk-Sand und Büsum-Hinnerk (LANG, 1975, Abb. 2). Die östliche Verlängerung der Norderpiep in die heutige Dithmarscher Bucht hinein bis nahe an den Ort Wöhrden war der die ehemalige Insel Büsum nördlich vom Festland trennende Wart-Strom. Unmittelbar parallel zum Festland vor Meldorf lag bis ins 19. Jahrhundert hinein das Kronenloch. Verbindungsrinne vom Binnenfluß Miele zum Wattstrom Piep war seit jeher die Außenmiele.

Um die Wende vom 16. zum 17. Jahrhundert lagen die beiden Mündungsarme der Piep etwa 7 km weit auseinander. Bis etwa zum Ende des 18. Jahrhunderts bestand auch eine bedeutende, Nord-Süd gerichtete Fahrwasserverbindung von der Eider zur Norderpiep. Das Wesselburener Loch, heute nach Ausweitung der Watten als Tiderinne zwischen Eider und Piep gelegen, war bis dahin noch nicht vorhanden. Mit der Landfestmachung der Insel Büsum durch den Bau des Wardammes um 1600, auch infolge erheblicher Landverluste der Insel im Süden und insbesondere durch die im gesamten Küstenvorfeld andauernde starke natürliche Dynamik, kam es zu ständigen Umformungen und Verlagerungen der Wattströme und Rinnen, zur Vertiefung und Verbreiterung der Piep als dem jetzt mit Abstand dominierenden Fahrwasser. Die meistens Nord-Süd gerichteten Priele orientieren sich nach West-Ost, zeitweise entstandene, z. T. bewachsene halligartige Inseln westlich und südlich von Büsum verschwanden größtenteils wieder (Koegs-Hinnerk-Sand, Büsum-Hinnerk, Bielshöft, Tötel).

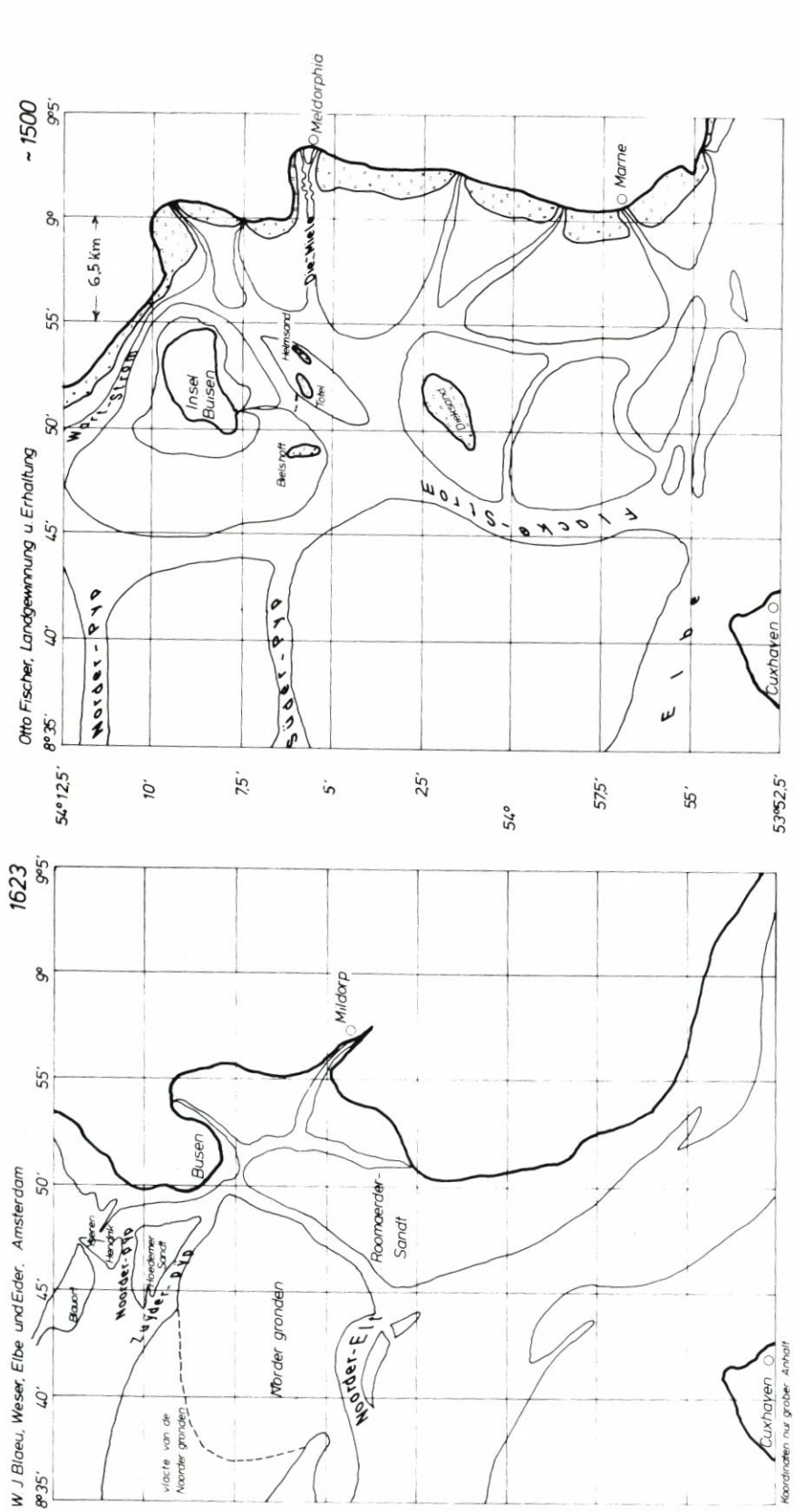
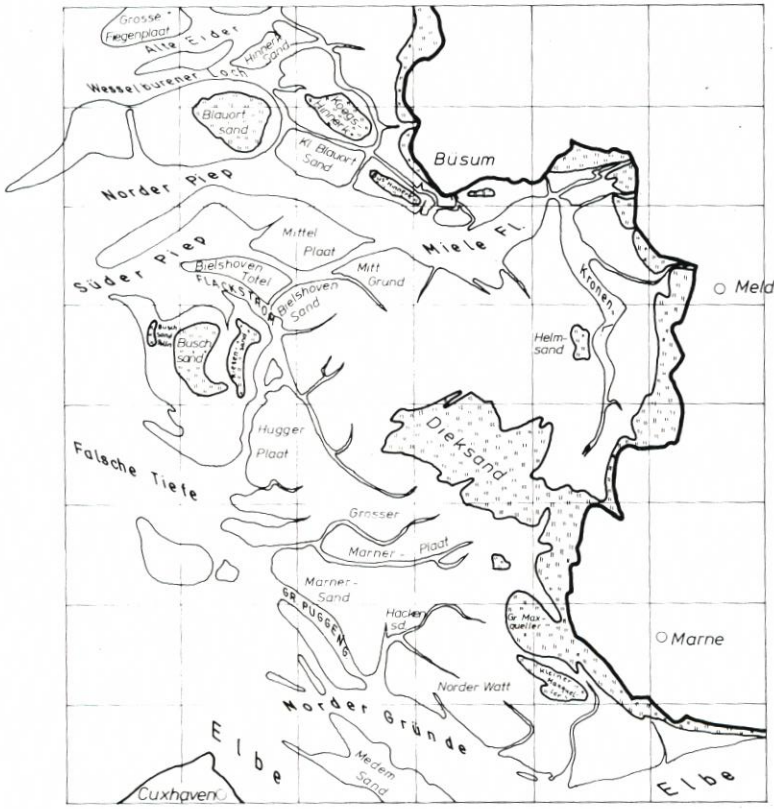


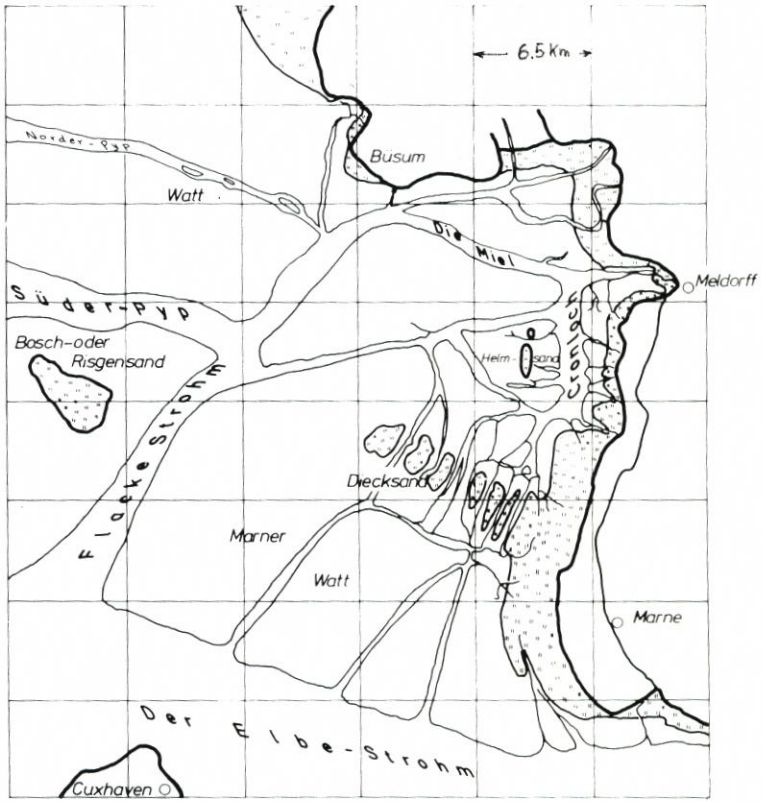
Abb. 2. Karten zur historischen Entwicklung des Küstenraumes zwischen Piep und Elbe

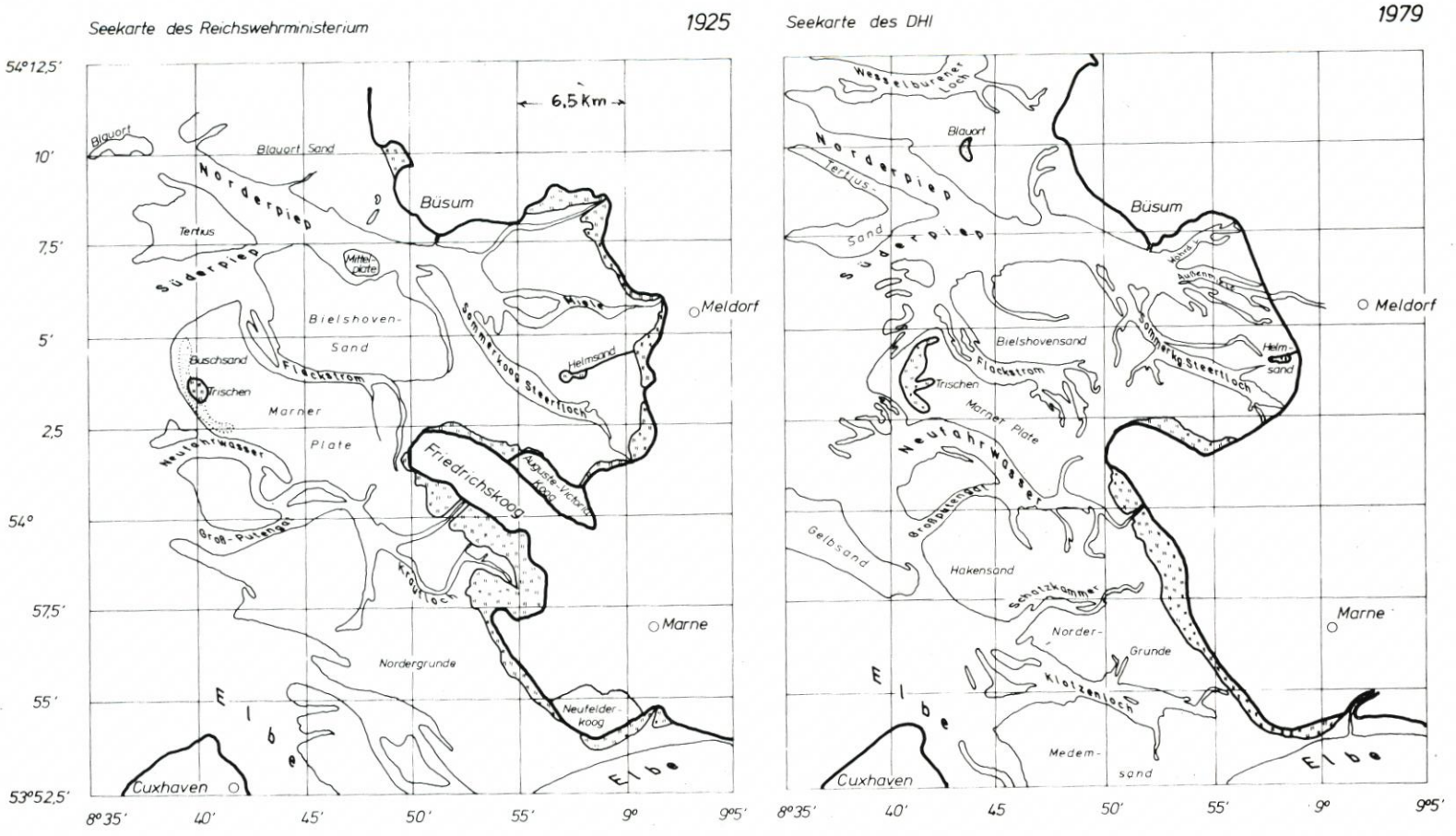
Dan Seekarte (Søkort over Sønderjyllands Westkyst) 1846



54°12,5'
10'
7,5'
5'
2,5
54°
57,5'
55'
53°52,5'

angelehnt an
J. A. Lang, Schiffahrts-und Hafendeputation, Hamburg 1787




Seekarte des Reichswehrministerium
1925
6,5 Km
Blayort
Blayort Sand
Norderpiep
Süderpiep
Tertius
Büsum
Meldorf
Bielshoven-
Sand
Buschsand
Flackstrom
Trischen
Marner
Plate
Sommerkoog Steerloch
Helmsand
Friedrichskoog
Augusta-Victoria-Koog
Neufahrwasser
Groß-Pulengat
Kreutloch
Nordergrunde
Marne
Neufelder-koog
Cuxhaven
Elbe
54°12,5'
10'
7,5'
5'
2,5
54°
57,5'
55'
53°52,5'
8°35'
40'
45'
50'
55'
9°
9°5'
Seekarte des DHI
1979
Wesselburener Loch
Blayort
Norderpiep
Tertius-Sand
Süderpiep
Büsum
Meldorf
Bielshovensand
Flackstrom
Trischen
Marner Plate
Neufahrwasser
Sommerkog Steerloch
Helm-sand
Gelbsand
Hakensand
Schlitzkammer
Norder-Grunde
Kiolzenloch
Medem-sand
Marne
Cuxhaven
Elbe

Am Westrand der nun geschlosseneren Watten wurden hochwasserfreie Sände aufgeworfen (Blauort, Tertius, Trischen), und durch Vorlandbedeichungen entstand die Dithmarscher Bucht und der im Südteil dominierende Wattstrom Sommerkoog-Steertloch. Durch den Bau des Speicherkooges Dithmarschen von 1970 bis 1978 wurde der Tideraum Dithmarscher Bucht in der Fläche um etwa 1/3 reduziert. Als einzige Hallig vor Dithmarschen blieb bis heute Helmsand in der Dithmarscher Bucht erhalten. Der hochwasserfreie Teil des Außensandes Tertius bestand nach kontinuierlicher, flächiger Schrumpfung bis 1975. Die Außensände Blauort und Trischen wandern im Mittel der letzten 90 Jahre in der Mittelachse, bezogen auf die Thw-Linie, um rd. 30 bis 40 m/Jahr ostwärts (WIELAND, 1972).

2.3 Landgewinn seit Beginn des Deichbaus

Die zunehmende Besiedlung und Landnutzung der Marsch sowie der anhaltende Meeresspiegelanstieg zwangen die Bewohner zu einem besseren Schutz vor Sturmfluten. So setzte etwa 1000 n. d. Z. der Deichbau ein. Der erste Seedeich entstand nach und nach am Westrand des alten Marschgürtels, worauf einige Ortsnamen noch heute hinweisen, wie z. B. Diekshörn nordwestlich von Brunsbüttel, Diekhusen südöstlich von Marne, Krumwehl nördlich von Marne, Barlter Altendeich südlich und Barsfletherdeich nordwestlich von Meldorf, Wesselburener Deichhausen, Süderdeich südlich und Schülper Altensiel nördlich von Wesselburen sowie Nesserdeich südwestlich von Lunden (Abb. 3).

Vor dieser Küstenlinie entstanden, dem örtlichen natürlichen Kräfte- und Stoffhaushalt entsprechend, in unterschiedlicher Intensität aus schlickigen Absätzen Vorländer und schließlich nach deren Bedeichung neue Köge. Im Elbemündungsgebiet erfolgte der natürliche Landzuwachs erheblich rascher als im nördlichen Dithmarschen um Wesselburen oder gar im extrem anlandungsschwachen Bereich westlich Meldorf. Offensichtlich ist in der Elbemündung das Zusammentreffen der zwei gegensätzlichen Biotope Fluß (Süßwasser) und Meer (Salzwasser) mit resultierendem Ausfällen absterbender Organismen an der überdurchschnittlichen Verlandungsintensität entscheidend beteiligt (WIELAND, 1973).

Bis zum Jahre 1720 waren vor Dithmarschen insgesamt rd. 12 320 ha Neuland hinzugewonnen worden. In diese Zeit fällt um 1600 die sog. Landfestmachung der bis dahin durch hohe Landverluste infolge ständiger Abbrüche am Südwestrand und technisch unterstütztem Landgewinn im Norden geformten Insel Büsum mit dem Bau des Wardammes. Von 1770 bis 1820 wurden im südlichen Küstenabschnitt vor Marne und an der Eider rd. 3400 ha Neuland gewonnen. Der größte Landzuwachs durch Bedeichung nutzreifen Vorlandes und einiger im Süden entstandener Halligen war zwischen 1854 und 1925; er betrug rd. 6500 ha. Diese von Naturkräften geprägte und technisch unterstützte Entwicklung führte schließlich zur Formung der heutigen Dithmarscher Bucht (Abb. 1).

Vom Anbeginn der Bedeichungen bis 1970, also unmittelbar vor Beginn der Vordeichung in der Dithmarscher Bucht, wurden zwischen Eider und Elbe insgesamt rd. 25 150 ha sturmflutgeschütztes Nutzland hinzugewonnen. Davon entfallen auf den südlichen Küstenabschnitt zwischen Brunsbüttel und Barlt 12 270 ha und mit 9420 ha reichlich dreiviertel davon auf den zwischen Ketelsbüttel und Lunden gelegenen nördlichen Dithmarscher Küstenabschnitt. Nur reichlich der siebente Teil des gesamten Neulandgewinns, nämlich bis 1970 rd. 3460 ha, sind im mittleren, etwa 15 km langen Küstenabschnitt im Innern der heutigen Dithmarscher Bucht natürlich angewachsen und eingedeicht worden (Abb. 3). Diese für eine Bucht auffallend schwache Schlicksedimentation war entscheidend für die Auswahl als Testgebiet im KFKI-Forschungsvorhaben neben dem vor Sahlenburg mit rel. hoher Sedimen-

tationsrate. Zum anderen steht hier zu erwarten, daß die Aufschlickung auch jetzt vor dem im Watt errichteten neuen Seedeich begrenzt bleibt, wenn sich nicht zugleich die Tide-Sinkstoff-Fracht erhöht und/oder Kräfteverhältnisse in den Tideströmungen sich sedimentationsfördernd ändern.

3. Jüngere morphologische Veränderungen

3.1 Grundlagen und Methode

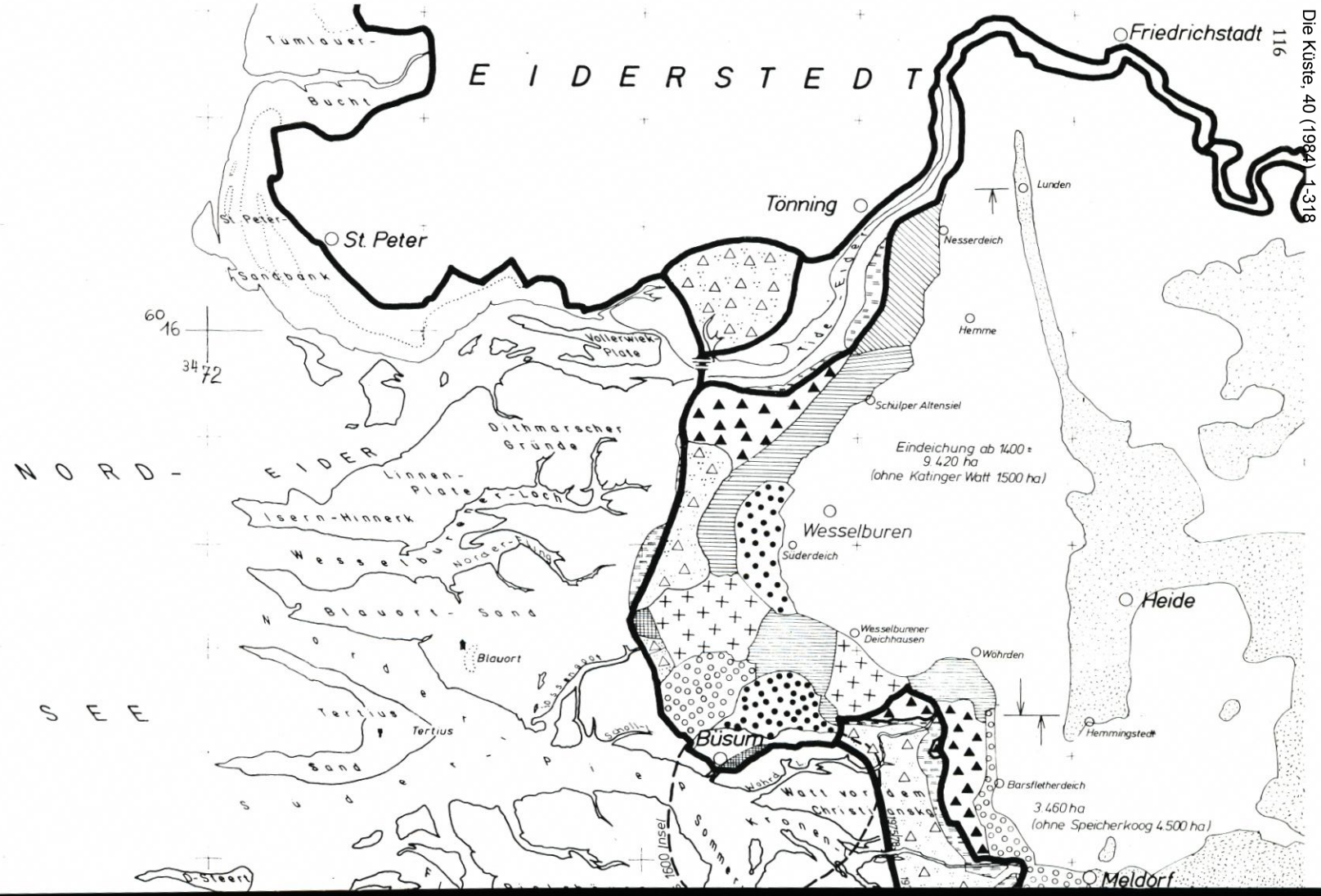
Das jeweilige Formeninventar als morphologischer Zustand sowie die Umformungen und Materialbilanzen im hydrodynamisch-morphologischen System Tidebecken sind das Produkt der natürlich oder/und anthropogen beeinflußt in diesem Raum wirkenden passiven Kräfte des Wattkörpers und der aktiven Kräfte aus Tidegang und Wind mit entsprechend wechselnden, teils sich überlagernden periodischen und aperiodischen hydraulischen Einwirkungen von Tidestrom, Seegang und Triftstrom.

In der nachfolgenden Untersuchung wird allein das aus Erosion und Sedimentation resultierende morphologische Folgebild dieses Wirkungsmechanismus aufgezeigt, ohne auf die verursachenden Kräfte näher einzugehen. Als Anhalt für etwaige übergeordnete hydrografische Veränderungen wird hier lediglich die Entwicklung der Tidescheitel-Wasserstände mitgeteilt.

Grundlage für die Ermittlung der morphologischen Veränderungen bilden die in Höhenlinienkarten im Maßstab 1 : 10 000 mit Stufungen von 10 cm (Watten) bis 1,0 m (Priele) aufbereiteten Ergebnisse der topografischen Wattvermessung (Wieland u. Thies, 1975).

Die morphologischen Zustände im Gesamtgebiet sind entsprechend den örtlich in Art und Intensität unterschiedlichen Gestaltungsvorgängen, technischen Aktivitäten und den kapazitiven Zwängen in wechselnden Zeitabständen und Flächengrößen erfaßt worden. Das Gebiet der Dithmarscher Bucht ist seit 1969 alle drei Jahre zusammenhängend topografisch vermessen worden. Aus der Zeit davor, seit Beginn der Wattvermessung im Jahre 1934, liegen zwei Gesamtaufnahmen aus zeitlich je über mindestens sieben Jahre gestreuten, verschieden großen Einzelflächenaufnahmen vor. Somit stehen insgesamt sechs zeitverschiedene morphologische Zustände für die weitere Auswertung zur Verfügung, und zwar 1944 (1936 bis 1951), 1956 (1953 bis 1959), 1969 (1969 bis 1970) sowie 1973, 1976 und 1979 (Abb. 4). Die zeitliche Streckung der Erstaufnahme ist insgesamt erheblich, und in Anbetracht der zwischenzeitlichen morphologischen Veränderungen, selbst wenn diese im hier betrachteten Gebiet relativ gering sind, nur bedingt als Vergleichsgrundlage brauchbar. Da aber reichlich 80 % der Fläche dieser ersten Aufnahme zeitlich eng aneinander liegen (1936/39), wird auch diese hier einbezogen.

Die Naturvorgänge sind gebietsspezifisch. Sie vollziehen sich innerhalb unterschiedlich geformter physiografischer Einheiten, wobei eine enge Beziehung zwischen dem jeweiligen Durchflußquerschnitt des Wattwasserlaufs und dem dorthin orientierten, durch die Watthöhenscheiden begrenzten Watteinzugsgebiet besteht (Lang, 1975; Renger, 1974; Rohde, 1977). Dies berücksichtigend, wurde das Wattenmeergebiet in der Dithmarscher Bucht als Haupteinzugsgebiet untergliedert in die drei Teileinzugsgebiete Sommerkoog-Steertloch, Kronenloch/Außenmiele und Wöhrdener Loch (Abb. 5). Auf dieser Grundlage werden die morphologischen Veränderungen und die Gesamtentwicklung durch vergleichende Betrachtungen ermittelt. Das geschieht flächig anhand aneinandergereihter, zeitverschiedener Linien gleicher Höhen mit der Höhenlinien-Differenzenkarte als Ergebnisbild insbesondere zur Prielverlagerung. Außerdem wird eine räumliche Bilanzierung der Watt- und Wasserräume



Die Küste, 40 (1984), 1-318

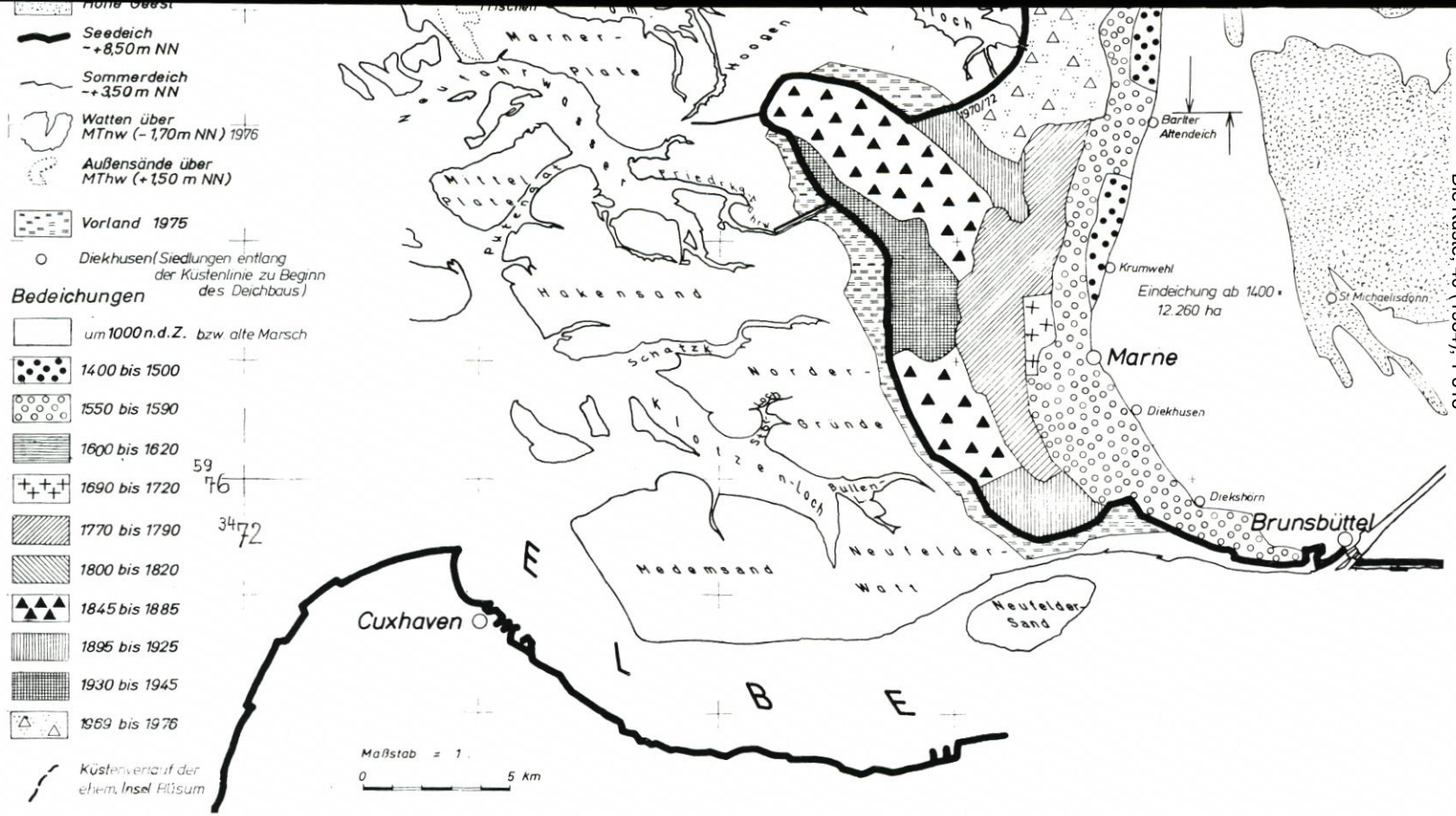


Abb. 3. Karte der Landentwicklung an der Dithmarscher Küste

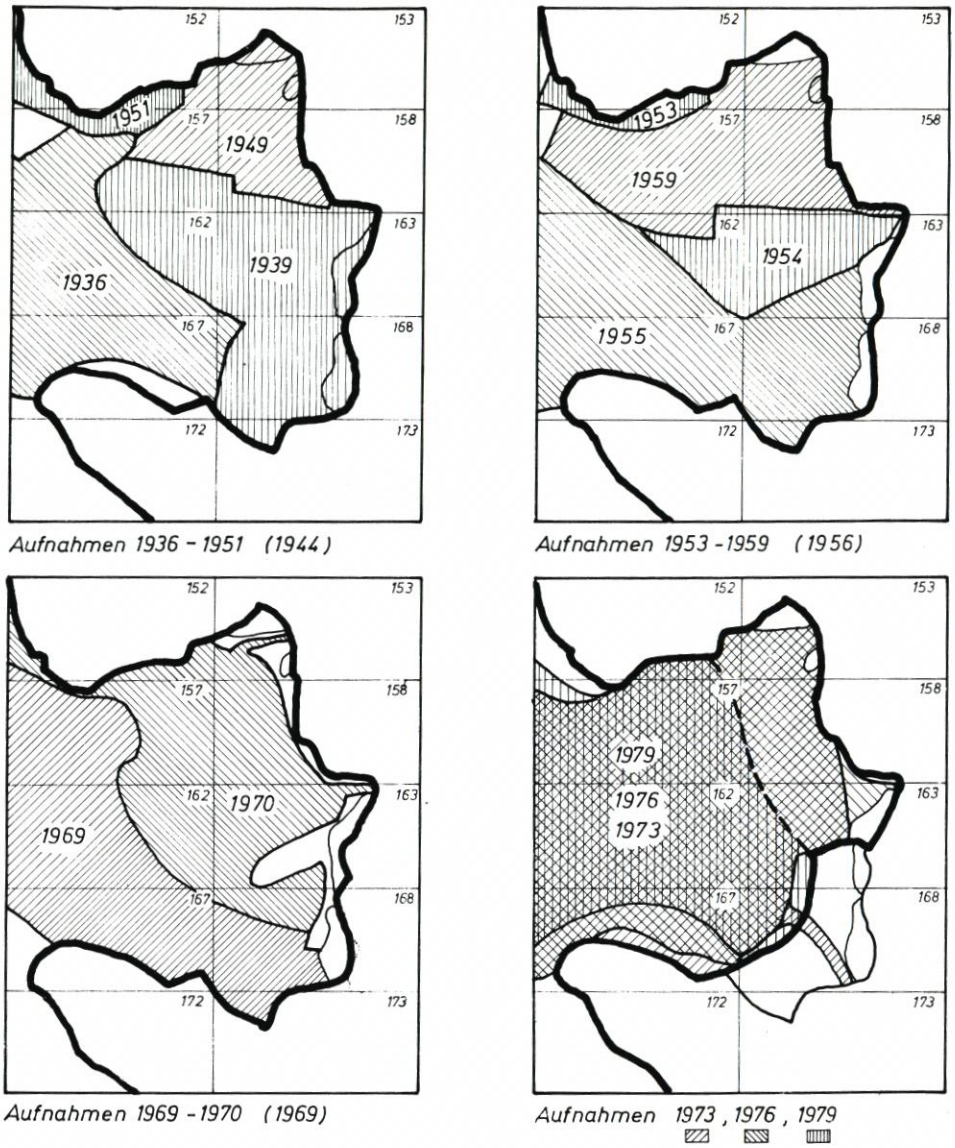


Abb. 4. Karte über Termine und Umfang topografischer Vermessungen in der Dithmarscher Bucht

jedes Einzugsgebiets auf planimetrischem Wege vorgenommen. Dabei wird die Prieluferlinie (−0,5 m NN) als Bezugsniveau angesetzt, weil die Priele z. T. auch ihre Sohlenhöhe verändern und das nach der größten Tiefe auszurichtende Niveau nicht über einen großen Zeitraum festlegbar ist. Andererseits würde hierbei oder bei sicherem, ausreichend tieferem Ansatz im Verhältnis zur Aussagekraft mit zu großen Raummengen operiert werden müssen (WIELAND, 1973). Der Vertikalbereich wird jeweils flächig und räumlich in der Weise bilanziert, daß oberhalb der Prieluferlinie die Wattvolumina und darunter die Prielvolumina (Wasserräume) erfaßt werden (Abb. 6).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

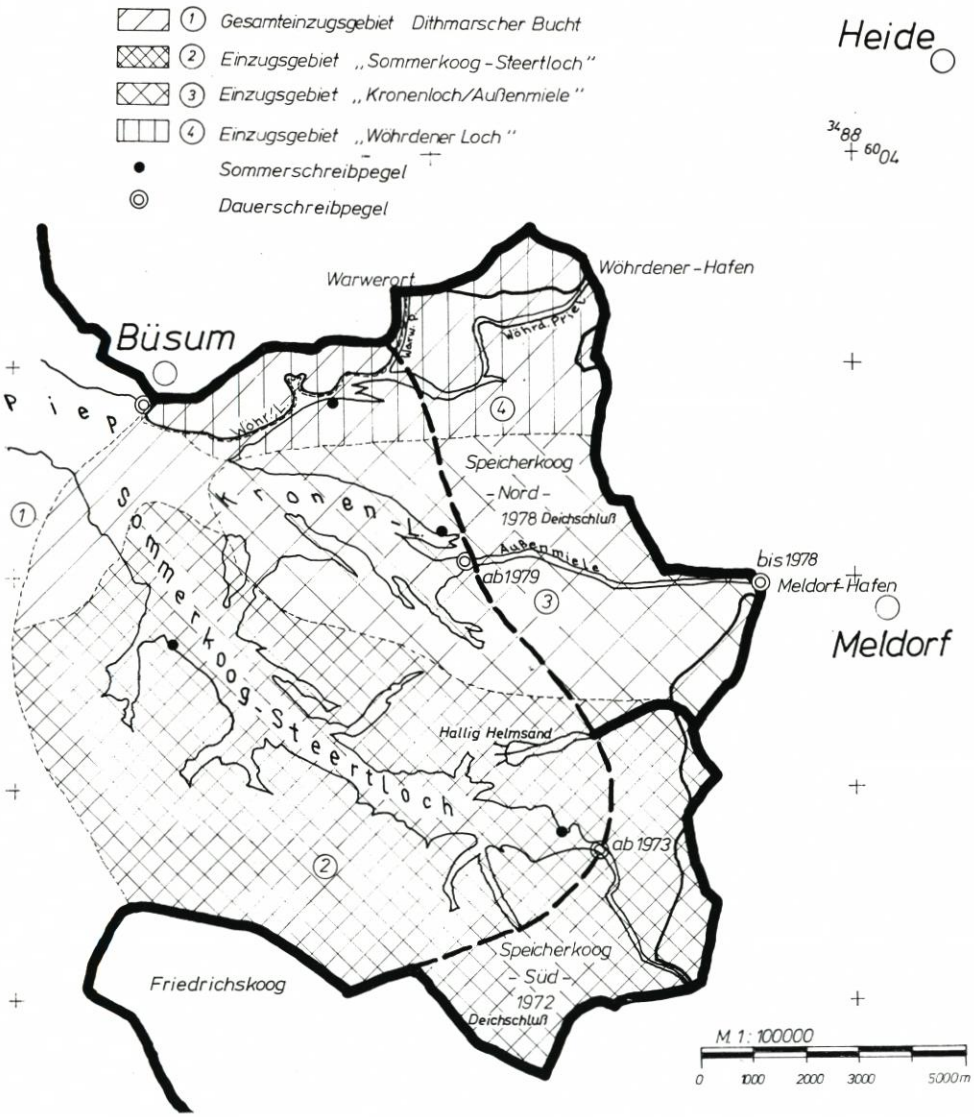
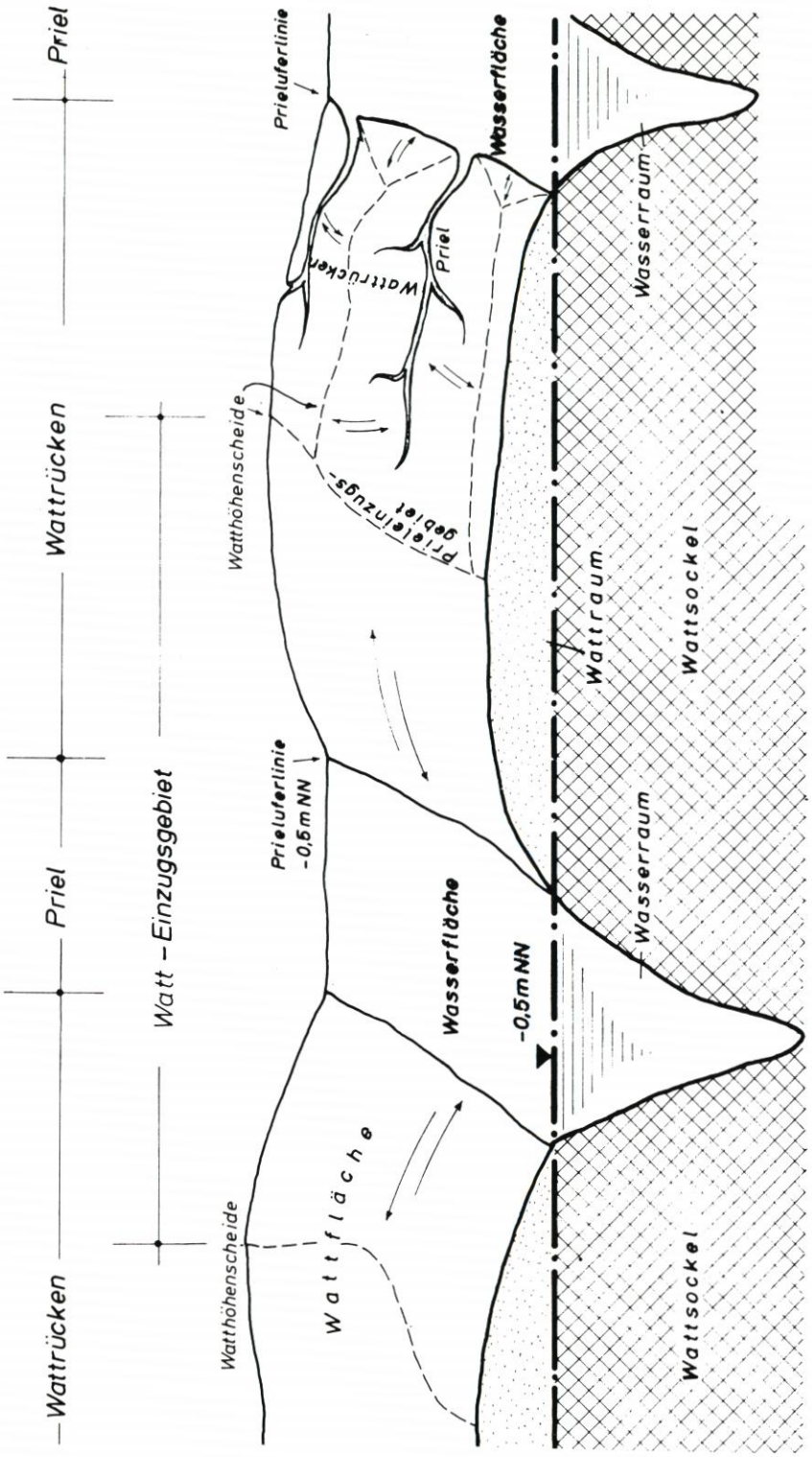


Abb. 5. Karte der Watteinzugsgebiete in der Dithmarscher Bucht

3.2 Entwicklung der Tidescheitelwasserstände

Zur Ermittlung langfristiger Tidewasserstandsänderungen hat sich inzwischen die Verwendung der 19jährigen übergreifenden Mittel als zweckmäßig erwiesen (ROHDE, 1977).

Untersuchungen von SIEFERT (1973) ergaben für Cuxhaven vom Beginn der Beobachtungen überhaupt bis 1973 einen säkularen MThw-Anstieg von 24 cm. ROHDE (1977) ermittelte für Cuxhaven insgesamt eine schwankende Entwicklung mit zunächst lange Zeit steilerem Anstieg bis 1920 von 28,9 cm und danach bis 1973 von nur noch 12 cm. Über die gesamte Beobachtungszeit von 1784/1810 bis 1965/74 wurden 23 cm errechnet.


Priel
Wattrücken
Priel
Watt – Einzugsgebiet
Wattrücken
Prieluferlinie
Watthöhenscheide
Wattrücken
Priel
Wasserfläche
Wasserraum
Prieluferlinie
-0,5 m NN
Wasserfläche
-0,5 m NN
Wattfläche
Wattraum
Wasserraum
Wattsockel
Wattsockel

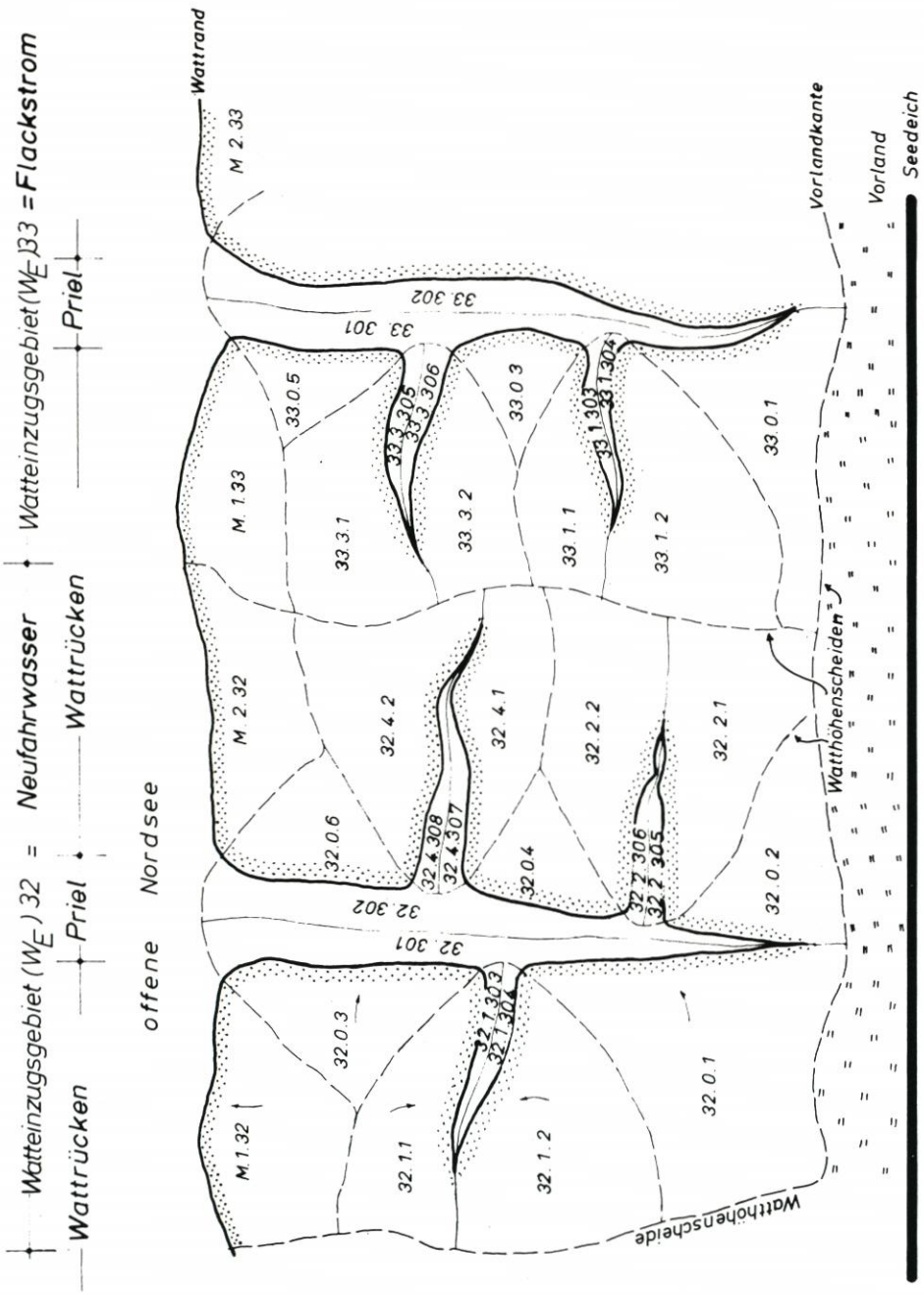


Abb. 6. Schema zur wattmorphologischen Bilanzierungsmethode

Für Büsum ermittelte ROHDE vom Beobachtungsbeginn im Jahre 1880 bis 1973 durchschnittlich 20 cm säkularen Meeresspiegelanstieg. Aber auch hier war dieser bis etwa 1922 mit 33,6 cm sehr viel steiler als danach mit nur 7 cm. Die Abflachung wurde entlang der gesamten deutschen Nordseeküste beobachtet.

Um die Entwicklung in jüngster Zeit einzubeziehen und dabei für die morphologische Untersuchung die wesentlichen Wasserstände des gesamten Vertikalbereichs zu berücksichtigen, wurde hier ergänzend anhand der Aufzeichnungen des Landespegels Büsum-Schleuse das 19jährige übergreifende Mittel von 1901 bis 1979 des MThw, MHThw und MNThw sowie von 1931 bis 1979 des MTnw, MHTnw und MNTnw errechnet (Abb. 7).

Beim MThw zeigt sich danach ein schwach wellenförmiger, aber relativ gleichmäßiger Anstieg von 643 cm PN im Mittel um 7 cm auf 650 cm PN. In den etwa letzten 30 Jahren war der Anstieg wieder etwas stärker und erreichte 2 mm/Jahr. Das MHThw fiel im Gesamtmittel um 11 cm, weist aber erhebliche Schwankungen auf, in den zurückliegenden 20 Jahren nach einem Tiefstand bei etwa 830 cm PN mit extrem steilem Anstieg um 62 cm auf 892 cm PN (1961/79). Hierin spiegelt sich die Zunahme der Sturmfluthäufigkeiten wieder. Das MNThw stieg unter weniger großen Schwankungen im Mittel um 25 cm.

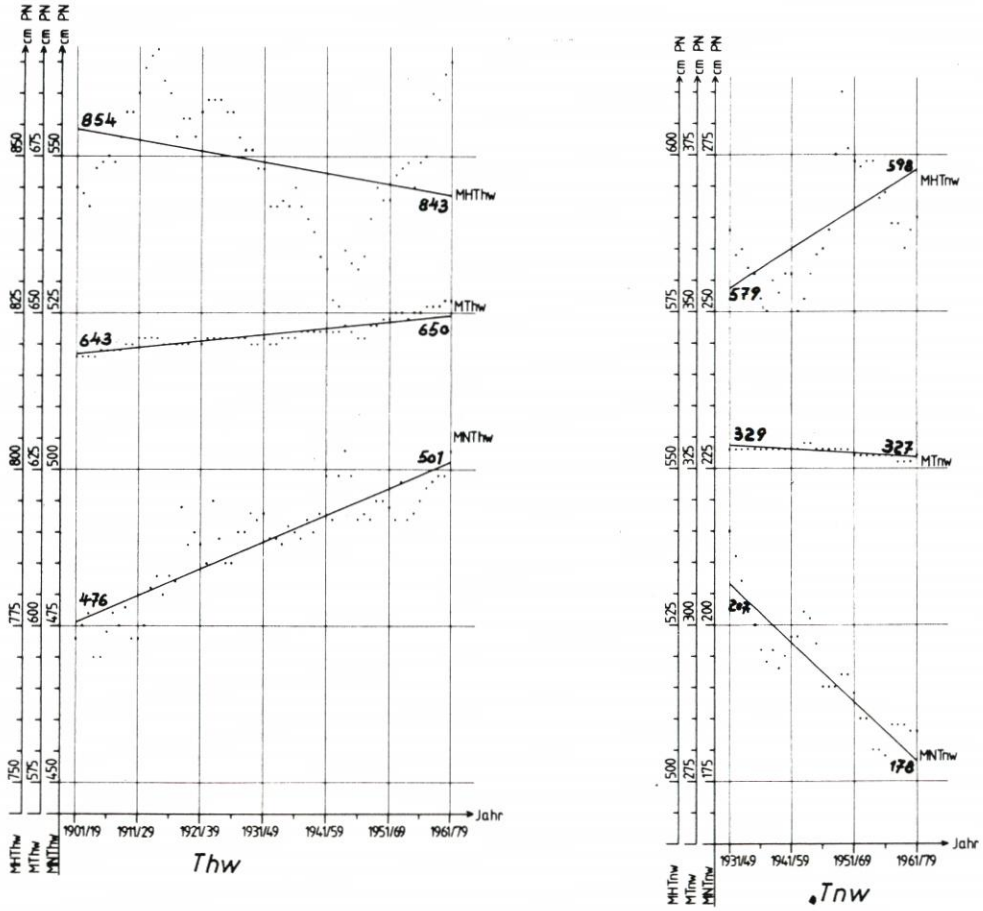


Abb. 7. Entwicklung der Tidescheitelwasserstände im 19jährigen übergreifenden Mittel am Landespegel Büsum-Schleuse

Für die Niedrigwasserbetrachtung konnte nur der kürzere Zeitraum ab 1931 berücksichtigt werden, der den Untersuchungszeitraum dieser Arbeit aber voll überspannt. Die Entwicklung verlief zum Hochwasser entgegengesetzt. Das MTnw fiel fast gleichmäßig um im Mittel 2 cm von 329 cm PN auf 327 cm PN. Erheblich angestiegen, unter großen Schwankungen, ist das MHTnw von 579 cm PN auf 598 cm PN um im Mittel 19 cm. In den letzten 20 Jahren fiel es aber um rd. 15 cm steil ab. Noch größer war die Absenkung beim MNTnw mit 29 cm von 207 cm PN (1931/49) auf 178 cm PN (1961/79).

In dem der nachfolgenden morphologischen Untersuchung zugrunde liegenden Zeitraum von knapp 50 Jahren ist der 19jährige übergreifende Mittelwert des MThw um 3,5 cm gestiegen und des MTnw um 2 cm gefallen. Somit hat der Tidehub im Mittel um 5,5 cm zugenommen. Die getrennt auch für Sommer- und Winterhalbjahr durchgeführte Berechnung erbrachte für das MTnw den gleichen Betrag wie das Jahresmittel, für das MThw im Sommer mit + 4 cm einen um 3 cm kleineren Betrag, im Winter mit + 10 cm einen gegenüber dem MThw um 3 cm größeren.

3.3 Veränderungen der Wattwasserläufe

Wesentliche morphologische Umformungen in den Watteinzugsgebieten lassen sich zumindest qualitativ rasch und umfassend anhand optischer Höhenlinienvergleiche eingrenzen. Dazu besonders geeignet sind für die Priele wegen der unterhalb des täglichen Tidewechsels auch trägeren und geringeren morphologischen Reaktionen die größeren Tiefen unterhalb Tideniedrigwasser, im landnahen Gebiet hier z. B. −1,5 m NN, −3,0 m NN und −6,0 m NN. Tendenzen in der Entwicklung der Watten werden am besten durch Vergleiche der Prieluferlinie (−0,5 m NN) und der +0,5-m-NN-Höhenlinie erkennbar (Abb. 8, 9, 11). Niedrigwasser-Luftbilder liefern wesentliche ergänzende Informationen, insbesondere in den Feinheiten verzweigter Priele.

In der Dithmarscher Bucht sind die drei charakteristischen, vom Wattstrom Piep bei Büsum landwärts abzweigenden Priele Sommerkoog-Steertloch im Süden, Kronenloch/Außenmiele in der Mitte und Wöhrdener Loch im Norden von Anbeginn der Wattvermessung im Jahre 1934 bis heute die dominierenden Tiderinnen, jede mit der typischen Mündungsbarre.

Das Sommerkoog-Steertloch hat sich kontinuierlich, offensichtlich ohne anthropogenen Einfluß, auf dem etwa 4 km langen Mündungsabschnitt von der Piep südlich Büsum beginnend, von einem NW-SO-Verlauf in einen fast N-S-Verlauf umorientiert durch Verlagerung sowohl an der Mündung nach Osten als auch im Süden nach Westen. Zugleich gabelte sich diese Strecke, beginnend etwa 1970, in eine östliche Flut- und eine westliche Ebberinne. Die größten Tiefen im südlichen Knie lagen immer um −14,0 bis −16,0 m NN. Der Ebbestrom trifft nun direkt auf das rechte Ufer der Piep entlang der Büsumer Watten (Abb. 8, 10, 11).

Im oberen Abschnitt verlagerte sich das Sommerkoog-Steertloch kontinuierlich etwa 300 m nach Süden. Etwa ab 1970, mit Beginn der Vordeichung in der Dithmarscher Bucht, setzte eine leichte Mäandrierung ein. Als natürliche Folge bildeten sich die Prielenden im Quellbereich entsprechend der Reduzierung des zugehörigen Tide-Überflutungsraumes durch die Vordeichung um 1600 ha zunächst abrupt, dann ab 1972 verlangsamt zurück. Dieser Vorgang hält an. Nur der nach Süden gerichtete Prielzweig blieb in der Funktion als Sielaußentief erhalten, zusätzlich gespeist vom deichnah unmittelbar seitlich davon durch Bodenentnahme für den Deichbau entstandenen und bis 1980 noch nicht wieder versandeten Baggerloch. Der nach Nordosten abzweigende, in einem Baggerloch unmittelbar nördlich der

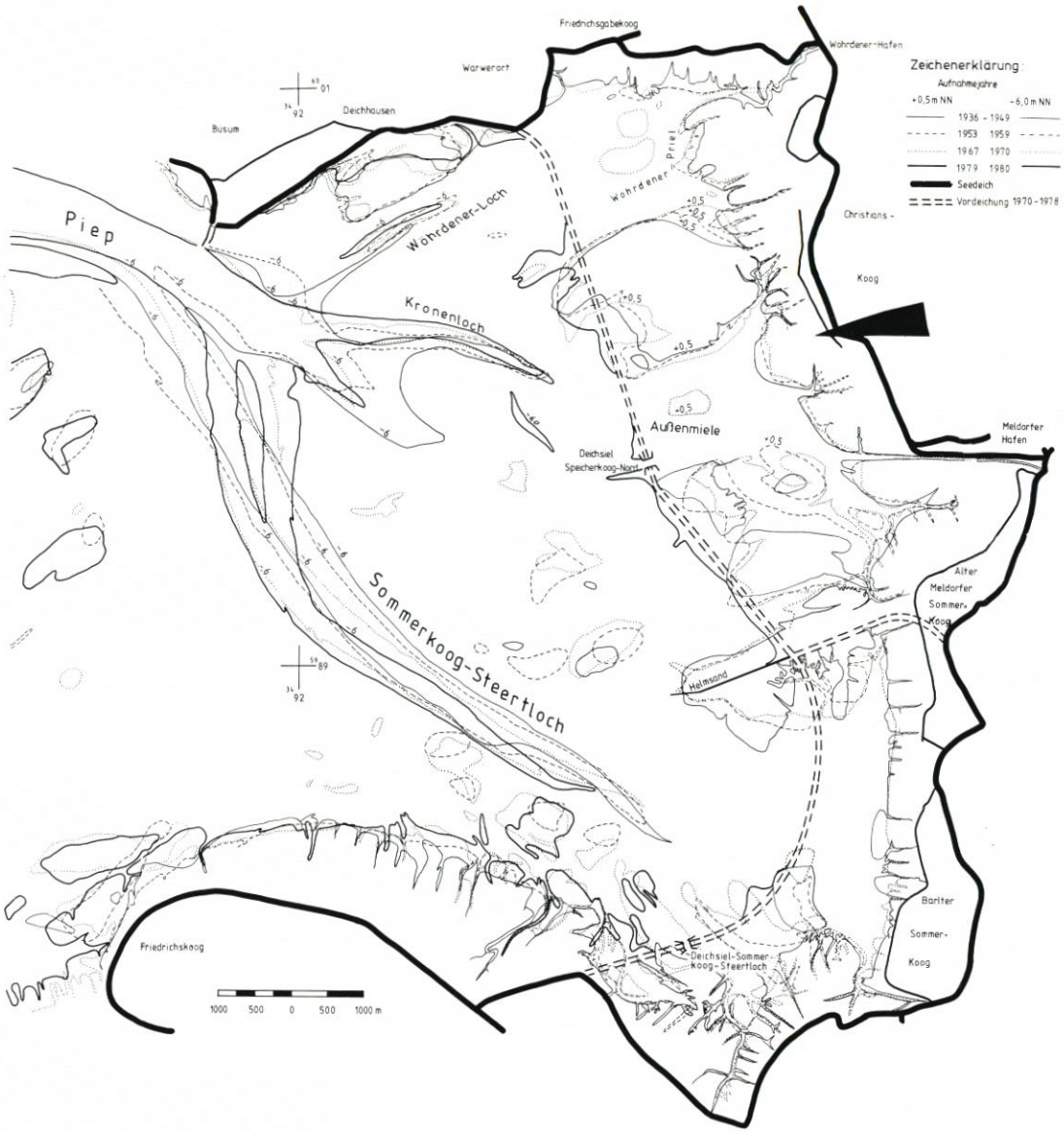


Abb. 8. Morphologische Entwicklungskarte Dithmarscher Bucht 1936–1979 des Höhenniveaus +0,5 m und −6,0 m NN

Hallig Helmsand mündende, 1973 künstlich entstandene Priel ist bis 1980 kaum verändert erhalten (Abb. 8, 10, 11).

Der ursprüngliche, nahe der Mündung des Kronenloches mündende und parallel zwischen diesem und dem S.-Steertloch verlaufende Helmsander Priel ist nach anfänglich zunehmendem Mäandrieren und Schrumpfen bis heute völlig zugesandet. Die zwei danach quer dazu entstandenen Nebenpriele des S.-Steertloches bilden sich ebenfalls wieder kontinuierlich zurück (Abb. 8).

Die Küste, 40 (1984), 1-318



Abb. 9. Morphologische Entwicklungskarte Dithmarscher Bucht 1936–1979 des Höhenniveaus −0,5 mm NN (Prieluferlinie)

Das Kronenloch wurde seit 1936 im Laufe der Jahre geringfügig ausgeräumt, bei Tiefen um −12 m bis −13 m NN auf zunehmender Länge, und nach Norden einschwingend nach und nach um etwa maximal 200 m verlagert. Unmittelbar südlich der Mündung deutet sich die Entwicklung einer Flutrinne und damit eine Rinnengabelung an, unabhängig vom technischen Eingriff durch die Vordeichung. Die Abtrennung von rd. 1500 ha Überflutungsraum und die Verlegung der Außenmiele durch die um rd. 400 m südlichere Anordnung des Schleusen- und Silbauwerks mit gebündelter Binnenwasserabführung von insgesamt 37 km² Binnenland sowie

durch das Baggerloch nordwestlich davon veränderten die verbleibende kurze Strecke der Außenmiele und den Übergang zum Kronenloch ab 1977 deutlich. Die Außenmiele schwenkt jetzt rd. 650 m seewärts vor dem Sielbauwerk von einer westsüdwestlichen Richtung hart um in eine nordwestlichere, so daß überwiegend der Ebbestrom gebündelt und entsprechend erodierend zunächst im Rinnenübergang mit z. Z. −8,0 m NN Tiefe auf das linke Ufer trifft, dann auf das rechte Ufer des Kronenloches, bevor es dort wiederum hart nach Westen umschwenkt, wo es Tiefen bis −14,0 m NN erreicht. Somit steht dieses gesamte Außentief des neuen Helmsander Kooges morphologisch eine Zeitlang in erhöhtem Ungleichgewicht.

Das Watteinzugsgebiet des 1979 bis zu −8,0 m NN tiefen Wöhrdener Loches wurde um rd. 1700 ha verringert, und es fehlen hier seit Deichschluß im Sommer 1978 die Binnenwassermengen von etwa 11 700 ha Nutzland. Unmittelbar seewärts vor dem neuen Seedeich blieb nach Sandentnahme für den Deichbau ein 1979 bis zu −28 m NN tiefes Baggerloch zurück (Abb. 8, 10, 11). Bis dahin war das Wöhrdener Loch mit den Zweigen Warwerorter Priel und Wöhrdener Priel als Außentief im morphologischen Gleichgewicht, mit Tiefen zwischen −8,0 m und −9,0 m NN, bei relativ geringer Dynamik. Hier wird es zu einer erheblichen Wasserraumschrumpfung kommen, zunächst – so lange das Baggerloch noch als eine Art Wattspeicherbecken wirkt – zögernd, dann aber verstärkt, bis das der verringerten Tidewassermenge entsprechende Prielvolumen sich eingestellt haben wird.

Die Wattrücken zwischen den jeweils benachbarten Prielen wurden seit Beginn der Beobachtungen nach und nach geschlossener und geringfügig höher. Die über +0,5 m und +1,0 m NN hohen Wattflächen nahmen insgesamt etwas zu. Geringe flächige Erosionen zeigen sich nur vereinzelt, vor allem unmittelbar südlich Deichhausen als Folge der 1967 erfolgten und natürlich noch nicht wieder ausgeglichenen Materialentnahme für den Deichbau, und um den Westkopf der Hallig Helmsand (Abb. 8, 9). Die beginnende Reaktion auf die landnahe künstliche Abtrennung natürlichen Überflutungsraumes spiegelt sich besonders an den Enden des Sommerkoog-Steertloches und des Wöhrdener Loches durch seewärtige Rückverlagerung der Prieluferlinie (−0,5 m NN) nach Abschnitt durch den neuen Seedeich um je reichlich 500 m wider.

3.4 Flächen- und Volumenbilanz

Das Wattenmeer der Dithmarscher Bucht als Haupteinzugsgebiet wurde zur Bilanzierung gegliedert in die Teileinzugsgebiete Sommerkoog-Steertloch, Kronenloch/Außenmiele und Wöhrdener Loch (Abb. 5). Bis zur topografischen Aufnahme im Jahre 1969, also ein Jahr vor Beginn der Vordeichung, verlief die morphologische Entwicklung in der Dithmarscher Bucht ohne bedeutsamen anthropogenen Einfluß. Von da ab führte die schrittweise Bedeichung der Vorländer und Watten und damit die Aussperrung des Tidemeeres zu beginnenden Reaktionen im verbleibenden Tideregime und entsprechenden Einschnitten in der morphologischen Entwicklung. Weil die topografischen Zustände von insgesamt drei Aufnahmen vor Beginn des technischen Eingriffs zur Verfügung standen (1936–1969), zwei während dieses Eingriffs (1973, 1976), aber erst einer unmittelbar danach (1979), ist es bis zum Einschnitt möglich, der Frage nach einer Entwicklungstendenz im Gesamtgebiet nachzugehen. Danach gelingt dies jedoch nur für Teilgebiete, solange sie von der Vordeichung noch unberührt waren oder diese bereits wieder länger zurücklag, so daß inzwischen mindestens drei neue Zustände erfaßt werden konnten. Ausgewertet wurden stets die kartierten Ergebnisse des Gesamtgebiets bis jeweils an den Seedeich heran, wobei die +1,0-m-NN-Höhenlinie als landseitig begrenzende Watthöhenscheide festgelegt wurde. Indem jeweils das Gesamtgebiet erfaßt

Die Küste, 40 (1984), 1-318

wurde, nicht von Anbeginn immer nur das Wattgebiet seewärts der neuen, heutigen Seedeichlinie, konnte zugleich der Umfang jedes Eingriffs wiedergegeben werden. Die morphologischen Auswirkungen zeigen sich jedoch erst entsprechend später.

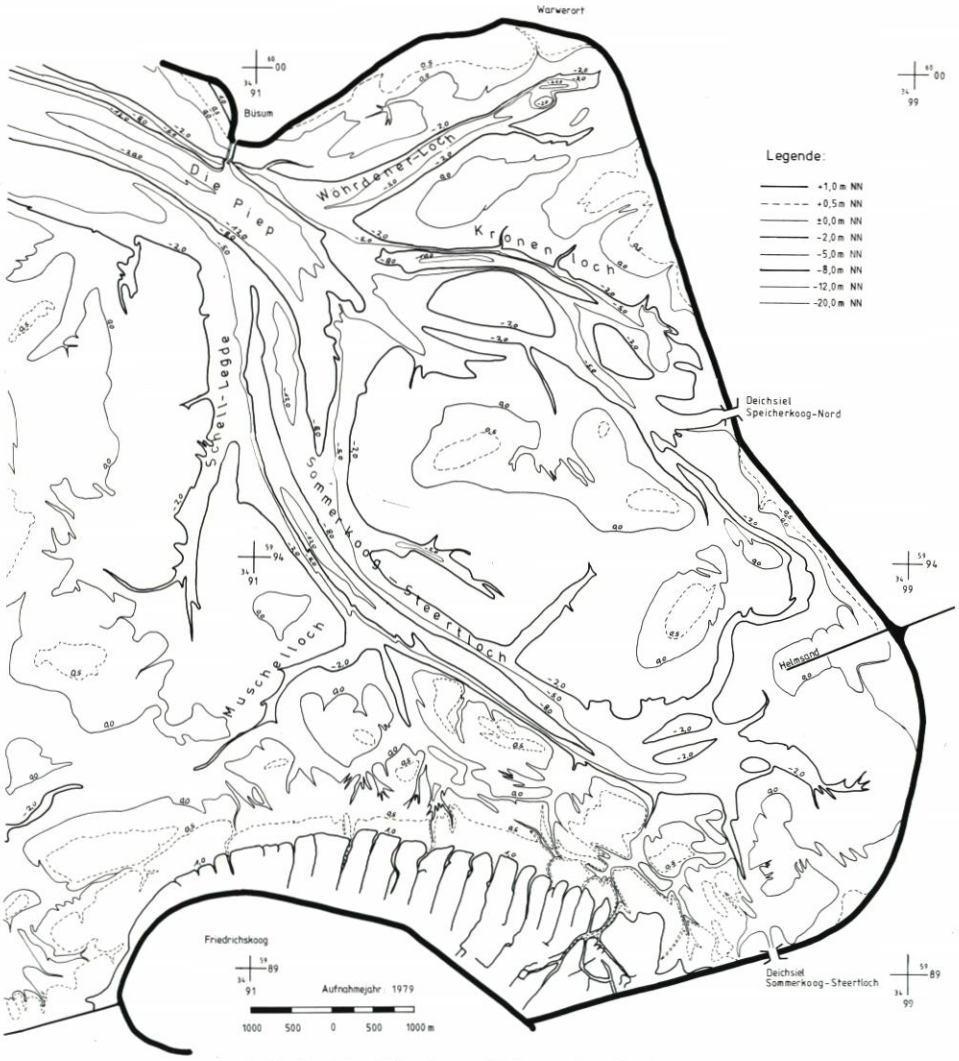


Abb. 11. Watthöhenkarte Dithmarscher Bucht 1979

In der Fläche änderte sich das ursprünglich (1944) 9771 ha große Watteinzugsgebiet Dithmarscher Bucht, davon 6088 ha Wattfläche und 3683 ha Wasserfläche (bezogen auf das Höhenniveau −0,5 m NN), bis kurz vor Beginn des Eingriffs im Jahre 1970 naturbedingt nur geringfügig. Zunächst wurde es bis 1956 um rd. 7 % kleiner, danach aber wieder um 5 % größer. Der als Bilanz 1969 verbliebene Anteil der Wasserfläche war entgegengesetzt zur Wattfläche (−3,6 %) positiv mit rd. + 1,3 %. In der Tendenz ähnlich, mit allerdings 1969 geringer negativer Bilanz, war die Einzugsgebiets-Größenänderung des Sommerkoog-Steertloches und des Wöhrdener Loches, nur daß bei letzterem, etwa von 1969 an, nahezu

Gleichgewicht herrschte. Dies war ebenso im Watteinzugsgebiet Kronenloch/Außenmiele, nur hier nahm abweichend zu den anderen Teilgebieten die Gesamtfläche von 1944 bis 1969 gleichmäßig um 701 ha zu, das sind knapp 42 % (Abb. 12).

Die Volumenentwicklung der Watten oberhalb der Bezugsbasis −0,5 m NN (Prieluferlinie) und der Priele unterhalb dieses Niveaus (s. dazu Absch. 3.1) verlief im Gesamteinzugsgebiet Dithmarscher Bucht entgegengesetzt zueinander. Das Wattvolumen

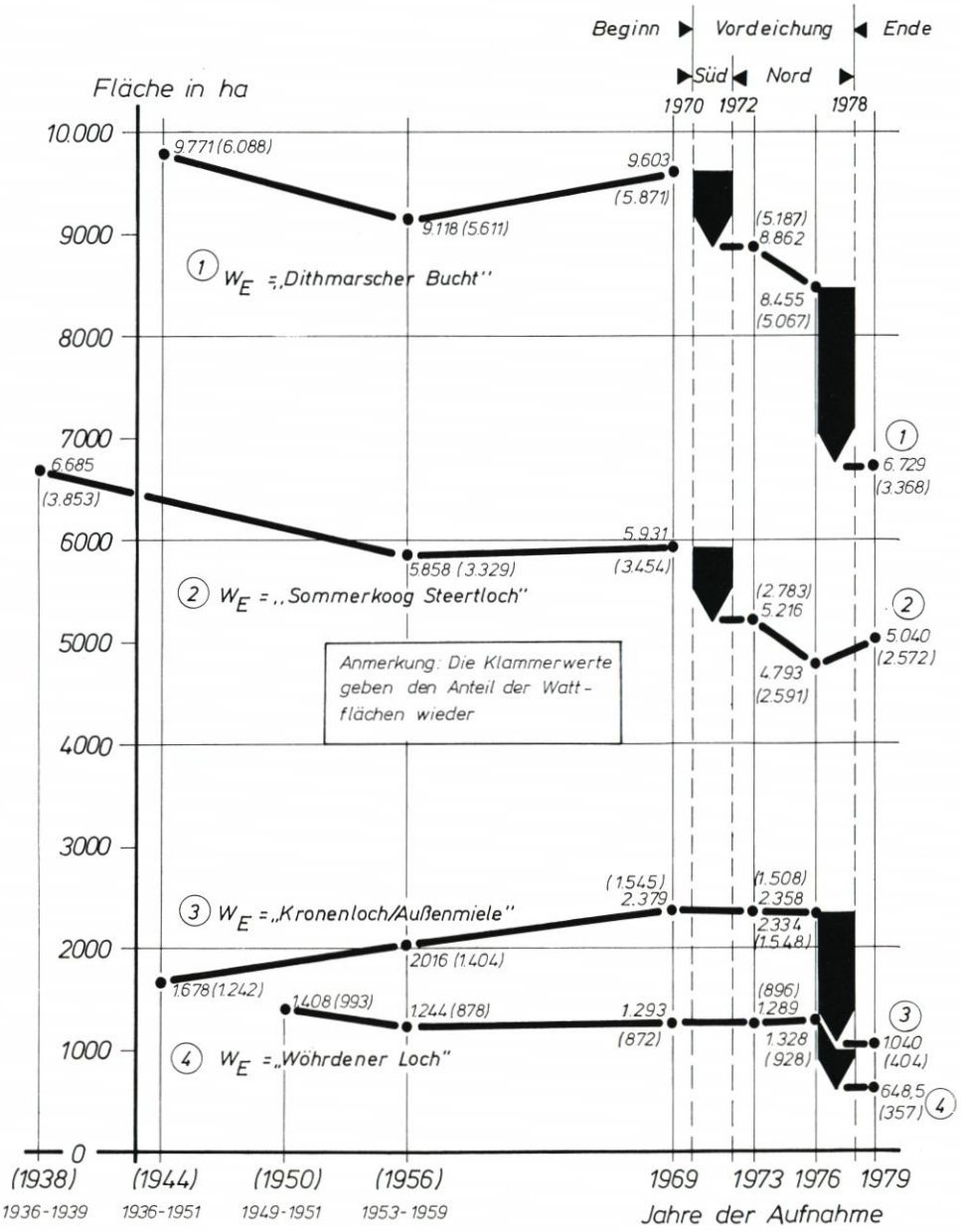


Abb. 12. Flächenentwicklung der Watteinzugsgebiete in der Dithmarscher Bucht

vergrößerte sich von 1944 bis 1969 nach zwischenzeitlicher Abnahme um rd. 5 % insgesamt um 2,23 Mio. m^3, das sind rd. 5,4 %. In der gleichen Zeit nahm der Wasserraum zunächst gering um 2,1 % zu (1944–1956), danach aber bis 1969 stark ab um rd. 12 %. Nach dem ersten Eingriff (Abschluß der Eindeichung Speicherkoog-Süd, 1972) bis kurz vor Deichschluß im Speicherkoog-Nord beschleunigte sich die Wasserraumschrumpfung nach vorübergehender Volumenvergrößerung insbesondere durch Sandentnahmen im Watt für den Deichbau gegenüber dem Zustand 1969. Sie erreichte in 7 Jahren knapp 8 %. Das Wattvolumen nahm in gleicher Zeit um fast 2 % zu.

Die Sedimentationsrate betrug damit bis zum Beginn der Vordeichung (1970) auf den Watten rd. 89 120 m^3/Jahr und in den Prielen rd. 365 500 m^3/Jahr. Bereits im kurzen Zeitraum nach Bedeichung des Südteils (1973) bis kurz vor Deichschluß im Nordteil (1978) wurde im Einfluß dieses Eingriffs die Sedimentationsrate auf den Watten um etwa das Dreifache auf 256 000 m^3/Jahr und in den Prielen um etwa das Achtfache auf 2 936 000 m^3/Jahr erhöht (Abb. 13).

Umgerechnet auf die relativen vertikalen Veränderungen, als Anhalt vereinfachend dargestellt durch die mittlere Höhe h als Quotient aus Volumen V und Fläche F und ungeachtet der von einem Quader abweichenden, aber im Prinzip beim Watt und Priel je gleichbleibenden Form des Körpers, zeigt das Watt im Gesamteinzugsgebiet von 1944 bis 1969 eine kontinuierliche Aufhöhung um 6 cm von 74 cm auf 80 cm. Das entspricht einem durchschnittlichen Jahresbetrag von 2,4 mm. Von 1973 bis 1976 beschleunigte sich die Aufhöhung der Watten mit 7 cm auf 23,3 mm/Jahr.

In den Prielen der Dithmarscher Bucht insgesamt verlief die Vertikalveränderung in zwei gegensätzlichen Phasen, zunächst (1944 bis 1956) mit einer Zunahme der relativen Wassertiefe (Ausräumung) um 18 cm, danach bis 1969 mit einer verstärkten Abnahme (Sohlenauflandung) um 46 cm, mit einer Bilanz von −28 cm. Das entspricht einer Sohlenaufhöhung von durchschnittlich 11 mm/Jahr. Von 1973 bis 1976 intensivierte sich die Aufhöhung auf 20 mm/Jahr (Abb. 14, 15).

Natürlich reagiert das Tideregime unmittelbar nach einem technischen Eingriff besonders stark und pendelt sich mit fortschreitender Zeit zu einem den veränderten Kräftebedingungen entsprechenden neuen dynamischen Gleichgewicht ein. Die Reaktion schlechthin wird aber früh deutlich sichtbar. Das morphologische Ausmaß wird jedoch frühestens nach Vorliegen einer dritten Zustandsaufnahme nach dem im Jahre 1978 erfolgten Deichschluß eingrenzbar sein. Darüber wird zu gegebener Zeit erneut berichtet werden.

In der Tendenz wird mit der aufgezeigten Entwicklung die bereits früher in verschiedenen Untersuchungen u. a. von Bahr (1963), Thies (1964) und Higelke (1975) für den gleichen Raum festgestellte positive Materialbilanz bei wellenförmiger Entwicklung bestätigt. Bahr (1963) ermittelte im Vertikalbereich von SKN bis −7,7 m SKN für den Zeitraum von 1840 bis 1900 einen erheblichen Materialzuwachs, der danach bis 1954 wieder etwas abgebaut wurde, maximal um 50 %. Zum Teil begann der Zuwachs bereits wieder 1936. Nach Higelke (1975) sind z. B. unterhalb SKN bis −6 m SKN von 1936 bis 1954 rd. 2,8 Mio m^3 und von 1954 bis 1969 weitere 3,2 Mio m^3 Sand in die Dithmarscher Bucht eingewandert.

Thies (1964) fand unterhalb SKN (etwa −1,9 m NN) eine Wasserraumschrumpfung von absolut rd. 13 Mio m^3 im Zeitraum von 1927 bis 1958, wobei bis 1939 eine Materialausräumung vorausging, bei der die fast gleiche Menge bis 1948 wieder eingewandert war und bis 1958 die doppelte.

Offensichtlich lagert sich ein Teil des von Nordfriesland her südwärts und in weit größerer Menge von den Ostfriesischen Inseln her westwärts transportierten Sandes im Mündungsgebiet der Piep ab (Bahr, 1963).

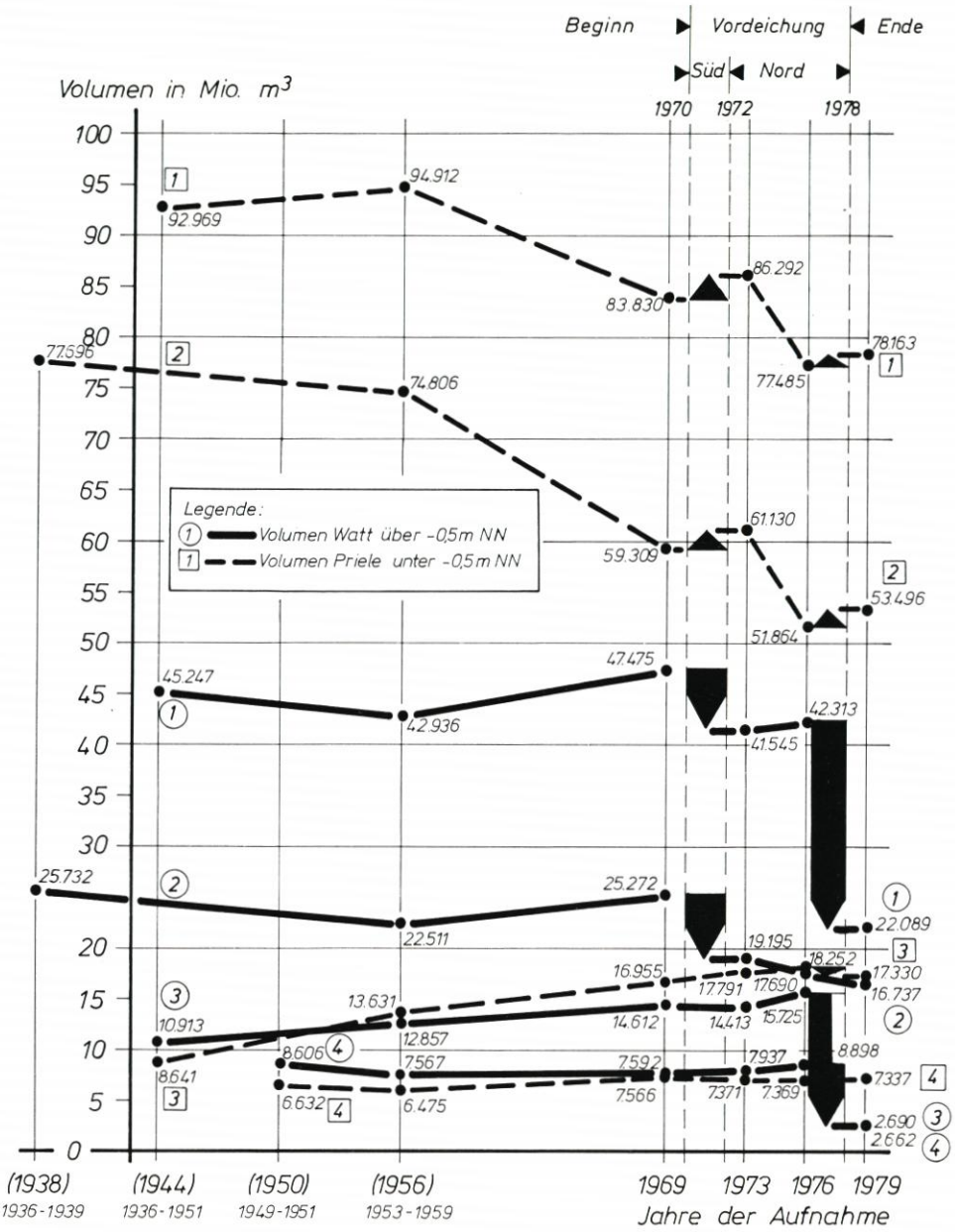


Abb. 13. Volumenentwicklung der Watten oberhalb und unterhalb der Priele der Höhenbezugsbasis −0,5 mm NN in der Dithmarscher Bucht

Der für das Gesamteinzugsgebiet Dithmarscher Bucht aufgezeigten morphologischen Entwicklung ähnlich waren die Veränderungen in dem mit rd. 65 km² größten Teileinzugsgebiet Sommerkoog-Steertloch (Abb. 5, 12, 13, 14). Nach 1973 erfolgte hier ein erneuter Eingriff. Das Wattvolumen nahm von da ab bis 1979 geringfügig ab, jedoch wurde die Fläche des verbliebenen Watteinzugsgebiets ebenfalls kleiner, so daß die Bilanz in diesen sechs

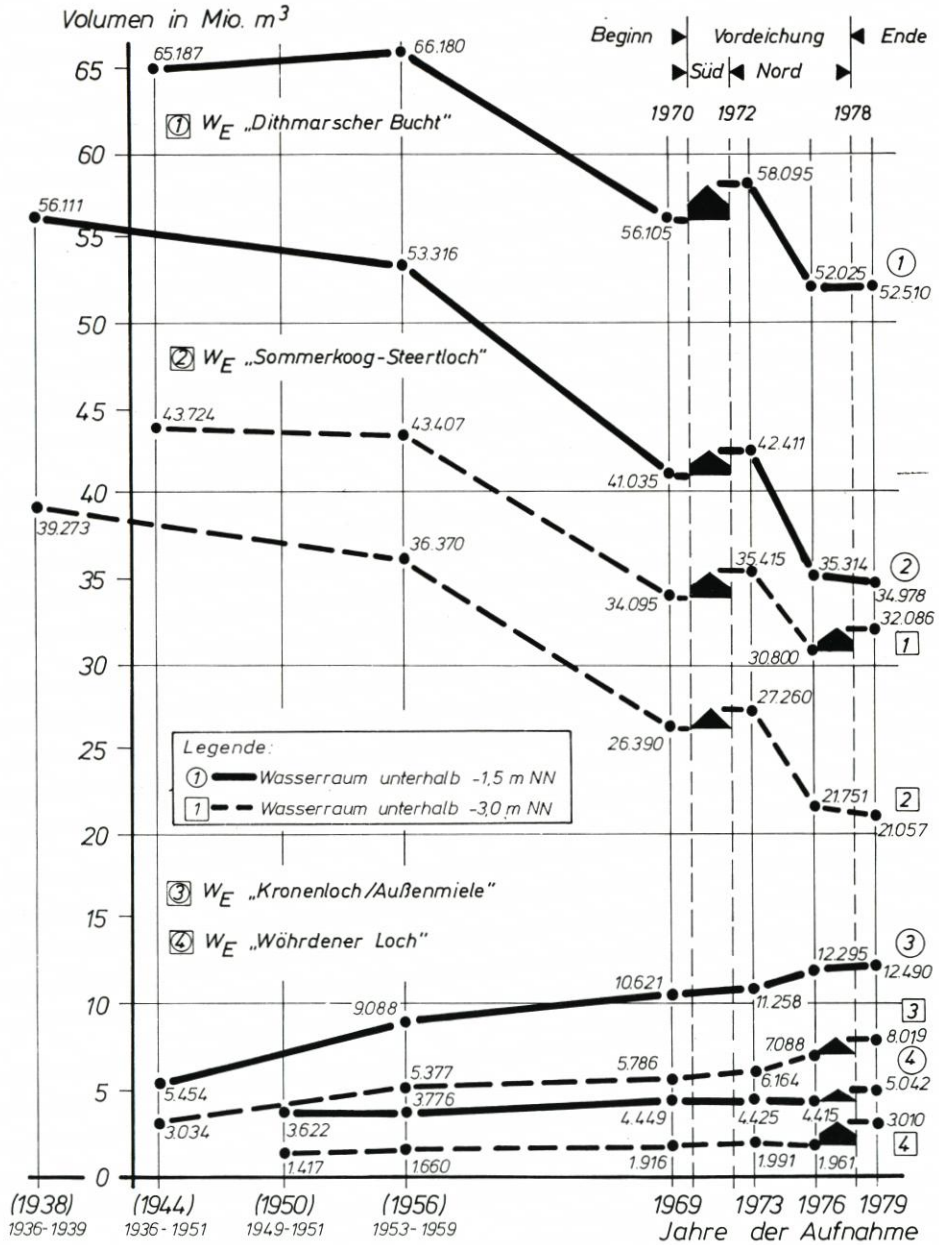


Abb. 14. Volumenentwicklung der Priele (Wasserräume) in den Watteinzugsgebieten der Dithmarscher Bucht unterhalb −1,5 m und −3,0 m NN

Nachfolgejahren zunächst ausgeglichen blieb. Daß nicht anfangs eine stärkere Reaktion eintrat, kann auf das auch aus diesem Gebiet für den weiteren Deichbau entnommene Sandmaterial zurückzuführen sein. Der Wasserraum jedoch verringerte sich wohl unterhalb der Bezugsbasis −0,5 m NN als auch −1,5 m NN und −3,0 m NN noch etwas stärker als im Gesamtgebiet (Abb. 12 bis 15).

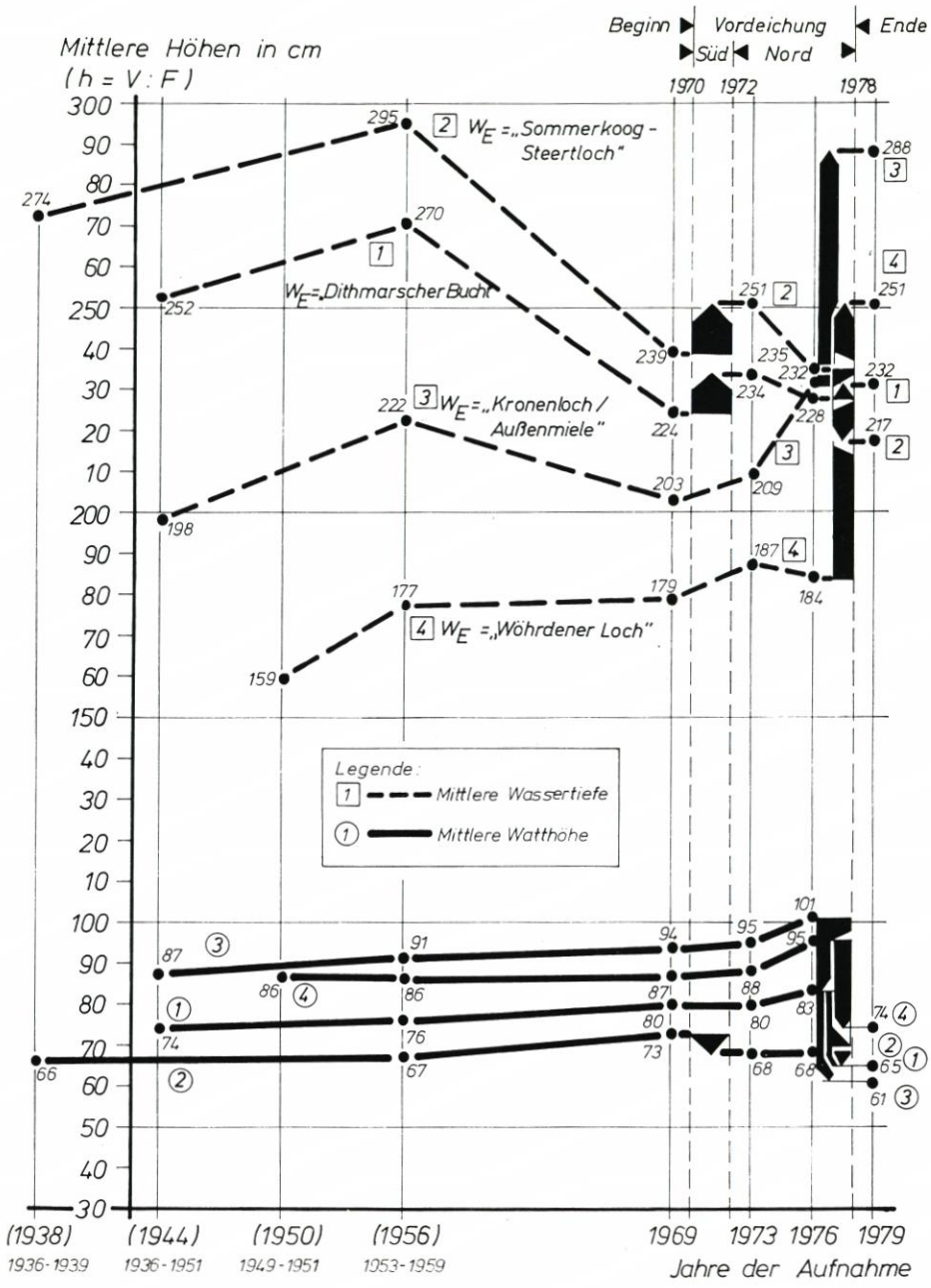


Abb. 15. Entwicklung der relativen mittleren Watthöhen und Wassertiefen in den Watteinzugsgebieten der Dithmarscher Bucht, bezogen auf die Höhenbasis −0,5 m NN (Prieluferlinie)

Im zweitgrößten, mittleren Teileinzugsgebiet Kronenloch/Außenmiele (rd. 2 km²) verlief die flächige und räumliche Entwicklung von 1944 bis 1976 gleichmäßig positiv, d. h., daß Watt- und Wasserraum insgesamt kontinuierlich zunahmen, von 1973 bis 1976 noch verstärkt,

woraus auch die künstliche Veränderung durch die umfangreiche, seeseitige Materialentnahme für den Deichbau besonders deutlich wird (Abb. 5 und 12 bis 15).

Das mit rd. 1,3 km² kleinste Teileinzugsgebiet Wöhrdener Loch befand sich von Anbeginn der Beobachtungen im Jahre 1949 bis 1973 hinsichtlich des Wattkörpers oberhalb der Prieluferlinie nahezu im Gleichgewicht mit nur geringer positiver Tendenz. Das fand 1971 auch GÄRTNER (1971) beim Vergleich der Zustände 1949, 1959 und 1970. Der Wasserraum nahm in der gleichen Zeit mit unterschiedlicher Intensität zu. Von 1973 bis 1976 vergrößerte sich das Wattvolumen, das Prielvolumen dagegen nahm geringfügig ab (Abb. 5 und 12 bis 15).

Als Anhalt für bisherige morphologische Veränderungen auf den Watten ist hier zusätzlich der Wattrücken vor dem Christianskoog zwischen Kronenloch und Wöhrdener Loch näher betrachtet worden. Die Watthöhenscheide hat sich bis herab auf −2,0 m NN (am westlichen Ende) bis etwa 1976 zunehmend im Verlauf gestreckt und dabei nach Nordwesten verlagert. Im übrigen ist sie, mit begrenztem Ausschlag von maximal 500 m um eine Achse pendelnd, im Gleichgewicht. An Höhe hat sie von 1949 bis 1979 durchschnittlich um insgesamt 13 cm zugenommen, das entspricht einer jährlichen Sedimentationsrate von 4,5 mm (Abb. 16). Im Querschnitt hat sich der Wattrücken in den zwei dargestellten Profilen (Abb. 17) teils verlagert, teils umgeformt mit positiver Bilanz von +11,5 m² (Querschnitt I) und +85 m² (Querschnitt II).

Eine abschließende vergleichende Betrachtung der mittleren vertikalen Wattveränderungen ‚h' in den einzelnen Watteinzugsgebieten ergibt folgende Tendenz (Abb. 15):

A. Zeitraum bis 1969 (ungestört):

W_E (1)	=	60	mm	in	25	Jahren	=	2,5 mm/a
W_E (2)	=	70	mm	in	31	Jahren	=	2,3 mm/a
W_E (3)	=	78	mm	in	25	Jahren	=	2,8 mm/a
W_E (4)	=	10	mm	in	19	Jahren	=	0,5 mm/a

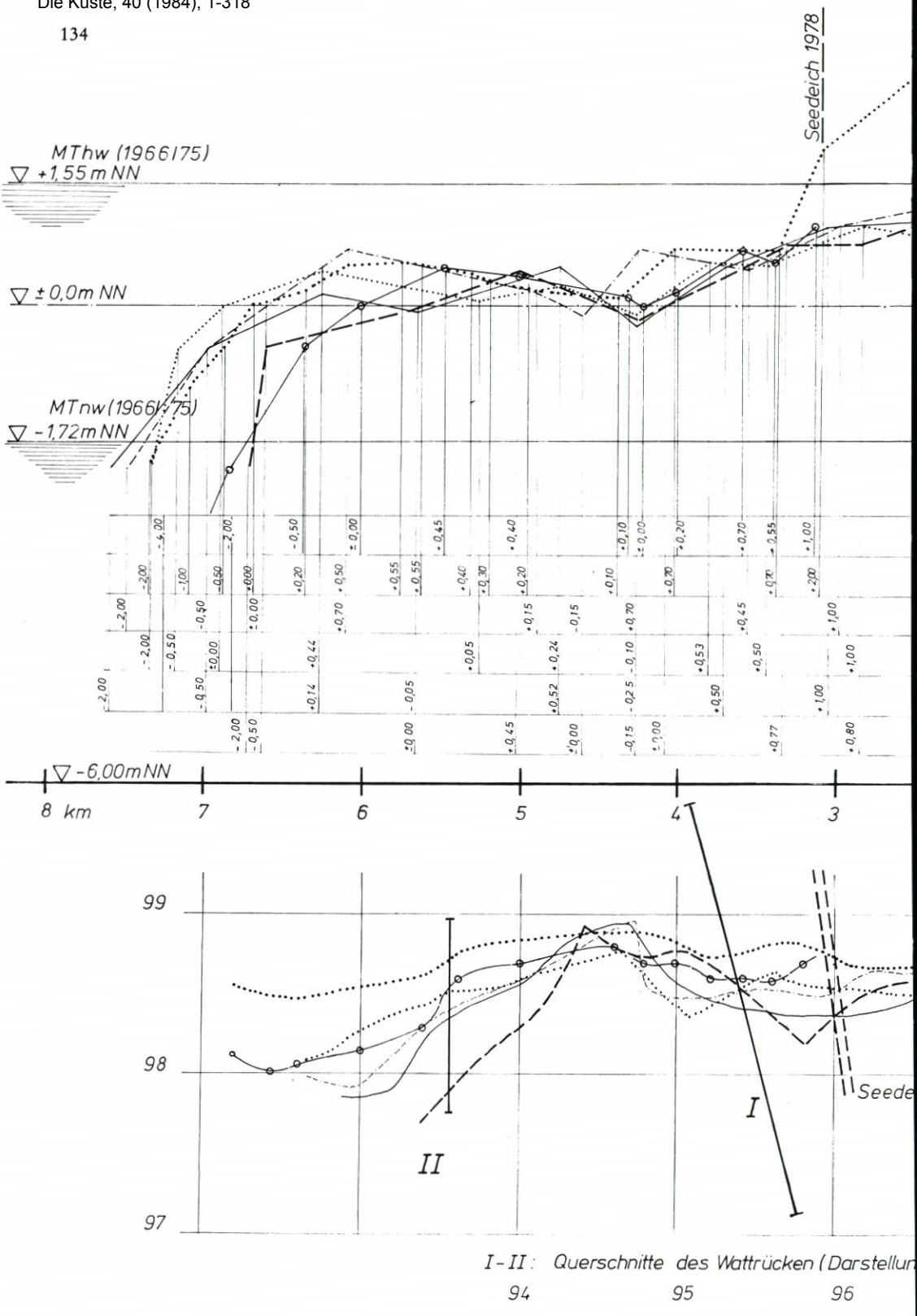
B. Zeitraum von 1973 bis 1976 (gestört):

W_E (1)	=	30	mm	in	3	Jahren	=	10 mm/a
W_E (2)	=	0	mm	in	3	Jahren	=	0 mm/a
W_E (3)	=	60	mm	in	3	Jahren	=	20 mm/a
W_E (4)	=	70	mm	in	3	Jahren	=	23,3 mm/a

Die Sedimentation auf den Watten hält folglich im ungestörten küstennahen Gebiet durchschnittlich etwa Schritt mit dem säkularen Meeresspiegelanstieg. Künstliche Eingriffe in Form von Vordeichungen fördern die Sedimentation dort anfangs um das Mehrfache.

4. Schlußanmerkungen

Die im Watt zur Entnahme von Sandmaterial für den Seedeichbau entstandenen sog. Baggerlöcher versanden in der Dithmarscher Bucht nur langsam; sie haben mehr als 10 Jahre Bestand. Rinnen dorthin, von einem Priel aus zuvor gebaggert, bleiben ebenso lange erhalten. Deshalb sollten solche Entnahmen in einem für den Bestand des Seedeichfußes auch unter Beachtung einer etwa nachteiligen Verlagerung der Rinne unproblematischen Abstand erfol-



I-II: Querschnitte des Wattrücken (Darstellun

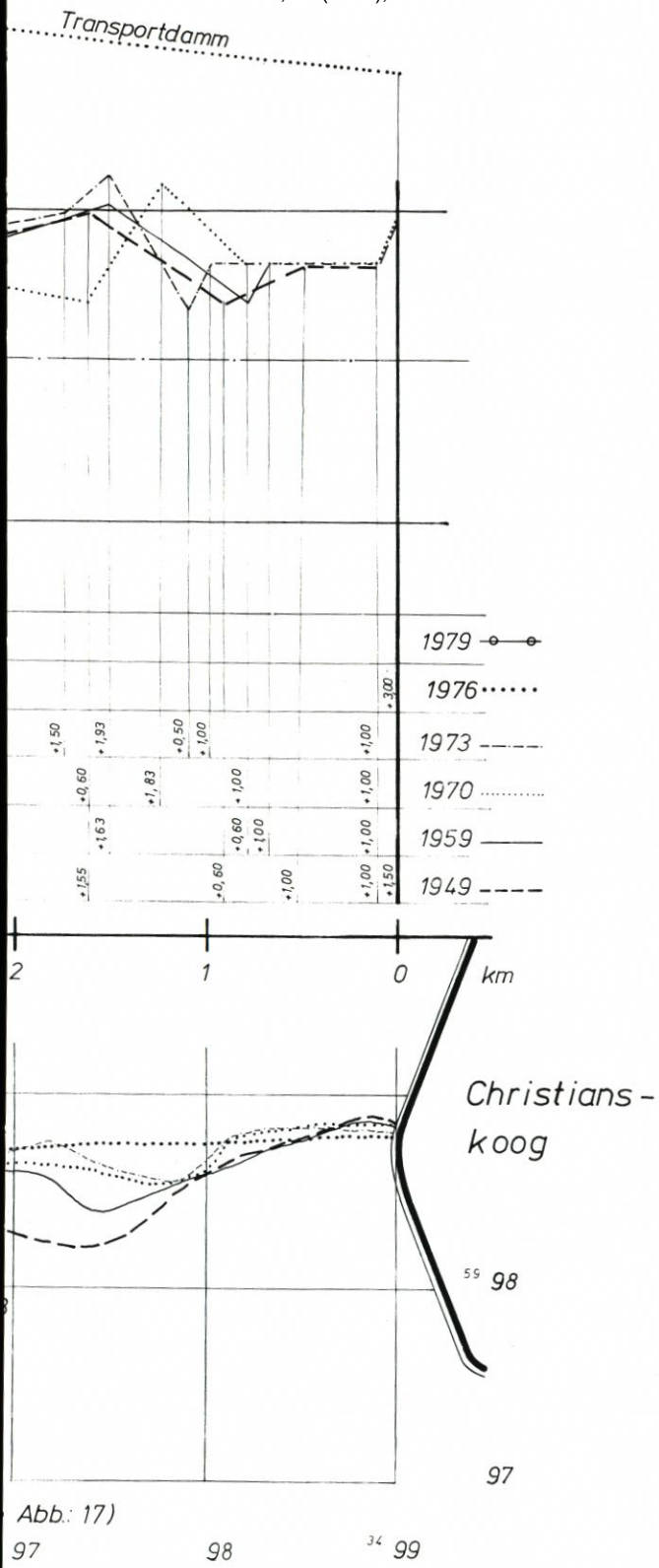


Abb. 16. Veränderung der Watthöhenscheide vor dem Christianskoog 1949–1979

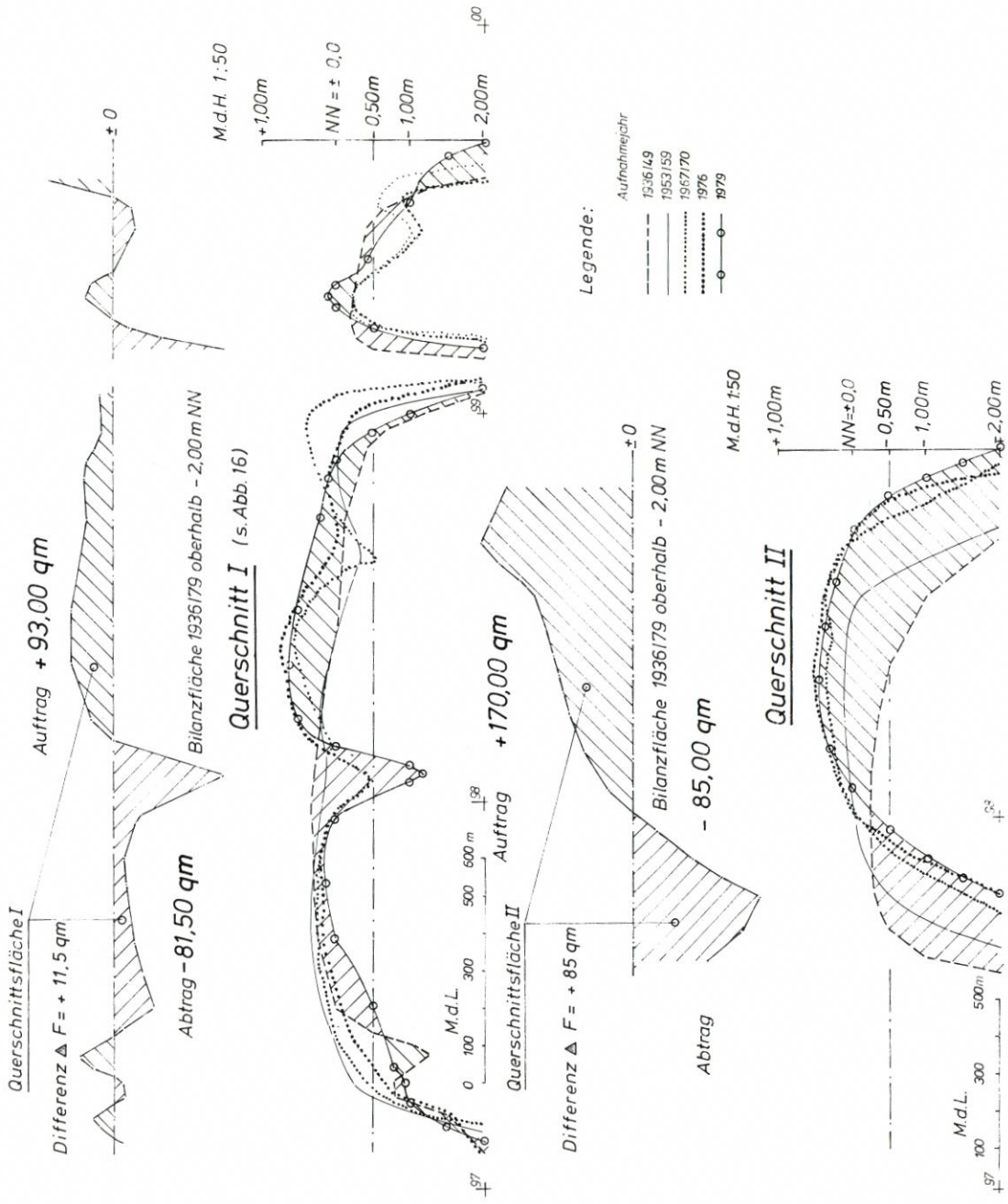


Abb. 17. Veränderung der Wattrücken vor dem Christianskoog in zwei Querschnitten 1949–1979

gen. Baggerlöcher sind kleinen, natürlichen Speicherpoldern ähnlich. Werden sie unmittelbar an einem Außentief angeordnet, mit nur kurzer Verbindungsrinne, so wirken sie eine Zeitlang als Spülpolder. Als erweitertes Außentief gefährden sie in dieser Verbindung auch nahe am Siel den in diesem Bereich ohnehin stärker gesicherten Seedeich nicht, und sie helfen die unmittelbar nach Deichschluß zunächst besonders intensive Versandungsreaktion im deichnahen Außentief streckend zu überbrücken bis etwa zum neuen dynamischen Gleichgewichtszustand. Dieser ist dann erst zu einem entsprechend späteren Zeitpunkt nach erfolgtem bautechnischem Eingriff in das Tideregime erfaßbar.

Die Mündungsstrecken der drei Hauptpriele und insbesondere das Außentief des neuentstandenen Helmsander Kooges (Kronenloch/Außenmiele) unterliegen auf mehreren Kilometern Länge mit der beobachteten Nordschwenkung und Rinnengabelung vorerst einem Ungleichgewicht, so daß die Zustände überwachend morphologisch und begleitend hydrologisch (Tideströme, Wasserstände) wenigstens dreijährlich weiterhin erfaßt und bilanziert werden sollten. Das gleiche gilt für das vom Ebbestrom zunehmend stärker beanspruchte rechte Ufer der Piep vor Büsum und den dortigen Watten.

Die festgestellte, in den einzelnen Watteinzugsgebieten schlechthin sowie zwischen Küstenlinie und Prielmündung sehr unterschiedliche morphologische Entwicklung sowohl räumlich als auch lagemäßig bestätigt die Unerläßlichkeit der hier angewendeten naturräumlichen Bilanzierungsmethode (im Gegensatz zur morphologischen Analyse rein geometrisch begrenzter Gebiete). Dieses manuell durchgeführte Verfahren ist jedoch sehr zeit- und personalaufwendig. Deshalb wird angestrebt, hierfür in absehbarer Zeit als Hilfsinstrument die ADV anzuwenden. Dazu werden entscheidende Grundlagen aus dem derzeitigen KFKI-Forschungsprojekt „MORAN" (Morphologische Analysen) erwartet.

5. Schriftenverzeichnis

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde Büsum: Rahmenentwurf für hydrologische und wattmorphologische Untersuchungen im Gebiet der Dithmarscher Bucht von 1970 bis 1992. Unveröffentl. Arbeitsgrundlage, 1981.

Bahr, M.: Die Entwicklung des Küstenvorfeldes zwischen Hever und Elbe seit dem Ende des 16. Jahrhunderts. Untersuchungsbericht im Auftrag der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Kiel. Unveröffentl., 1963.

Deutsche Forschungsgemeinschaft: Sandbewegung im Küstenraum. Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. Forschungsbericht. Harald Boldt Verlag, Boppard, 1979.

Dittmer, E.: Das Alluvium Dithmarschens. Untersuchungsbericht des Marschenbauamts Heide, Forschungsabt. Büsum. Unveröffentl., 1937.

Dittmer, E.: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. Meyniana, Bd. 1, 1952.

Dittmer, E.: Neue Beobachtungen und kritische Bemerkungen zur Frage der Küstensenkung. Die Küste, Jg. 8, 1960.

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.

Fischer, O.: Landgewinnung und Landerhaltung in Schleswig-Holstein. Teil III: Das Festland. Bd. 5: Dithmarschen. Verlag Dietrich Reimer, Berlin, 1955.

Gärtner, H.-J.: Untersuchung über die voraussichtliche Entwicklung einer Wattrinne vor einem neuen Siel – behandelt am Beispiel der Bedeichung Meldorfer Bucht Nord –. Marschenbauamt Heide. Unveröffentl., 1971.

Higelke, B.: Morphodynamik und Materialbilanz im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe. Ergebnisse quantitativer Kartenanalysen für die Zeit von 1936 bis 1969. Dissertation Univ. Kiel, 1975.

LANG, A. W.: Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung des Dithmarscher Watts von der Mitte des 16. Jahrhunderts bis zur Gegenwart. Hamburger Küstenforschung, H. 31, 1975.

MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Deichverkürzung und Küstenschutz. Kiel, 1977.

RENGER, E.: Untersuchungen von Watteinzugsgebieten. Mitt. d. Franzius-Inst. d. TU Hannover, H. 40, 1974.

RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. d. Franzius-Inst. d. TU Hannover, H. 34, 1970.

ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.

SIEFERT, W.: Ergänzende Wasserstandsuntersuchungen im Elbmündungsgebiet und im Wurster Watt. Hamburger Küstenforschung, H. 27, 1973.

THIES, E.: Veränderung der Wasserräume in der Piep und Meldorfer Bucht unter Seekartennull in der Zeit von 1927–1958. Studie Nr. 19 d. Marschenbauamtes Heide, Pegelaußenstelle Büsum. Unveröffentl., 1964.

WIELAND, P.: Untersuchung zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort. Die Küste, H. 23, 1972.

WIELAND, P.: Ursache und Umfang der Versandung des Hafens Friedrichskoog. Untersuchung über die geomorphologische Entwicklung im Wattengebiet zwischen Marner Plate und Hakensand. Arbeitsbericht Nr. 28 d. Marschenbauamts Heide, Pegelaußenstelle Büsum. Unveröffentl., 1973.

WIELAND, P. u. THIES, E.: Methoden der Wattvermessung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Wasserwirtschaft, H. 7/8, 1975.

WOHLENBERG, E.: Dithmarschen – eine landschaftsgeschichtliche Untersuchung. Dithmarschen, Geschichte und Bild einer Landschaft. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1968.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Tidedynamische und meteorologische Randbedingungen im Bereich des Schlick-Testfeldes Dithmarscher Bucht

Von Peter Wieland, Bernd Fladung und Volker Bergheim

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens über die Schlickbildung auf den Watten waren auch die wesentlichen natürlichen Randbedingungen zu ermitteln. Als Arbeitsgrundlage werden die Tidebewegung, meteorologische Abläufe, einige chemische Zustände und hydrologische Vorgänge in Form von Karten, Tabellen und Grafiken dargestellt. Einige spezielle Erscheinungen und Wechselbeziehungen werden ergänzend erläutert.

Summary

The dominant, naturally occurring boundary conditions for mud formation in the Dithmarsh intertidal zone were investigated in connection with an associated research project. This resulted in charts, tables and plots of tidal, meteorological, hydrological and some chemical conditions. Additional comments on particularly interesting observations and interrelationships between various phenomena are presented.

Inhalt

1. Anlaß und Aufgabe 139
2. Ergänzende Erläuterungen 142
   2.1 Zur Meerwassertemperatur im Wattengebiet 142
   2.2 Zur Wattoberflächentemperatur 147
   2.3 Zum Salzgehalt und zur Eisbildung im Watt 156
3. Schriftenverzeichnis 163

1. Anlaß und Aufgabe

Durch das „Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen" (KFKI) ist in den Jahren 1977 bis 1981 mit der Erforschung der Schlickbildung auf den Watten begonnen worden. Die maßgebenden natürlichen Gesetzmäßigkeiten sind ebenso komplex wie die Einflußparameter vielgestaltig sind, so daß die Aufgabe nur interdisziplinär eingrenzend zu lösen ist. Als Grundlage für die Arbeiten der verschiedenen, am Forschungsprojekt beteiligten Wissenschaftler werden nachfolgend einige wichtige Ergebnisse hydrologischer und meteorologischer Naturmessungen vorgelegt, die für die Interpretation und Beurteilung spezieller Erscheinungsbilder und Veränderungen gebraucht werden. Die ausgewählten Unterlagen in Form von Karten, Tabellen und Grafiken geben Zustände, Abläufe und Wechselbeziehungen

wieder. Sie erfassen überwiegend die Tidedynamik (Wasserstände, Strömungen), das Klima und die Witterung (Niederschläge, Lufttemperaturen, Wind, Sonnenscheindauer) sowie topographisch-hydrologische (z. B. Überflutungsdauer), meteorologisch-hydrologische (z. B. Wellenhöhen), chemische (Meerwassersalzgehalt) und hydrologisch-topographisch-meteorologische (z. B. Meerwassertemperaturen) Aussagen in Mittelwerten und teilweise in den Extremen.

Diese einzelnen Informationen sind überwiegend so weit aufbereitet oder ausgewertet dargestellt, daß sie ohne eine weitere Kommentierung verwertet werden können.

Eine ergänzende kurze Erläuterung wird zu den Meerwasser- und Wattoberflächentemperaturen sowie zur Eisbildung im Watt gegeben.

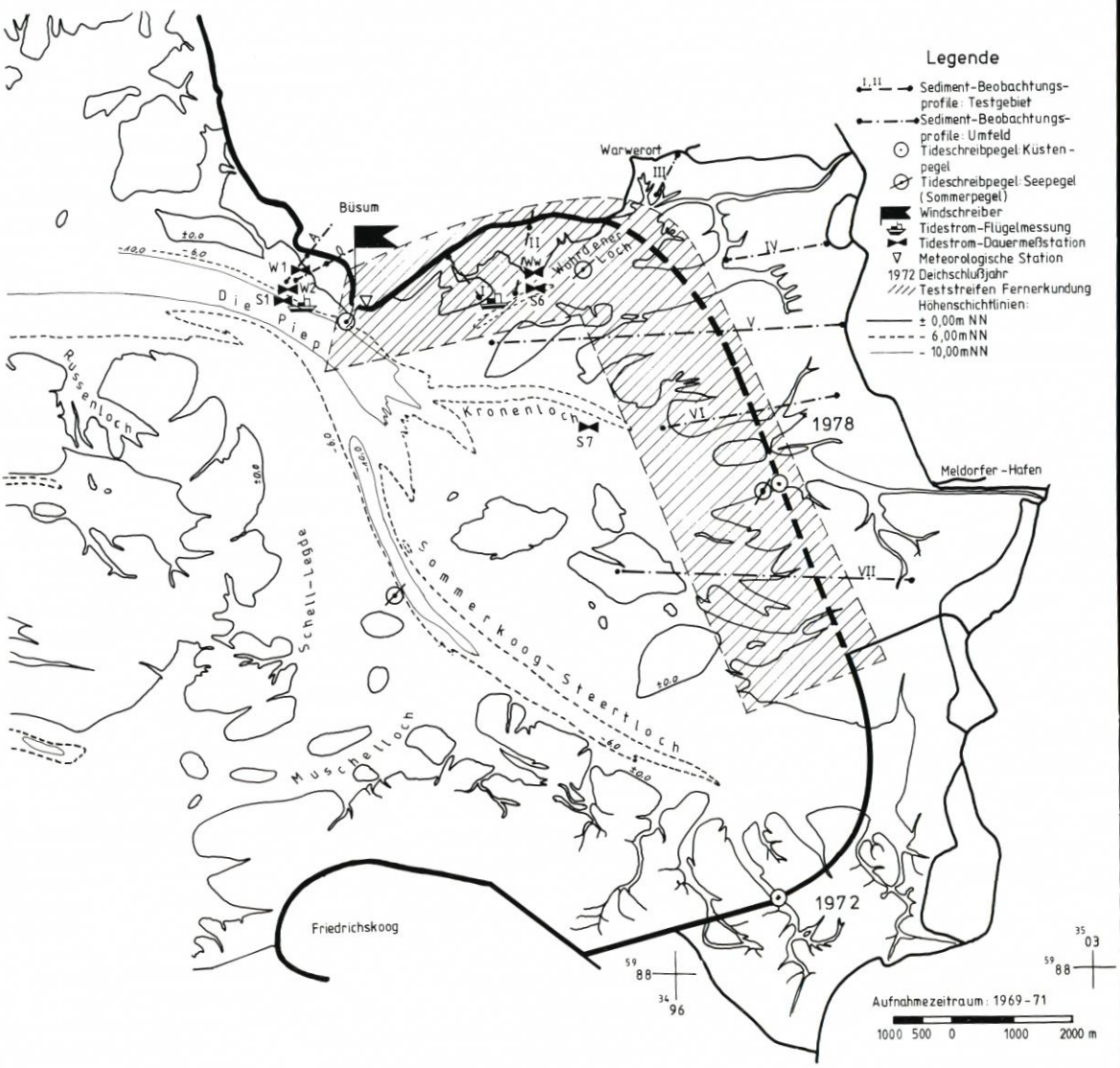


Abb. 1. Lageplan der Sediment-Beobachtungsprofile, Meßstationen und des Bildflugstreifens in der Dithmarscher Bucht

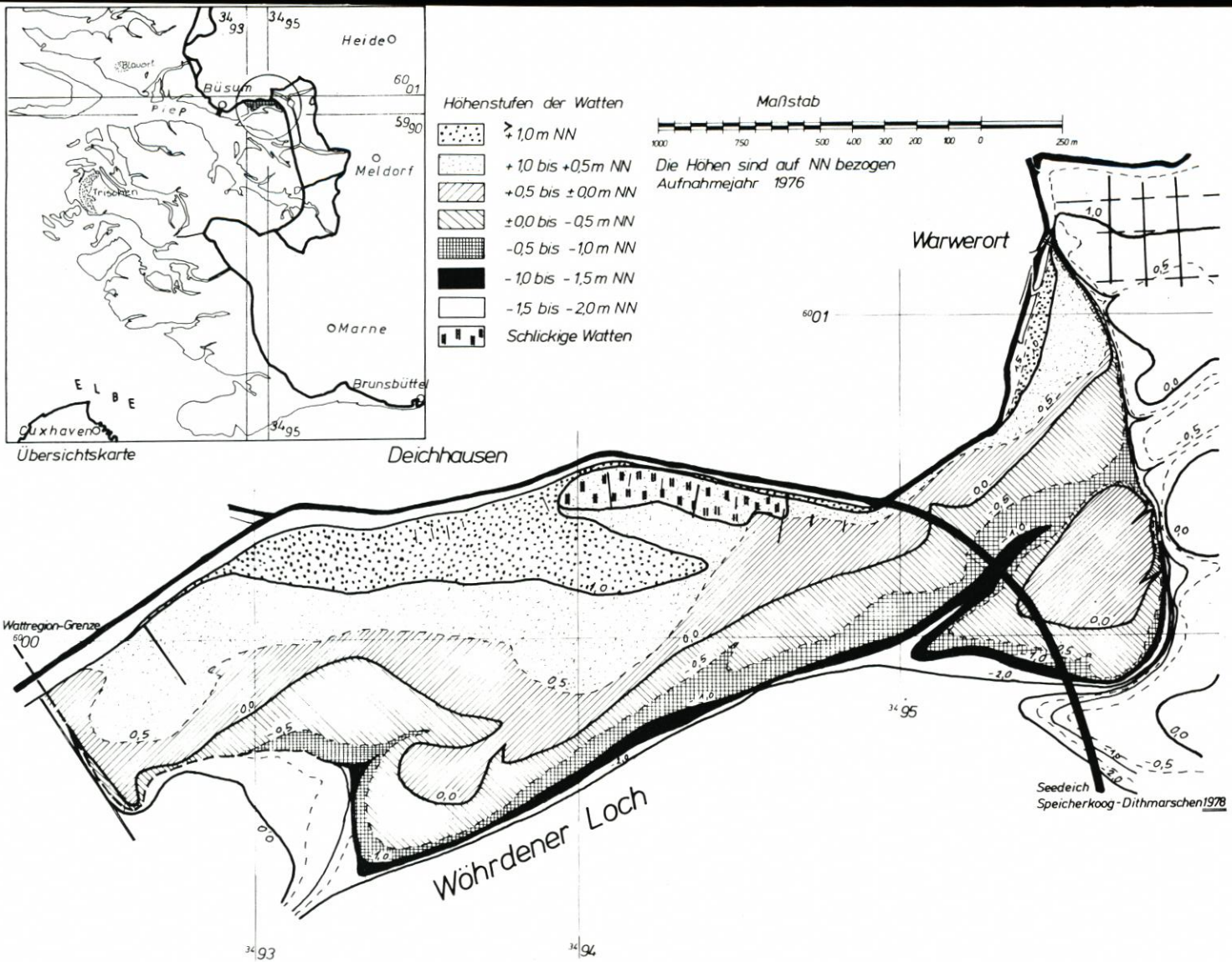


Abb. 2. Höhenstufen-Flächenkarte des Watts im Testgebiet vor Deichhausen/Warwerort

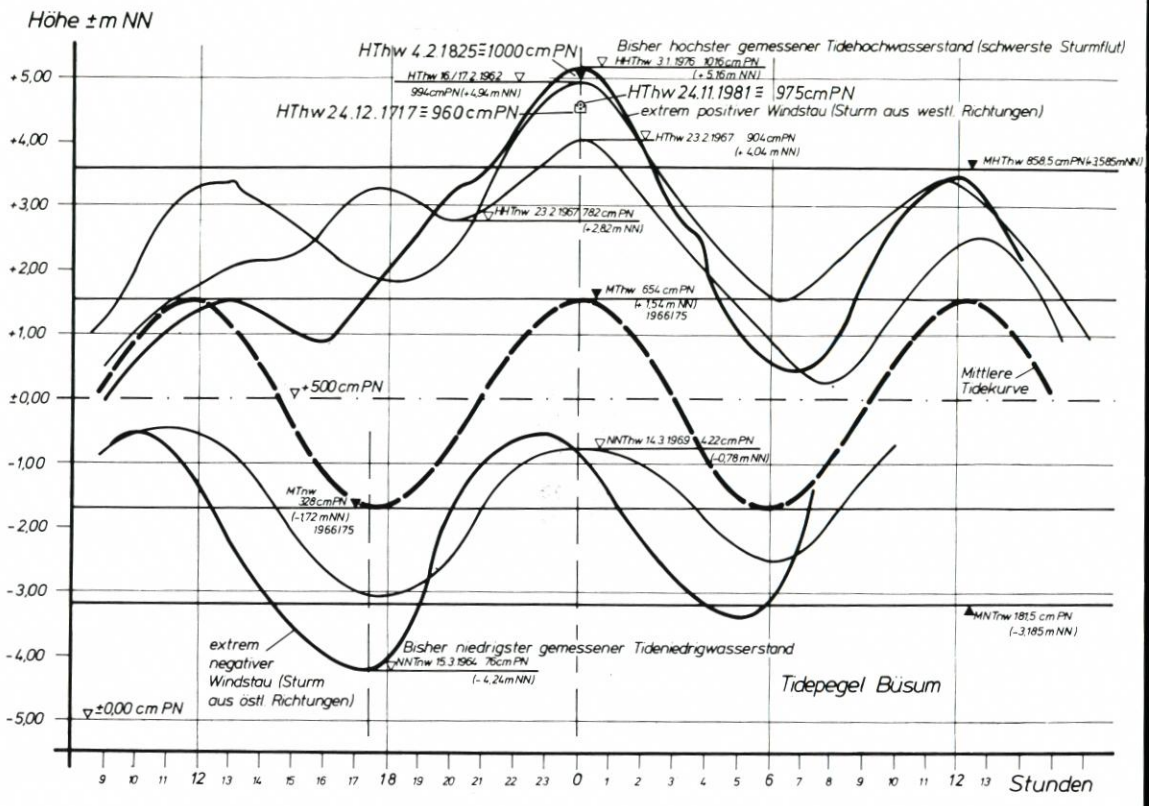


Abb. 4. Ganglinien extremer Tiden am Pegel Büsum

2. Ergänzende Erläuterungen

2.1 Zur Meerwassertemperatur im Wattengebiet

Kontinuierliche Meerwassertemperatur-Messungen wurden und werden an der Nordseeküste z. Zt. nur an wenigen Stellen und dort fast ausschließlich in tiefem Wasser – vor allem an Schleusen und Sperrwerken – höchstens zweimal am Tag tideunabhängig vorgenommen. Aus flachem Wasser, über küstennahem Watt sind kaum Meßergebnisse bekannt. Die dort auftretenden Meerwassertemperaturen wurden eingrenzend abgeleitet durch Literaturauswertungen und ergänzende Einzelmessungen von den an der Dauermeßstation Büsum-Schleuse in 1,0 m Wassertiefe täglich um 7.00 h gemessenen Werten (WIELAND, 1982). Die Untersuchung ergab folgende Ergebnisse lokaler Einflüsse (Abb. 18–22, Tab. 3 u. 4):

W a s s e r t i e f e : Die Meerwassertemperaturen sind oberhalb der Wassertiefe von 1,0 m, vor allem unter dem Einfluß der Atmosphäre auf die Meeresoberfläche, mindestens ebenso hoch wie in 1,0 m Tiefe, in der Regel aber höher.

T i d e g a n g : Vom Morgenniedrigwasser (6.00 h bis 10.00 h) bis zum Nachmittaghochwasser (14.00 h bis 18.00 h) wird das Meerwasser über den Watten bei sonnigem Wetter (SD $\geqq$ 8 h/d) um etwa 0,5 °C und bei bewölktem Wetter (SD $\leqq$ 4 h/d) um etwa 0,32 °C erwärmt. Vom Morgenhochwasser (6.00 h bis 10.00 h) bis zum Nachmittagniedrigwasser

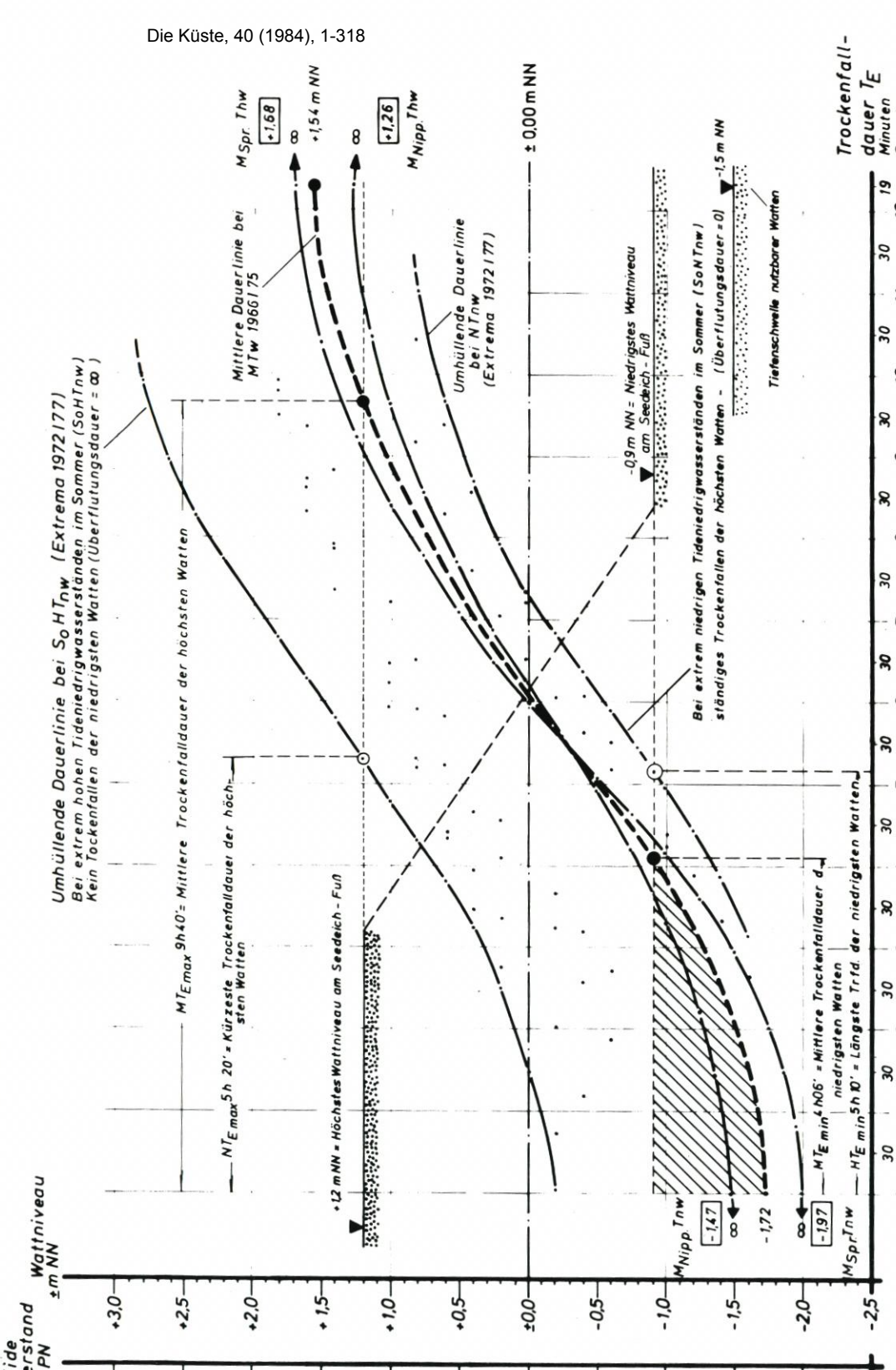


Abb. 5. Trockenfalldauer der Watten in Abhängigkeit vom Tidegang in Büsum

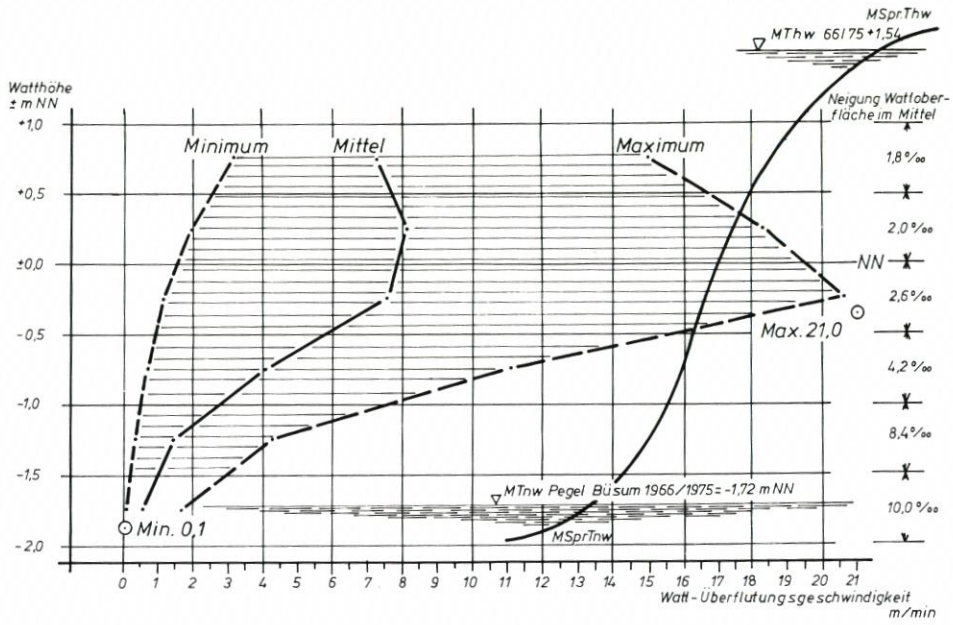


Abb. 6. Wandergeschwindigkeit des Tidesaumes während Flut in Abhängigkeit von Watthöhe, Wattneigung und Tidesteiggeschwindigkeit bei mittlerer Springtide in Büsum

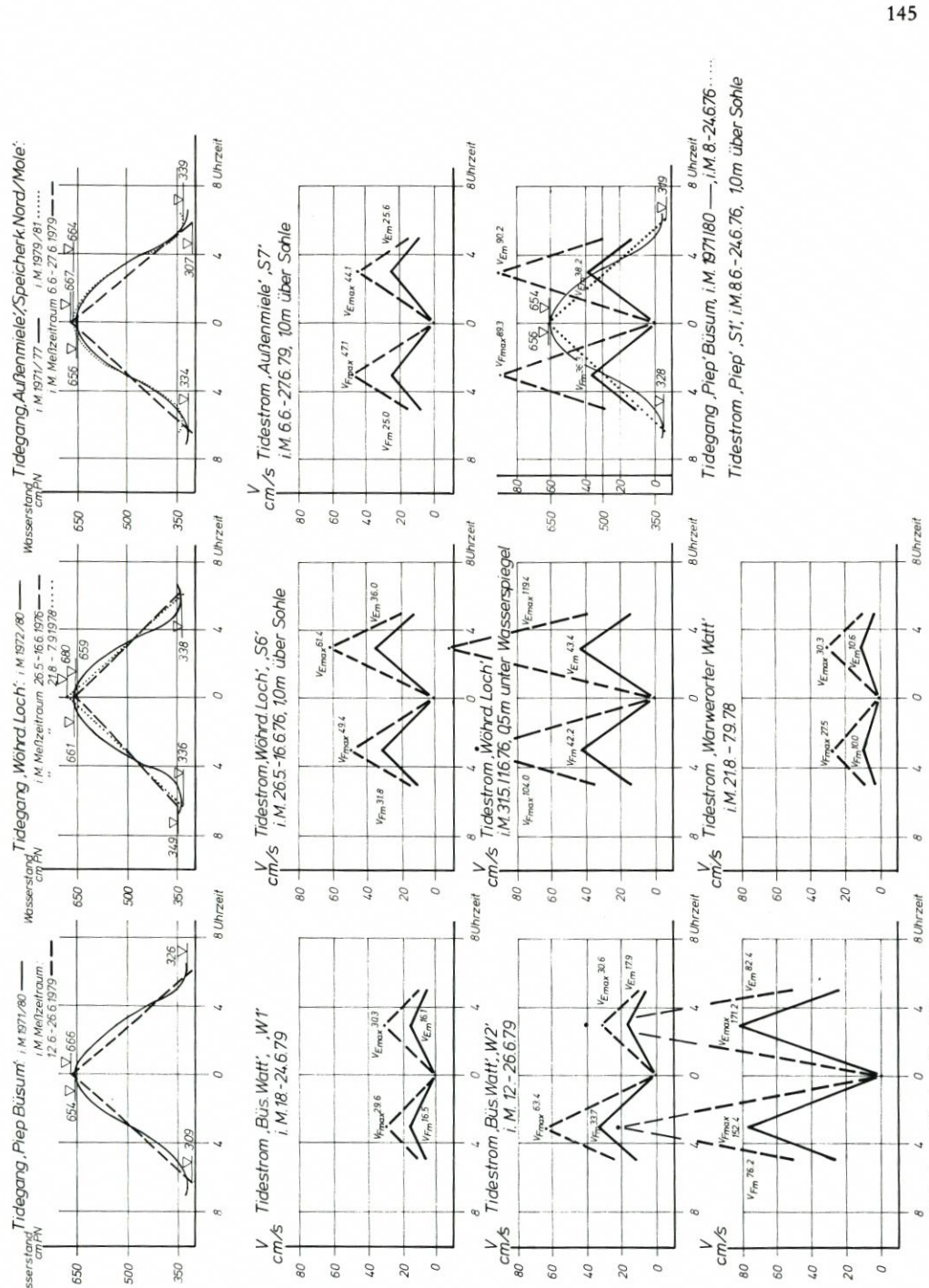


Abb. 7. Tidegang sowie mittlere und maximale Tidestromgeschwindigkeiten in der nördlichen Dithmarscher Bucht 1976 u. 1979

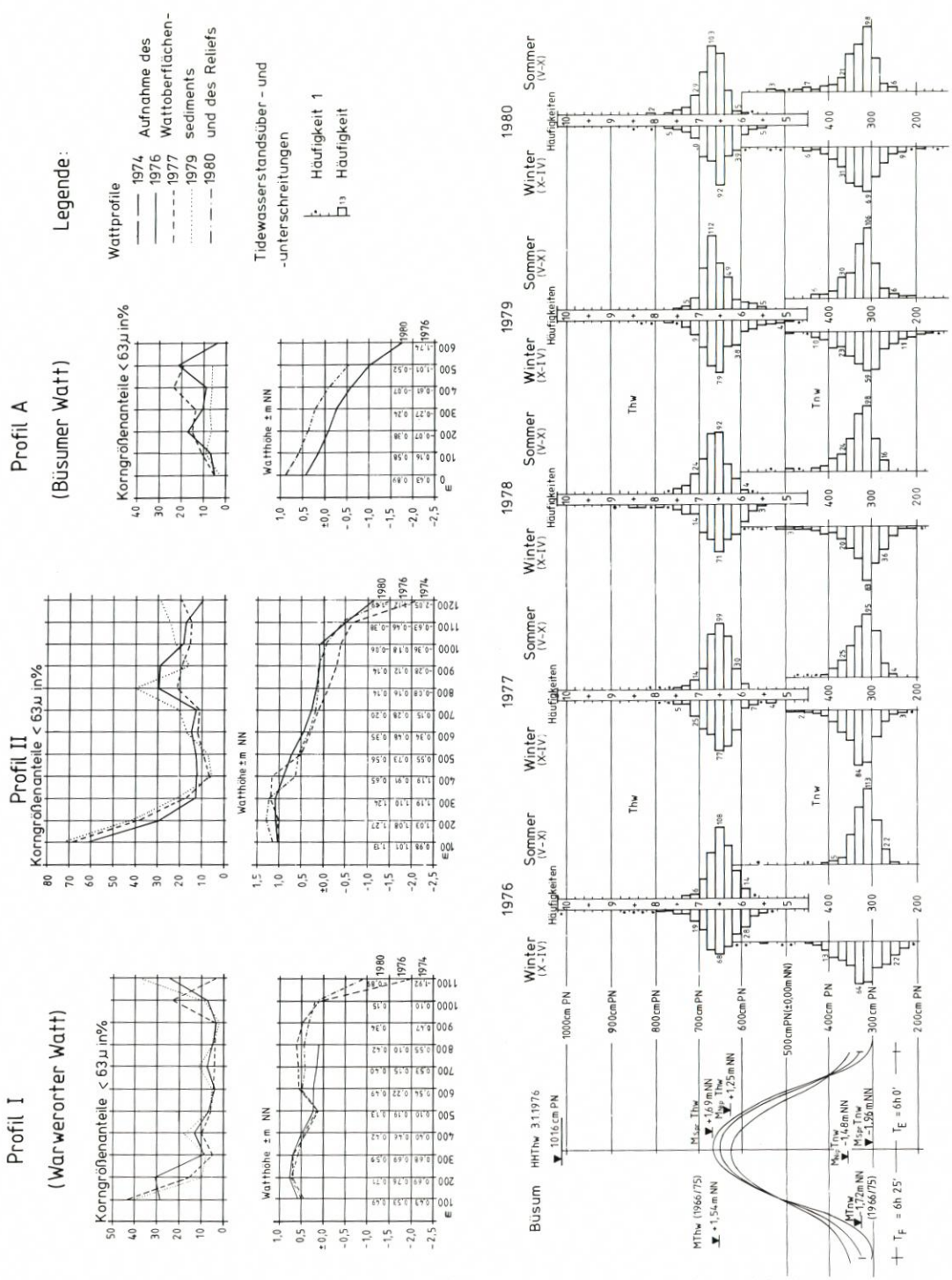


Abb. 8. Wattoberflächensediment im Tideeinfluß: Veränderungen 1974–1980 bei jährlich abweichenden Wasserstandsüber- und -unterschreitungshäufigkeiten am Pegel Büsum 1976–1980

(14.00 h bis 18.00 h) wird das Meerwasser über den Watten bei sonnigem Wetter um etwa 1,28 °C und bei bewölktem Wetter um etwa 0,46 °C erwärmt.

Tageszeit: Im Tagesverlauf erwärmt sich das Meerwasser während der Sommermonate vom 12. Juni bis 15. September zwischen 8.00 h und 20.00 h durchschnittlich um 1,2 °C mit dem Maximum um 16.00 h. Bei sonnigem Wetter beträgt die Erwärmung 1,48 °C, doppelt so viel wie bei bewölktem Wetter. Durchschnittlich steigt die Meerwassertemperatur im Tagesverlauf bei bewölktem Wetter von 7.00 h bis 14.00 h stündlich um 0,1 °C, ab 18.00 h sinkt sie wieder bis 19.00 h um 0,1 °C und danach bis 20.30 h um 0,2 °C. Der mittlere monatliche Tagesgang der Meerwassertemperatur kann im Sommer in den einzelnen Monaten und Jahren je nach Witterung bis zu 5,6 °C auseinander liegen (Abb. 9).

Watten: Das Wasser in der offenen Nordsee erwärmt sich im Frühjahr langsamer und kühlt im Herbst langsamer wieder ab als an der Wattenmeerküste. Der Unterschied ist im Sommermittel bei Sonnenwetter doppelt so hoch wie bei bewölktem Wetter. Im Einfluß der Watten erwärmt sich die Meerwassertemperatur bei Tage und bewölktem Wetter um mindestens 0,8 °C (Abb. 10–12).

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, daß die Meerwassertemperatur über dem Watt unmittelbar am Seedeichfuß in 30 cm Tiefe im Sommer mindestens 1 °C über derjenigen an der Dauermeßstelle liegt.

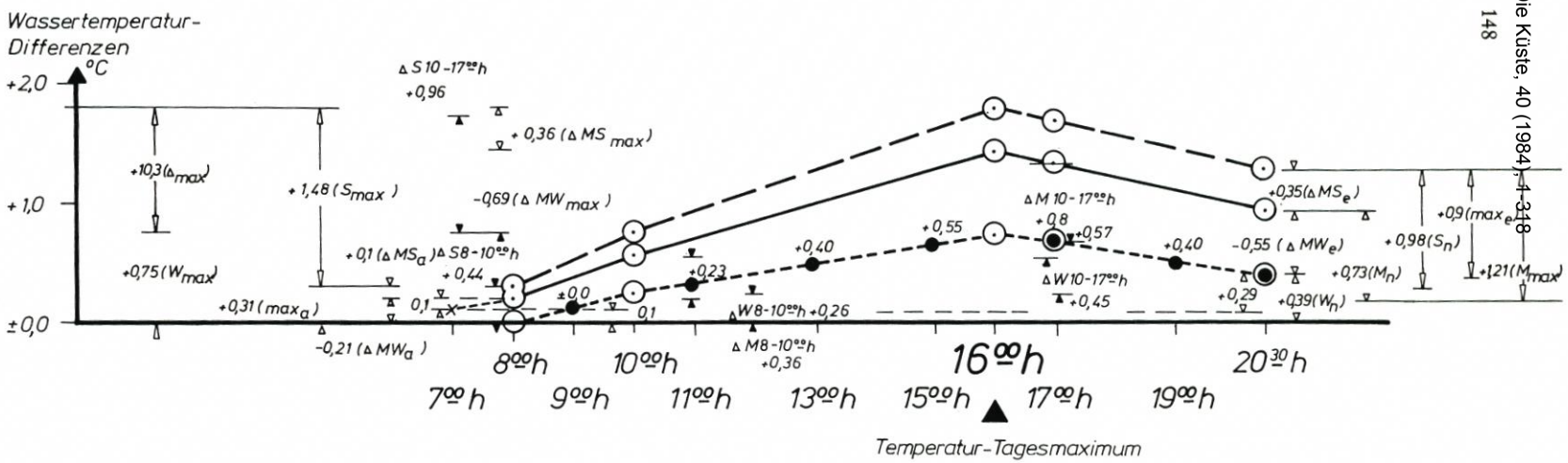
Im Mittel der Zehnjahresreihe 1967/76 waren +15 °C Meerwassertemperatur an der Dauermeßstelle in Büsum-Schleuse um 7.00 h in 1,0 m Meßtiefe vom 7. Juni bis 20. September, also insgesamt 106 Tage lang, ununterbrochen überschritten.

2.2 Zur Wattoberflächentemperatur

Die Temperaturen unmittelbar an der Oberfläche der Watten, im Grenzbereich zwischen Boden, Wasser und Luft und in Abhängigkeit verschiedener Niveauhöhen, Sedimentzusammensetzung, wechselnd hoher und langer Meerwasserüberflutungen, Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlung, sind entsprechend veränderlich.

Wegen der sehr viel geringeren Wärmekapazität der Luft gegenüber dem Wasser (Wasser = 50mal stärker) erwärmt ein hochgelegener, in der obersten Schicht trockener Wattboden tagsüber je nach Bewölkung und Sonnenstand rascher und erheblich stärker als ein tiefgelegener, sehr nasser Boden, und er gibt die Wärme schneller wieder ab. Dieses als Albedo bezeichnete Verhältnis von zurückgeworfener zu einfallender Globalstrahlung erfaßte Andrews (1976 u. 1980) erstmals beispielhaft im Wattgebiet zwischen Wesermündung und Jadebusen. Zunächst ist das Albedo über Wasser zur Hochwasserzeit sehr gering. Bei dem für wolkenfreien Himmel, Morgenhochwasser und Hochsommer gezeigten Beispiel stieg der Wert von etwa 7,5 % bei gerade noch geringer Wasserüberdeckung auf 11 % unmittelbar nach dem Trockenfallen um 9.30 h, mit zunehmender Austrocknung des Sandes bis gegen 12.00 h dann zunächst langsam weiter auf 11,7 % und ab Mittag stärker auf reichlich 14 % unmittelbar vor erneuter Überflutung, um mit der Wasserüberdeckung gegen 16.00 h abrupt wieder auf fast 8 % abzusinken (Abb. 10). Bewölkung und Sonnenstand verändern diesen Albedo-Tagesgang je nach Wolkenart und jahreszeitlicher Strahlungsintensität positiv oder negativ.

Die absolute Temperatur in der obersten Wattbodenschicht verläuft bei warmem Wetter und intensiver Strahlung entsprechend in Wellen mit hohen Amplituden während des Trockenfallens am Tage. In 2 cm Tiefe sind bei wolkigem bis fast klarem Himmel vom 20. bis 22. April 1975 nach rd. fünfstündigem Trockenfallen Temperaturanhebungen am Tage von



Legende:

⊙——— Wetter sonnig (Sonnenscheindauer ≧ 8h/Tag)
⊙------ Wetter bewölkt (Sonnenscheindauer ≦ 4h/Tag)
⊙——— Mittelwert sämtlicher Tage (einschl. teilbewölkt)

±0,0 +0,23 +0,40 Meerwassertemperatur - Abweichung vom 7°° h - Mittelwert bei bewölktem Wetter (Sonnenscheindauer ≦ 4h/Tag)

Maximaler Temperaturanstieg bei sonnigem Wetter = S_{max}
" " " bewölktem " = W_{max}
" " im Mittel sämtl. Tage = M_{max}

Netto-Temperaturanstieg 8°°h - 20³⁰h bei sonnigem Wetter = S_n
" " " " " bewölktem " = W_n
" " " " im Mittel sämtl. Tage = M_n

Abb. 9. Tagesgang der Meerwassertemperatur über dem Watt in Wyk/Föhr im Mittel von Juni bis September 1967–1971 und 1974 bei verschiedenem Wetter

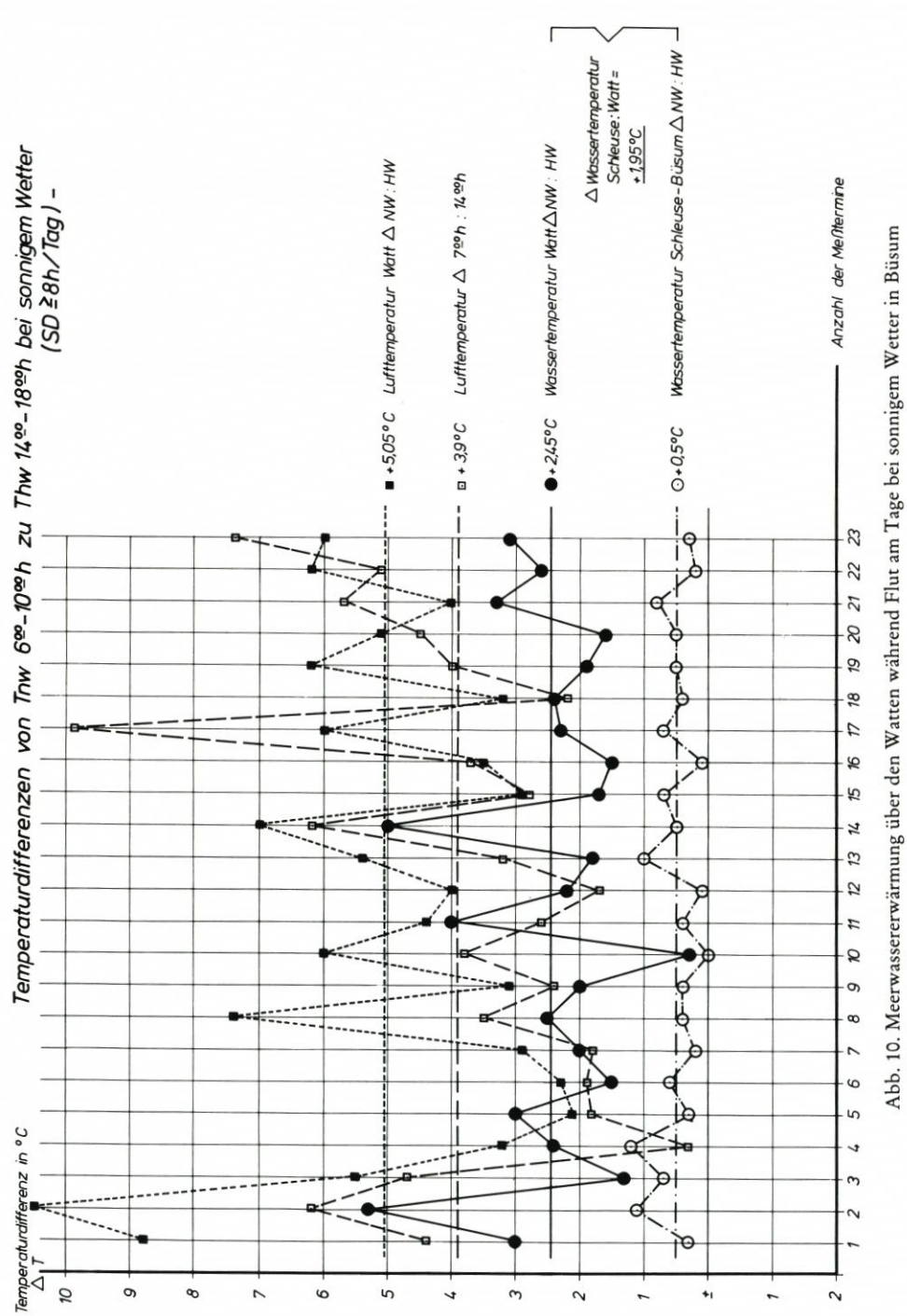


Abb. 10. Meerwassererwärmung über den Watten während Flut am Tage bei sonnigem Wetter in Büsum

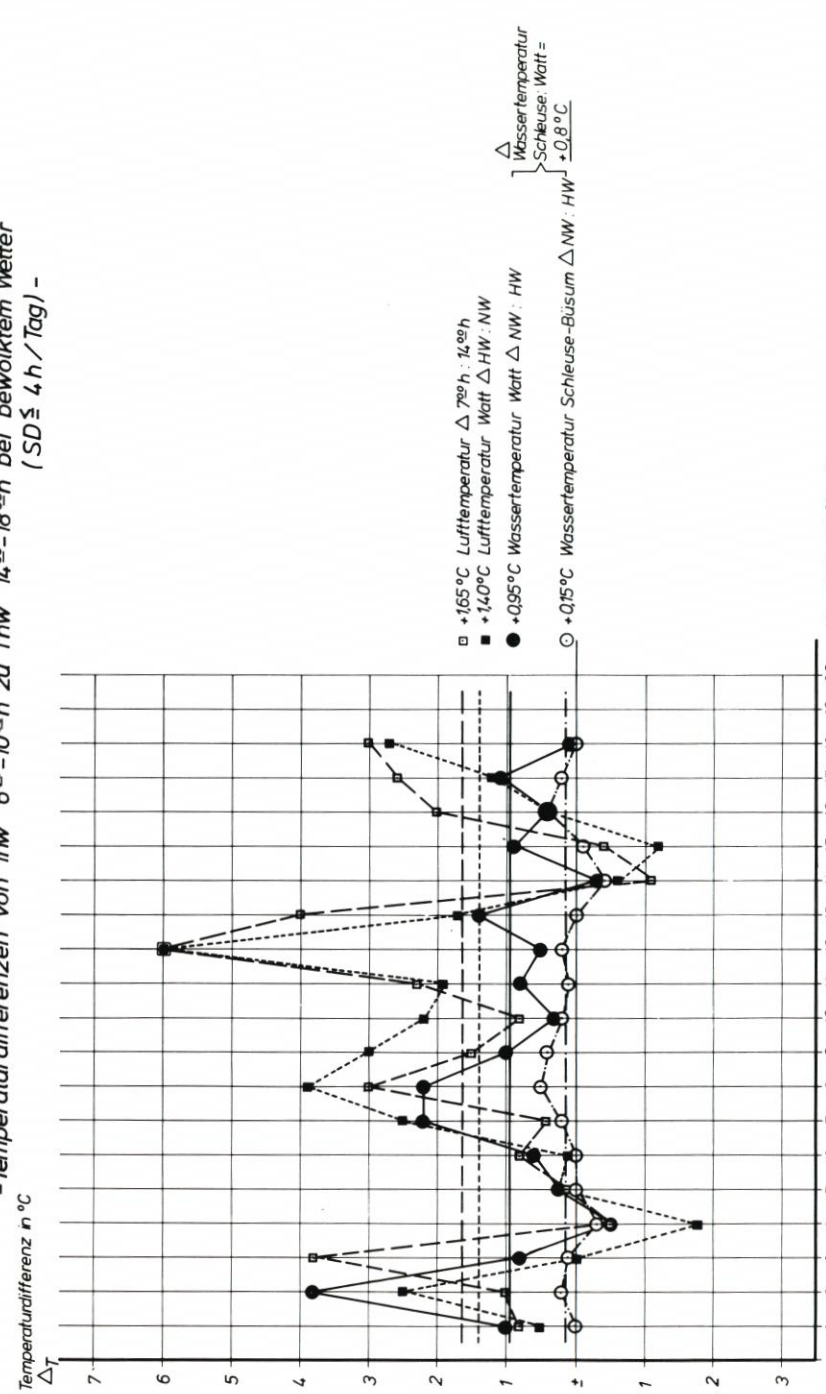


Abb. 11. Meerwassererwärmung über den Watten während Flut am Tage bei bewölktem Wetter in Büsum

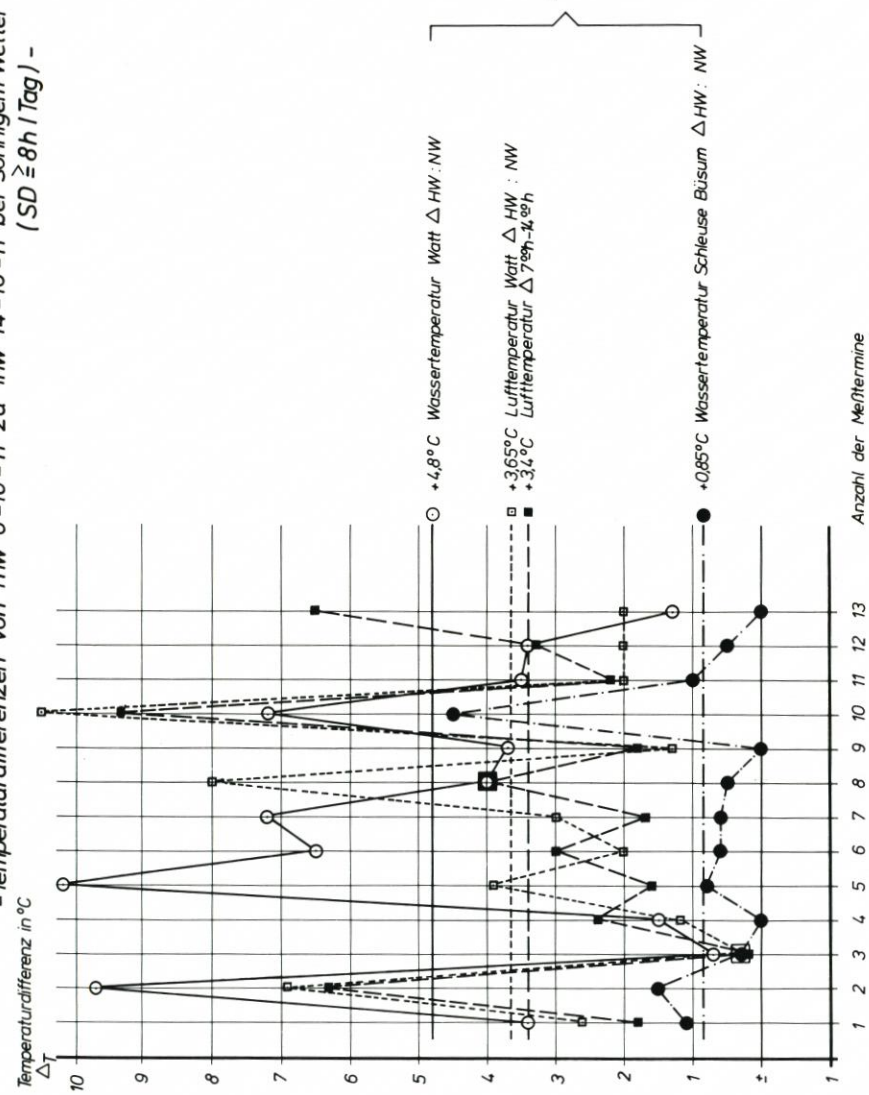


Abb. 12. Meerwassererwärmung über den Watten während Ebbe am Tage bei sonnigem Wetter in Büsum

Tab. 1. Termingleiche Luft- und Meerwassertemperaturen bei sonnigem und bewölktem Wetter vom 12. 6. bis 15. 9. 1974–1976 in Helgoland und Büsum

Wetter sonnig (SD ≥ 8h/Tag) Temperaturen in °C						Wetter bewölkt (SD ≤ 4h/Tag) Temperaturen in °C					
Monat	Luft St Peter Tagesmittel	Meerwasser Helgoland 7.33 h	Meerwasser Büsum Schleuse 7.33 h	Meerwasser Büsum Watt 6–10.33 h	Sonnenschein-dauer h	Monat	Luft St Peter Tagesmittel	Meerwasser Helgoland 7.33 h	Meerwasser Büsum Schleuse 7.33 h	Meerwasser Büsum Watt 6–10.33 h	Sonnenschein-dauer h
Juni	14,2	13,6	16,6	18,8	8,8	Juni	8,8	9,7	11,0	9,8	3,2
	14,4	13,6	18,7	17,5	8,0		9,2	10,4	13,3	11,5	3,4
	16,7	14,0	16,5	17,7	14,9		12,7	11,3	17,6	17,0	1,2
	16,3	15,5	19,5	21,0	14,8		15,0	11,0	16,0	17,2	4,1
	16,6	14,1	15,8	18,9	14,6		13,8	14,4	19,0	16,5	4,1
	15,4	13,0	15,5	17,5	14,3		16,5	13,7	16,5	15,8	4,0
	17,0	13,0	15,5	18,2	9,3						
	11,2	9,7	10,3	10,6	11,3						
	15,9	11,9	17,5	20,3	12,9						
	18,2	17,2	21,8	22,0	14,9						
(12)	17,3	16,8	21,5	22,0	15,0	(6)					
	17,6	16,8	21,6	23,0	14,8						
Mittel:	15,9	14,1	17,55	18,95	12,8	Mittel:	12,65	11,75	15,55	14,65	3,35
Juli	17,6	15,7	17,0	17,2	12,9	Juli	18,8	16,3	17,9	17,9	2,1
	15,2	15,6	16,2	16,7	12,2		15,2	14,0	16,7	16,5	4,1
	16,4	14,5	17,0	15,8	12,9		13,4	15,7	17,2	17,0	1,7
	15,8	14,7	17,5	18,4	14,1		15,2	15,8	16,7	16,8	0,0
	19,0	17,2	20,0	19,4	14,5		17,1	15,9	18,4	16,5	4,2
	16,6	15,6	18,0	17,3	10,2		15,0	15,7	18,5	17,7	4,2
	17,4	16,1	18,2	18,5	10,9		14,9	15,5	17,7	17,5	4,1
	16,3	16,7	18,5	21,6	14,9		16,0	16,1	19,1	17,0	4,0
	18,8	16,2	21,3	21,5	14,9		19,5	17,6	22,0	21,5	3,0
(11)	20,2	17,8	21,9	20,5	11,2	(11)	15,9	15,1	17,8	17,5	4,3
	19,6	16,8	21,8	23,4	14,7		14,9	15,2	17,3	17,5	2,2
Mittel:	17,55	16,1	18,85	19,1	13,05	Mittel:	16,0	15,7	18,1	17,6	3,1
August	18,1	16,5	16,8	16,8	7,8	August					
	15,4	16,4	16,2	16,8	8,8						
	14,4	17,6	19,0	19,0	10,4						
	13,8	17,0	18,5	17,0	9,7		14,8	16,2	16,9	15,5	4,0
	15,7	17,5	18,7	20,8	12,2		16,0	17,5	18,6	18,5	3,7
	16,2	17,5	18,6	20,0	11,9		17,4	18,4	19,5	18,6	3,5
	16,6	16,9	18,5	17,0	7,9						
	18,6	17,2	17,5	17,5	8,6						
	19,2	17,9	18,7	18,7	12,0						
(11)	23,4	19,2	23,2	24,8	12,9	(3)					
	25,6	20,0	23,0	25,5	13,1						
Mittel:	17,9	17,5	18,95	19,45	10,45	Mittel	16,05	17,35	18,35	17,55	3,75
September (2)	15,8	15,0	14,2	15,6	7,7	(3) September	13,8	16,0	15,6	14,7	4,4
	9,3	14,5	11,3	13,9	7,5		11,8	15,0	14,7	14,7	2,1
							13,7	15,0	14,1	15,6	2,5
Mittel:	12,55	14,75	12,75	14,75	7,6	Mittel:	13,10	15,35	14,8	15,0	3,0
Mittel Sommer	16,0	15,65	17,0	18,05	11,0	Mittel Sommer	14,45	15,05	16,7	16,2	3,3

8 °C (wolkig) bis 12,4 °C (wolkenlos) gemessen worden. In 15 cm Tiefe betragen diese Schwankungen nur mehr etwa 30 % derjenigen in 2 cm Tiefe. Bereits in 40 cm Tiefe erreicht die Tagesamplitude nur noch etwa einen halben Grad. In 60 cm Tiefe und nachts ist ein Tagesgang nicht mehr vorhanden (Abb. 9). In einer nahezu horizontalen Linie verläuft die Bodentemperatur ähnlich der Wassertemperatur im Spätherbst und Winter bei völlig bedecktem Himmel, niedrigen Lufttemperaturen, anhaltendem Niederschlag und stärkerem Wind.

Unmittelbar an der Wattoberfläche sind die Temperaturschwankungen sehr viel extremer als in den tieferen Schichten. Im strahlungsintensiven Frühjahr und im Sommer können sie bis zu 25 °C erreichen. Ebenso sind die Temperaturausschläge im Sandwatt größer als im

porenärmeren und wasserhaltigeren Schlickwatt. Sand besitzt in der obersten Schicht mit durchschnittlich $0{,}79 \times 10^{-6}$ eine deutlich höhere Temperaturleitfähigkeit als Schlick mit $0{,}45 \times 10^{-6}$ (Schlicksand = $0{,}51 \times 10^{-6}$). Dementsprechend geringer ist bei Sandwatt die Wärmekapazität je Volumeneinheit.

Die Höhenlagen der Meßpunkte im Watt, denen die mitgeteilten Ergebnisse entstammen, sind nicht genannt. Lediglich einen groben Anhalt liefert die fünfstündige Trockenfalldauer. Extrem hohe Watten von +1,0 m NN können in bezug auf den Tidegang in Büsum durchschnittlich 8 Stunden lang wasserunbedeckt sein. Sie sind daher entsprechend stärker der Strahlung ausgesetzt als tiefe Watten von −1,0 m NN mit durchschnittlich nur 3,5 Stunden Trockenfalldauer.

Im Sommer richtet sich die Wärmeaufnahme des Watts nach dem Wetter, insbesondere der Lufttemperatur und Himmelsbedeckung, wobei die Luftbewegung ein entscheidender Faktor ist, und nach dem Sonnenstand. Im Winter erfolgt immer eine etwa gleichmäßige Wärmeabgabe (Abb. 13 u. 14).

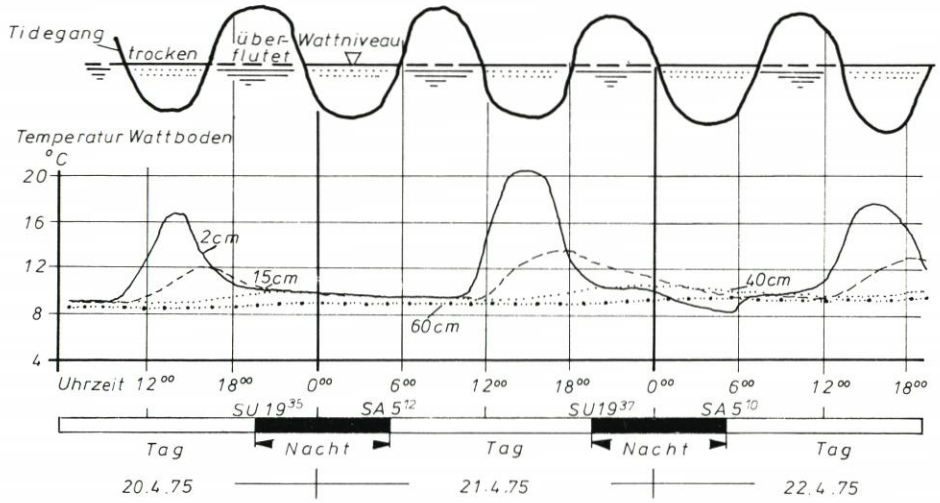


Abb. 13. Temperaturgang im feuchten, braunen Sandwatt in Abhängigkeit von Tidegang, Jahreszeit und Meßtiefe bei wolkigem bis klarem Wetter (nach Andrews 1980)

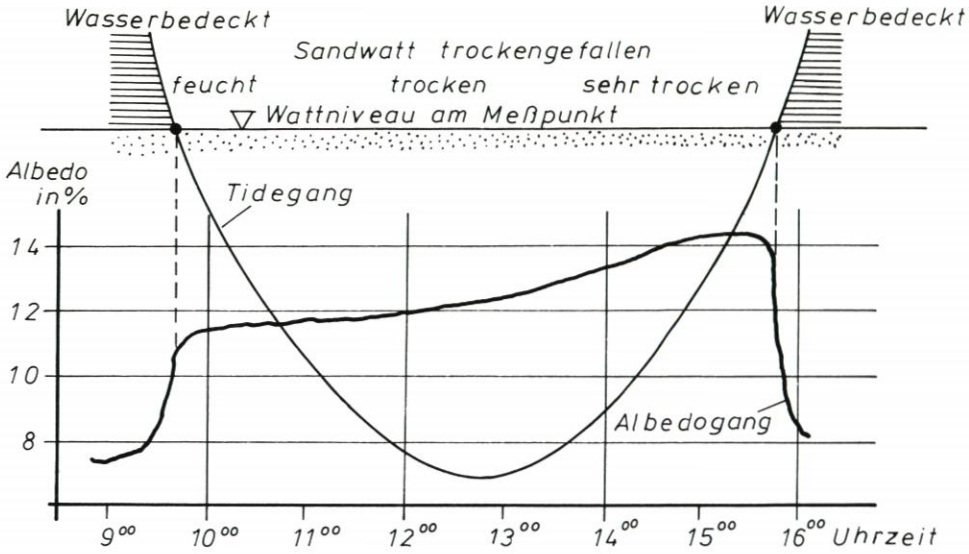


Abb. 14. Änderung der Albedo über braunem Wattsand unter wolkenfreiem Himmel im Tideeinfluß am 2. 8. 75 (nach Andrews 1983)

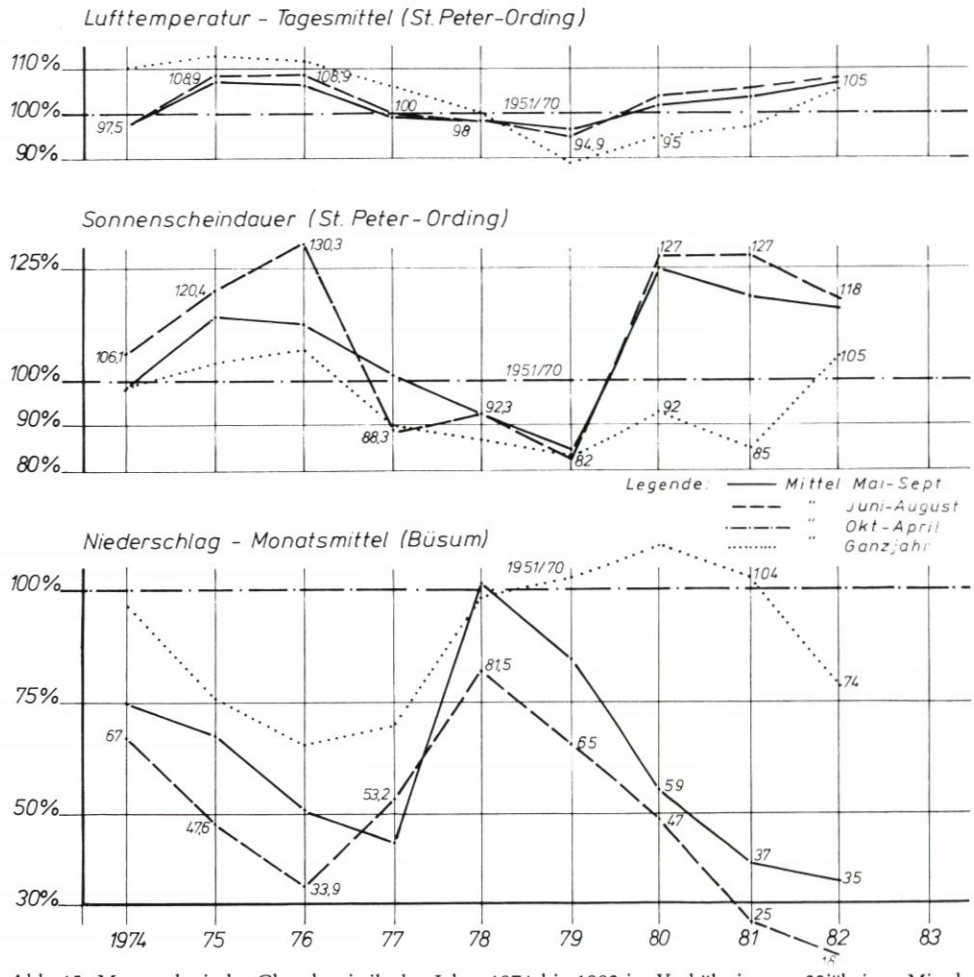


Abb. 15. Meteorologische Charakteristik der Jahre 1974 bis 1982 im Verhältnis zum 20jährigen Mittel 1951/70

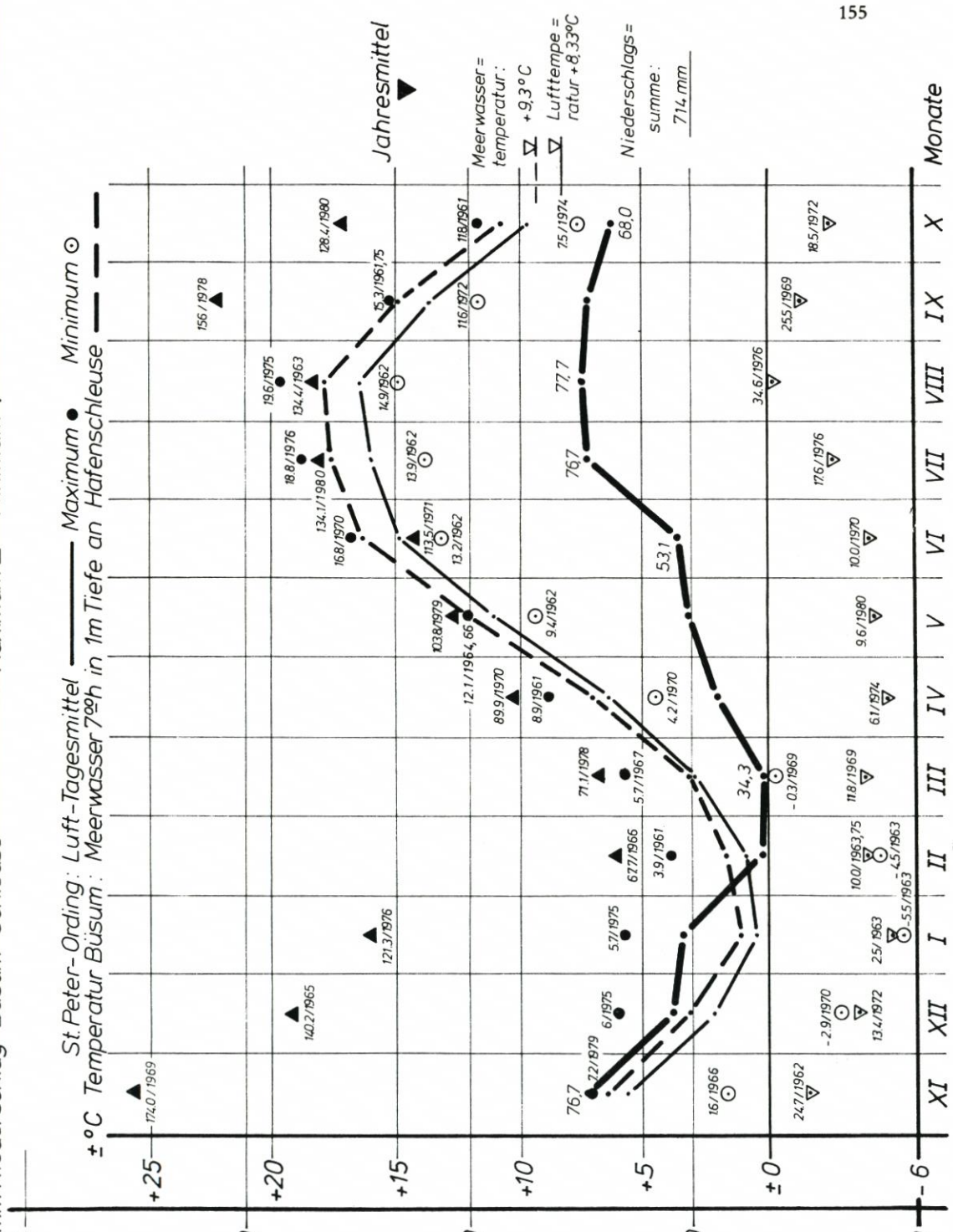


Abb. 16. Mittlere und extreme Niederschläge, Luft- und Meerwassertemperaturen 1961/80 in Büsum

Tab. 2. Überflutungs- und Trockenfallgeschwindigkeit der Watten in Abhängigkeit von ihrer Höhe, Neigung und vom Tidegang bei mittl. Springtide in Büsum

Höhenlage der Tide- und Wattstufen ± m NN von / bis	Tidegang am Pegel Büsum bei mittlerer Springtide 1966/75				Neigung der Wattoberfläche (Westküste S.-H.)							Überflutungsgeschwindigkeit m/min.			Trockenfallgeschwindigkeit m/min.		
	Tidestieg		Tidefall		Anzahl	im Mittel		Minimum		Maximum							
	T_E min	cm/min	T_E min	cm/min	Stichpr.	1:n	‰	1:n	‰	1:n	‰	i. Mittel	Max.	Min.	i. Mittel	Max.	Min.
+1,00 / +0,75	20	1,25	22	1,14	13	554	1,8	1140	0,4	240	2,1	6,9	14,3	3,0	6,3	13,0	2,7
+0,75 / + 0,50	18	1,39	20	1,25								7,7	15,8	3,3	6,9	14,3	3,0
+0,50 / + 0,25	16	1,56	19	1,32	27	500	2,0	1140	0,4	120	8,3	7,8	17,8	1,9	6,6	15,0	1,6
+0,25 / ± 0,00	15	1,67	17	1,47								8,4	19,0	2,0	7,4	16,8	1,8
± 0,00 / - 0,25	13	1,92	16	1,56	29	386	2,6	1050	0,9	60	16,7	7,4	20,2	1,1	6,0	16,4	0,9
- 0,25 / - 0,50	12,5	2,00	15	1,67								7,7	21,0	1,2	6,4	17,5	1,0
-0,50 / -0,75	14	1,79	13	1,92	24	234	4,2	640	1,5	40	25,0	4,2	11,5	0,7	4,5	12,3	0,8
-0,75 / -1,00	15	1,67	13	1,92								3,9	10,7	0,7	4,5	12,3	0,8
-1,00 / -1,25	18	1,39	14	1,79	13	118	8,4	340	2,9	30	33,3	1,6	4,7	0,4	2,1	6,1	0,5
-1,25 / -1,50	22	1,14	16	1,56								1,3	3,9	0,3	1,8	5,3	0,5
-1,50 / -1,75	28	0,89	22	1,14	14	100	10,0	270	3,7	20	50,0	0,9	2,4	0,2	1,1	3,1	0,2
-1,75 / -1,96	61	0,34										0,3	0,9	0,1	0,4	1,1	0,1
/ -1,98			58	0,40													

2.3 Zum Salzgehalt und zur Eisbildung im Watt

Der Gefrierpunkt von Wasser ist abhängig vor allem von seiner Dichte, Temperatur und dem Salzgehalt. Süßwasser erreicht die größte Dichte bei +4 °C und gefriert, wenn die Temperaturschwelle von ±0 °C erreicht und unterschritten wird. Meerwasser mit einem Salzgehalt von 25 ‰ hat die größte Dichte bei etwa −1,4 °C. Wegen des Gemisches verschiedener Salze im Meerwasser, die bei sehr unterschiedlichen Temperaturen auskristallisieren, ist der Gefrierpunkt des Meerwassers nicht eindeutig festlegbar. Natriumsulfatlauge ($Na_2SO_4 \times 10\ H_2O$) wird z. B. bei −8,2 °C auskristallisiert, Natriumchlorid (NaCl) erst bei −23 °C. Unter −55 °C ist die restliche Mutterlauge völlig erstarrt (Dietrich u. Kalle, 1965). Bis sämtliche Salze auskristallisiert sind, bleibt zwischen den bereits gebildeten Eiskristallen eine Salzlauge eingeschlossen. Sie sickert wegen ihres gegenüber dem Eis schwereren Gewichts langsam nach unten aus. In die Hohlräume dringt Luft nach. Bei einem Meerwasser mit 33 ‰ Gesamtsalzgehalt beginnen sich reine Eiskristalle zu bilden, wenn die Wassertemperatur auf −1,8 °C gesunken ist. Das Eis bleibt also auch bei weiter absinkenden Temperaturen noch lange griesig, weich und brüchig.

Der Salzgehalt des Nordseewassers unmittelbar an der Küste liegt infolge des Süßwasserzuflusses vom Binnenland her etwa zwischen 18 ‰ und maximal 32 ‰ (Tab. 4), wobei jahreszeitliche Schwankungen beobachtet wurden, mit geringfügig höheren Werten im Sommer. Für das freie Meerwasser im Jadebusen ist eine Schwankungsbreite der Salinität von 22 bis 33 ‰ ermittelt worden (Dörjes, 1970).

An der Wattoberfläche schwanken die Salzgehalte insbesondere durch die meteorologischen Einflußwirkungen teilweise stark. Im Katinger Watt an der Eidermündung sind unmittelbar nach dessen Bedeichung in der obersten Schicht von 0 bis 2 cm Tiefe zwischen rd. 26 und 85 ‰ NaCl ermittelt worden. Die angrenzende Tideeider hatte zur gleichen Zeit einen

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Gehalt von 25 ‰ (WIELAND, 1973). Nach DÖRJES (1970) liegt der Salzgehalt des dem Tidewechsel unterliegenden Wattsediments infolge Kapillarwirkung und Verdunstung während der Trockenfalldauer um 3 bis 5 ‰ höher als das diese Watten überflutende Meerwasser. Bei intensiver Sonneneinstrahlung im Sommer kann diese Differenz im Extremfall bis zu 25 ‰ betragen. Im Winter ist die mittlere Differenz an Frosttagen infolge Ausfrierens höher als im Sommer, bei starken Niederschlägen niedriger. Im Lauwerzee-Polder (Niederlande) sind unmittelbar nach Deichschluß im Mai 1969 an der Wattoberfläche 25 bis 35 ‰ NaCl gemessen worden, im April 1970 waren es 25 bis 43 ‰, und erst danach sank der Wert durch Auswaschung langsam gleichmäßig ab (RIJKSDIENST V. IJSSELMEERP., 1971).

Da bei Lufttemperaturen um und unter ±0 °C der Niederschlag zumeist als Schnee die Wattoberfläche erreicht, eine Auswaschung also kaum stattfindet, zum anderen aber das Ausfrieren einsetzt, kann davon ausgegangen werden, daß die Watten entlang der Küste an der Oberfläche generell einen geringfügig höheren, zumindest aber gleichhohen Salzgehalt aufweisen als das Meerwasser dort. Das erlaubt den Schluß, daß die Eiskristallbildung auf den Watten entlang der Küste unter dem Einfluß eines Meerwassers mit durchschnittlich 25 ‰ Salzgehalt etwa bei −1,8 °C Wassertemperatur beginnt (WIELAND, 1982).

Nunmehr ist zu prüfen, ob, wann und wie lange mit einer Unterschreitung dieses Meerwassertemperatur-Schwellenwertes zu rechnen ist. Anhand der Pentadenwerte der Zehnjahresreihe 1967/76 ergibt sich, daß dies zu keiner Zeit der Fall war. Die niedrigste Meerwassertemperatur überhaupt betrug in insgesamt zwei Pentaden (16. bis 20. 1. 1972 und 15. bis 19. 2. 1970) −1,7 °C. Die längste ununterbrochene Reihe mit tiefsten Meerwassertemperaturen dauerte rd. 1,5 Monate (16. 1. bis 1. 3. 1970) bei mindestens −1,2 °C und höchstens −1,7 °C. Vereinzelt, besonders in stärker von Süßwasser durchmischten Flußmündungsgebieten, kam es dennoch zur Eisbildung, zumal an Einzeltagen innerhalb der Extrempentaden etwas tiefere Temperaturen vorkamen. Ausnahmen hiervon sind in Extremwintern möglich, wie 1978/79 mit vor allem viel Schneefall, jedoch Lufttemperaturen von minimal nur −11,4 °C (5. 1. 79) und Meerwassertemperaturen von minimal −1,9 °C (6. bis 10. 1. 79) oder, wie im Januar und Februar 1963, mit täglichen Lufttemperatur-Minima bis über −20 °C in St. Peter-Ording. Diese extremen Winter treten jedoch selten auf.

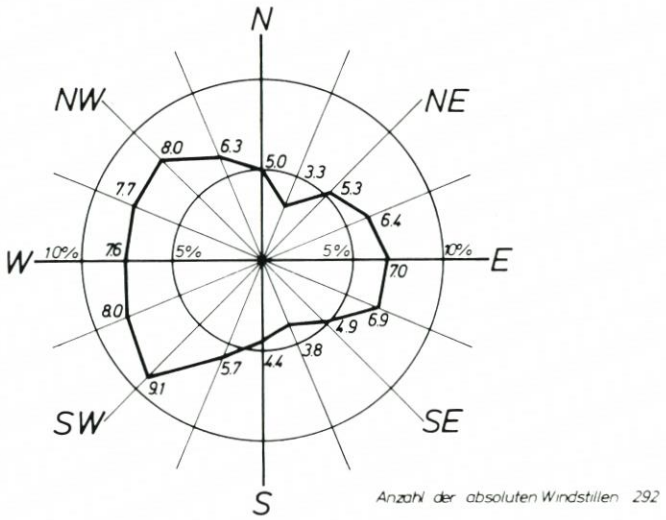


Abb. 17. Prozentuale Verteilung der Windrichtungen aller Windstärken im Mittel von 1969 bis 1974 in Büsum

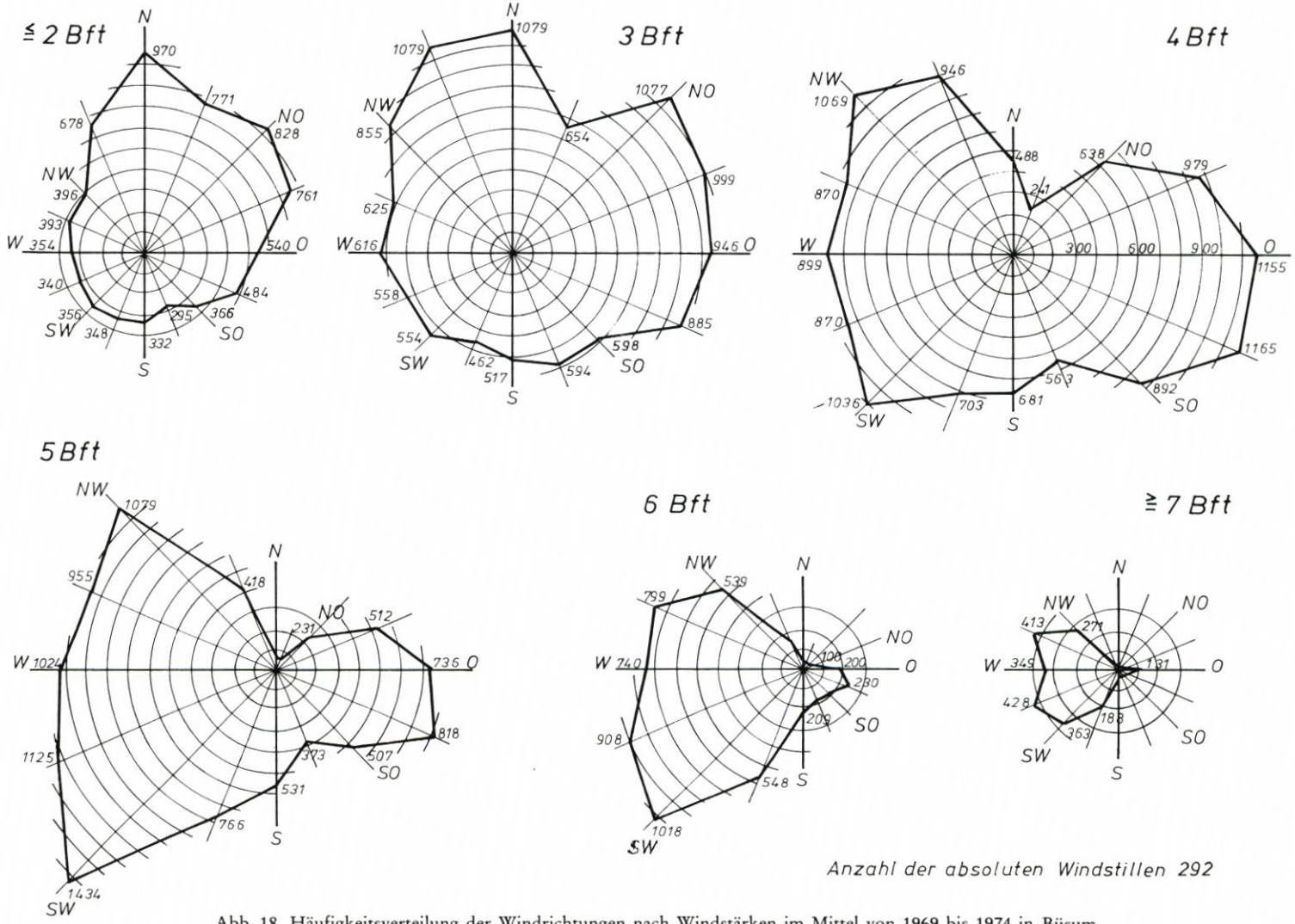


Abb. 18. Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen nach Windstärken im Mittel von 1969 bis 1974 in Büsum

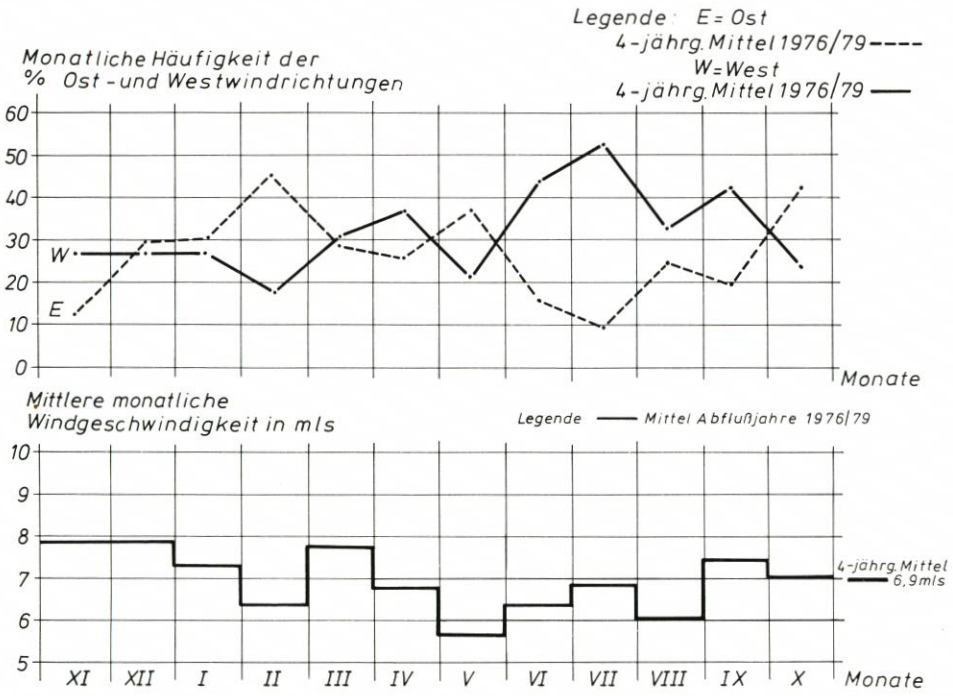


Abb. 19. Monatliche Verteilung der Ost- und Westwindhäufigkeiten und der Windgeschwindigkeiten im Mittel von 1969 bis 1974 in Büsum

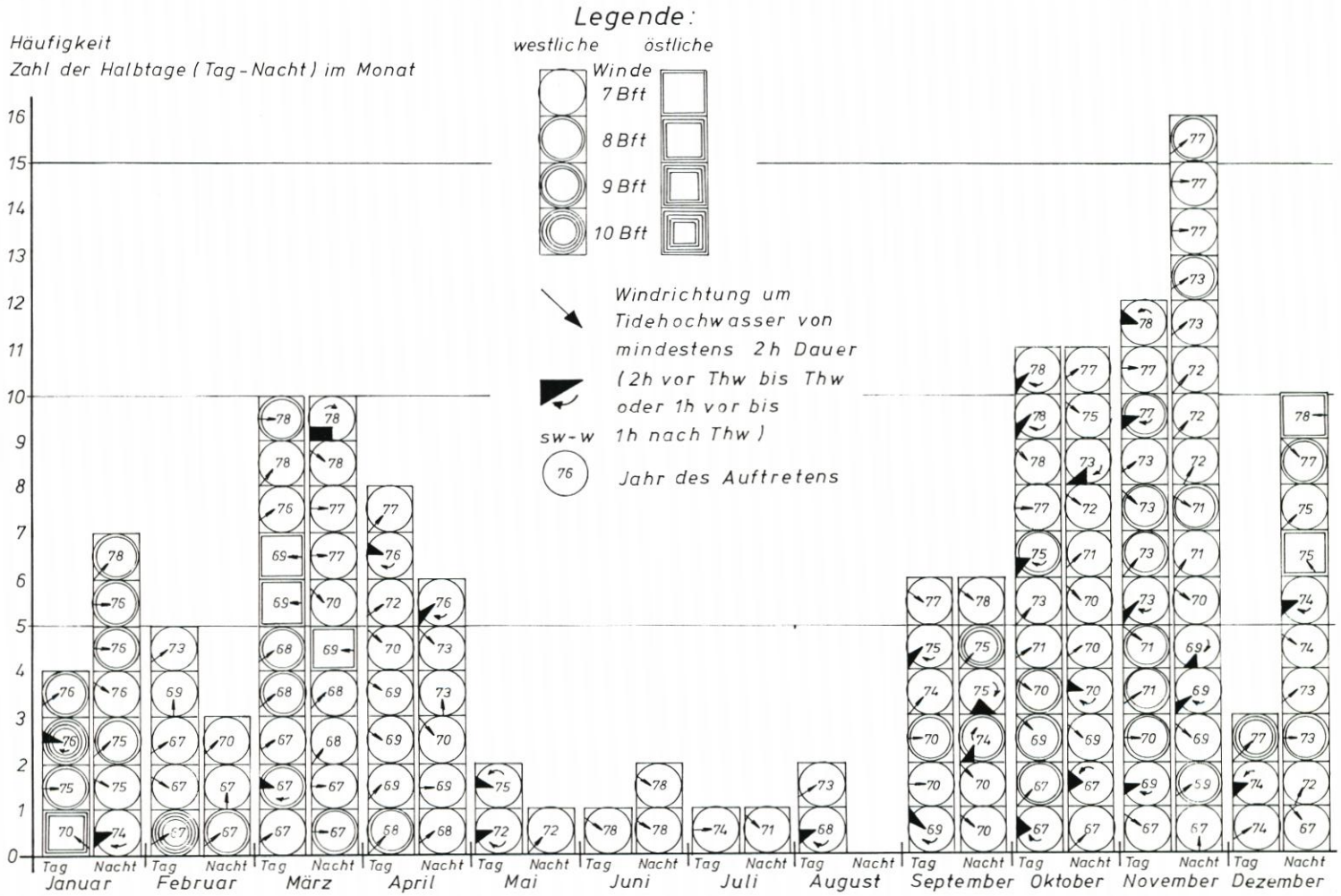


Abb. 20. Monatliche Verteilung der Starkwinde ≧ 15 m/S (Bft 7) um Hochwasser am Tage und nachts von 1967 bis 1978 in Büsum

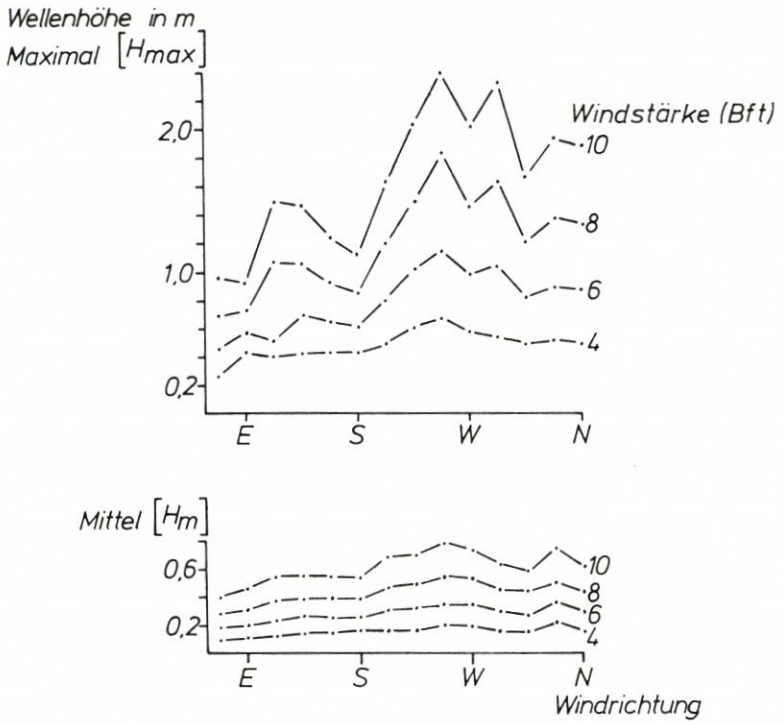


Abb. 21. Maximale und mittlere Wellenhöhen am Südrand des Büsumer Watts in Abhängigkeit von Windrichtung und -stärke (nach GIENAPP 1972)

Tab. 4. Prozentuale monatliche Häufigkeitsverteilung der Windstärken im Mittel von 1969 bis 1974 in Büsum

Monate	Windstillen	Windstärken in Beaufort 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Summe in % der Bft 0-3 und Windstillen
Januar	0,20	0,11	1,57	8,27	21,53	30,85	26,93	7,97	2,42	0,16				31,68
Februar	0,64	0,39	2,42	10,48	21,67	29,19	22,26	10,11	2,44	0,35	0,05			35,60
März	0,63	0,29	1,99	10,75	22,76	27,55	19,85	11,27	4,41	0,49				36,42
April	0,46	0,23	3,89	13,63	22,41	22,27	19,31	12,29	4,89	0,63				40,62
Mai	1,79	0,38	4,08	11,25	25,58	27,20	18,39	9,23	2,04	0,07				43,08
Juni	0,86	0,25	4,26	14,77	29,38	26,09	17,04	6,62	0,74					49,52
Juli	0,67	0,38	2,84	11,16	22,60	24,35	23,66	11,54	2,51	0,29				37,65
August	0,22	0,29	4,88	17,90	28,54	23,90	15,97	7,35	0,90	0,04				51,83
September	0,44	0,28	4,58	15,56	22,89	22,23	20,00	10,05	3,31	0,67				43,75
Oktober	0,49	0,40	4,88	16,26	27,84	21,42	14,45	9,09	4,05	1,10				49,87
November	0,14	0,07	1,67	6,85	14,17	21,64	21,16	18,91	10,88	4,24	0,25	0,02		22,90
Dezember	0,11	0,20	2,06	8,02	16,49	24,55	24,24	17,88	5,58	0,78	0,09			26,88
Jahr 69/74	0,56	0,27	3,26	12,08	23,01	25,09	20,26	11,02	3,68	0,73	0,03	0,0		

Als Basis diente das Zehnminutenmittel des Windschriebs Büsum

Tab. 3. Meerwassersalzgehalte im Gebiet der Dithmarscher Bucht 1977/78

Ort	Entnahme Datum	MEZ	Meerwasserwerte Tempera-tur °C	pH	Chlorid mg/l	Gesamtsalz ‰
Büsum,	4. 5.77	14.25	-	7,9	13.380	24,18
Badebecken-Ost	31. 8.77	15.10	-	7,5	16.095	29,08
(Meßtiefe 0,2m)	25.10.77	12,45	-	7,1	15.140	27,35
Büsum,	4. 5.77	14.15	17,5	8,1	15.680	28,33
Seegarten	31. 8.77	14.50	20,0	7,4	16.580	29,95
(Meßtiefe 0,2m)	25.10.77	12.40	11,5	7,0	14.915	26,95
	24. 1.78	14.10	-1,0	7,8	10.465	18,92
	7. 4.78	13.35	6,5	7,4	14.140	25,55
	2. 8.78	13.30	20,0	8,0	13.000	23,49
	12.10.78	9.15	12,0	8,0	13.020	23,53
Büsum,	31. 8.77	14.25	-	7,9	16.280	29,41
Ostwatt	25.10.77	12.05	-	7,1	14.930	26,98
(Meßtiefe 0,2m)	24. 1.78	13.50	-	7,7	12.060	21,80
	7. 4.78	13.15	-	7,5	13.130	23,73
	2. 8.78	13.10	-	8,6	13.850	25,03
	12.10.78	8.50	-	7,4	12.750	23,04
Warwerort,	4. 5.77	13.30	15,5	7,9	16.810	30,37
östl.Büsum	31. 8.77	14.05	20,0	7,2	16.485	29,78
(Meßtiefe 0,2m)	25.10.77	11.45	12,0	6,9	15.190	27,45
	24. 1.78	13.25	-0,5	7,7	10.965	19,82
	7. 4.78	12.50	6,5	7,2	12.630	22,83
	2. 8.78	12.35	20,0	8,4	11.330	20,48
	12.10.78	8.40	12,5	7,6	12.830	23,19
Hallig	4. 5.77	13.00	15,0	7,9	13.620	24,61
Helmsand	31. 8.77	13.25	21,5	7,3	16.560	29,92
Dithm.Bucht	25.10.77	11.00	12,0	7,1	12.940	23,39
(Meßtiefe 0,2m)	24. 1.78	12,45	0,0	7,7	12.840	23,24
	7. 4.78	12.00	6,5	7,3	12.795	23,12
	2. 8.78	11.55	20,0	8,4	10.240	18,51
	12.10.78	8.00	12,0	7,5	11.950	21,61
Wattstrom	5. 5.77	8.50	11,5	8,2	12.410	22,43
"Piep"	24. 8.77	16.00	17,2	8,0	16.150	29,18
querab	3.11.77	12.30	10,2	8,0	13.860	25,05
Seegarten	23. 1.78	12.00	0,6	8,0	14.780	26,71
(Meßtiefe 1,0m)	13. 4.78	9.40	5,8	8,1	14.000	25,30
	9. 8.78	16.25	18,9	8,4	16.140	29,16
	11.10.78	17.10	12,9	8,0	12.050	21,78
Priel	5. 5.77	13.30	11,5	8,2	13.190	23,84
"Wöhrdener Loch"	24. 8.77	14.15	16,7	7,9	15.090	27,28
südöstl.Büsum	3.11.77	15.20	10,1	8,0	14.030	25,35
(Meßtiefe 1,0m)	23. 1.78	11.35	0,5	8,0	12.760	23,06
	13. 4.78	17.10	6,2	8,1	14.090	25,46
	9. 8.78	16.00	19,0	8,3	14.040	25,37
	11.10.78	19.30	12,8	8,0	13.770	24,88
Mittelwert:	-	-	-	7,7	13.924	25,16

Die Küste, 40 (1984), 1-318

3. Schriftenverzeichnis

ANDREWS, R.: Wärmehaushaltsuntersuchungen im Wattgebiet der Nordseeküste. DGM, H. 5, 1976.

ANDREWS, R.: Wärmeaustausch zwischen Wasser und Wattboden. DGM, H. 2, 1980.

DIETRICH, G. u. KALLE, K.: Allgemeine Meereskunde. Verlag Gebrüder Bornträger, Berlin, 1965.

DÖRJES, J.: Das Watt als Lebensraum. Das Watt, Ablagerungs- und Lebensraum. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a. M., 1970.

FIGGE, K., KÖSTER, R., THIEL, Hj. u. WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht – Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. Die Küste, H. 35, 1980.

GIENAPP, H.: Wellenmessungen im Seegebiet der Piep (Deutsche Bucht). Helgoländer wiss. Meeresuntersuchungen, H. 23, 1972.

GUNNEBERG, E.: Wärmehaushalt der Küstengewässer. Unveröffentlichtes Manuskript, Vortragstage der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, vom 13. bis 14. Mai 1975.

RIJKSDIENST voorde JJSSELMEERPOLDERS (Hrsg.): De Ontzilting van de Gronden in de Lauwerszee bis Oktober 1970 und Mai 1971. Jahresberichte, unveröffentl., Baflo, 1971.

SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964/77 aus dem Sahlenburger Watt. Studie Nr. 41, Strom- u. Hafenbau Hamburg, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, 1979.

SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogrammes. Die Küste, H. 35, 1980.

SIEFERT, W., MIESSNER, F., RICHTER, H. H. u. WIELAND, P.: Triftströmungen vor der Küste zwischen Eider und Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.

WIELAND, P.: Grundlagen zur Gestaltung und Begrünung des eingedeichten Katinger Watts im Hinblick auf seine Nutzung für Erholungszwecke. Arbeitsbericht 29/1973, Marschenbauamt Heide/Pegelaußenstelle Büsum, unveröffentl., 1973.

WIELAND, P.: Untersuchung über Grundlagen zur Quantifizierung des natürlichen Erholungspotentials der deutschen Wattenmeerküste. Diss., Verlag R.b. Fischer, Frankfurt, 1982.

WIELAND, P. u. FLADUNG, B.: Windstatistik Büsum 1969–1974. Wasser und Boden, H. 11, 1982.

WIELAND, P.: Gewässerkunde und Küstenforschung in Büsum – Einblick und historischer Rückblick. Dithmarschen-Zeitschrift für Landeskunde und Landschaftspflege, H. 1, 1983.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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 Testprofiles in der Buchtmitte keine stetigen Veränderungstendenzen. 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 sedementological (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 sedementological 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 exentsively 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 Probendaten 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

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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 Künsteningenieurwesen, 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

Die Küste, 40 (1984), 1-318

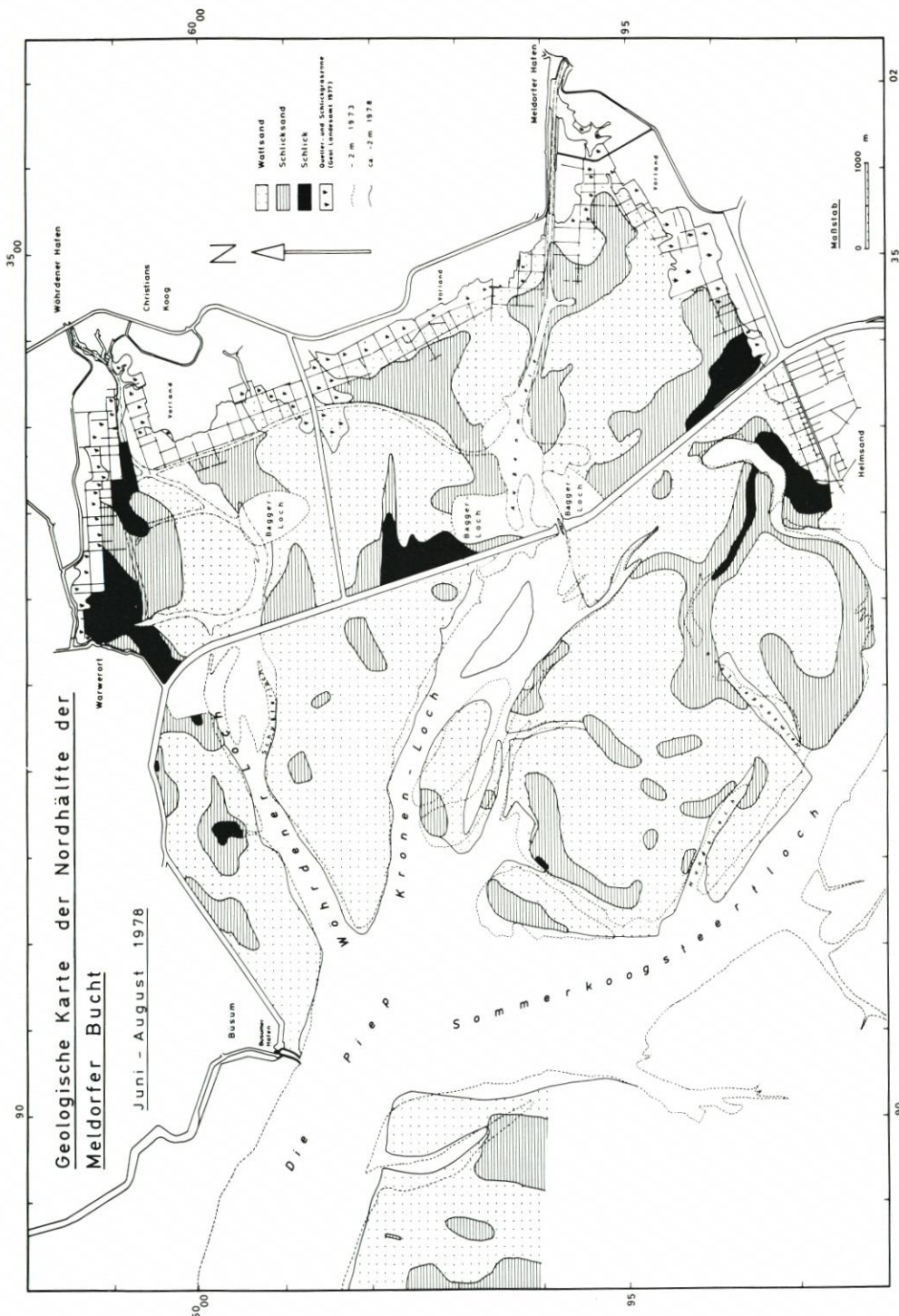


Abb. 1. Geologische Karte der Nordhälfte der Meldorfer Bucht

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 Bielshövensandes.

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 rauh, beim Begehen ohne nennenswerte Fußeindrücke

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 gröberem Material zusedimentiert wurde. Auf der Karte der Verteilung von Erosion und Sedimentation

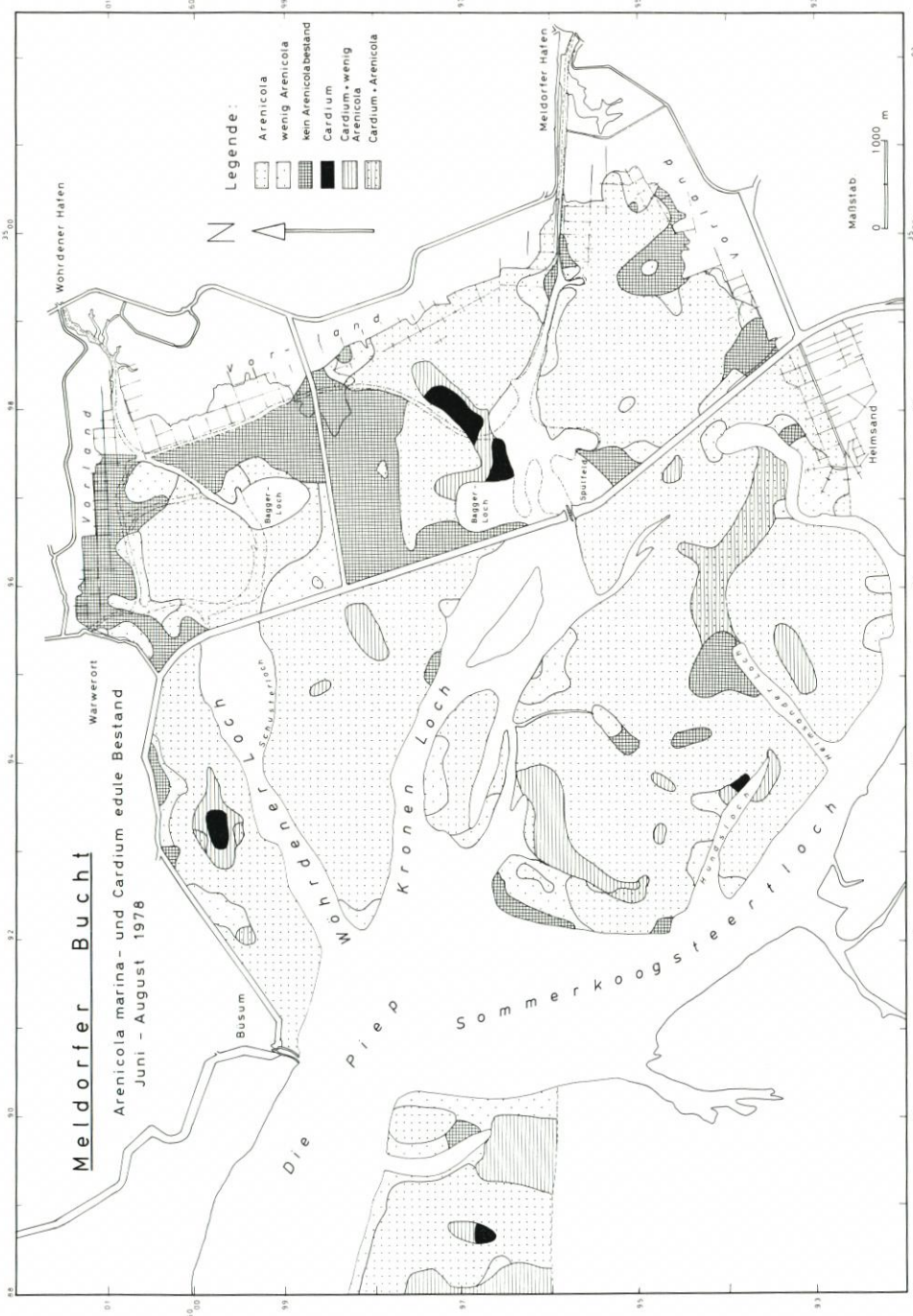


Abb. 2. Meldorfer Bucht. Arenicola-marina- und Cardium-edule-Bestand Juni–August 1978

(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 übergingen.

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 Buhnen 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 (Sandpierwurm): 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 gröberen Partikel zurückbleiben und sich auf dem „Freßniveau" in ca. 20 cm Tiefe anreichern (VAN STRAATEN, 1956; SCHÄFER, 1962).

Nach VAN STRAATEN (1956) erreichen gröbere 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 gröbere 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 Sandpierwurm 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; WOHLENBERG, 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 Sandpierwurm 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, solang 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 Sandpierwurm aufgrund zu starker Erosion nicht siedelt, liegt am Nordwestende der mittleren Plate. Allgemein zeigen die der Wellenwirkung und Strömungserosion 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 Sipho, 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

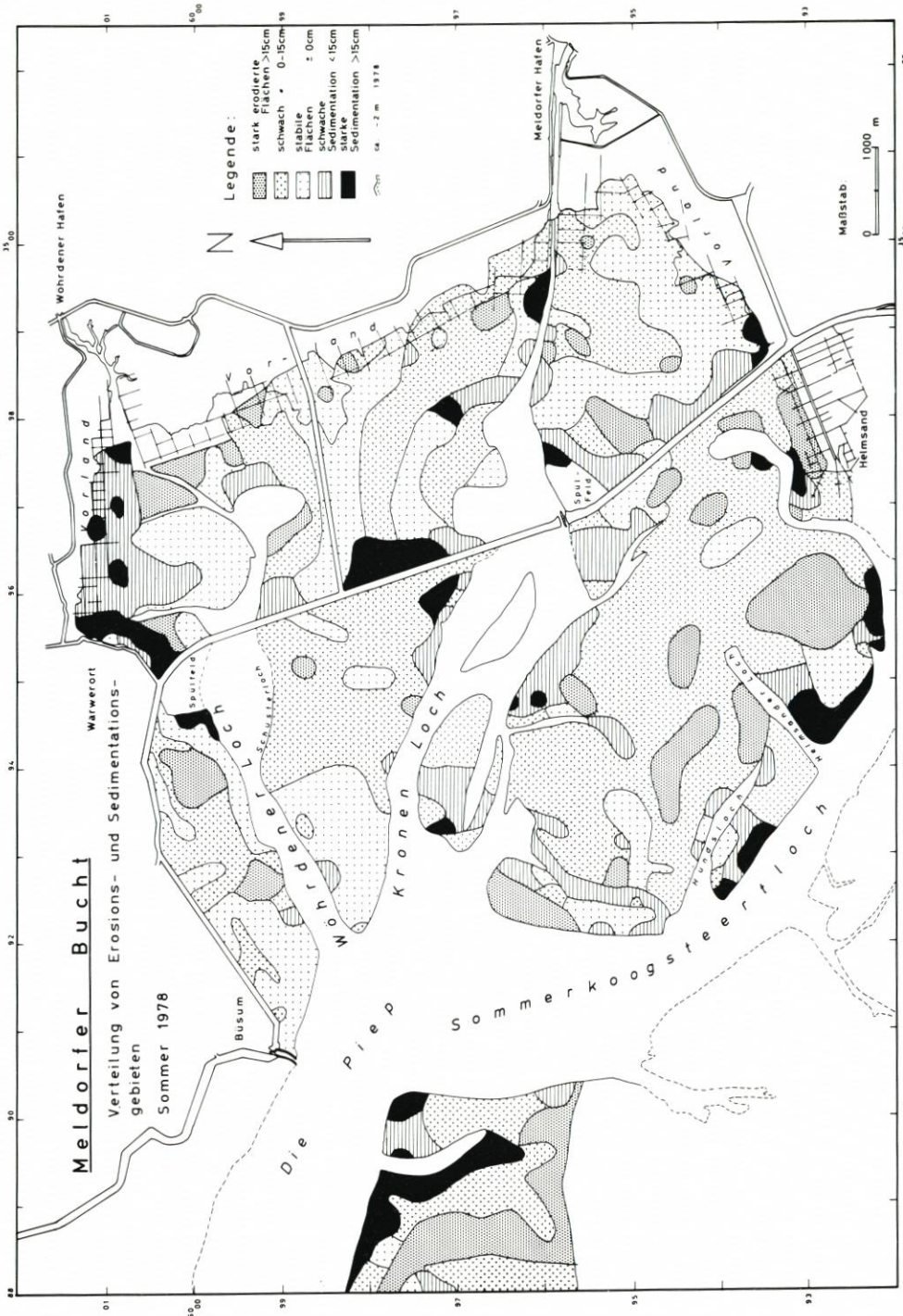


Abb. 3. Verteilung von Erosions- und Sedimentationsgebieten im Sommer 1978

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 schlickreiche 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. Hierzu 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 Wattsedimente 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 Wattsedimenten der Meldorfer Bucht nicht vorkommen. Für Sand-, Schluff- und Tonanteil hat sich folgender Bearbeitungsgang 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-µm-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°-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 $< 0{,}50$ µm 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 °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 STOKE'schen Gesetz zu Grunde.

Der Anteil < 50 µm 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 PHI°, 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 µm. Die Entnahme aus 20 cm Tiefe stellt sicher, daß auch die gröbste Kornfraktion des Schluff- und Tonanteiles < 50 µm 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 Aqu 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 gesamtes 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-µm-Fraktion ist nur ca. doppelt so groß wie die der 44-µm-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 Analysenergebnisse 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 µm 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 µm 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 µm 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 µm wurde schon wegen der extrem langen Analysenzeiten dieser Fraktion stets eingehalten, und die Obergrenze bei 50 µm wurde durch die Vorbehandlung eingegeben.

Auch die Genauigkeit der Berechnung nach der STOKE'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

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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-Fraktionen. Die erste Abbildung stellt das Korngemisch aller Korngrößen < 44 µm (4,5 PHI°) und die zweite sämtliche Partikel < 1,95 µm (9 PHI°) dar.

Die Fraktionen 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

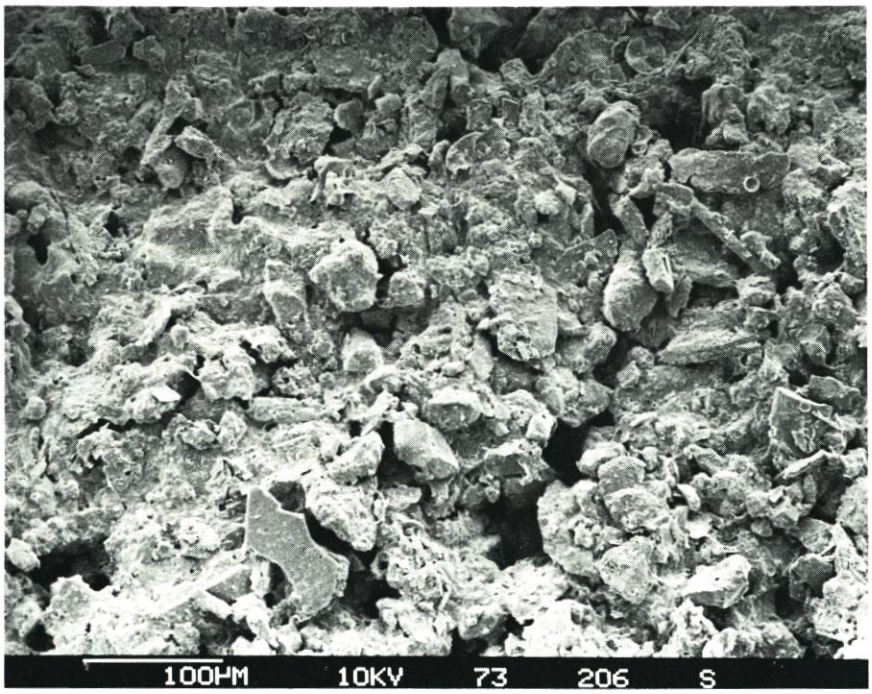


Abb. 4. Rasterelektronische Aufnahme der Pipette-Fraktion < 44 µm (4,5 PHI°), 200fache Vergrößerung, Kippung der Objektebene um 15°

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

Im Tonanteil (< 2 µm) „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 Fraktion 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°-Fraktion, so erreichen sie in der Tonfraktion oft mehr als die vierfache Größe der theoretischen Fraktionswerte.

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

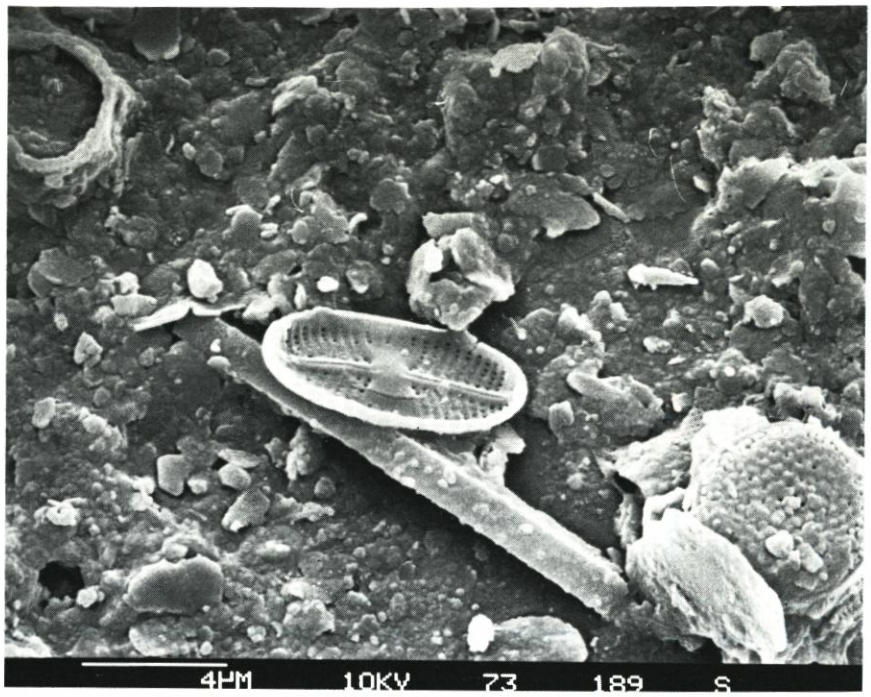


Abb. 5. Rasterelektronische Aufnahme der Pipette-Fraktion < 1,95 µm (9,0 PHI°), 5000fache Vergrößerung, Kippung der Objektebene um 15°

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.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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:

$$PHI^0 = -\log \frac{x\,(mm)}{1\,(mm)} = 1\,\frac{1}{\lg 2}\,\lg \frac{x\,(mm)}{1\,(mm)};\ x_0 = 1\ mm$$

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

Für die praktische Arbeit mit den PHI-Graden ist die Aufstellung eines PHI°-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.

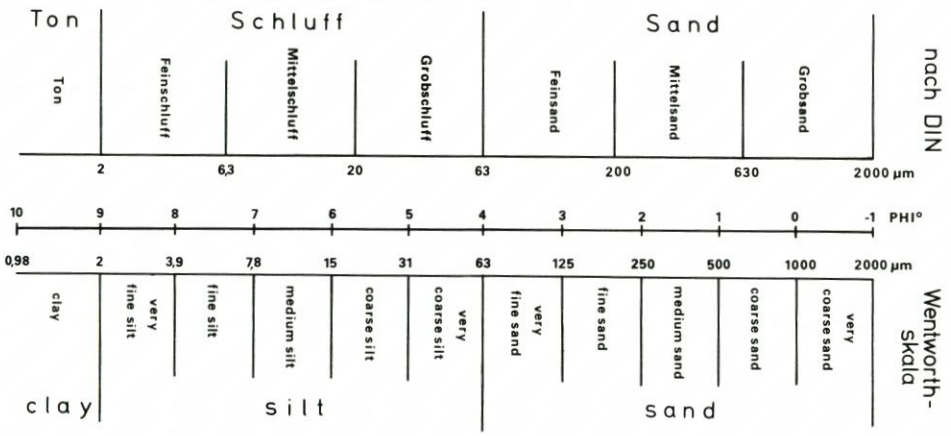


Abb. 6. Vergleichende Darstellung der Korngrößenmaße

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-

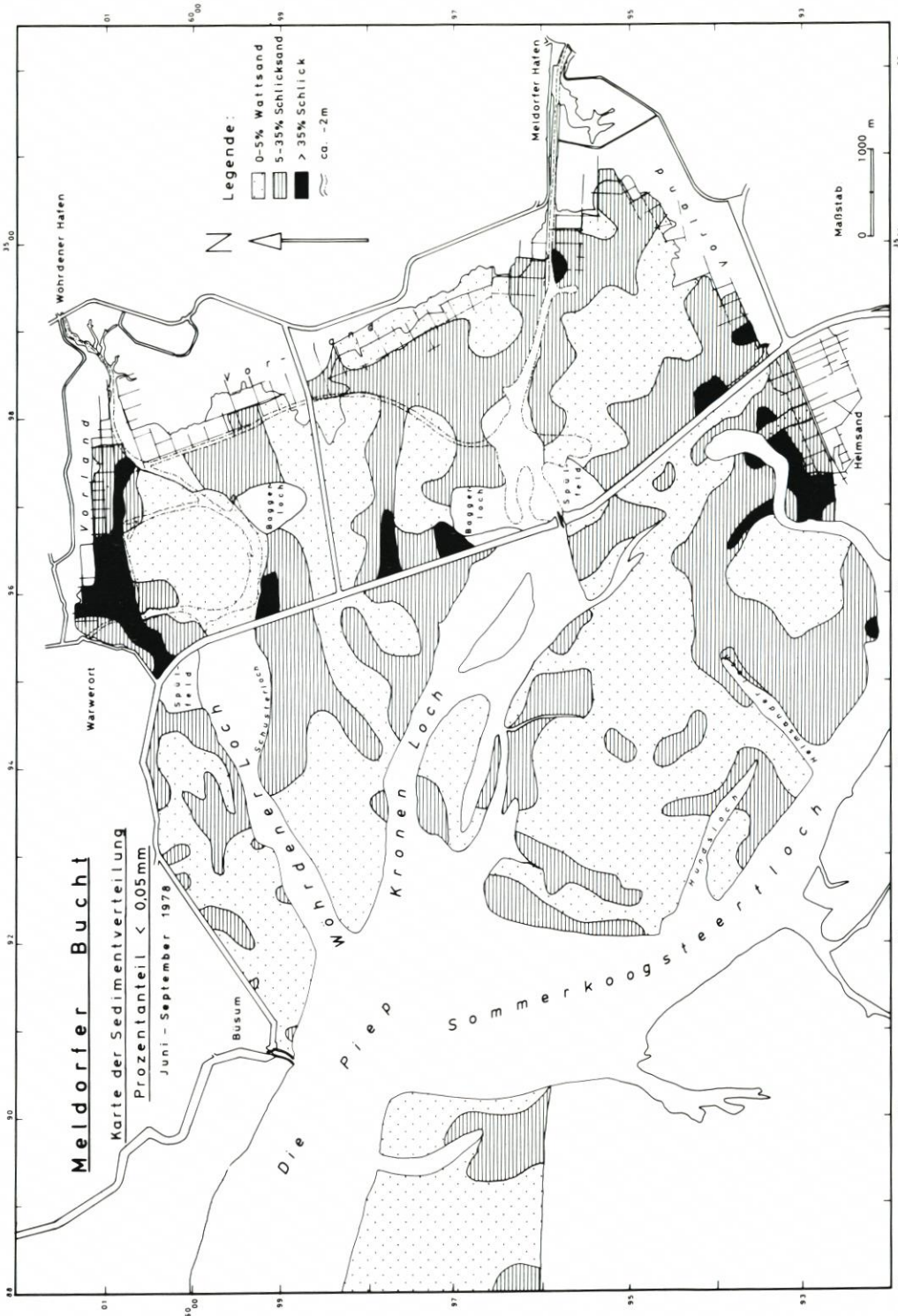


Abb. 7. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil < 0,05 mm

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 µm 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-µm-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 µm (Abb. 8): Das Kartenbild der Prozentanteile < 63 µm 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 µm, die den Ton- und Schluffanteil im Sinne der DIN vom Sand abtrennt, ermöglicht unter bestimmten Bedingungen eine näherungsweise Beschreibung der gesamten Kornverteilung:

0–10 % Wattsand bzw. 0– 5 % heller Wattsand, 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 µm 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 µm 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 µm zwischen 10 und 25 % weit größere Flächen einnimmt, als das Material < 63 µm 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 µm 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-µm-Karte. Stark toniger Schlick (> 85 % < 63 µm) wird nur im Norden des Speicherkooges 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-µm-%-Anteils werden die folgenden Parameter meist mit dieser Auftragungsform verglichen.

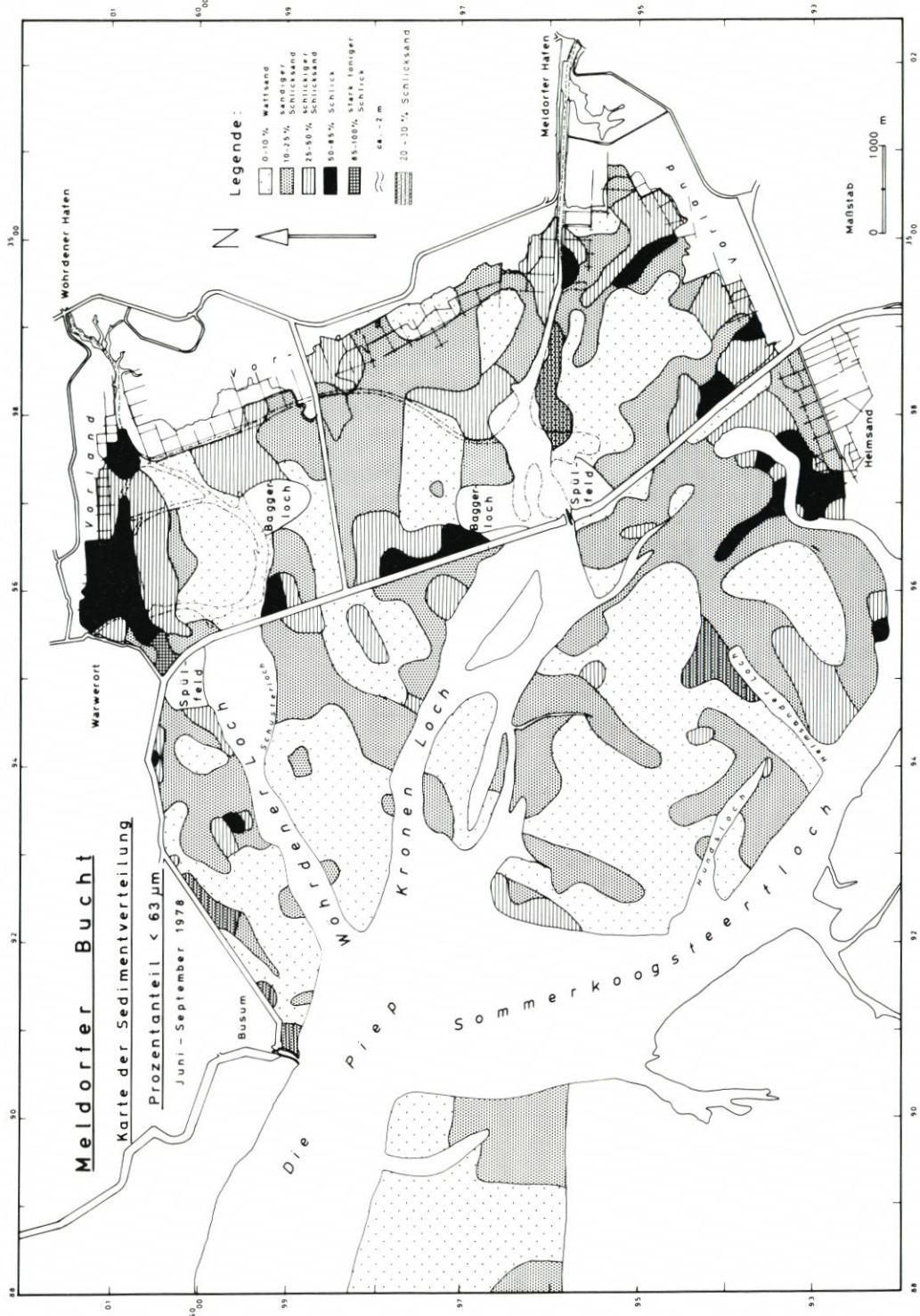


Abb. 8. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil < 0,063 mm

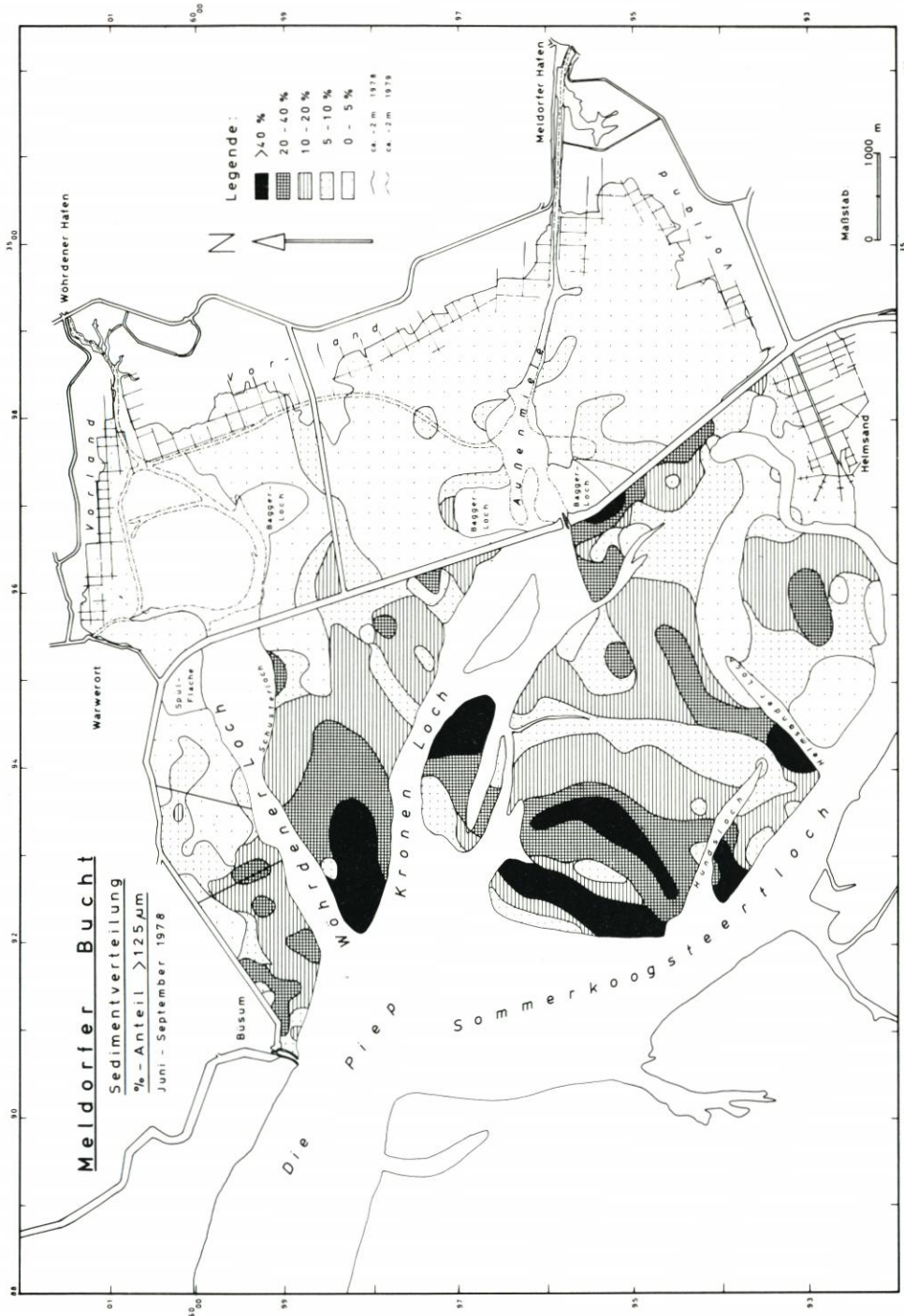


Abb. 9. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Prozentanteil < 0,125 mm

Prozentanteil von Korngrößen > 125 µm (3 PHI°) (Abb. 9): Bei Wattsedimenten ist der Prozentanteil an Korngrößen > 125 µm in landnahen Gebieten meist sehr gering (< 10 %). Erst auf landferneren Platen steigt der Anteil an Korngrößen > 125 µm bis auf Werte von 40 % und mehr an. Die Abbildung der Prozentanteile > 125 µm 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 gröberem Material (> 125 µm) 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 µm eine Zonierung der Wattsedimente ab. Auf der nördlichen Plate entsteht diese durch die nach Osten hin stetig abnehmenden Anteile an Material > 125 µm. Auf den nach Süden angrenzenden Wattgebieten wechseln dagegen Zonen gröberen Materials mit Zonen höherer Feinanteile. Insgesamt nimmt auch dort der Anteil gröberer Fraktionen in Richtung Deich ab.

Verteilung der Medianwerte (Quartilsystem) (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 µm werden bei der Medianwertauftragung nicht so deutlich untergliedert wie bei der Prozentanteilkarte > 125 µm. Trotzdem werden auch bei dieser Darstellung die besonders belasteten Randgebiete der großen Platen herausgehoben.

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

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 µm 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 µm 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 anzeigen.

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

Die Küste, 40 (1984), 1-318

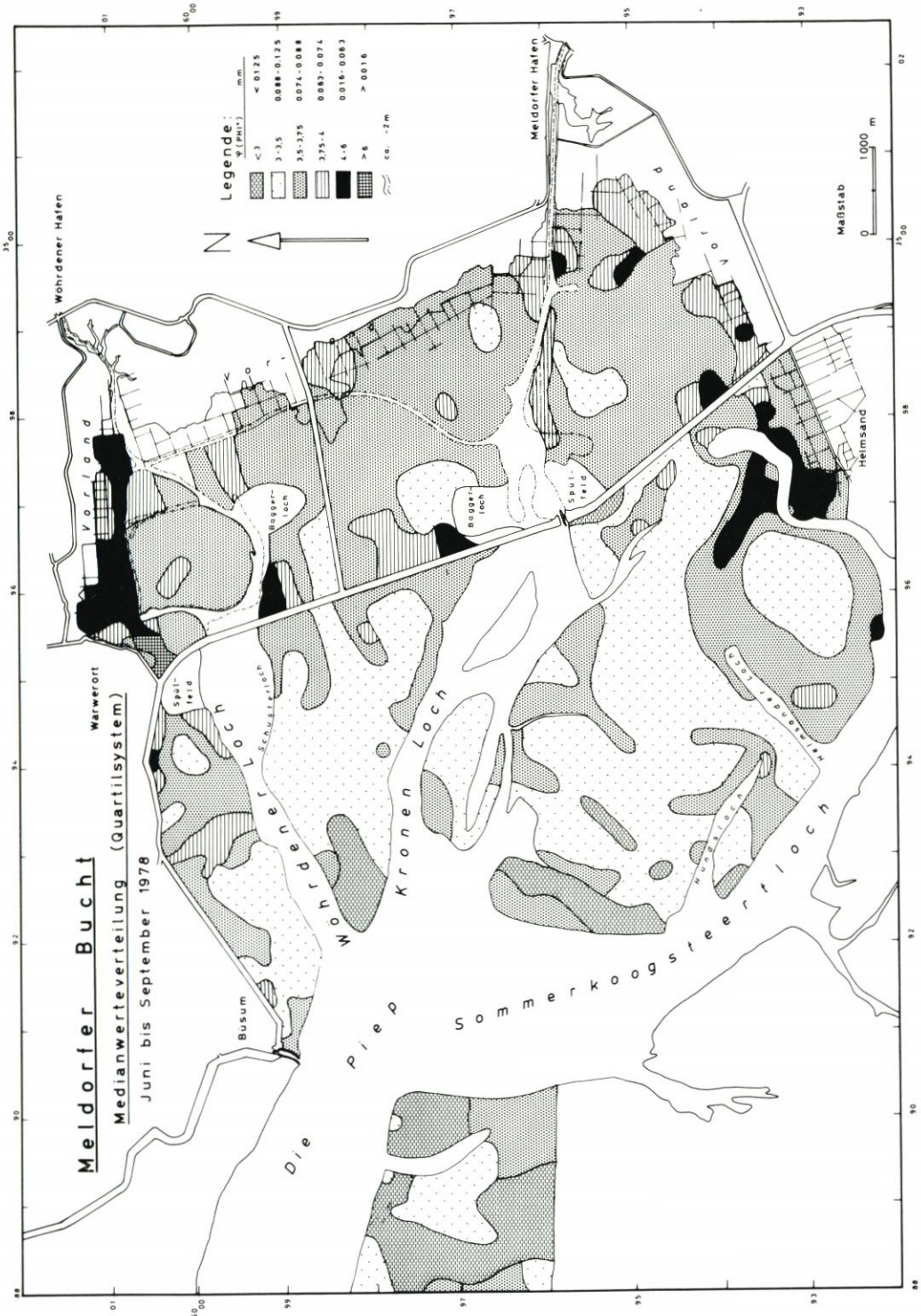


Abb. 10. Meldorfer Bucht. Karte der Sedimentverteilung. Medianwerte

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 Probendaten 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 Neuzuordnungen 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 Summenprozente 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 PHI°) und den anderen Schlickwerten korreliert.

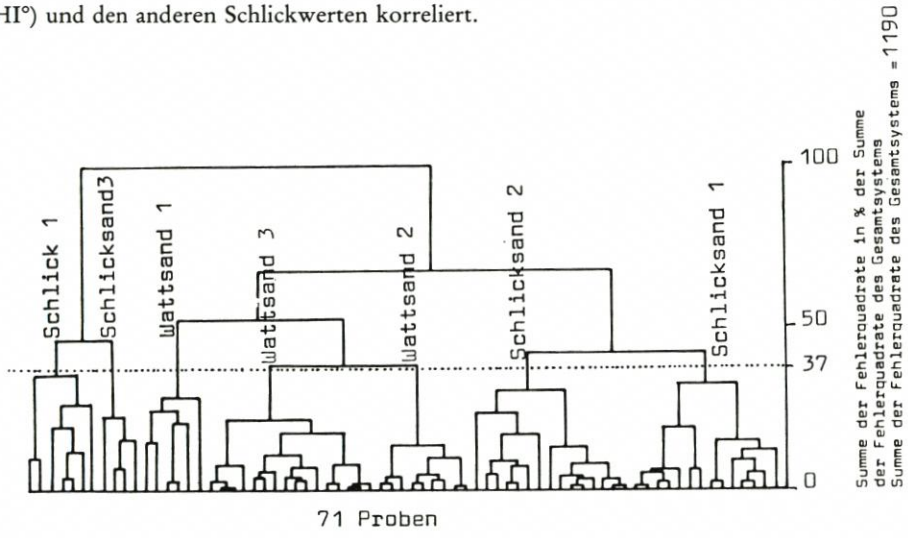


Abb. 11. Dendrogramme (Programm YHAK von Forst & Vogel, 1978) von 71 Stichproben aus der Meldorfer Bucht westlich des neuen Deiches
1. Klassifikation mit 17 Merkmalen (Mn, Cr, Zn, Watthöhe, Arenicola, Cardium, Mom-MIW, -SDV, -SCH, -KURT, 9, 6, 5, 4.25, 4 und 3 PHI°)

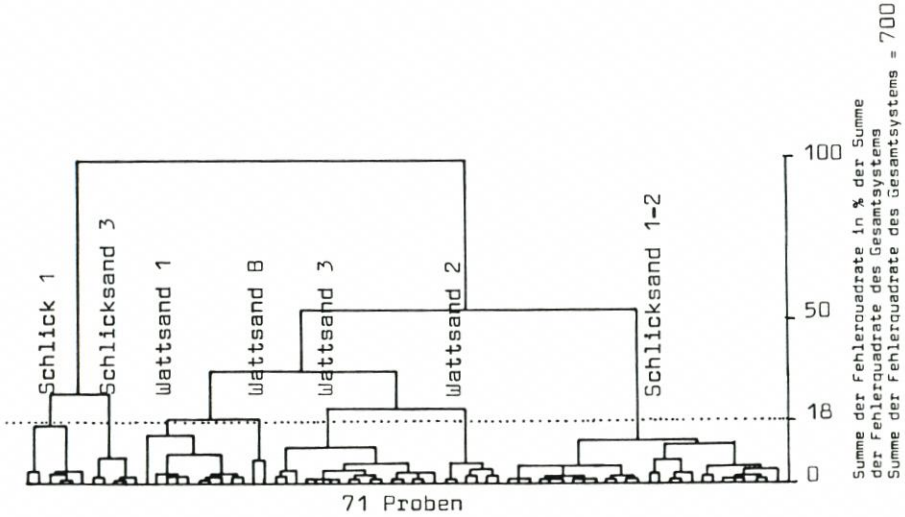


Abb. 11. 2. Klassifikation mit 10 Merkmalen (Mom-MIW, -SDV, -SCH, 9, 6, 5, 4.25, 4 und 3 PHI°)

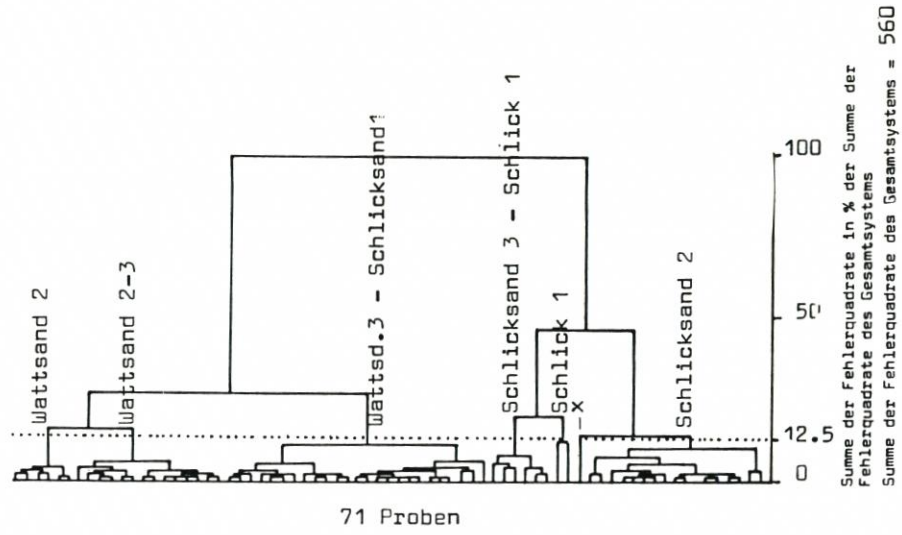


Abb. 11. 3. Klassifikation mit 8 Merkmalen, die mit Hilfe einer Faktorenanalyse ausgewählt worden sind (Zn, Mom-SDV, -KURT, 9, 6, 5, 4.25 und 4 PHI°)

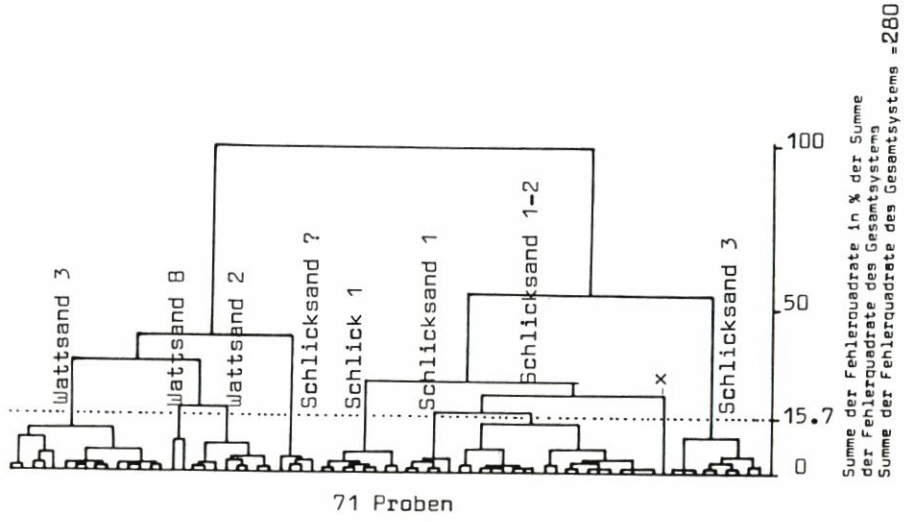


Abb. 11. 4. Klassifikation mit 4 Merkmalen (Mom-MIW, -SDV, -SCH, -KURT)

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.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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 µm (> 3 PHI°) 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°		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
Wattsand 2 n = 20
Wattsand 3 n = 21
Wattsand B n = 18

Schlicksand 1 n = 20
Schlicksand 2 n = 24
Schlicksand 3 n = 20

Schlick 1 n = 6
Schlick 2 n = 8
Schlick 3 n = 3

Anmerkung: Bei einem Teil der Proben des Sedimenttyps Wattsand 2 und allen Bielshövensand-Proben der Tabelle wurde der Schlickanteil des Sediments (< 50 µm) 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 µm aus. Eine Mittelstellung in den Prozentgehalten < 125 µm 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 µm. Der Prozentsatz < 125 µm 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 Sandwattplaten der Bucht zu finden sind.

Eine bessere Untergliederung der Wattsedimente ergeben die Werte der Prozentsätze < 63 µm (> 4 PHI°). 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 µm (4,25 PHI°), 31 µm (5 PHI°), 15 µm (6 PHI°) und 2 µm (9 PHI°) die Zuordnungsmöglichkeit zu den Wattsedimenttypen geringer. Nur die schlickigen Sedimente (Schlicksande und Schlicke) lassen sich auch mit den Prozentwerten bei 2 µm (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

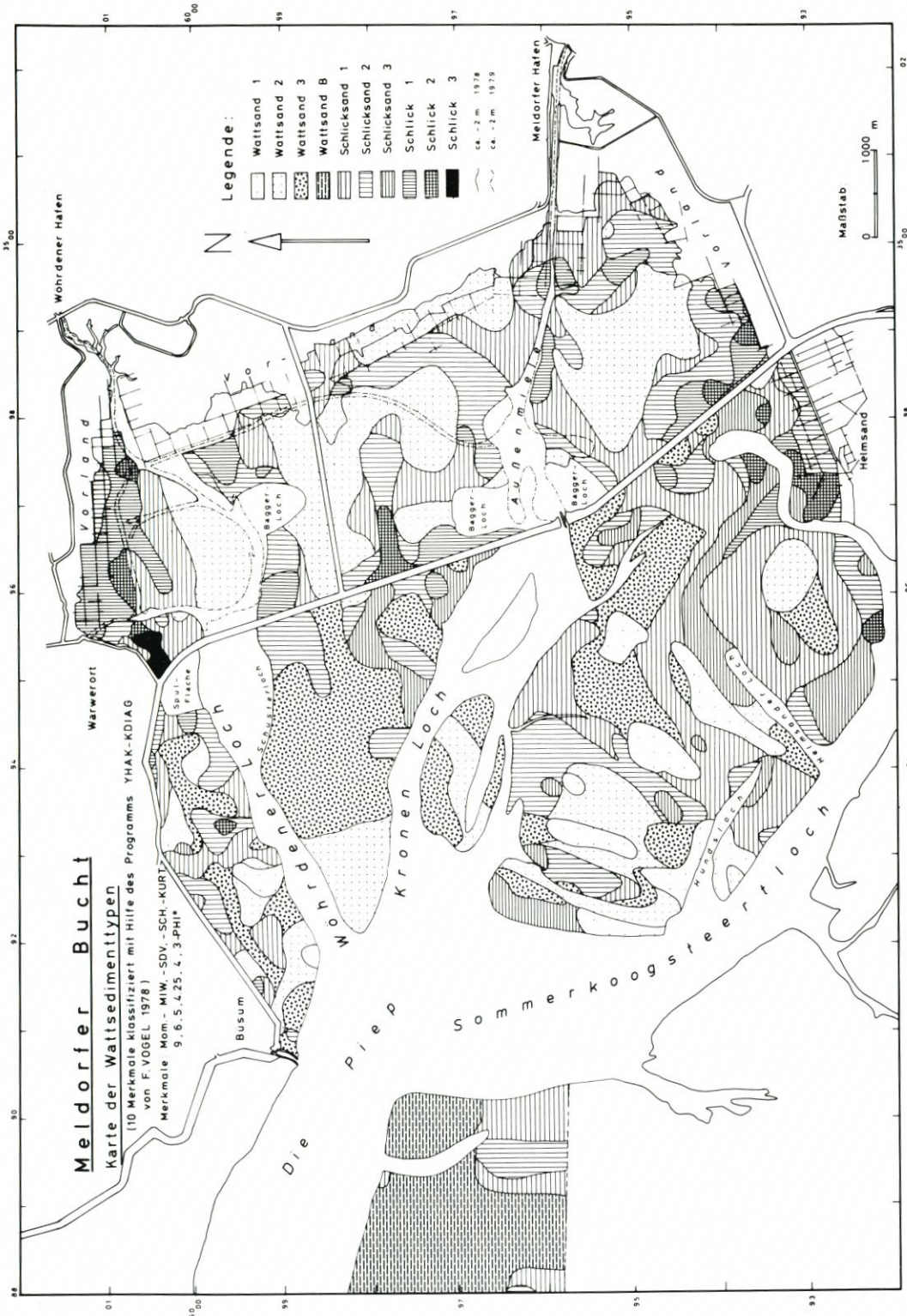


Abb. 12. Meldorfer Bucht. Karte der Wattsedimenttypen

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 k e i n e r l e i 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 < 63 µm 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 Außenmiele 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.

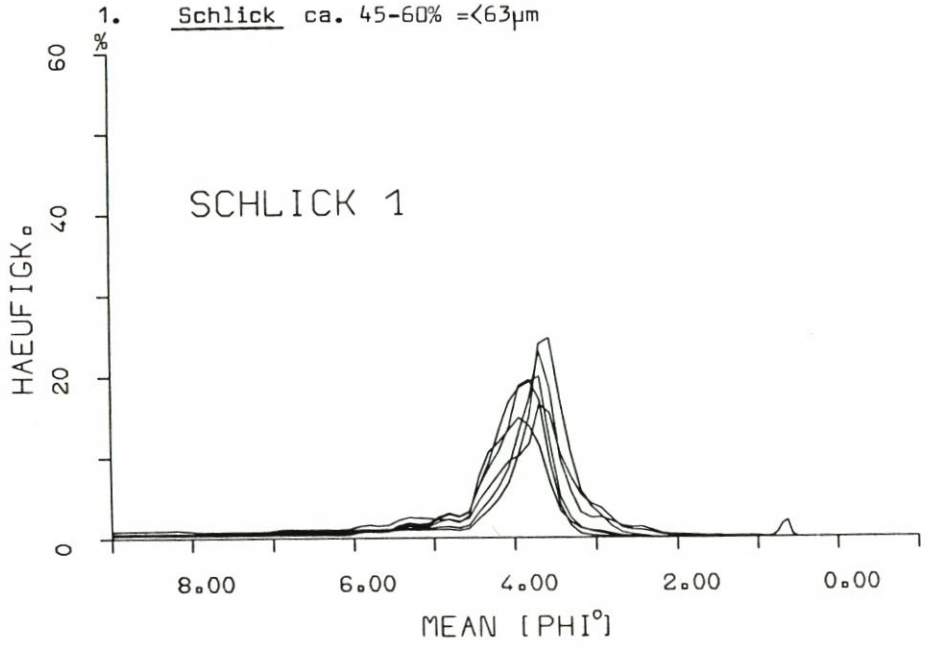
Als Ergänzung zu den Wattsedimentgruppen des Ostgebietes traten hier noch zusätzlich die Klassen „Wattsand 1", „Wattsand 2" und „Schlicksand 3" auf. Wie die Diskriminanzanalysen zeigten, sind auch hier die Klassifikationsergebnisse zufriedenstellend genau.

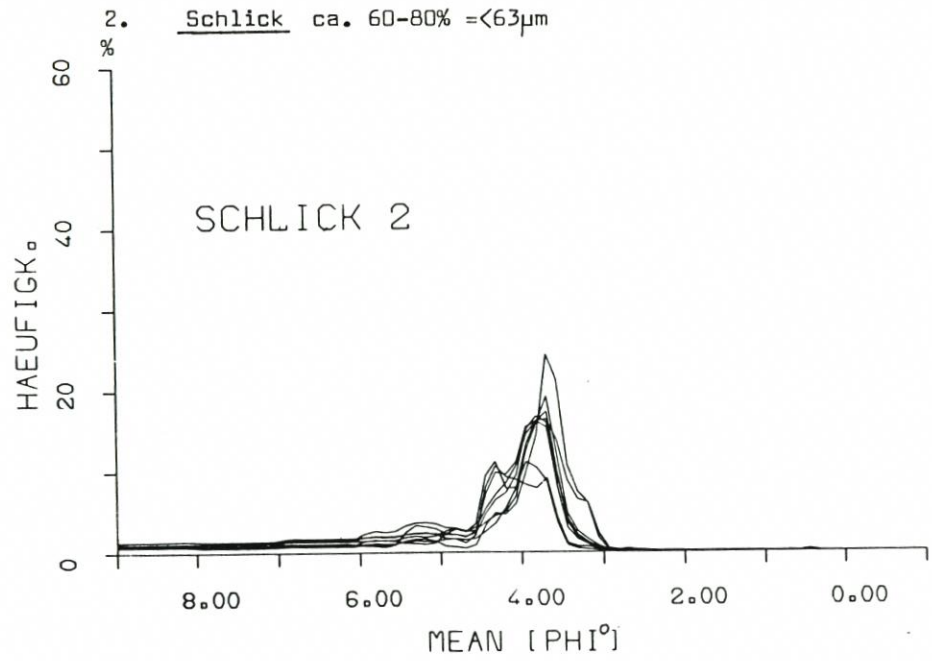
„Wattsand 1" findet sich überwiegend an Stellen, die einer starken Umlagerungsaktivität unterliegen. Meist ist die Sedimentbilanz auf „Wattsand 1"-Flächen negativ. Im Vergleich zur Flächenausdehnung der anderen Wattsandtypen besitzt der „Wattsand 1" eine relativ kleinräumige Verbreitung.

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

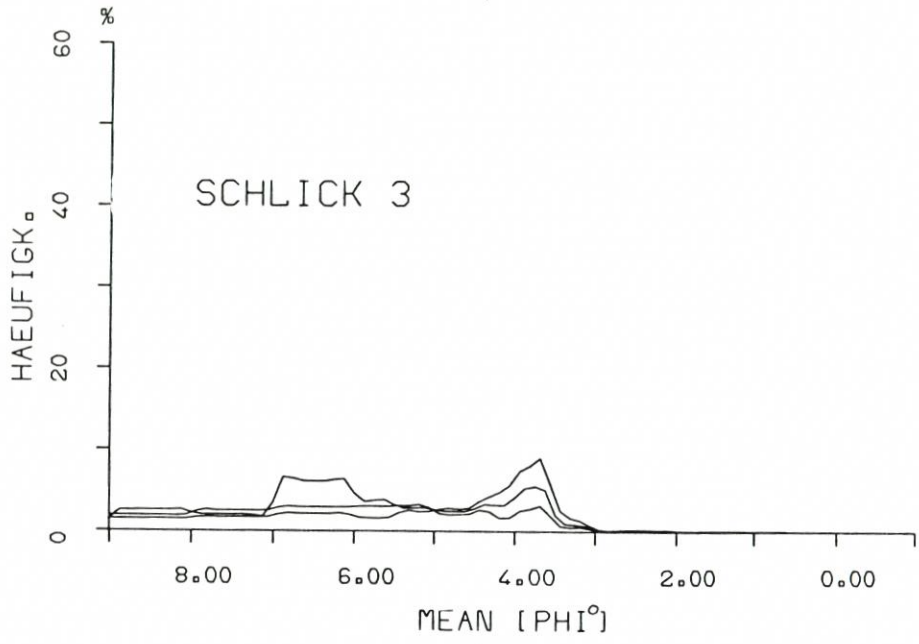
Abb. 13. Häufigkeitsverteilungen von Wattsedimenttypen der Meldorfer Bucht und des Bielshövensandes

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

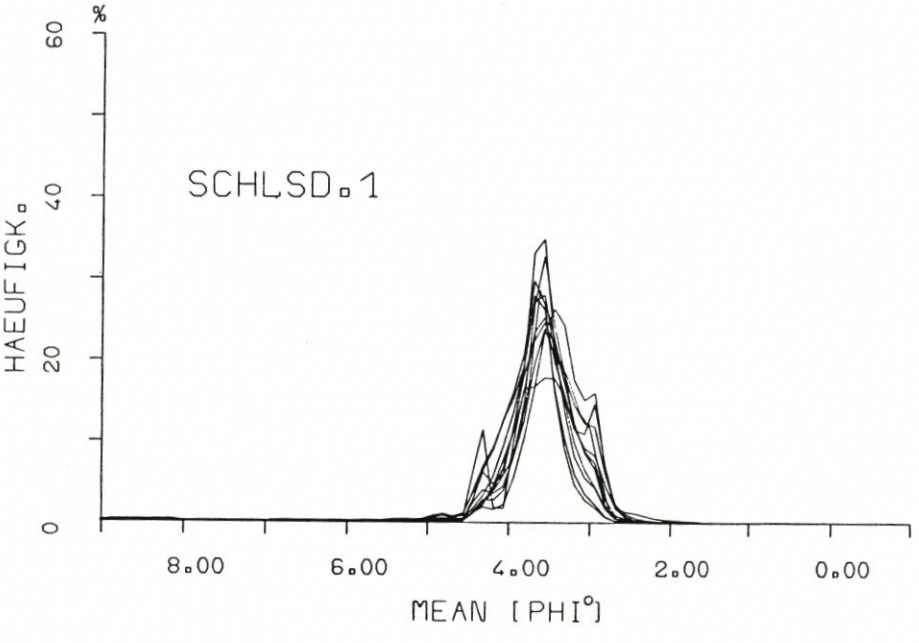




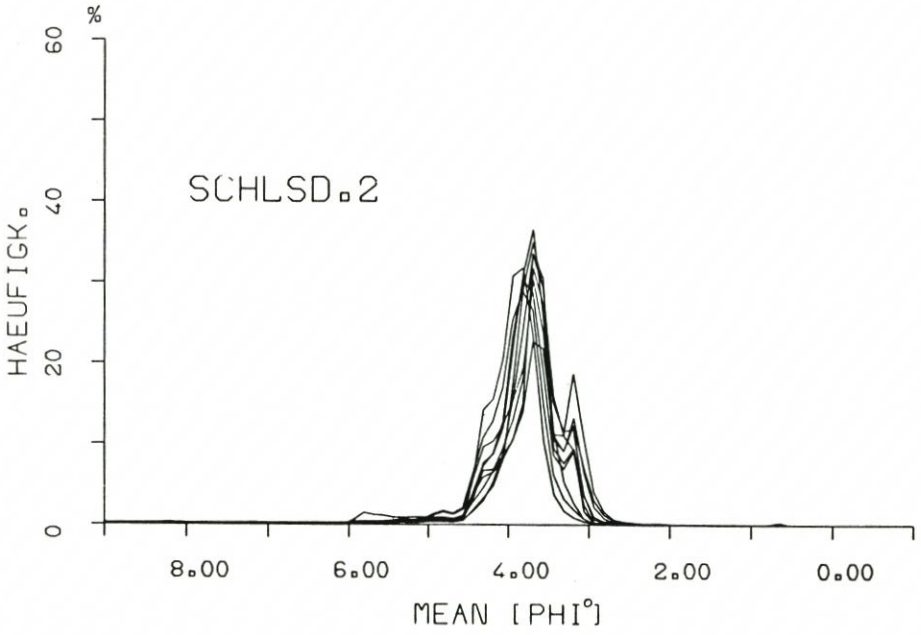
3. Schlick ca. >80% =<63µm



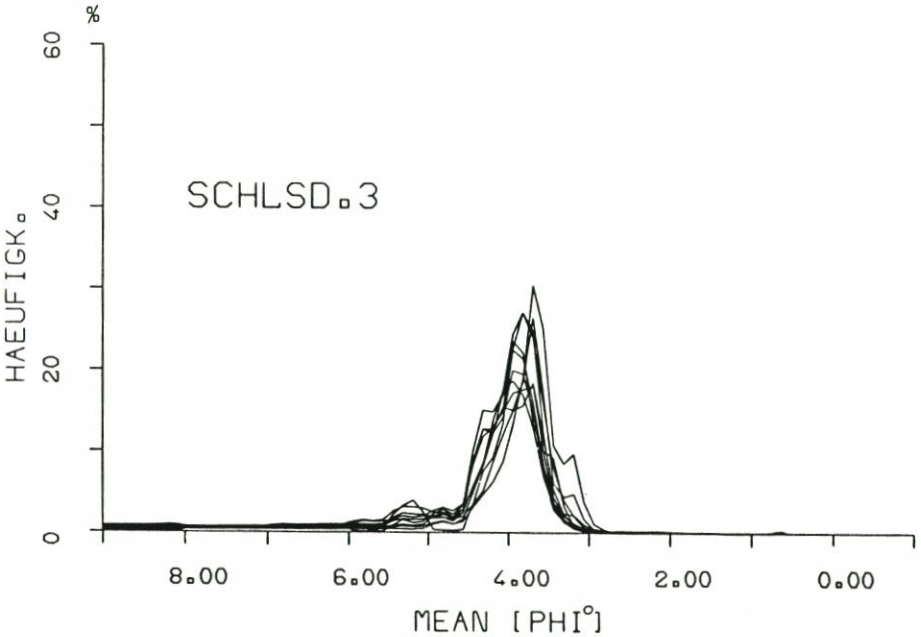
4. Schlicksand ca. 10-20% =<63µm



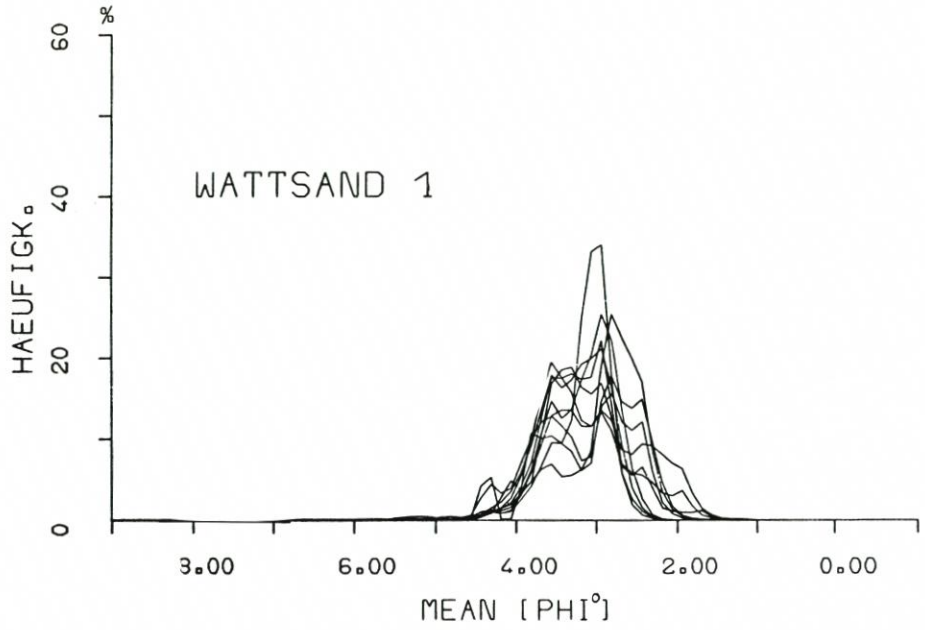
5. Schlicksand ca. 20-30% =<63µm



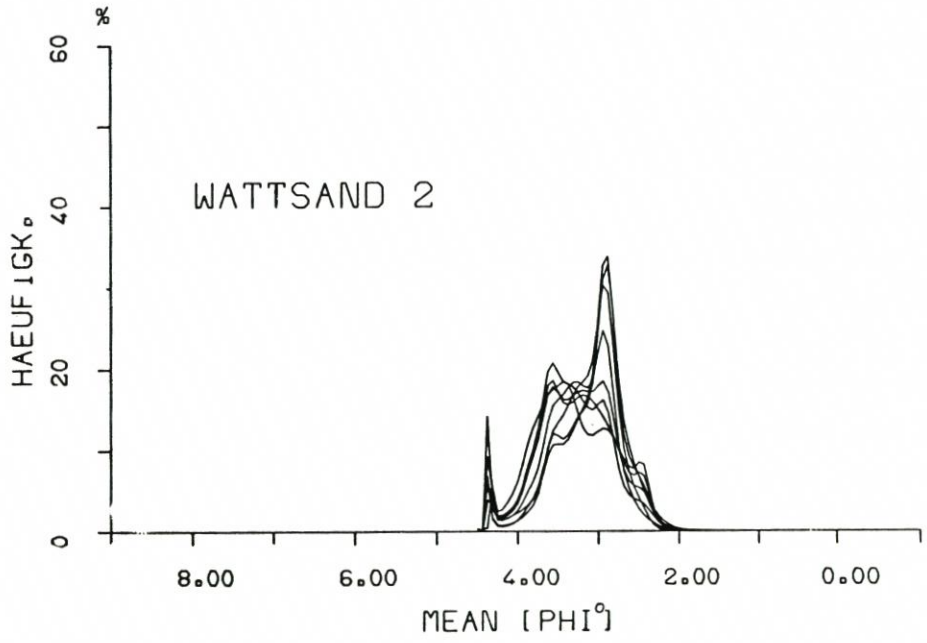
6. Schlicksand ca. 30-45% =<63µm



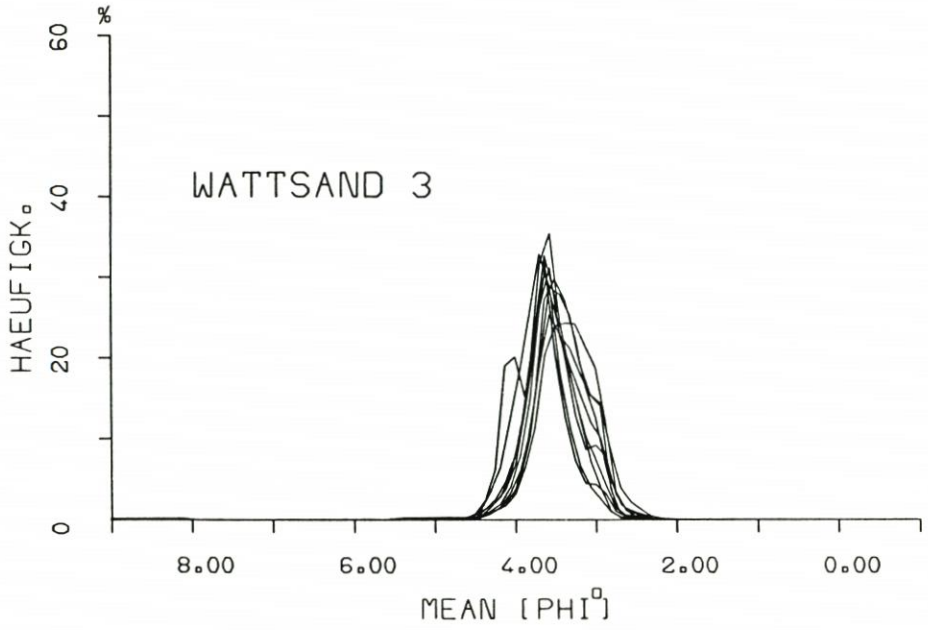
7. Wattsand ca. 2-7.5% =<63µm



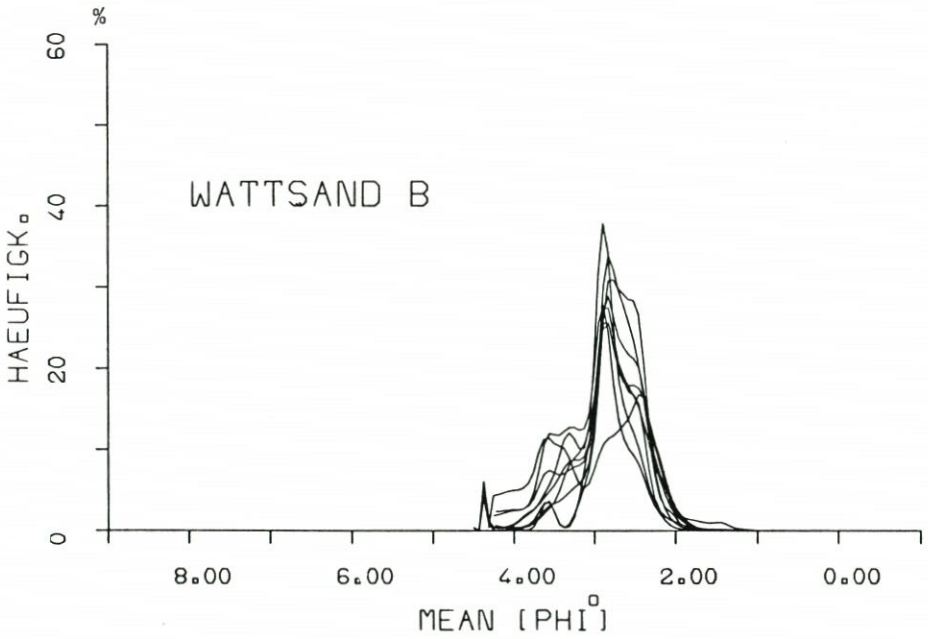
8. Wattsand ca. 2-7.5% =<63µm



9. Wattsand ca. 2-10% =<63µm



10. Wattsand Bielshövensand ca. 1-5% =<63µm



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 Seegrasfeld 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 Luftbildauswertungen 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 Bielshövensandes 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 Bielshövensandgruppe „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 Prielen 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 Prielnetzkarten 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 Prielen in diesem Bereich deutlich ab (Abb. 15).

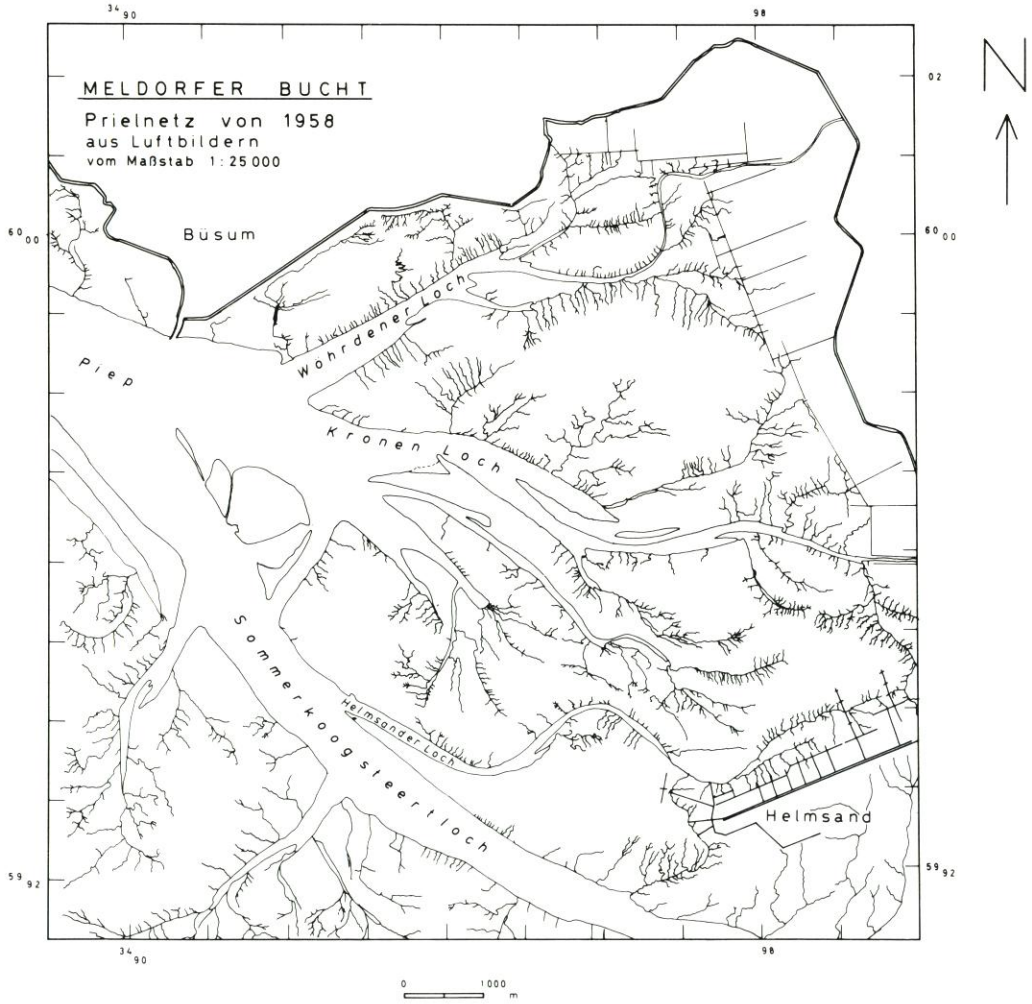


Abb. 14. Meldorfer Bucht. Prielnetz von 1958 aus Luftbildern

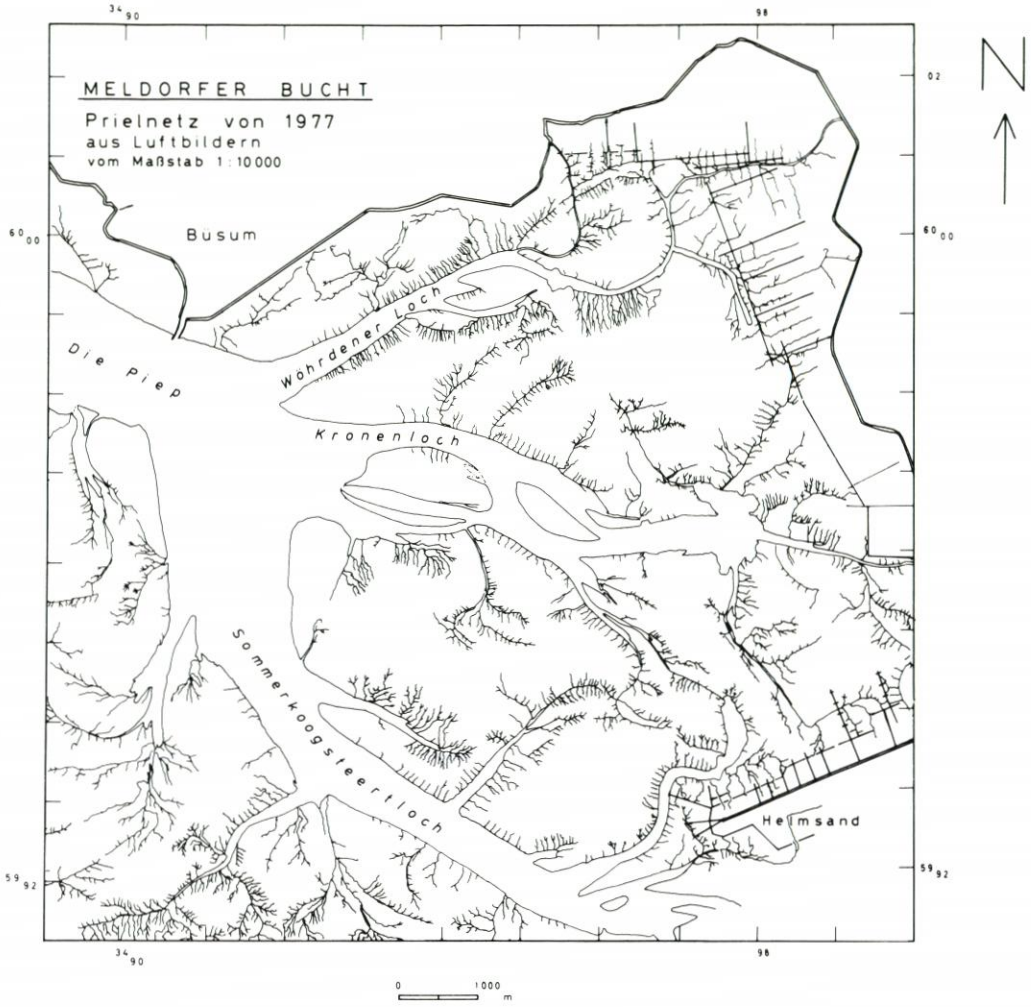


Abb. 15. Meldorfer Bucht. Prielnetz von 1977 aus Luftbildern

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 Prielnetzdichte, 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 Probendaten beruht.

Vor allem Wattsand-Flächen werden von Prielen 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 mittelmäßig geschlängelte Priele; geringe Prielnetzdichte	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.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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.

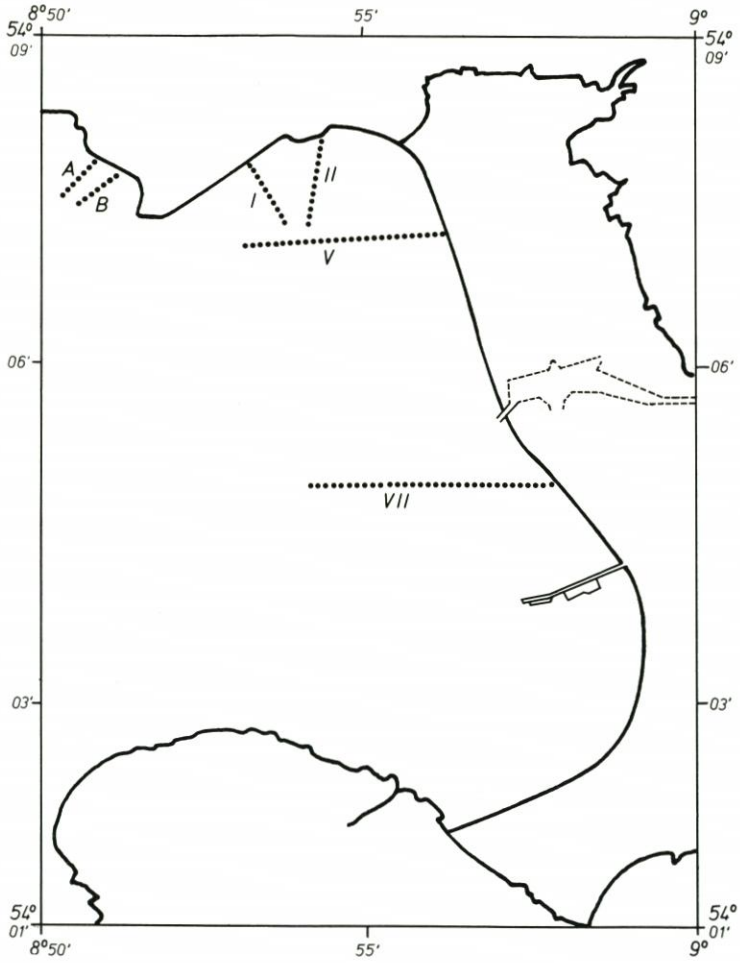


Abb. 16. Lage der Testprofile (aus FIGGE, 1983)

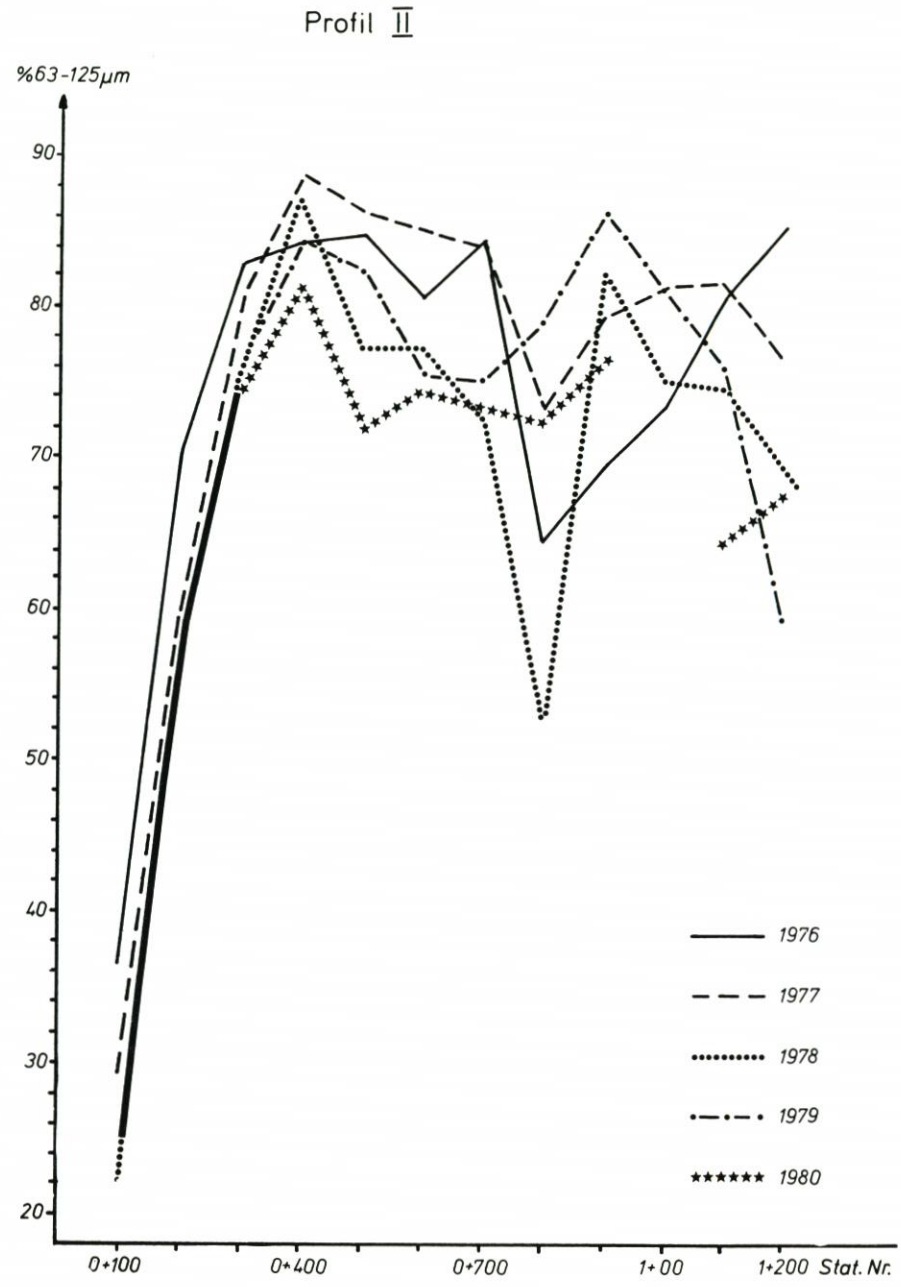


Abb. 17. Anteile der Krongrößen 0,063 bis 0,125 mm im Profil 2 in den Jahren 1976 bis 1980 (aus FIGGE, 1983)

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	stürmisch	wenig gelockerter Schlick
	3	ruhig, Ostwind	
Dez. 77	1, 2, 3	ruhig – wechselhaft	etwas Sedimentation
Jan. 78	3	stürmisch (W–SW)	wenig Eis, Erosion
	1, 2	ruhig und kalt, Eis auf Profil 2	keine Veränderungen
Feb.	3	wechselhaft	neuer Priel seeseitig, Erosion landseitig
	1, 2	ruhig und kalt, viel Schnee	viel Eis auf dem Watt, Treibeisproben!
März	3	ruhig und sehr kalt	geschlossene Eisdecke
	1, 2	stürmisch (W)	Reste der Eisschlickdecke noch vorhanden
April	1, 2	stürmisch, 2–6 °C	neuer Schlick im Profil 2
	3		seeseitig auffallende Prielverlagerungen, Aufschlickung landseitig
Mai	1, 2	starke Ostwinde, kalt	keine Veränderungen
	3		seeseitig weitere Prielverlagerungen und Erosion
Juni	1, 2	stabile Wetterlage, 15–20 °C	Sedimentation auf Profil 1
	3		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	stürmisch	keine Veränderungen
	3		landseitig trocken, Deichschluß
Okt.	1, 2	wechselhaft	Erosion besonders im Profil 2
	3		seeseitige Fläche zwischen den 2 großen Prielen sehr stark erodiert (Mya in Lebendstellung)
Nov.	1, 2	ruhig	geringe Sedimentation
	3		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 tieften 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.

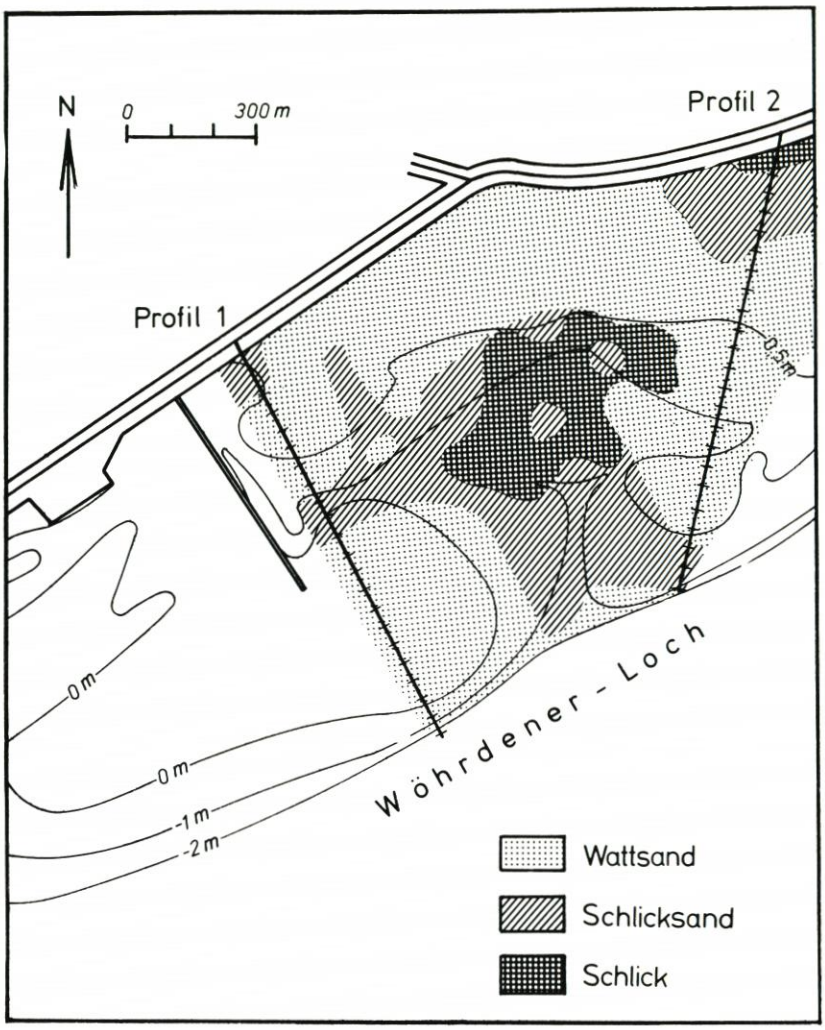


Abb. 18. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 0,0 – 0,10 m Tiefe

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

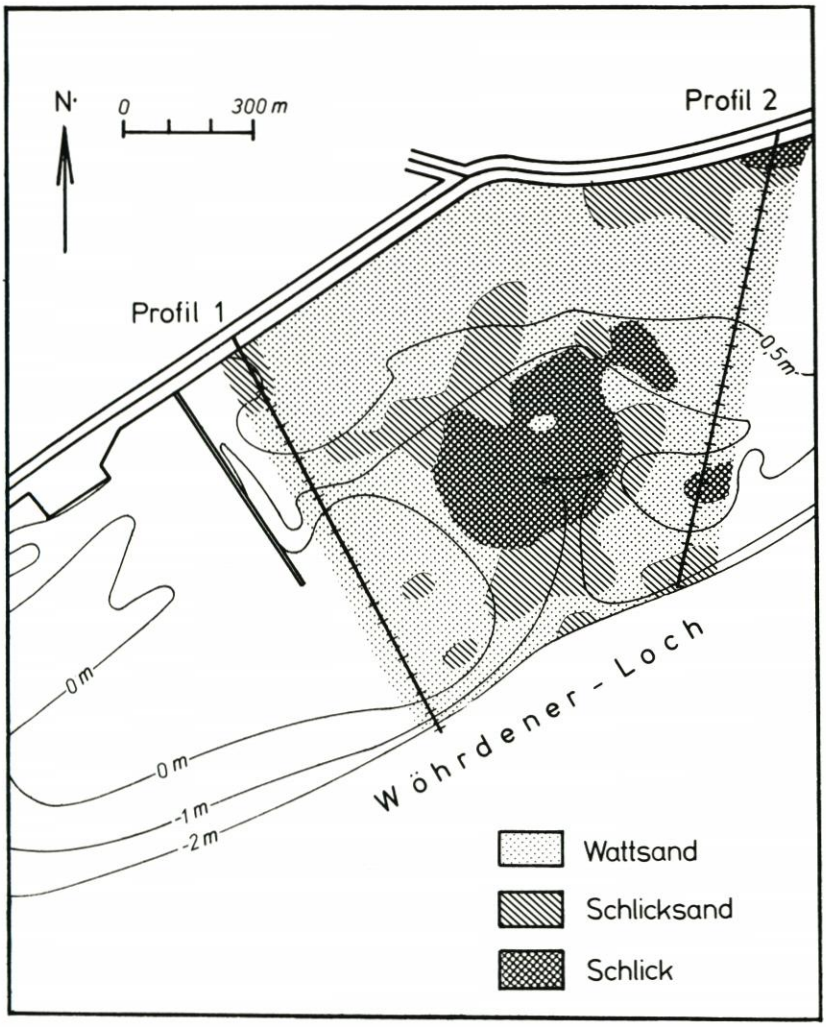


Abb. 19. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 0,90 – 1 m Tiefe

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

Prozentanteile von Korngrößen < 50 µm, < 63 µm und > 125 µm (Abb. 22, 23 u. 24): Entsprechend den Ergebnissen der großflächigen Darstellungen der Meldorfer Bucht ähnelt die Verteilung der Korngrößen < 50 µm der Grobansprache-Karte am meisten, da auch hier eine Dreierstufung der Sedimentaufteilung gewählt wurde. Die < 50-µm-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 µm. Nach dieser Auftragungsart nehmen die beiden Schlicksandstufen (10–25 und 25–50 % < 63 µm) den größten Teil der Testfeldflächen ein. Schlick ist nach der Korngrößendefinition (mehr als 50 % < 63 µm) nur in kleinen Arealen des Baggerlochs und im Spartinagrasfeld am Deichfuß im Osten des Testfelds anzutreffen.

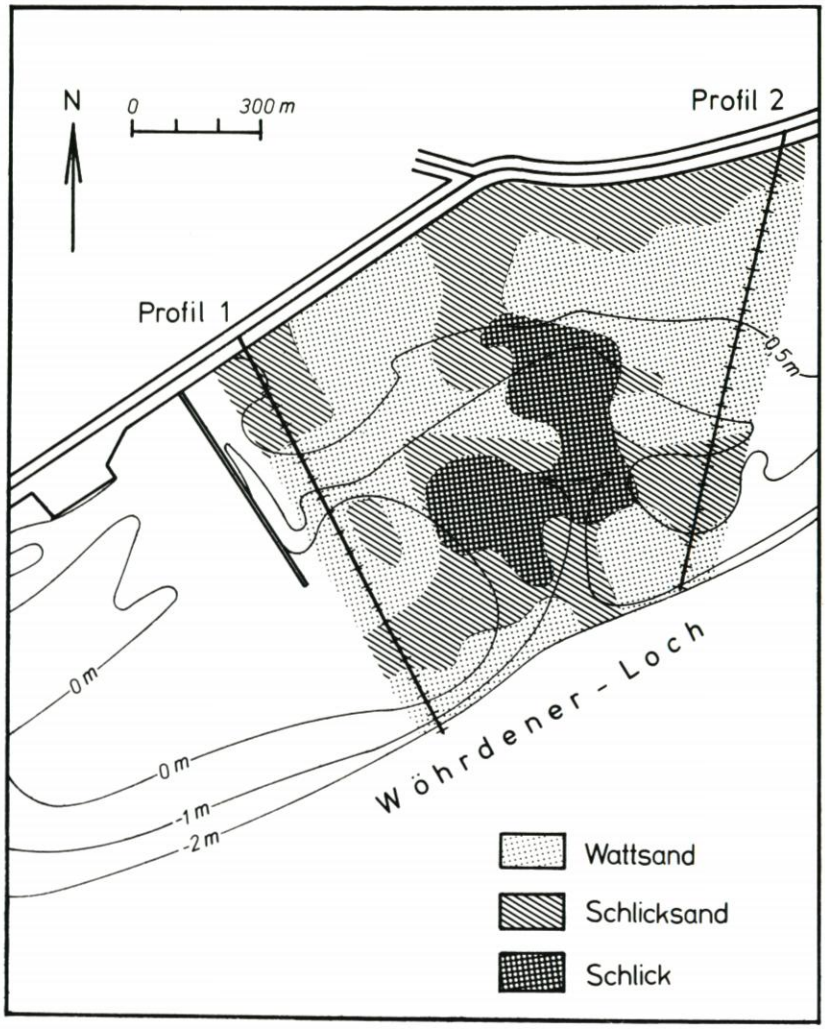


Abb. 20. Testfeld bei Deichhausen. Sediment in 1,90 – 2 m Tiefe

Der Unterschied zwischen Grobansprache 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 µm wurde die Stufung der Prozentanteile im Bereich der Wattsande enger gewählt als auf der Übersichtsdarstellung der Bucht, da Sedimente mit einem größeren Anteil > 125 µm 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 µm. 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 µm. Ein Vergleich mit den Häufigkeitsverteilungen dieser Gebiete zeigt, daß dort zweigipfelige Kornverteilungen vorherrschen.

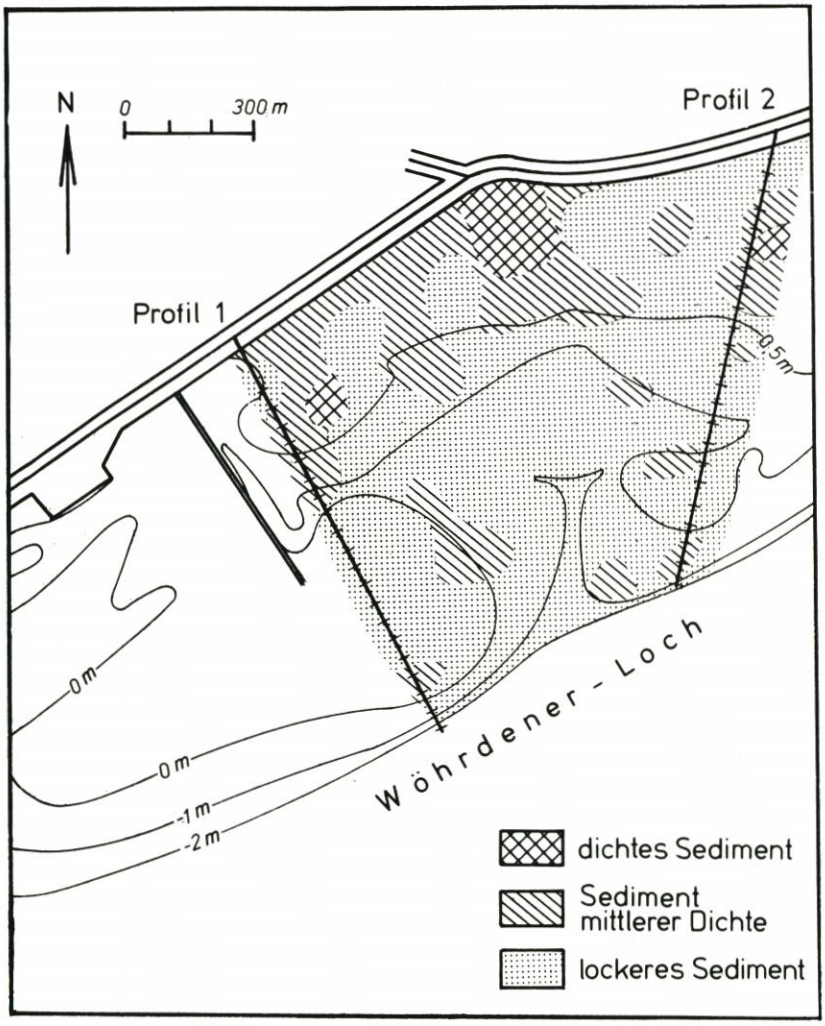


Abb. 21. Testfeld bei Deichhausen. Sedimentdichte in 0 – 30 cm Tiefe

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 µm. 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-µm-Karte gut entspricht, aber noch einige

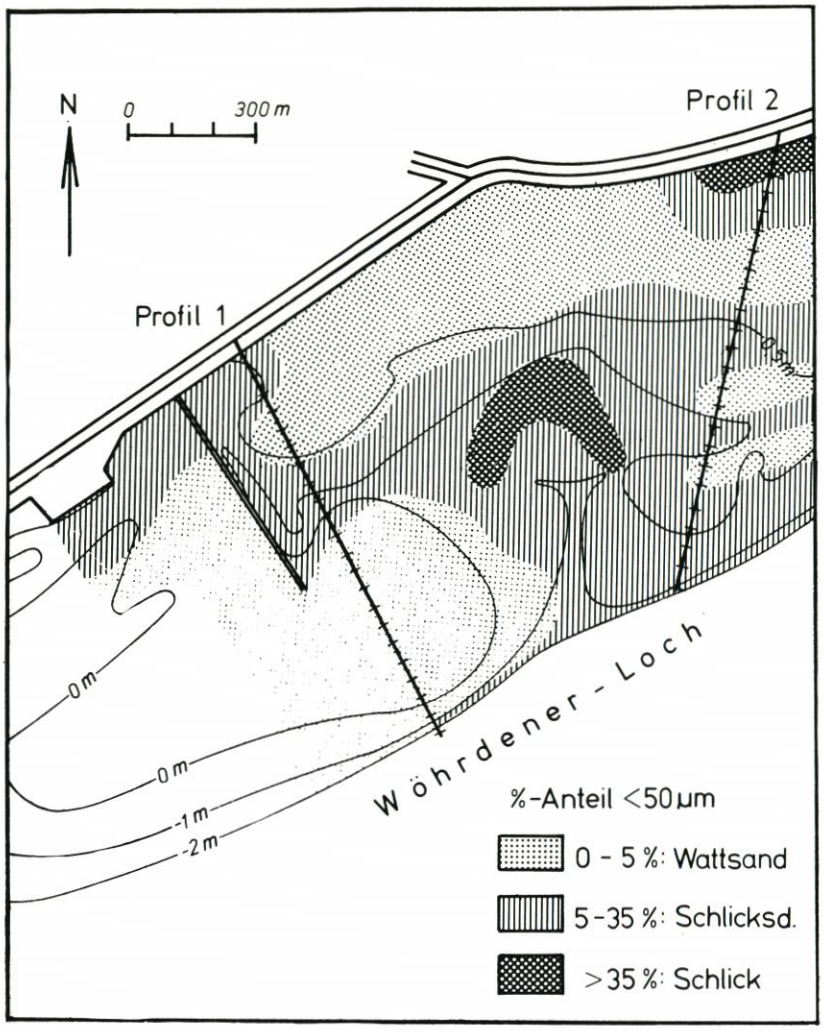


Abb. 22. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil < 0,05 mm

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 µm.

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).

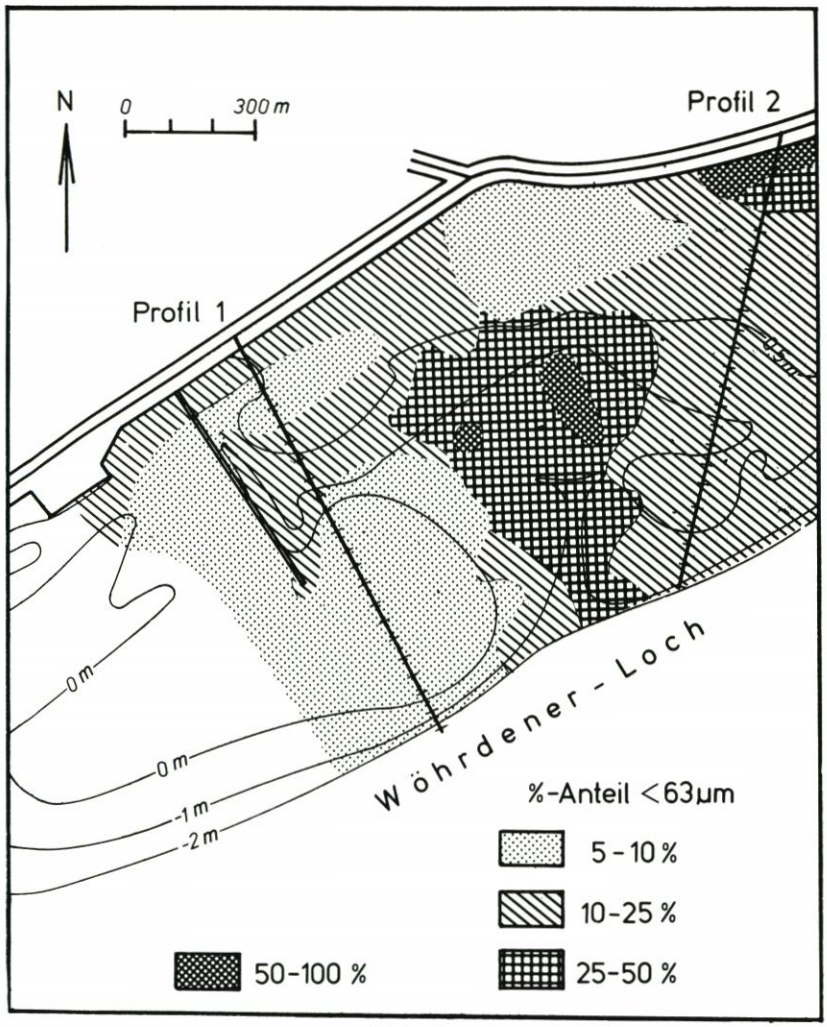


Abb. 23. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil < 0,063 mm

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 Spartinagrasfeld gebildet hat. Auch seewärts 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.

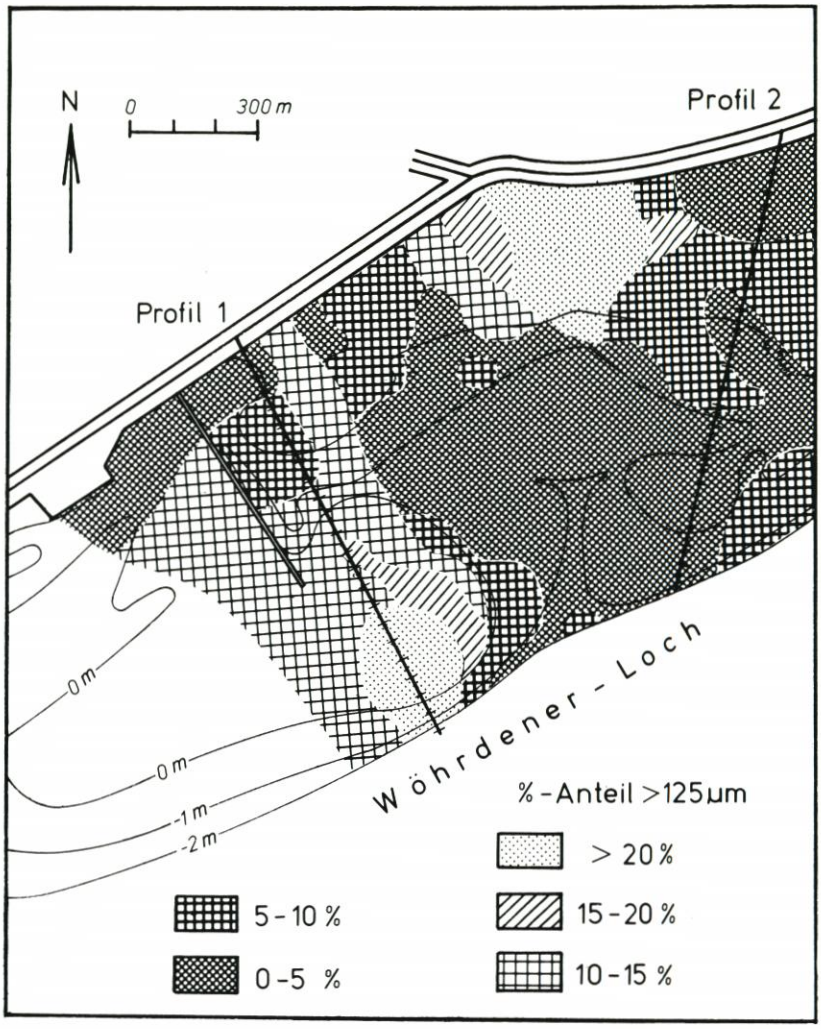


Abb. 24. Testfeld bei Deichhausen. Prozentanteil > 0,125 mm

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 µm) einen Knick in der Häufigkeitskurve. Bei Schlicken, 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.

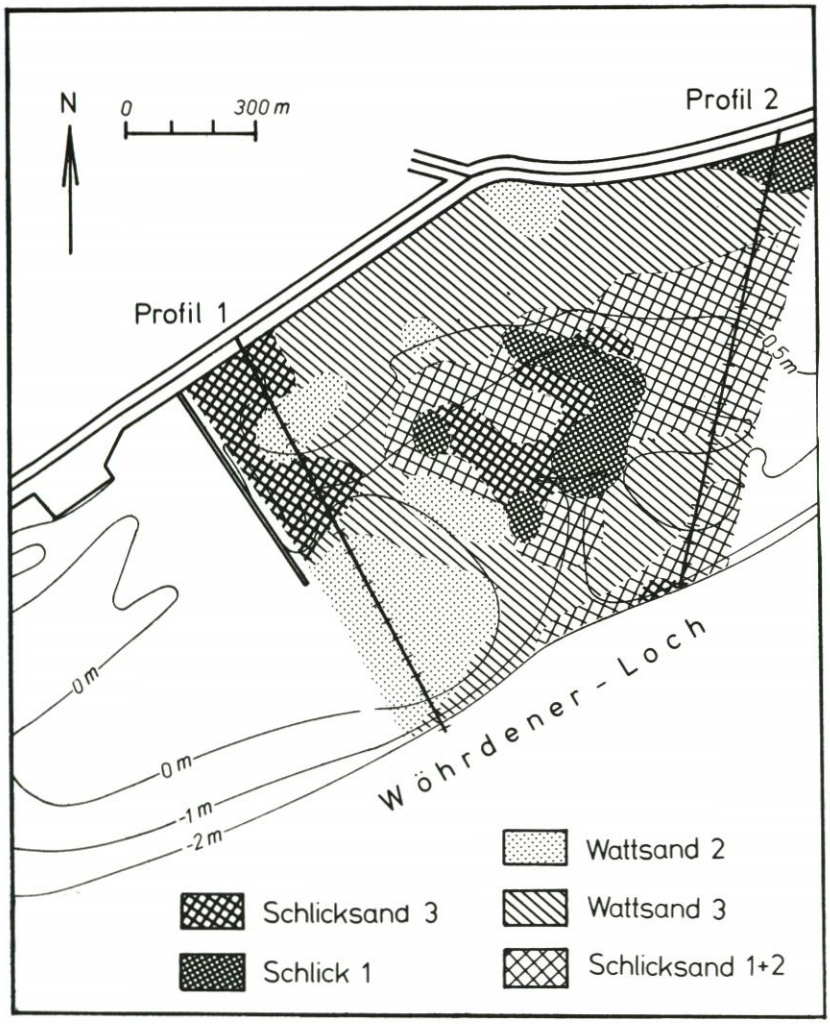


Abb. 25. Testfeld bei Deichhausen. Karte der Wattsedimenttypen (Momentenparameter klassifiziert nach Vogel, Programm YHAK-KDIAG)

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 µm (> 9 PHI°). Der Feinsiltanteil < 31 µm (> 5 PHI°) ist nur in sehr kleinen Prozentsätzen vertreten. Den größten Anteil an Korngrößen im Grobschluff- und Feinsand-Bereich (> 31 µm [< 5 PHI°]) 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 gröberen Materials (> 31 µm) dagegen wieder erheblich an. Der mit der Pipette-Analyse nicht erfaßbare Korngrößenbereich .> 63 µm (< 4 PHI°) konnte wegen der sehr geringen Materialmengen nicht in weitere Fraktionen

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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

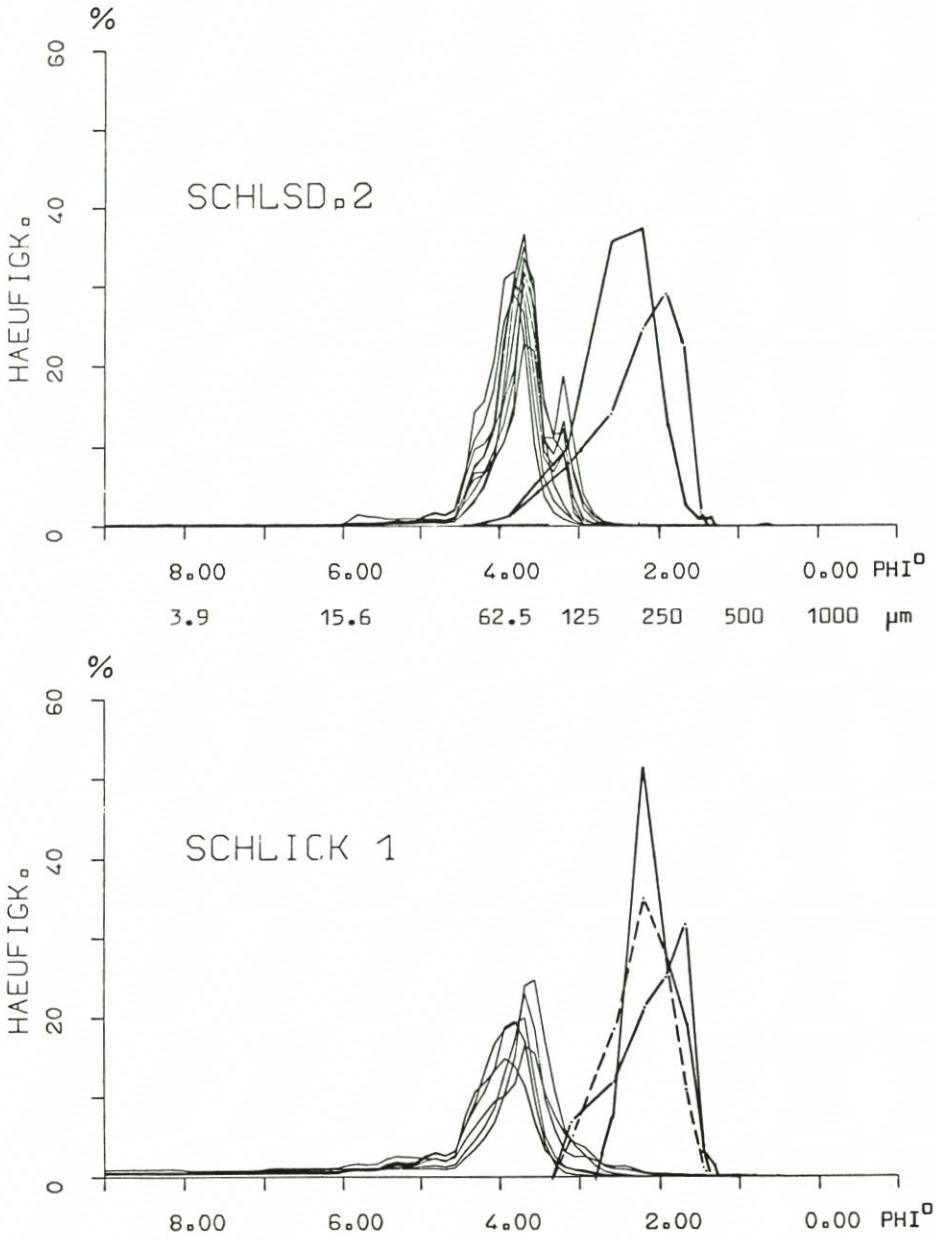


Abb. 26. Vergleich von Korngrößenverteilungen der Wattsedimenttypen Schlicksand 2 und Schlick 1 mit den Korngrößenverteilungen von Kotpillen an den entsprechenden Wattoberflächen

einem zweidimensionalen Schnitt durch ein nicht eingeregeltes 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

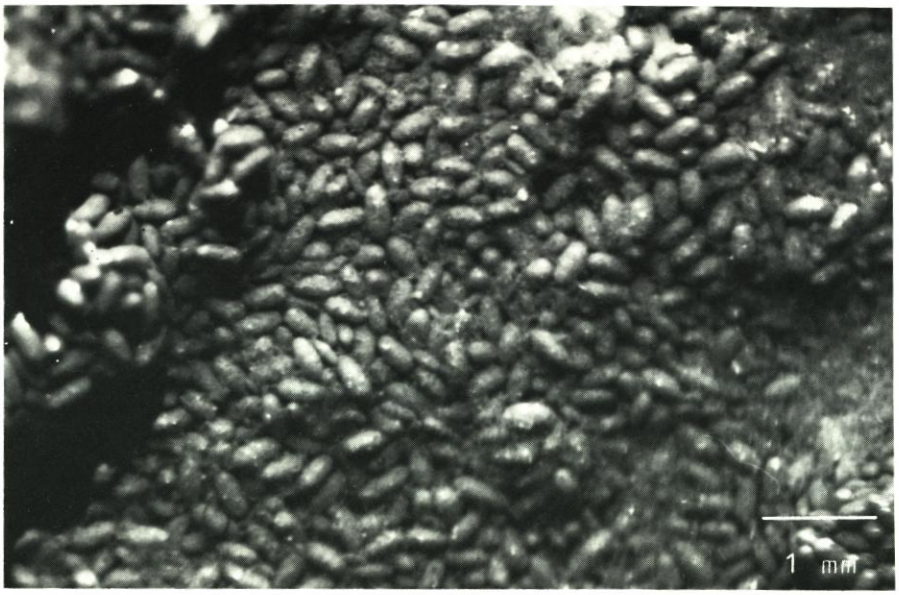


Abb. 27. Kotpillenbedeckte Schlicksandoberfläche (Schlicksand 2)

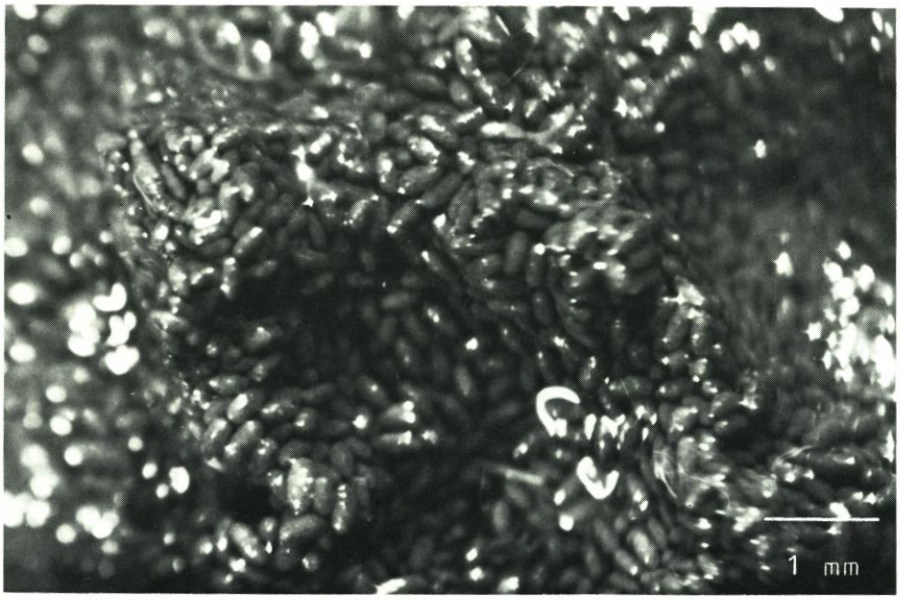


Abb. 28. Kotpillenbedeckte Schlickoberfläche (Schlick 1)

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 PHI° = 0,2 mm und für die der Schlick-Position 2,2 PHI° = 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 PHI° = 0,05 mm, während beim Schlick die kleinste gemessene Kotpille eine Größe von 3,3 PHI° = 0,1 mm besitzt. Die größten Kotpillen liegen bei beiden Sedimenttypen bei ca. 1,3 PHI° = 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

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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 (Planktonten), 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 µm liegt fast fünfmal höher als bei der Aufwurfprobe, der des Tonanteils (<2 µm) um das zwölffache. 54 % der Schwebfracht besteht aus kleineren Korngrößen als 20 µm (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 µm). Der Mittelwert der Schwebfrachtproben beträgt 72,12 % <63 µm.

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 µm 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 Schlicksanden (10–25 % <63 µm). Der Hauptanteil des Sediments (80,6 %) liegt innerhalb der Grenzen 63 µm bis 125 µm. Der durchschnittliche Tongehalt (<2µm) dieses Materials entspricht dem Mittel eines sandigen Schlicksandes (2,33 %). Der Anteil des feinen Silts (2–20 µm) ist ungewöhnlich gering (ca. 1 %), und der des Grobsilts (20–63 µm) 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 ausgepflockten 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-

Die Küste, 40 (1984), 1-318

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 Gefriertrocknung 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 Gefriertrocknung 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 Schrumpfungserscheinungen 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.

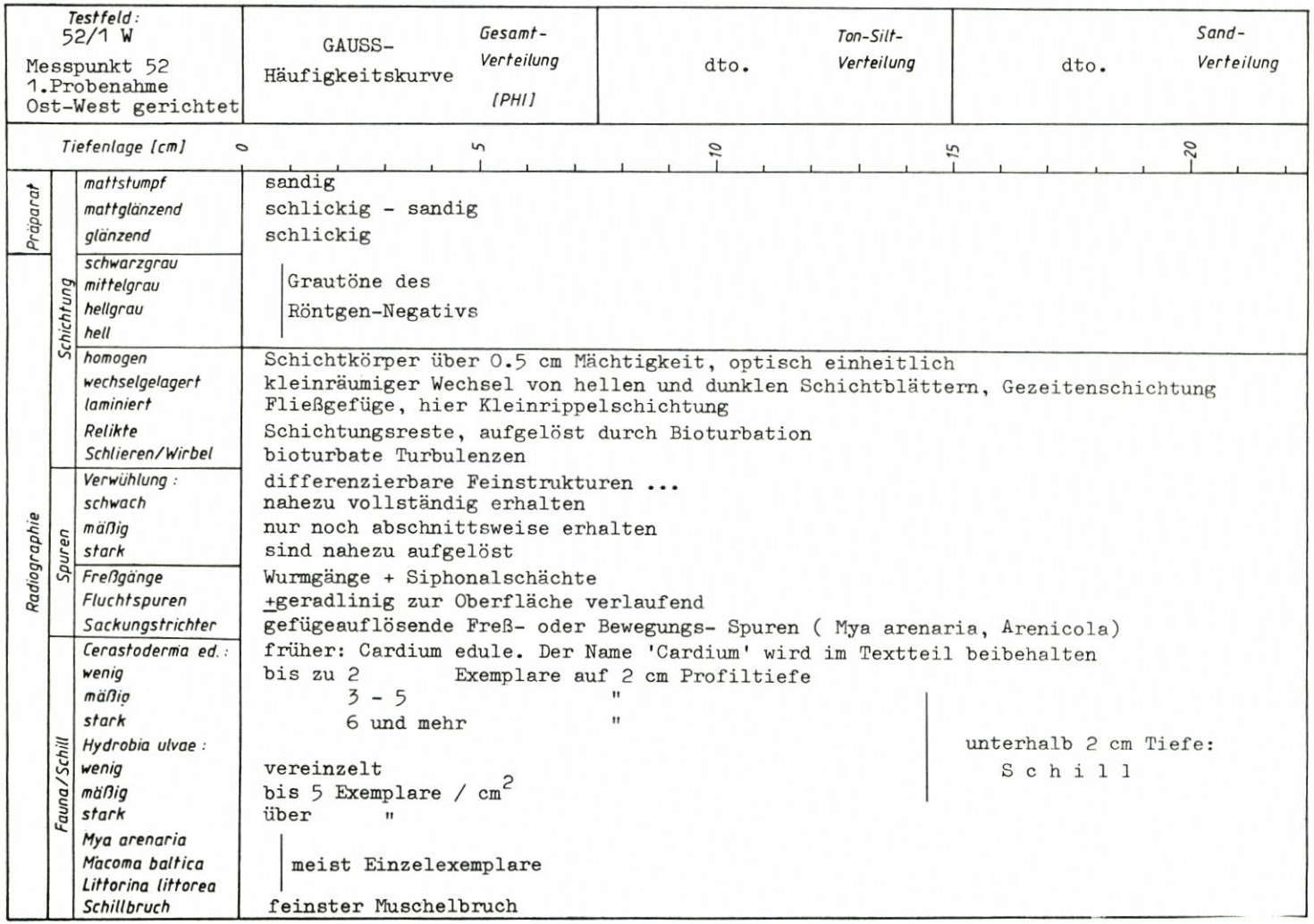


Abb. 29. Legende zur Darstellung der Stechkasten-Profile

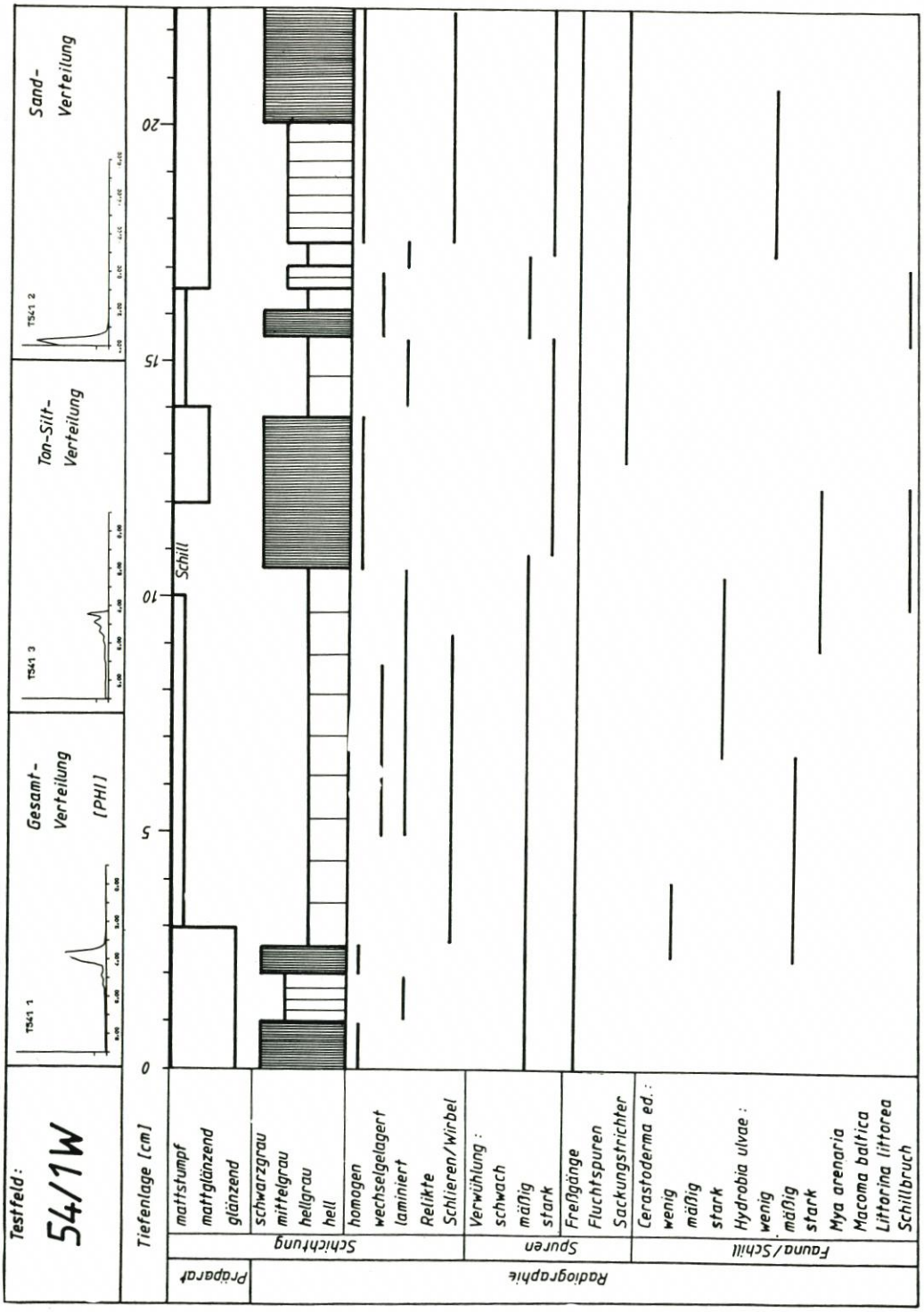


Abb. 30. Stechkasten-Profile 54/1 W

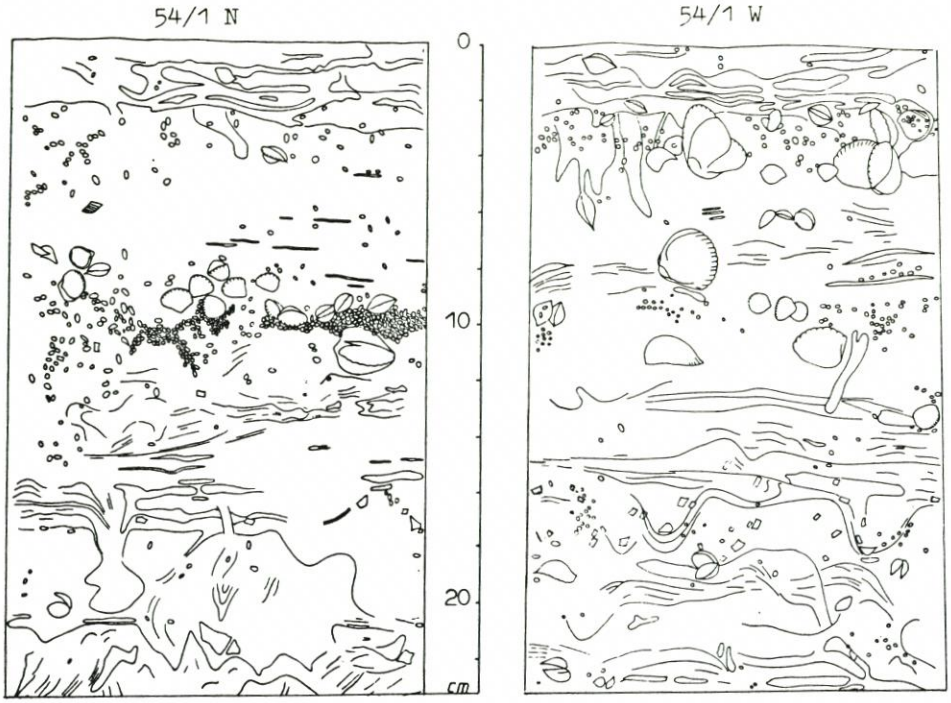


Abb. 31. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/1 N und 54/1 W

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

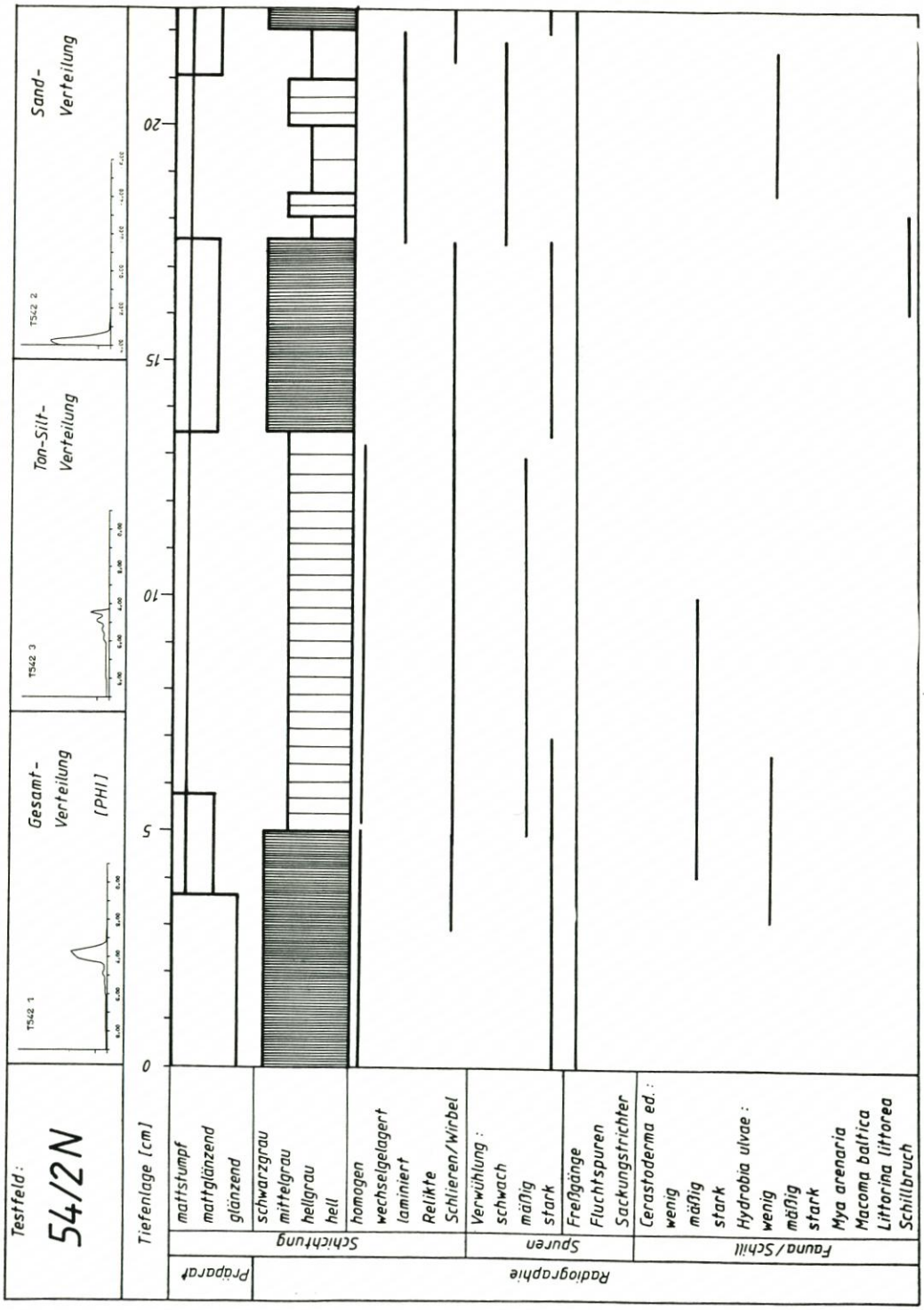


Abb. 32. Stechkasten-Profil 54/2 N

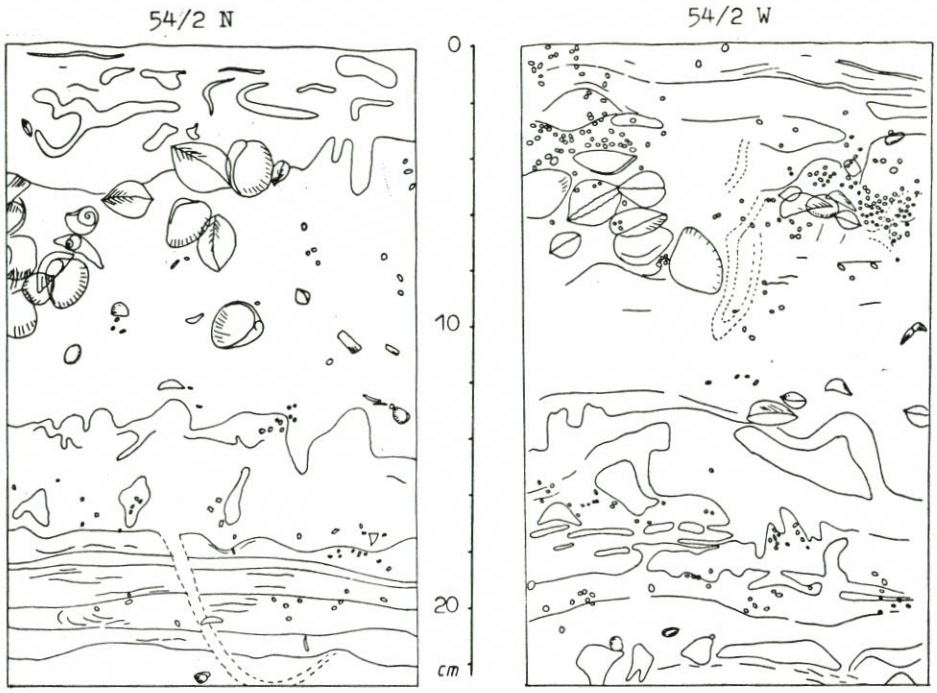


Abb. 33. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/2 N und 54/2 W

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 turbierten 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 turbiertes 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

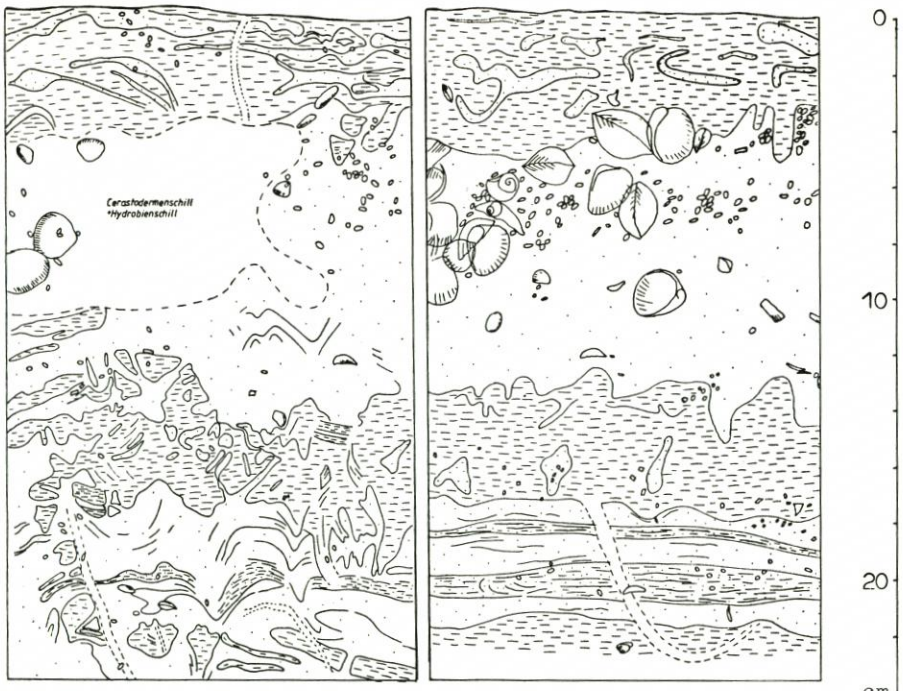


Abb. 34. Stechkasten-Profil 54/2 N. Zeichnung von 2 parallelen Schnitten in 3 cm Abstand. Sie zeigen unterschiedlich ausgeprägte Bioturbation

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

Im liegenden Sandkörper ist das Ablagerungsgefüge strukturell aufgelöst. Im Präparat sind schlickige 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. Gezeitenschichtung, Kleinrippelgefüge u. a., die aufgrund ihrer genetisch i. d. R. weitflächigen Verbreitung anderen Gesetzmäßigkeiten unterliegen (Morphologie, Faziesgrenzen u. a.).

Dritte Probennahme 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

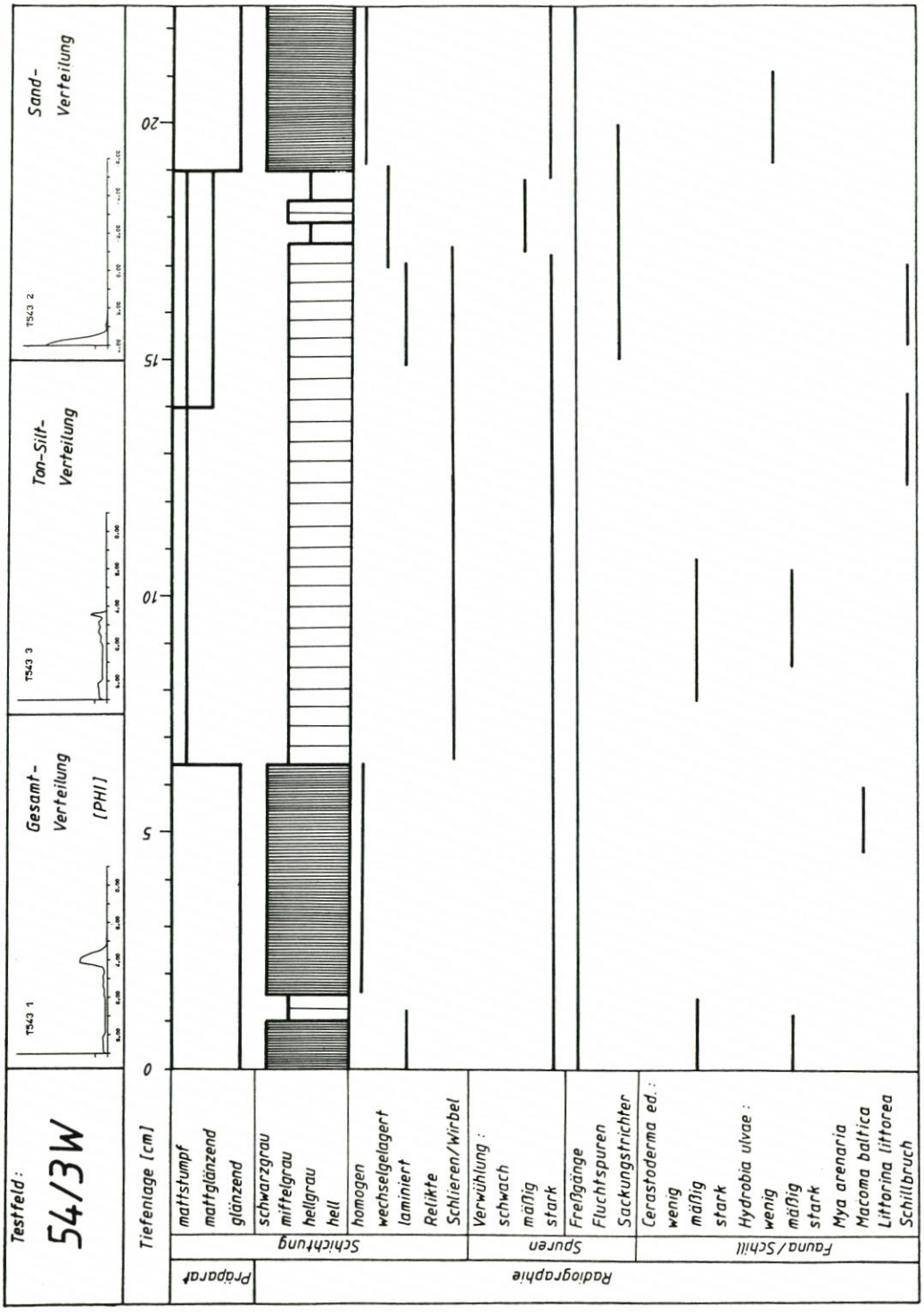


Abb. 35. Stechkasten-Profil 54/3 W

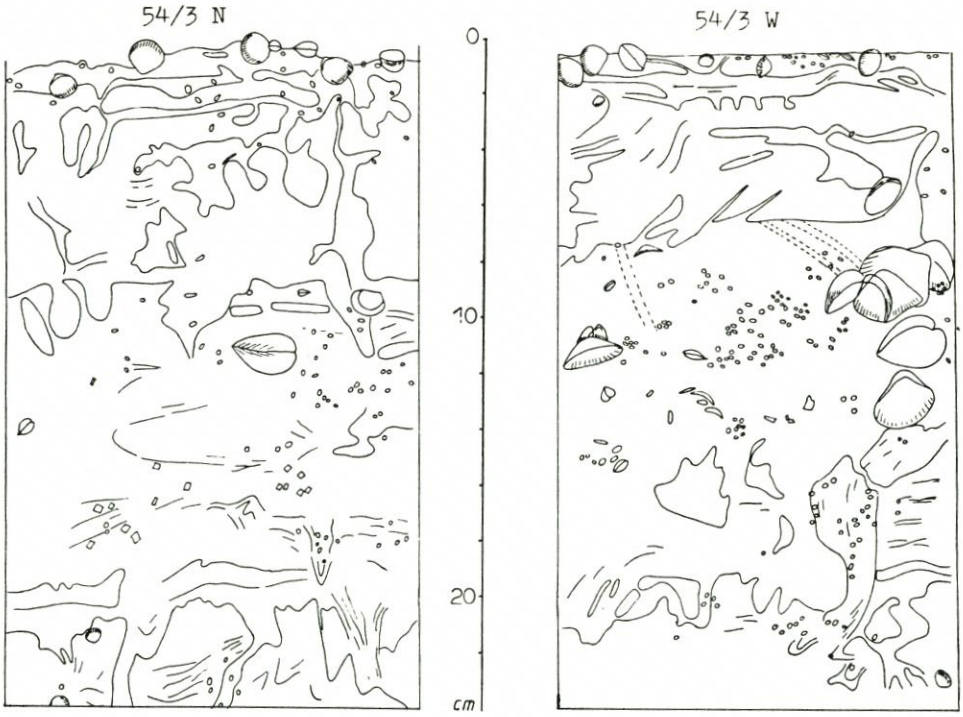


Abb. 36. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/3 N und 54/3 W

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 turbierten 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

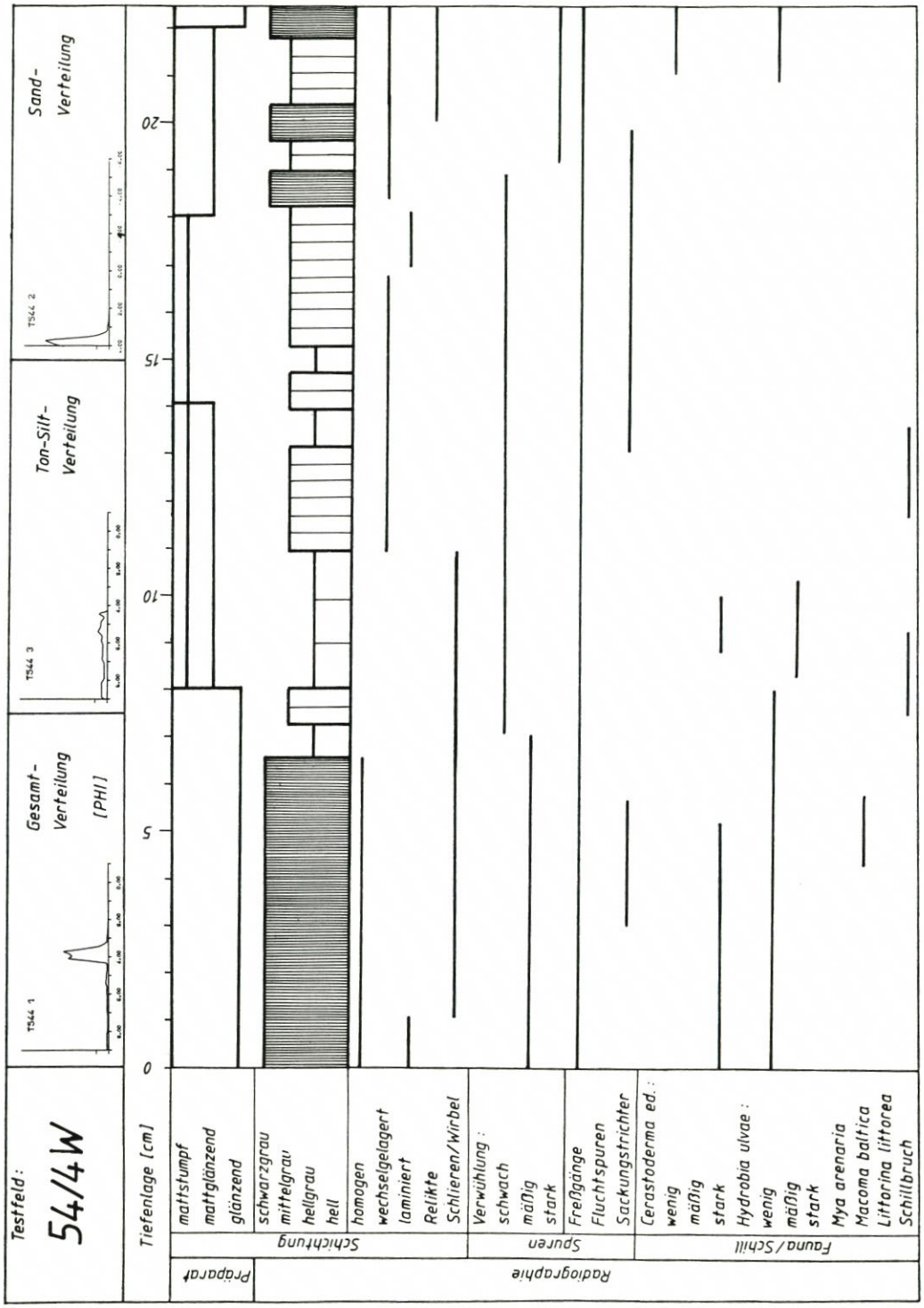


Abb. 37. Stechkasten-Profil 54/4 W

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 (Gezeitenschichtung) 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 Gezeitenschichtung 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 Ausnahmeerscheinungen 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.

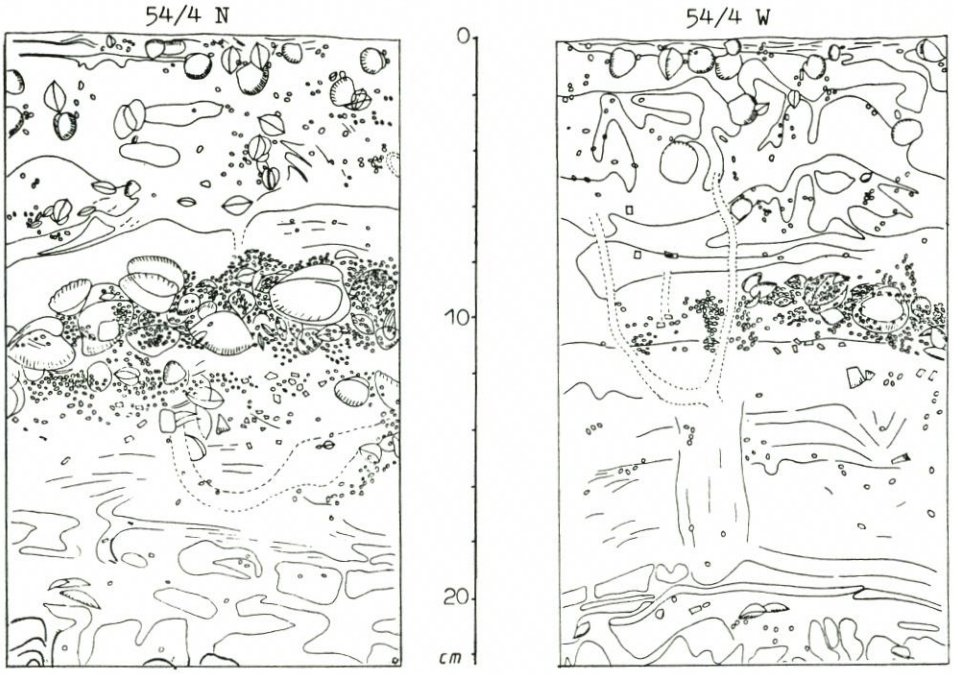


Abb. 38. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 54/4 N und 54/4 W

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 Gezeitenschichtung. Die Wechsellagen sind sehr feinschichtig, differenzierbare Abstände erreichen 0,01 cm.
4) Schlickschicht 18–21 cm: Obwohl nur noch reliktisch erhalten, ist sie gut im Gefügewandel von der hangenden Gezeitenschichtabfolge mit aussetzender Bioturbation abzugrenzen, welche diskordant abgelagert wurde.
5) Gezeitenschichtung 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 Gezeitenschichtkörper 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.

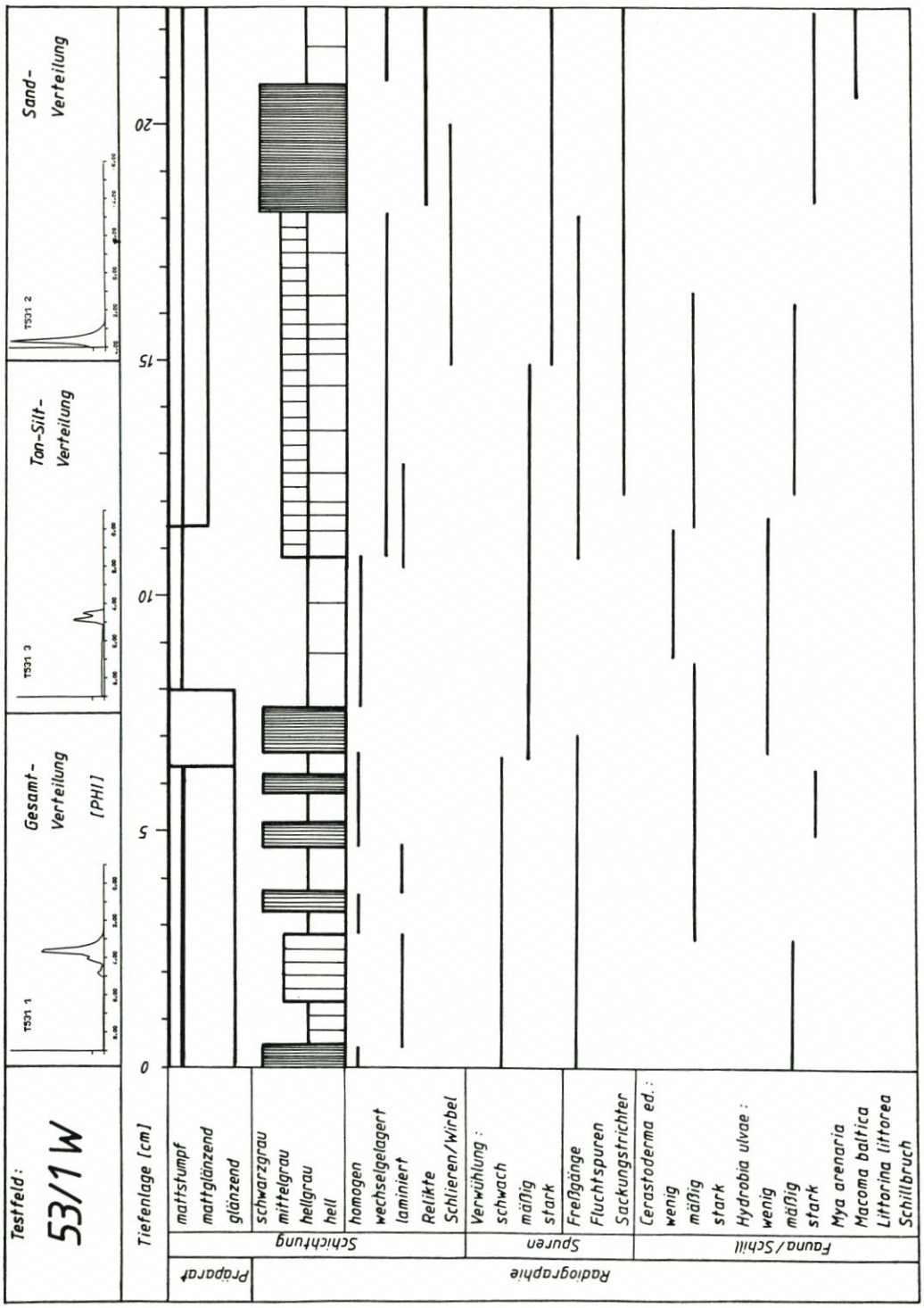


Abb. 39. Stechkasten-Profil 53/1 W

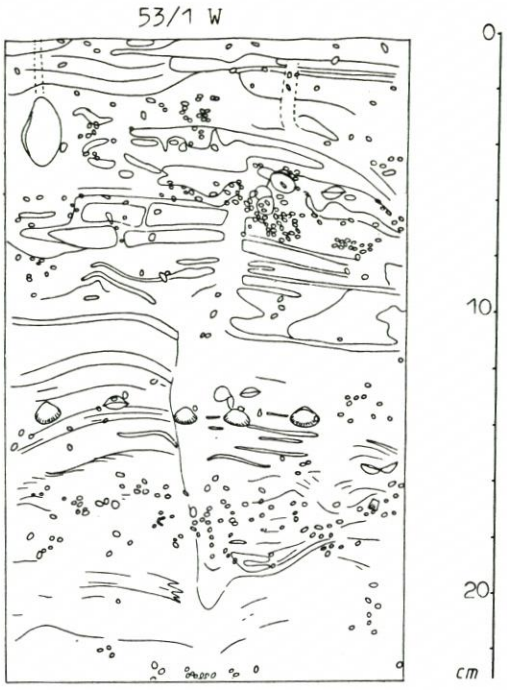


Abb. 40. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 53/1 W

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-Schlichtung, 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 unbekannten Tiefe wiederfindet, daß dessen Mächtigkeit jedoch erheblich höher ausfallen dürfte (Schichtspreizung in Senken).

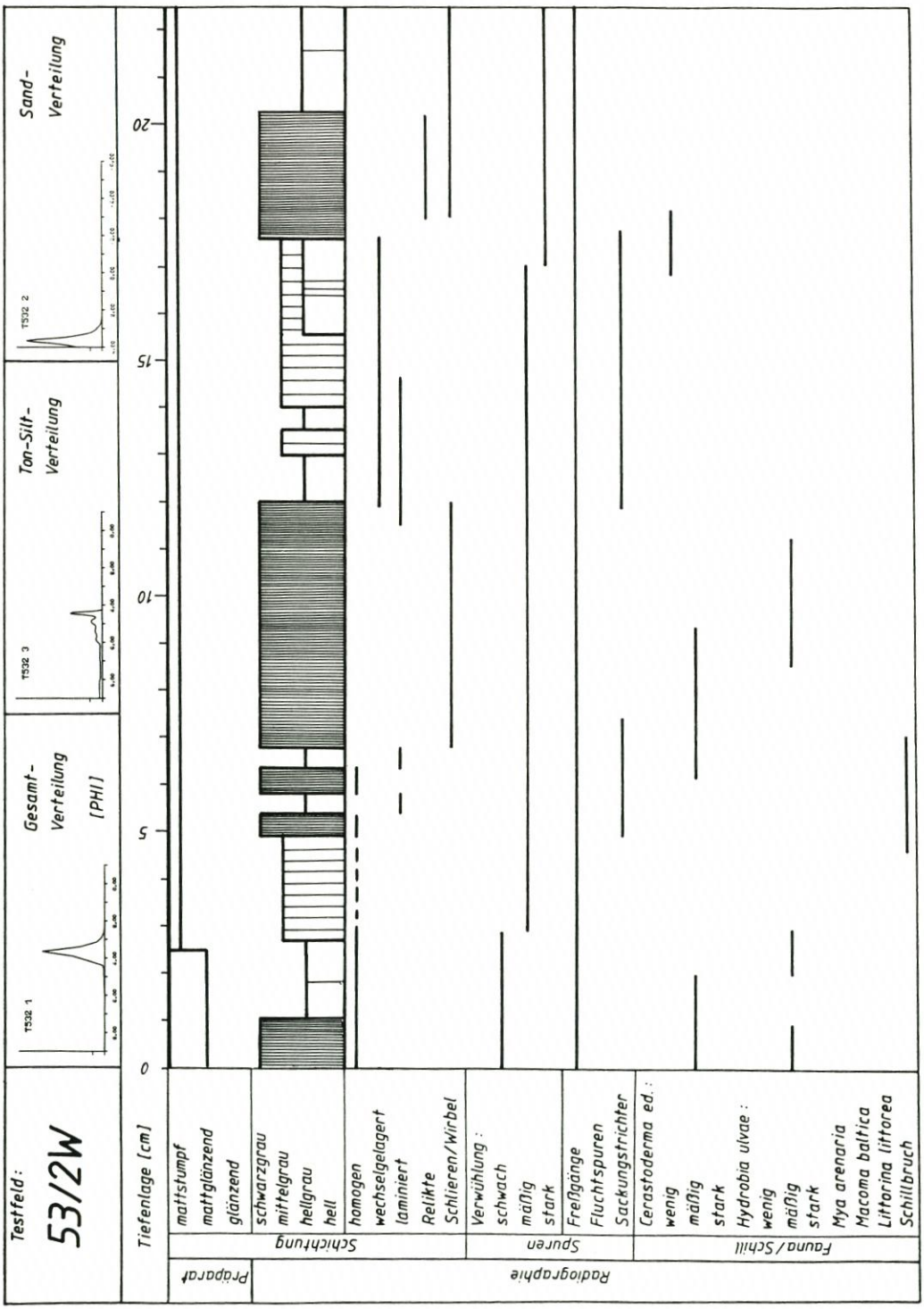


Abb. 41. Stechkasten-Profil 53/2 W

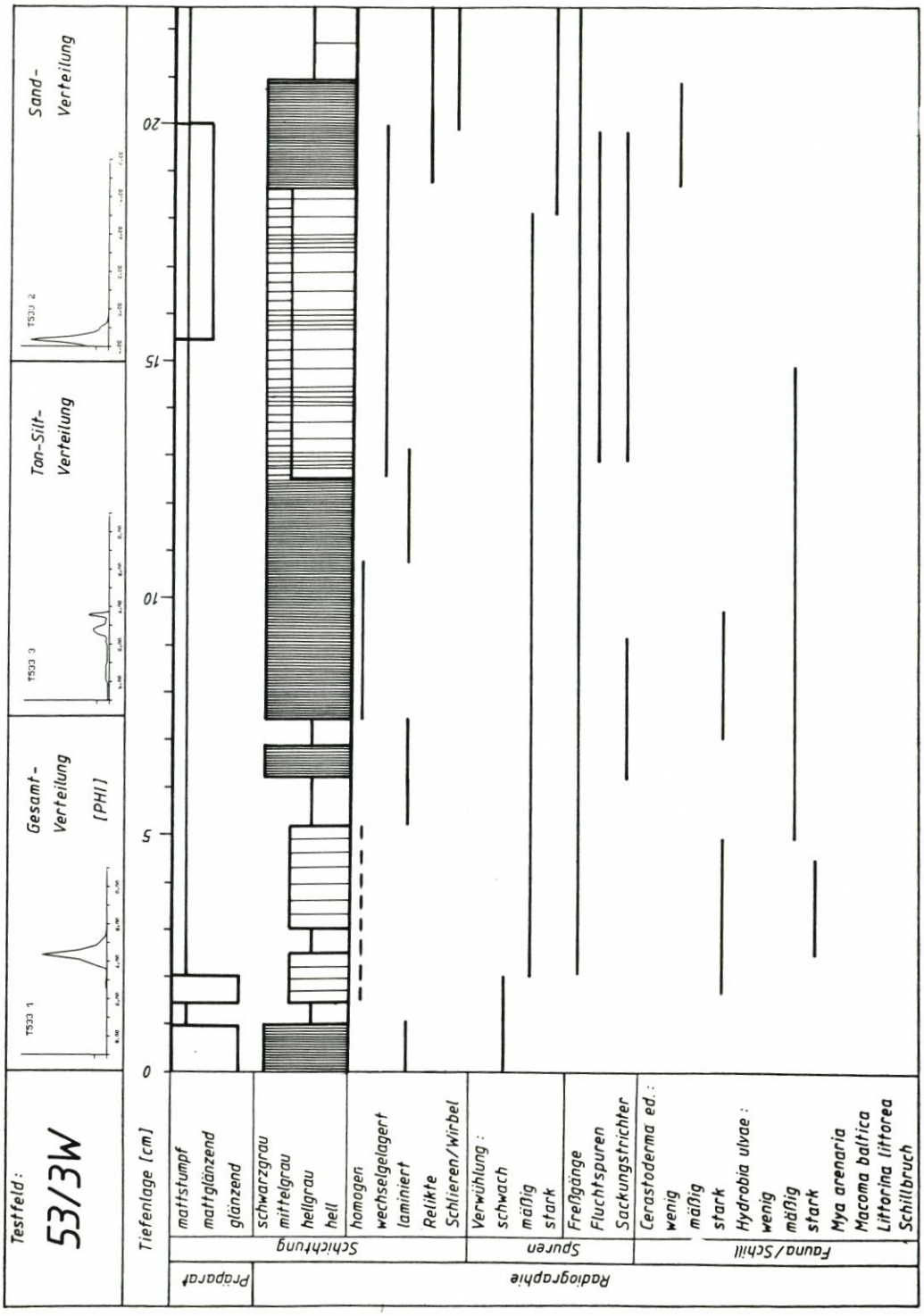


Abb. 42. Stechkasten-Profil 53/3 W

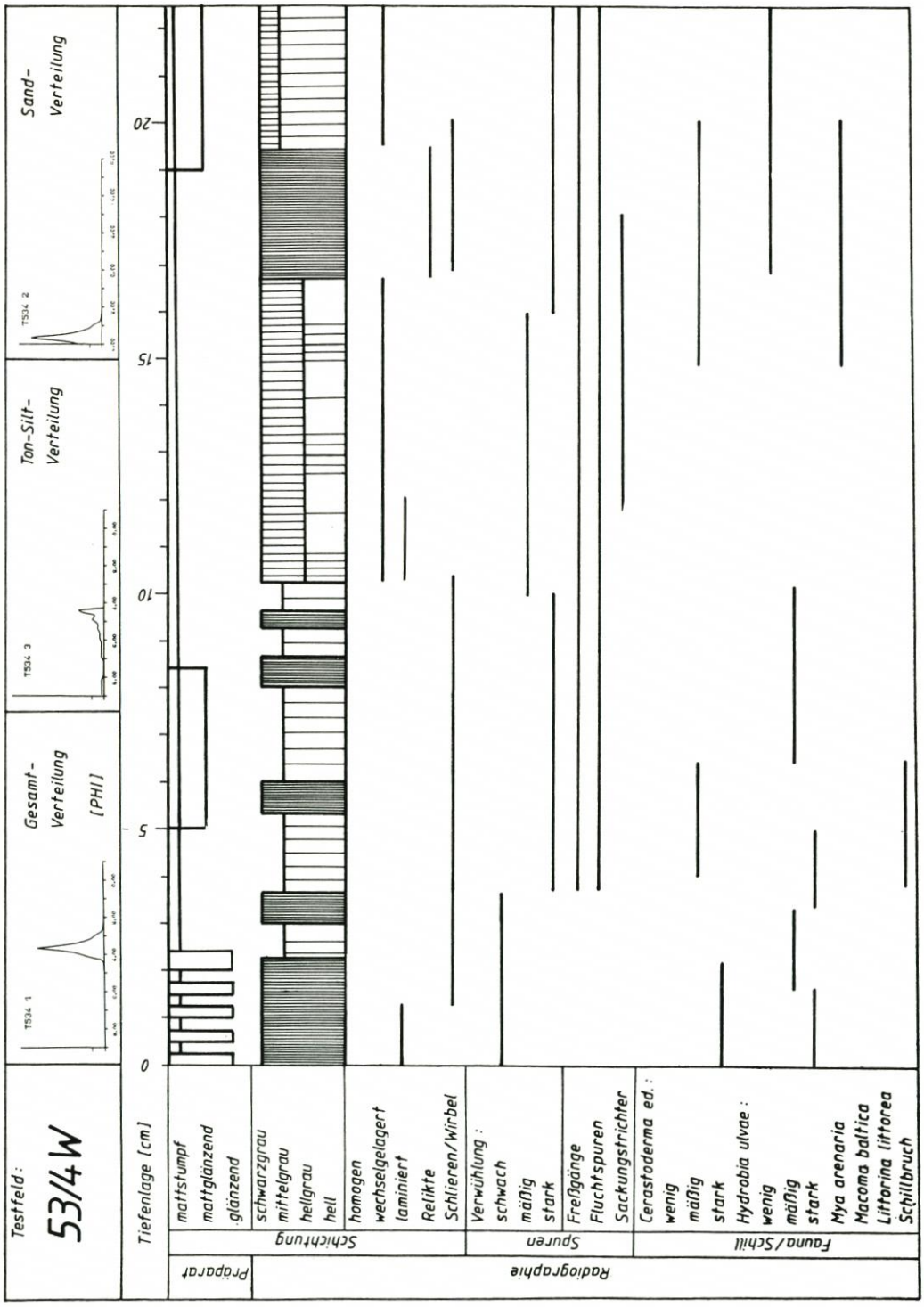


Abb. 43. Stechkasten-Profil 53/4 W

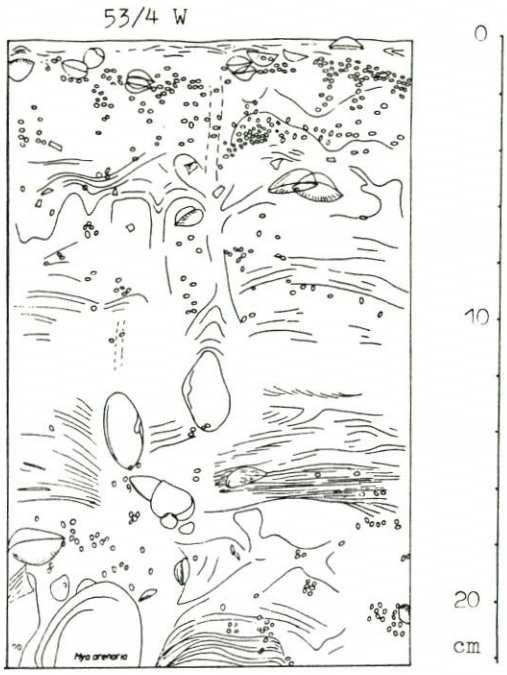


Abb. 44. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 53/4 W

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 Stechkastenkerne 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.

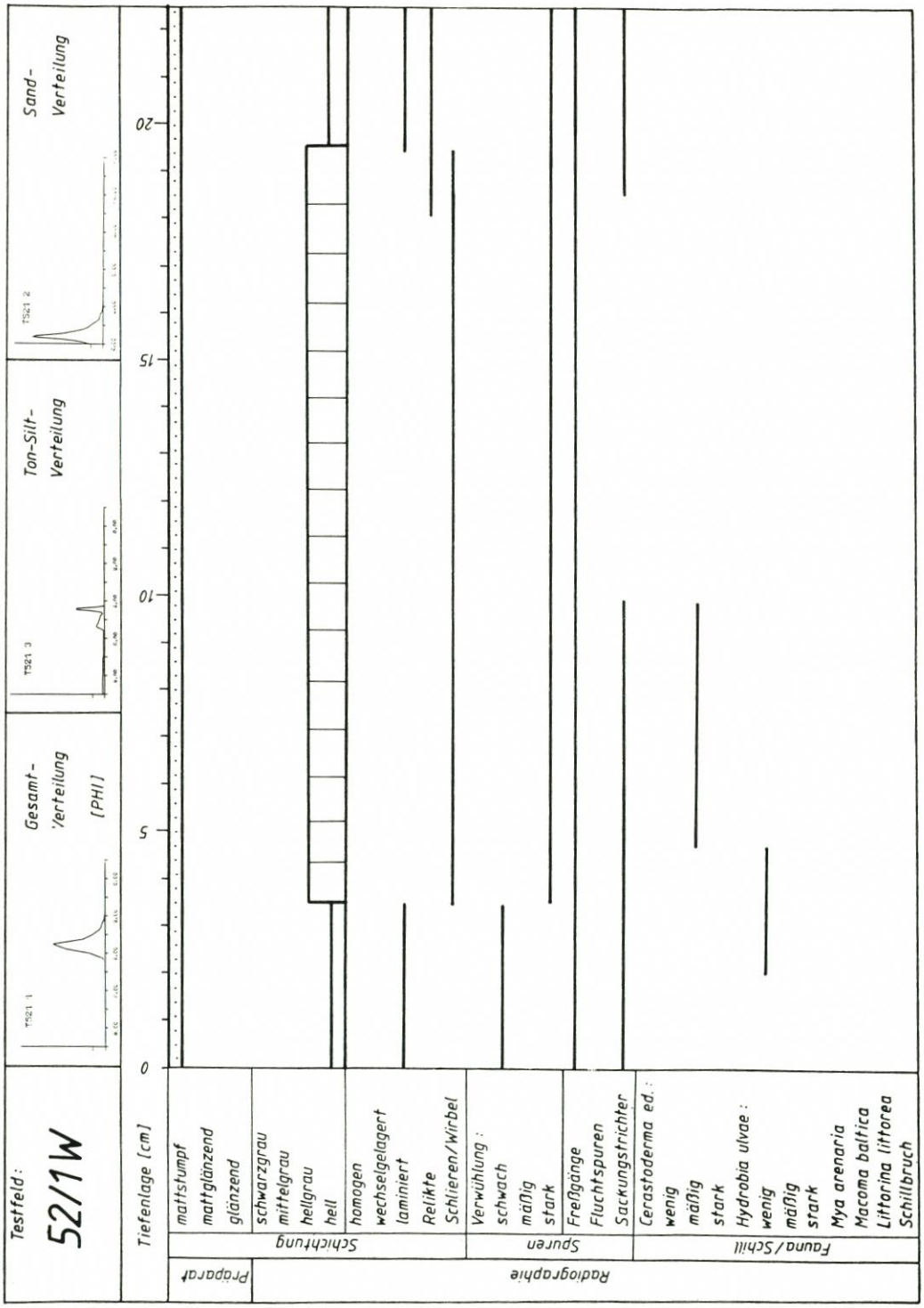


Abb. 45. Stechkasten-Profil 52/1 W

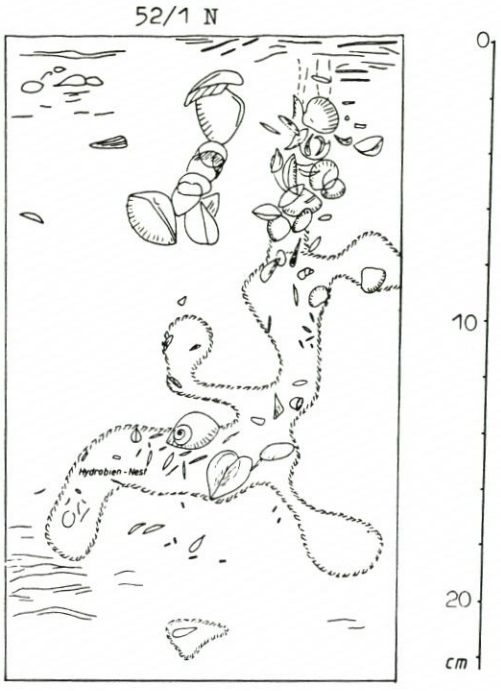


Abb. 46. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 52/1 N

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.

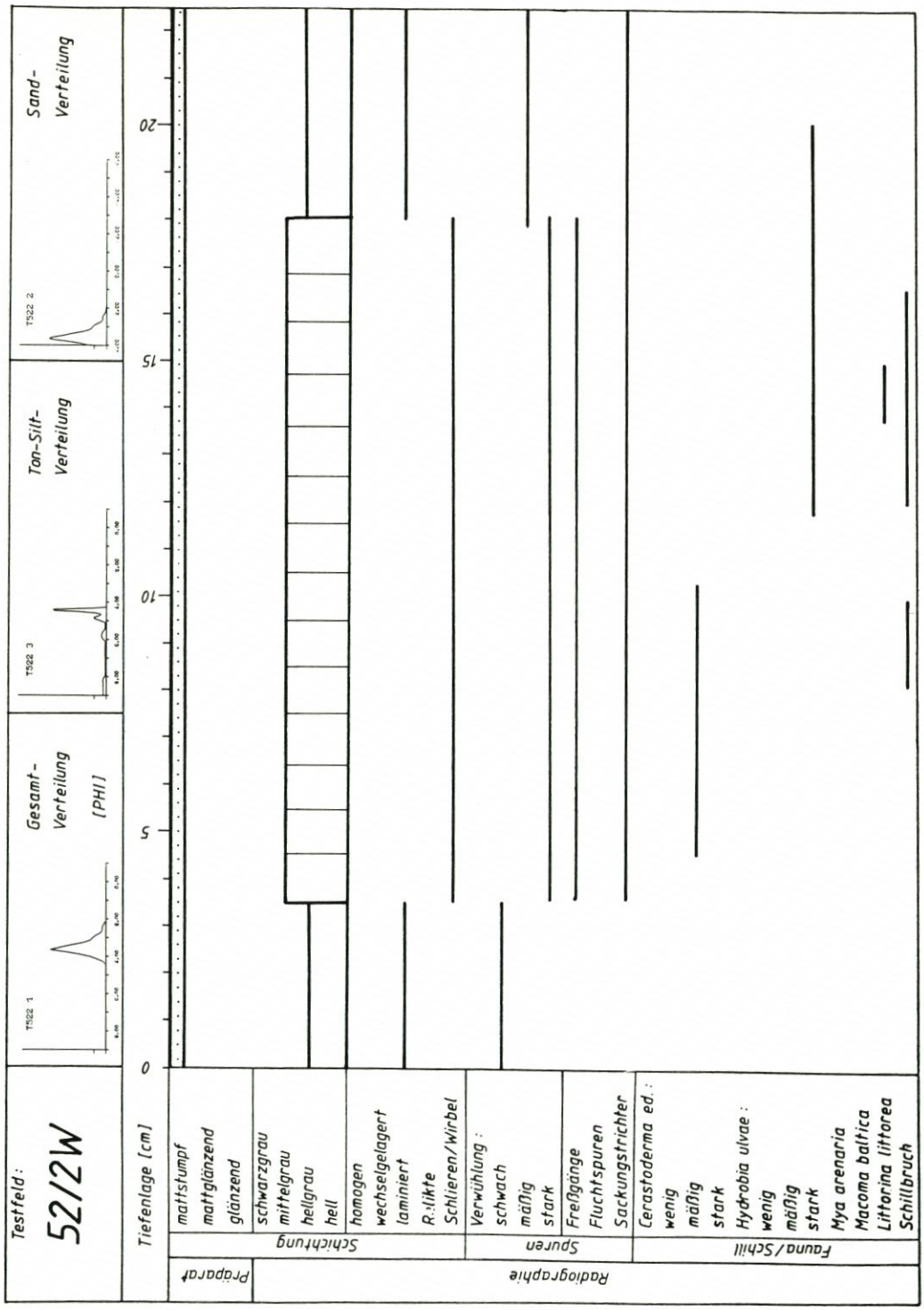


Abb. 47. Stechkasten-Profil 52/2 W

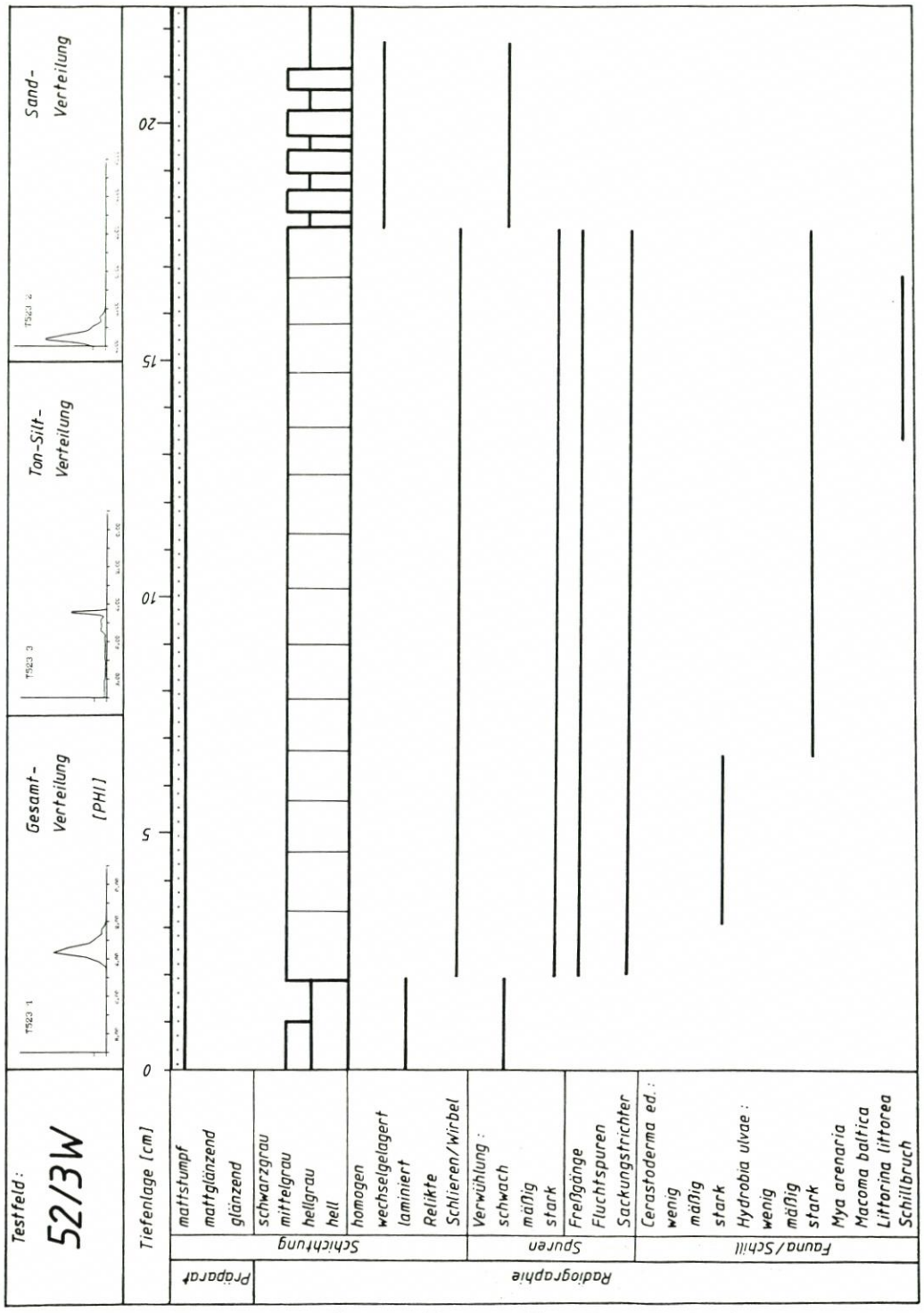


Abb. 48. Stechkasten-Profil 52/3 W

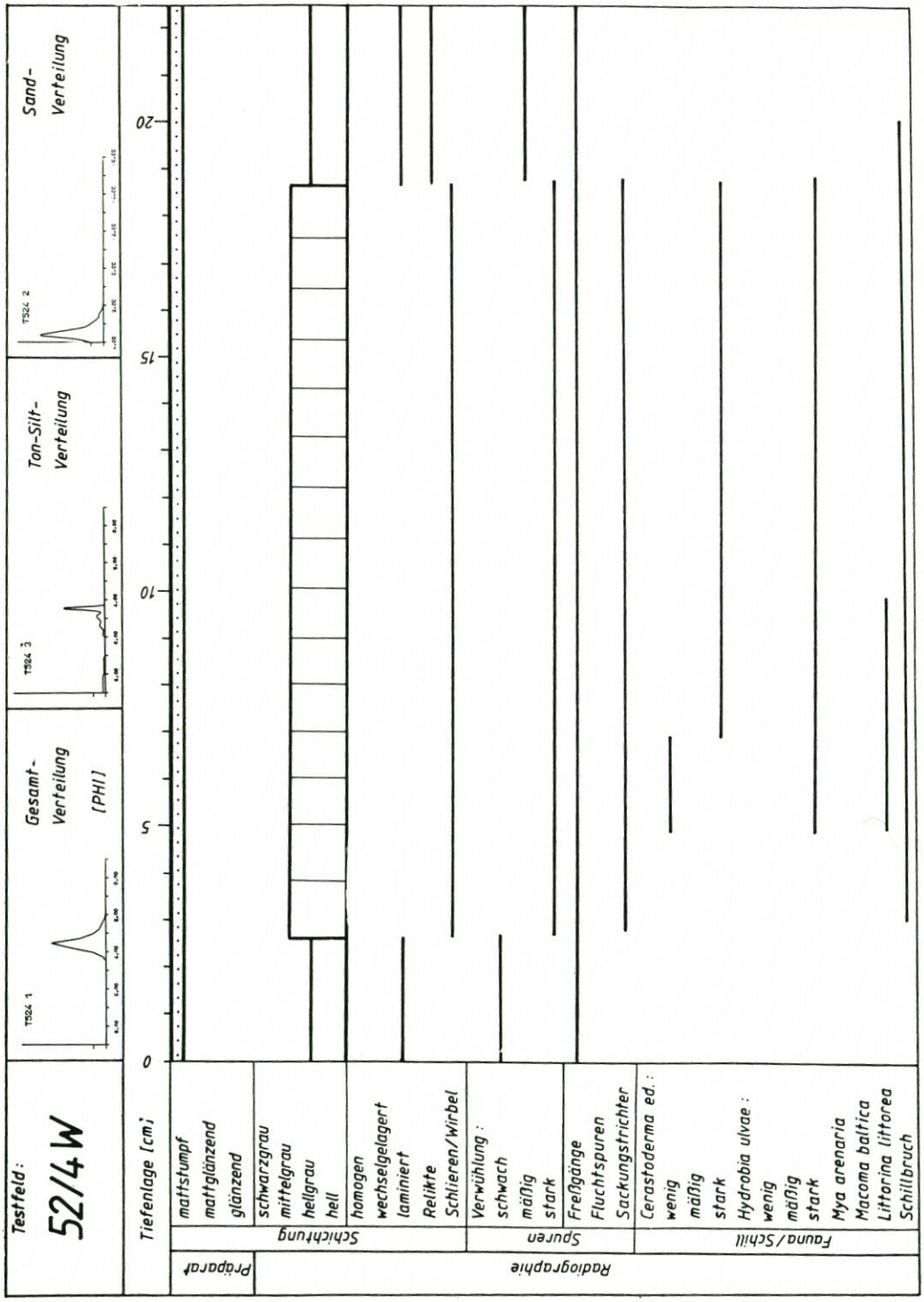


Abb. 49. Stechkasten-Profil 52/4 W

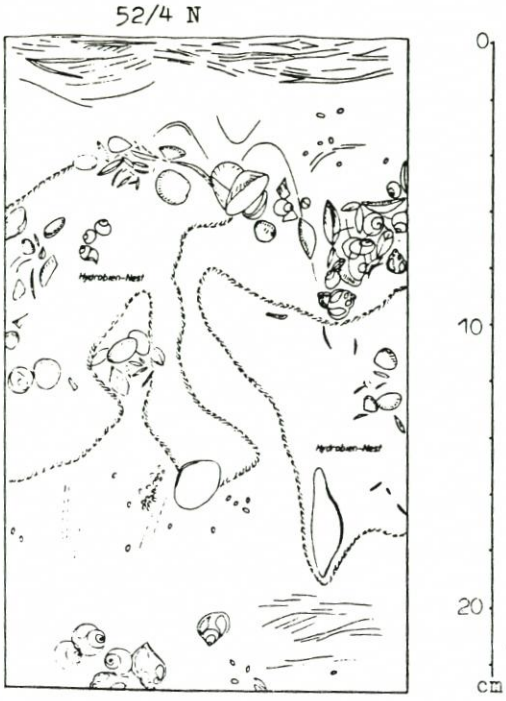


Abb. 50. Zeichnung der radiographischen Dichteunterschiede 52/4 N

10.4 Dünnschliffmikroskopie von Kleinprofilen[1])

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 Wurmgängen 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.

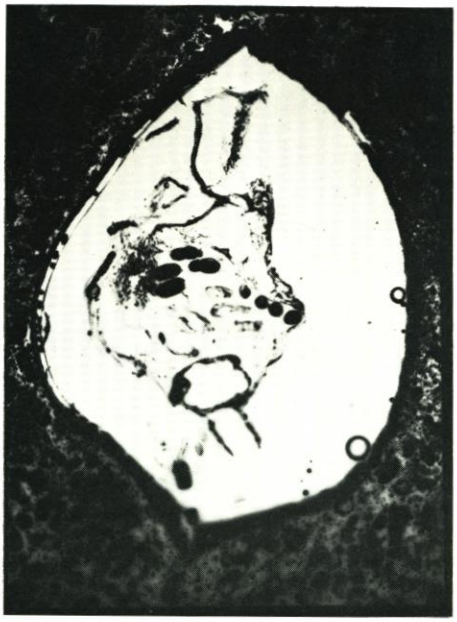


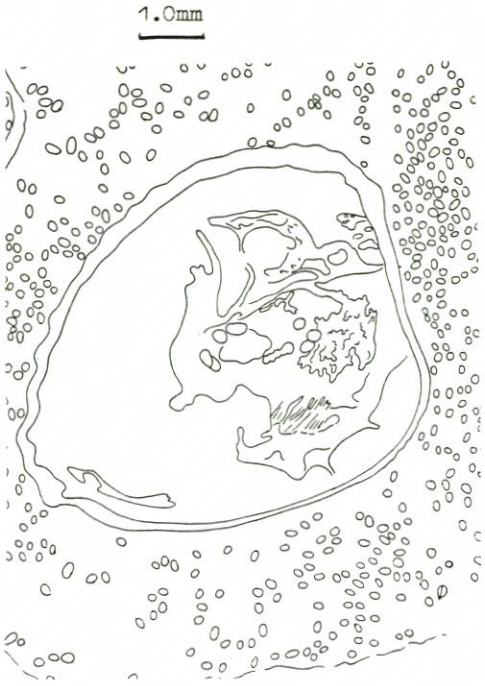
Abb. 51. Cardium edule juv. Anschnitt des Weichkörpers, Kotpellets intern erhalten. Einfach polarisiertes Licht



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).



Orientierung der Objekte im Schnitt

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 Wurmtorso 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

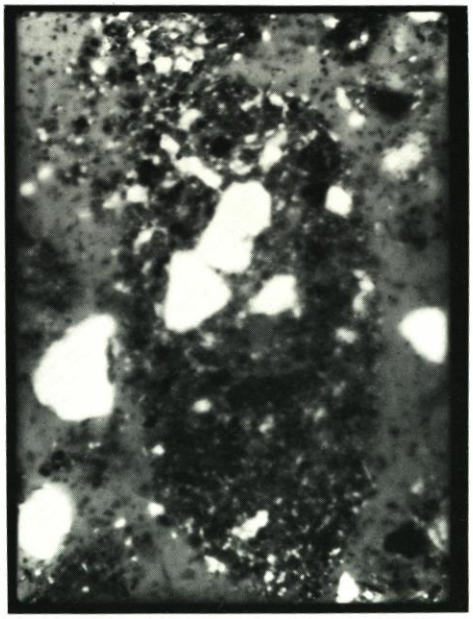


Abb. 54. Kotpellet. Deutlich erkennbar der feinkörnige Aufbau mit hell erscheinenden Quarzkörnern. Polarisationsmikroskop, schräg gekreuzte Nicols



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

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 Schlicksedimentation

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 Hafenbecken oder die hohe Schlicksedimentationsrate im Watt südlich des Hindenburg-Dammes sind dagegen nicht mit Biodeposition zu erklären. In den Hafenbecken 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 Umfanges 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 Bindungungsformen 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-Intersience), 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 Neuwerker 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 Noderney, 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, Köbenhavn, 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 Wattsedimente 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 Wattsedimenten. 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 Aufwachsraten in Schlicksedimenten eines künstlichen, gezeitenoffenen 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 Korngrößendaten. 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.

WOHLENBERG, E.: Die Wattenmeer-Lebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgoländer wiss. Meeresunters., H. 1, 1937.

WOHLENBERG, 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. Scince 202, 1978.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Quantitative Erhebungen über die Makrofauna in einem Testfeld im Büsumer Watt und Abschätzung ihrer Auswirkungen auf den Sedimentverband

Von Hjalmar Thiel, Michael Grossmann u. Hubert Spychala

Zusammenfassung

Zur Beurteilung des Einflusses der Organismen auf das Sediment wurde die Besiedlung eines Testfeldes im Büsumer Watt (Dithmarscher Bucht) durch Makrofauna untersucht. Einzelne Arten der Makrofauna verändern das Sediment deutlich. Ihre Tätigkeiten werden als Biodeposition und Bioresuspension sowie als Bioturbation und Biostabilisation zusammengefaßt. Unter Verwendung von Daten zur Leistung der die Lebensgemeinschaft bestimmenden Arten wird ihr Einfluß auf den Sedimentverband diskutiert. Es zeigt sich, daß der Mangel an quantitativen Daten über den Sedimentumsatz durch die Makrofauna und die natürliche Variabilität biologischer Systeme nur eine grobe Abschätzung zulassen. Die Auswirkungen der Organismen auf das Sediment im Testfeld des Büsumer Watts sind allgemein kurzfristig (mit Zeitskalen von Tagen und Wochen), während die physikalischen Bedingungen mittel- und langfristig (Wochen und Monate) die Sedimentdynamik bestimmen.

Summary

A macrofauna population study was undertaken in a test area of the Büsum intertidal zone (Dithmarscher Bucht) in order to evaluate the influence of the organisms on the sediment characteristics. Particular species of macrofauna can significantly alter the sediment. Their activity can be summarized in terms of biodeposition and bioresuspension as well as bioturbation and biostabilization. Their influence on the sediment characteristics is discussed based on performance data of the primary benthic community species. It is concluded that only gross estimations can be made due to the scarcity of data quantifying the sediment turnover by macrofauna and the natural variability of the biological systems.

The organisms in the Büsum test area have essentially short term influence on the sediment (days to weeks). The long term sediment dynamics (weeks to months) are dominated by the external physical conditions.

Inhalt

1. Einleitung 260
2. Material und Methoden 261
2.1 Untersuchungsgebiete 261
2.2 Untersuchungen 264
2.2.1 Sedimentverteilung 264
2.2.2 Wasserbedeckungszeit 266
2.2.3 Seston 266
2.2.4 Kohlenstoff-Stickstoff-Analyse, Wassergehalt und Glühverlust des Sediments . 267

2.2.5 Sedimentprofil-Kamera 267
2.2.6 Fotografie der Sedimentoberfläche 268
2.2.7 Makrofauna-Stechrohrproben 269
2.2.8 Biomassenbestimmung 269
3. Ergebnisse 269
3.1 Sedimentverteilung und Wasserbedeckungszeit 269
3.2 Seston 271
3.3 Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wassergehalt des Sediments 271
3.4 Makrofauna und Pflanzenbedeckung sowie deren Auswirkungen auf das Sediment . 272
3.4.1 *Hydrobia ulvae* 275
3.4.2 *Cerastoderma edule* (früher: *Cardium edule*) 278
3.4.3 *Macoma balthica* 280
3.4.4 *Mya arenaria* 281
3.4.5 *Nereis diversicolor* 282
3.4.6 *Pygospio elegans* 284
3.4.7 *Heteromastus filiformis* 284
3.4.8 *Arenicola marina* 287
3.4.9 Diatomeen 289
3.4.10 Pflanzenbedeckung 292
3.4.11 Verteilung der Biomasse 293
3.4.12 Beziehungen zwischen dem Vorkommen der wichtigsten Tierarten und den Korngrößenklassen der Sedimente 294
4. Diskussion 297
4.1 Probleme der Quantifizierung biogener Sedimentbeeinflussung 297
4.2 Biodeposition 300
4.3 Bioresuspension 304
4.4 Bioturbation 304
4.5 Biostabilisation 306
4.6 Zur Sedimentdynamik im Büsumer Watt 308
5. Schriftenverzeichnis 311

1. Einleitung

Schlicktransport und Schlicksedimentation sind Prozesse, die in Küstenbereichen von weitreichender Bedeutung sind: Häfen, Schleusenanlagen und Hafenzufahrten verschlicken durch Sedimenttransport und müssen regelmäßig ausgebaggert werden. Die Schlicksedimentation in flachen Küstenbereichen ist ein wesentlicher Vorgang, der seit Jahrhunderten Eindeichungen ermöglichte. Zum Verständnis der Prozesse sind Kenntnisse über das Transportmaterial und die Bedingungen erforderlich, die zur Veränderung gegebener Situationen führen. Erschwert wird die Deutung oder gar die Vorhersage von Schlicktransport und Schlickablagerung durch einen Komplex mechanischer und biogener Faktoren, die bisher nicht ausreichend zu quantifizieren sind. Das äußert sich auch in der Begriffsbestimmung „Schlick" (Figge, Köster, Thiel u. Wieland, 1980), in die die Korngrößenzusammensetzung und der Gehalt an organischer Substanz eingehen. Detritus, biologisch definiert als biogenes, partikuläres Restmaterial, wird aufgrund seines hydrodynamisch wirksamen Äquivalentdurchmessers mit den feinen Sedimentkomponenten abgelagert. Wesentliche ergänzende Komponenten des Detritus sind Aufwuchsbakterien, die die organische Substanz umkomponieren und größeren Organismen als Nahrung dienen. Die Lebensäußerungen dieser größeren Organismen wirken sich gleichzeitig in unterschiedlicher Weise auf die Sedimente aus, wie die folgenden Begriffe anzeigen:

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Biodeposition: Ablagerung aufgenommener Partikel als Sediment durch Organismen, meist in einer anderen als der ursprünglichen Umgebung, häufig unter gleichzeitiger Veränderung des Materials.

Bioresuspension: Aufwirbelung der Sedimente mit der Folge des Abtransportes der Partikel durch Strömungen.

Bioturbation: Verwühlung der Sedimente in Gewässern, einschließlich der Watten, durch Organismen.

Biostabilisation: Verfestigung der Sedimente durch Organismen.

Die Begriffe „Bioresuspension" und „Biostabilisation" sind unseres Wissens bisher nicht benutzt worden, doch sollen die vier Wortbildungen, die die Kombination eines physikalischen Vorgangs mit der Vorsilbe „Leben" bezeichnen, die breite Bedeutung der Organismen für die Sedimente aufzeigen.

Vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) wurde ein Forschungsvorhaben initiiert, das sich mit dem Schlick im Bereich der Nordseewatten befassen sollte. Die biologischen Arbeiten sollten sich auf die Makrofauna (Evertebraten > 0,5 mm) beziehen, und es sind zwei Fragenkomplexe, die in diesem Zusammenhang bedeutsam sind: Einerseits muß zur Beurteilung der Auswirkungen der Organismen auf das Sediment deren Leistung bezüglich des Sedimenttransportes bekannt sein, andererseits wird die Kenntnis der Populationsdynamik benötigt, um die Gesamtleistung einzelner Arten und der gesamten Lebensgemeinschaft abschätzen zu können. Beide Fragestellungen sind in ihrer Bearbeitung sehr aufwendig und konnten von uns nicht nebeneinander bewerkstelligt werden. Da für eine Abschätzung der Transportleistungen der Organismen Werte aus der Literatur herangezogen werden konnten, haben wir uns im biologischen Programmteil, in Absprache mit Hydrologen und Geologen, wesentlich um die Erfassung von Bestandsdichten im Testfeld des Büsumer Watts bemüht. Im Sahlenburger Watt wurden einige Daten zusätzlich gesammelt.

Danksagung: Allen Beteiligten, durch deren Einsatz und Hilfe unser Projektteil ermöglicht und gefördert wurde, sei an dieser Stelle gedankt: dem Forschungsleiter des KFKI, Herrn Ltd. Baudirektor Dr. H. Rohde und dem Geschäftsführer des KFKI, Herrn Ltd. Baudirektor J. Sindern, für die Befürwortung unseres Vorhabens und für die Bereitstellung von Personal- und Sachmitteln aus Fonds des Bundesministeriums für Forschung und Technologie; dem wissenschaftlichen Koordinator des Projektes, Herrn Dr. K. Figge, Deutsches Hydrographisches Institut; dem Leiter des Dezernats für Gewässerkunde Büsum im Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Herrn Dr. Ing. P. Wieland, und seinen Mitarbeitern für Beratungen und Diskussionen, für technische Hilfe bei den Außenarbeiten und für den verwaltungstechnischen Ablauf; den Kollegen der Geologisch-Paläontologischen Institute, Prof. Dr. R. Köster und Dr. R. Gast, Kiel, Prof. Dr. E. T. Degens und Dr. S. Kempe, Hamburg, für gute Zusammenarbeit und Diskussionen; den Studentinnen S. Jahns, I. Kiehn und P. Scheewe für die Bearbeitung von Probenmaterial und Frau Dipl.-Biol. B. Mein für die Unterstützung bei den Auswertungen.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

Als Probengebiete wurden durch die Forschungsgruppe das Sandwatt der Meldorfer Bucht und das Schlickwatt vor Sahlenburg ausgewählt (Abb. 1). Diese Gebiete boten sich für

Untersuchungen an, weil dort bereits in früheren Jahren wichtige Grundlagendaten ermittelt worden waren (ELWERT, 1977; SIEFERT, 1979).

Um Prognosen über die Ursachen des Schlickfalls und der Erosion erstellen zu können, waren simultane Messungen zahlreicher Naturvorgänge in Schlick- wie auch in Nicht-Schlickgebieten geplant. Erste Begehungen der bereits vorhandenen und vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide (ALW), Dezernat Gewässerkunde, Büsum, mit Pflöcken markierten fünf Profilschnitte in der Meldorfer Bucht ergaben, daß im Gebiet zwischen den Profilen I und II (südlich von Deichhausen) auf einer Fläche von ca. 1 km² die in der gesamten Bucht vorkommenden wesentlichen Sedimentarten vorhanden sein könnten.

Diese Annahme wurde durch detaillierte Untersuchungen, insbesondere der Arbeitsgruppe Küstengeologie der Universität Kiel, später bestätigt (GAST, KÖSTER u. RUNTE, 1984).

Vergleichende Untersuchungen biologischer Einflußgrößen auf die verschiedenen Watttypen (Schlick-, Misch-, Sandwatt) sollten sich daher in diesem Areal der Meldorfer Bucht durchführen lassen.

Da die Auswertung benthischer Proben und die Bestimmung der Organismen sehr aufwendig sind, wurde unter Berücksichtigung der vorhandenen Arbeitskapazität und des beschränkten Zeitraums das Büsumer Watt als Untersuchungsschwerpunkt gewählt. Das Sahlenburger Watt diente dem ergänzenden Vergleich.

Im Nordteil der Meldorfer Bucht, vor Deichhausen (Abb. 2), wurde im Büsumer Watt eine Testfläche ausgewählt, die von den bereits vorhandenen Profilen I und II des ALW Heide begrenzt war. Dieses etwa 1 km² große Gebiet wurde im Frühjahr 1978 mit einem Stationsraster – insgesamt 116 Stationen – versehen (Abb. 3a). Die Stationen wurden mit

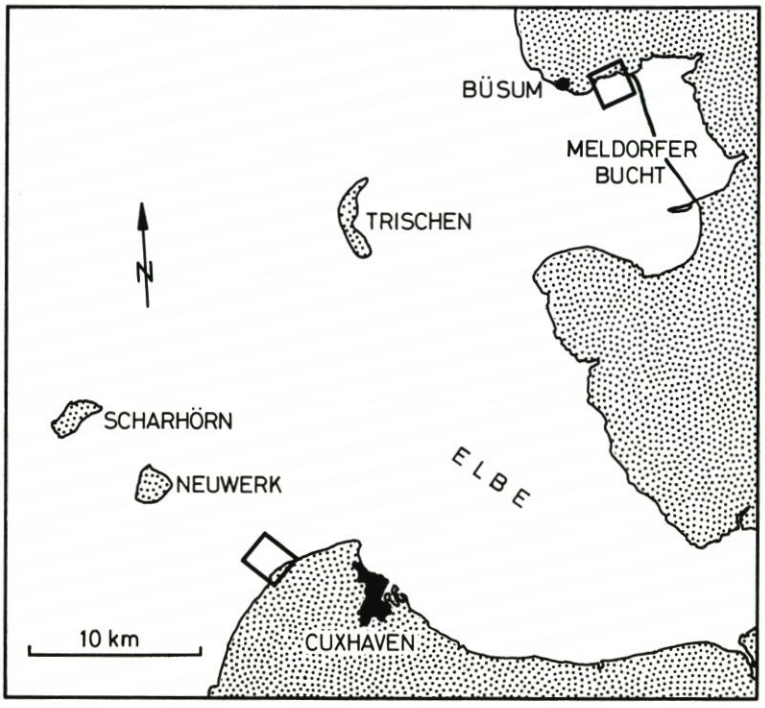


Abb. 1. Das Gebiet der Dithmarscher Bucht und der Elbmündung mit den Untersuchungsgebieten im Büsumer Watt und im Sahlenburger Watt



Abb. 2. Luftaufnahme der nördlichen Dithmarscher Bucht mit den Profilen I und II. Freigegeben durch L.A.H. 2782/79

Holzpflöcken gekennzeichnet, deren Abstand untereinander etwa 100 m betrug. Nach der Zerstörung der Markierungen durch den Eisgang des Winters 1978/79 wurden die Stationen neu eingemessen und markiert, um die Untersuchungen fortsetzen zu können. Abb. 3b zeigt das Stationsnetz mit den veränderten Watthöhenlinien des Testgebietes nach der Vermessung des ALW Heide im Sommer 1979.

Im Sahlenburger Watt wurde ein Profilschnitt (Profil III) vor der Küste von Arensch eingerichtet (Abb. 4). Dieser Schnitt ging von einem Buhnenkopf aus, wurde mit dem Wasserturm Neuwerk als Fixpunkt eingepeilt und endete nach 1000 m auf dem „Profil Arensch" der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk des Amtes für Strom- und Hafenbau, Hamburg.

2.2 Untersuchungen

Die Primärdaten aus diesem Programm sind auf Magnetband (Hewlett Packard 9815 A) gespeichert und werden im Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universität Hamburg aufgehoben.

2.2.1 Sedimentverteilung

Die Beschaffenheit der Sedimente an den einzelnen Stationen wurde während der Probennahme im Gelände abgeschätzt und nach den dort gewonnenen Erfahrungswerten anhand der Oberflächenfotografie klassifiziert. Vergleiche mit den von GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984) analysierten Silt-Gehalten ergaben eine gute Übereinstimmung der Resultate. Für die Auswertung der Daten des Jahres 1979 wurden die genaueren Werte der Laboranalysen dieser Autoren verwendet.

Als Klassifizierungsgröße verwendeten GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984) den prozentualen Anteil der Partikelgrößen kleiner als 63 µm. Bei dem Vergleich der von uns durchgeführten Sedimentansprache (Sand, Schlick-Sand, Schlick) mit den von GAST, KÖSTER u. RUNTE gefundenen Analysenwerten ergaben sich die in Tab. 1 zusammengestellten Beziehungen.

Tabelle 1
Beziehungen zwischen Grobansprache im Gelände und Analysenwerten von GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984)

Grobansprache im Gelände	Werte der Pipette-Analysen
Sand	< 15 % Silt
Schlick-Sand	15–35 % Silt
Schlick	> 35 % Silt

Bei der Übertragung der Daten auf Magnetband wurden die von uns ermittelten Sedimenttypen als Sandwatt = 10 %, Mischwatt = 25 %, Schlickwatt = 35 % aufgezeichnet.

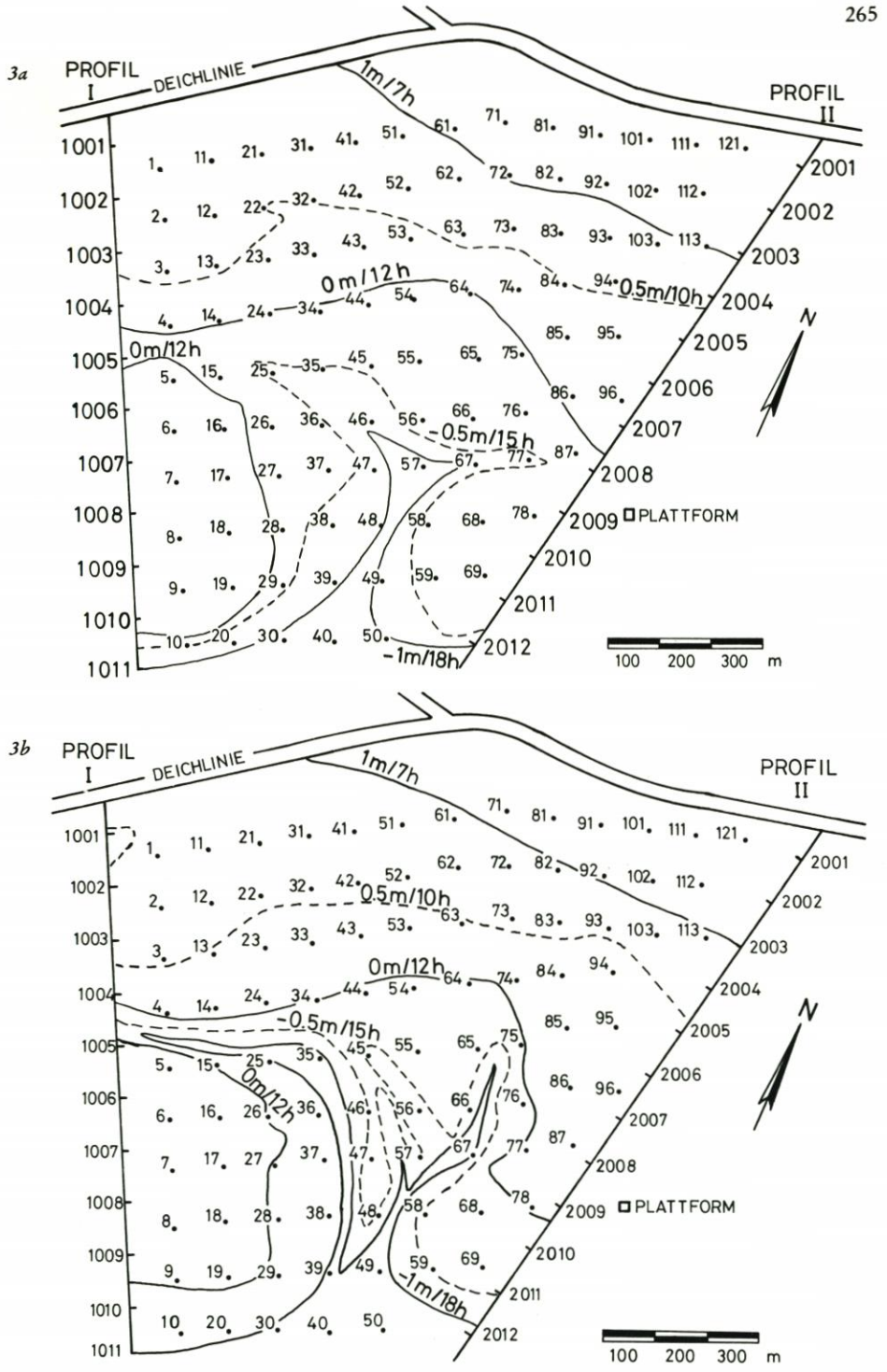


Abb. 3. Das Testfeld im Büsumer Watt, begrenzt durch Profil I (Stationen 1001–1011) und Profil II (Stationen 2001–2012), mit den Stationsnummern im Feld, mit Tiefenlinien (bezogen auf NNIOm) und Wasserbedeckungszeiten (12 h). ■ Beobachtungsplattform außerhalb des Testfeldes. 3a = 1978, 3b = 1979

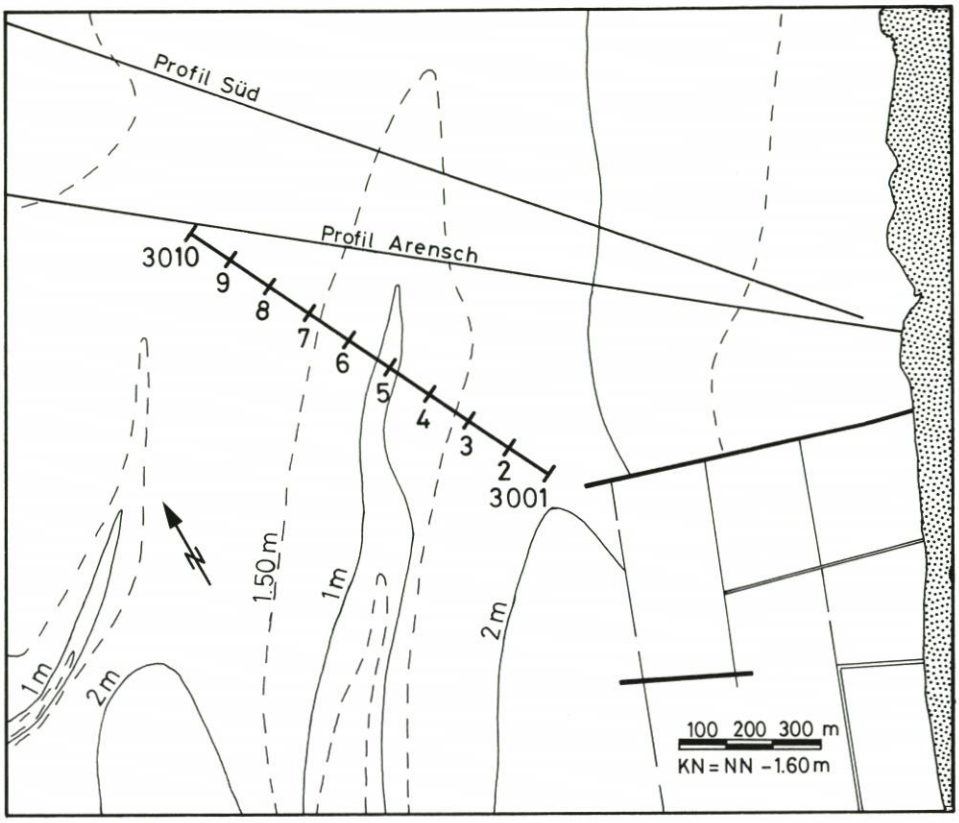


Abb. 4. Der Schnitt im Sahlenburger Watt mit den Stationen 3001–3010 und Tiefenlinien. Rechts im Bild Lahnungen

2.2.2 Wasserbedeckungszeit

Anhand des vom ALW Heide zur Verfügung gestellten Materials (Tidenkurven und Watthöhenaufnahmen) wurde für jede Station im Büsumer Watt die Wasserbedeckungszeit an den Probenterminen errechnet und in die Auswertung einbezogen. Die theoretischen Wasserbedeckungszeiten sind in die Abbildungen 3a und 3b mit eingetragen.

2.2.3 Seston

Der Gehalt an Seston, der im Wasser suspendierten und sedimentierfähigen bzw. abfiltrierbaren Substanzen, ist für die Kalkulation der Leistung filtrierender Organismen bedeutsam. Die Arbeitsgruppen der Geologisch-Paläontologischen Institute der Universitäten Kiel und Hamburg, des ALW Heide und des Instituts für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universität Hamburg haben deshalb mehrfach den Sestongehalt im Wattwasser bestimmt. Unsere Arbeitsgruppe verwendete dafür Schöpfwasserproben, die in halbstündi-

gem Abstand von der im Büsumer Watt aufgestellten Forschungsplattform genommen wurden. Die Wasserproben wurden mittels der Filtrationseinrichtung SM 16510 von Sartorius und einer Unterdruckluftpumpe durch vorgewogene Membranfilter SM 11107 mit der Porenweite 0,2 µm filtriert. Danach wurde bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

2.2.4 Kohlenstoff-Stickstoff-Analyse, Wassergehalt und Glühverlust des Sediments

Um einen Anhaltspunkt über die Verteilung des organischen Anteils im Sediment zu haben und daraus Rückschlüsse auf Nahrungsangebot und Besiedlungsattraktion ziehen zu können, wurden an ausgewählten Stationen mit Hilfe eines Stechrohrs (Fläche der Öffnung = 1 cm^2) Sedimentproben entnommen und in 1-cm-Schichten in Glasröhrchen überführt. Die Proben wurden sofort gekühlt und unmittelbar nach der Rückkehr nach Hamburg eingefroren. Die oberste Schicht wurde jeweils benutzt, um nach Trocknung (60 °C/24 h) und Homogenisierung (Kugelmühle/5 min) eine Analyse von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) mit einem Elementar-Analyzer Mod. 1104 der Firma Carlo Erba Strumentazione vorzunehmen.

Parallelproben wurden verwendet, um den Wassergehalt des Sediments zu bestimmen. Im Anschluß an die Trocknung des Sediments zur Bestimmung des Wassergehalts wurden die Proben bei 485 °C verascht und so der Glühverlust (Anteil C_{org}) im Sediment bestimmt. Zur Bestimmung des gesamten im Sediment gebundenen Kohlenstoffs (C_{ges}) wurden weitere Parallelproben nach der Trocknung bei 600 °C verascht.

2.2.5 Sedimentprofil-Kamera

Die Grenzschicht Sediment-Wasser wurde mit Hilfe einer Sedimentprofil-Kamera untersucht. Aufbau und Funktion der Kamera gehen aus Abb. 5 hervor. Ähnliche Vorrichtungen wurden von Rhoads u. Young (1971) und Rhoads u. Cande (1971) verwendet.

Eine 16-mm-Filmkamera wurde für Einzelbildschaltung, Blitzsynchronisation und Unterwassereinsatz umgerüstet. Vor dem Kameragehäuse wurde ein Klarsichtvorsatz (Wasser-Alkohol-Gemisch als Füllung) mit einem Umlenkspiegel befestigt. Mit der Schneidkante in das Sediment gedrückt, nimmt die Kamera Bilder vom Geschehen in der Wasser-Sediment-Grenzschicht und in der oberen Sedimentschicht auf.

Die Kamera wurde an Stationen mit verschiedenen Sedimenten und unterschiedlichen Strömungsverhältnissen eingesetzt. Insgesamt wurden ca. 220 m Farbfilm mit ca. 18 000 Einzelaufnahmen belichtet. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe eines Bildbetrachters und mit einem Filmprojektor, mit dem die Zeitraffereffekte sichtbar gemacht werden konnten.

Ziel der mit der Sedimentprofil-Kamera durchgeführten Fotografie war es, die Tidephasen mit besonderen Aktivitäten der Makrofauna herauszufinden und artspezifische Verhaltensweisen zu erkennen. Zusätzlich sollten Informationen über den Transport von Organismen bei größeren Wind- bzw. Strömungsgeschwindigkeiten gewonnen werden.

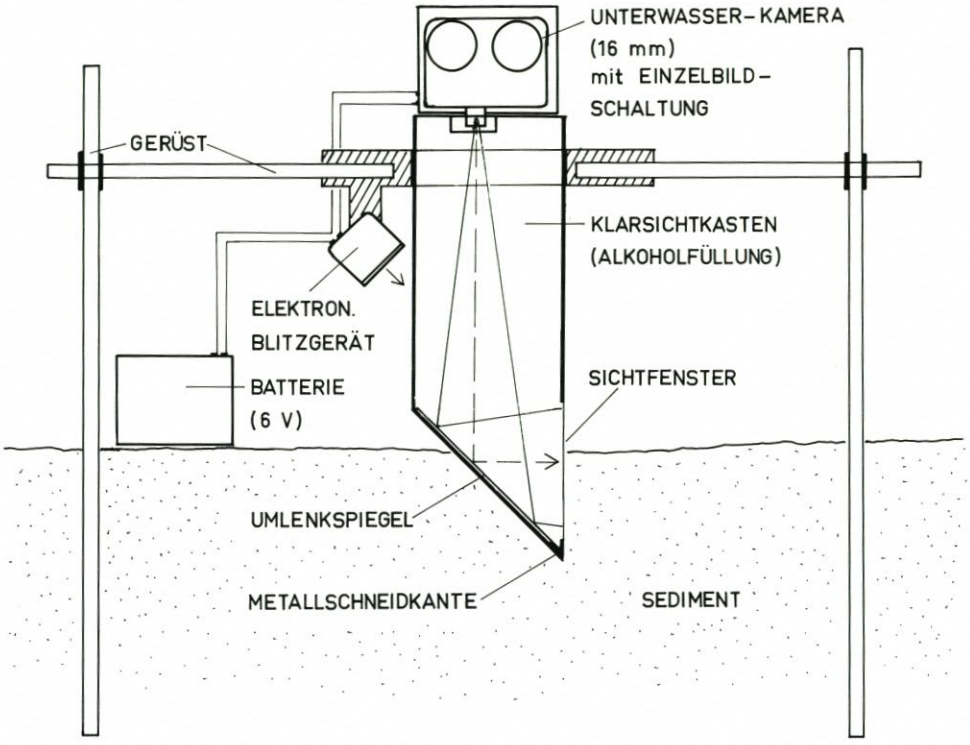


Abb. 5. Sedimentprofil-Kamera im Schema

2.2.6 Fotografie der Sedimentoberfläche

Da die Auswertung biologischer Sedimentproben einen erheblichen Zeitaufwand erfordert, hätte bei regelmäßiger Beprobung entweder auf die engmaschige Erfassung des gesamten Testfeldes verzichtet werden müssen, oder es hätten nur wenige Aufsammlungen gemacht werden können. Zur Erfassung der Sukzessionen einzelner Arten sind aber Untersuchungen in mindestens 1- bis 2monatlichen Abständen erforderlich. Um das Testfeld dennoch ganz erfassen zu können, wurde daher ein neues Verfahren getestet und später erfolgreich eingesetzt: Alle sechs Wochen wurden bei Niedrigwasser an jeder Station zwei Sedimentflächen von jeweils $^1/_3$ m^2 auf Farbdiafilm fotografiert.

Die Besiedlungsdichte der wichtigsten für die Sedimentumlagerung und Schwebstoffbindung verantwortlichen Organismen konnten wir auf diese Weise ausreichend genau quantifizieren und anhand von Vergleichsproben mit einem Stechrohr ermitteln, inwieweit die Fotografien den tatsächlichen Sachverhalt widerspiegelten. Mit der Oberflächenfotografie wurden neben der Besiedlungsdichte weitere Parameter erfaßt: Rippelform, -größe und -richtung, Verbreitung höherer Pflanzen und Algen sowie mit eingeschränkter Aussagemöglichkeit Sedimentfarbe und Sedimenttyp. Die Ausdehnung der Diatomeenrasen konnte ebenfalls (in 5 %-Stufen) abgeschätzt werden.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

2.2.7 Makrofauna-Stechrohrproben

Um die Grundlagen für die weiteren biologischen Untersuchungen zu erhalten, wurden auf den Profilen I und II und im Testfeld Aufsammlungen der Makrofauna mit Hilfe eines Stechrohres vorgenommen. Das Rohr hatte die lichte Weite von 8 cm und ergab pro Einstich (Tiefe 10 cm) eine Probenmenge von ca. 500 ml Sediment. Die Proben (2 bis 3 Parallelproben pro Station) wurden in einem Sieb der Maschenweite 0,5 mm ausgewaschen. Der Rückstand wurde in 8prozentigem Formol konserviert. Im Labor erfolgten das Zählen und Bestimmen der Arten.

2.2.8 Biomassenbestimmung

Zur Bestimmung der Biomassen wurden jeweils alle Individuen einer Art und Probe benutzt. Die Tiere wurden bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, bei 485 °C im Muffelofen vier Stunden geglüht und erneut gewogen. Aus der Gewichtsdifferenz wurde das aschefreie Trockengewicht ermittelt.

3. Ergebnisse

3.1 Sedimentverteilung und Wasserbedeckungszeit

Die Kartierung der Sedimentverteilung im Büsumer Testfeld wurde im Juli 1978 mit der regelmäßigen Oberflächenfotografie begonnen. Zur Klassifizierung der Sedimente wurden 661 Fotos aus dem Jahr 1978 und 988 Fotos aus dem Jahr 1979 analysiert.

Die in Abb. 6a dargestellten Sedimentverhältnisse zeigen Durchschnittswerte, die an vier Terminen zwischen Mitte Juli und Mitte November 1978 gewonnen worden sind. Sie basieren auf acht Aufnahmen je Station, zwei bei jeder Begehung.

Die Stationen 45, 46, 55 und 56 konnten 1978 an keinem der Termine erreicht werden, da die Schlickmächtigkeit eine Begehung im Zentrum des ehemaligen Baggerlochs nicht zuließ. Vor dem Deich lag ein 200 bis 300 m breiter Sandwattbereich, der seewärts in einen Mischwattstreifen von ca. 100–150 m überging und der das Schlickwattfeld im Zentrum des Testgebietes nahezu vollständig umschloß.

Für das Jahr 1979 ließ sich anhand der Fotografien eine deutliche Veränderung der Sedimentverhältnisse erkennen (Abb. 6b). Von sechs Fototerminen zwischen Mitte April und Mitte Oktober 1979 konnten jeweils 12 Fotografien pro Station für die Beschreibung der Sedimente ausgewertet werden.

Die 1978 wegen der großen Schlickmächtigkeit von uns gemiedenen Stationen waren ab Mai 1979 gefahrlos zu betreten. Im Baggerloch hatten sich die Sedimente offensichtlich konsolidiert. Eine Auswirkung auf die Korngrößenverteilung konnte jedoch nicht festgestellt werden, da die Vergleichsproben aus dem Jahr 1978 nicht genommen werden konnten. Der Sandwattbereich hatte sich im Vergleich zu 1978 unter Zurückdrängung des Mischwatts z. B. um die Stationen 3, 4, 11 und 13 ausgedehnt. Der 1978 in der 600-m-Linie (Abstand vom Deich) noch 700 m breite Schlickbereich war im Jahr 1979 nur noch etwa 400 m breit bzw. in

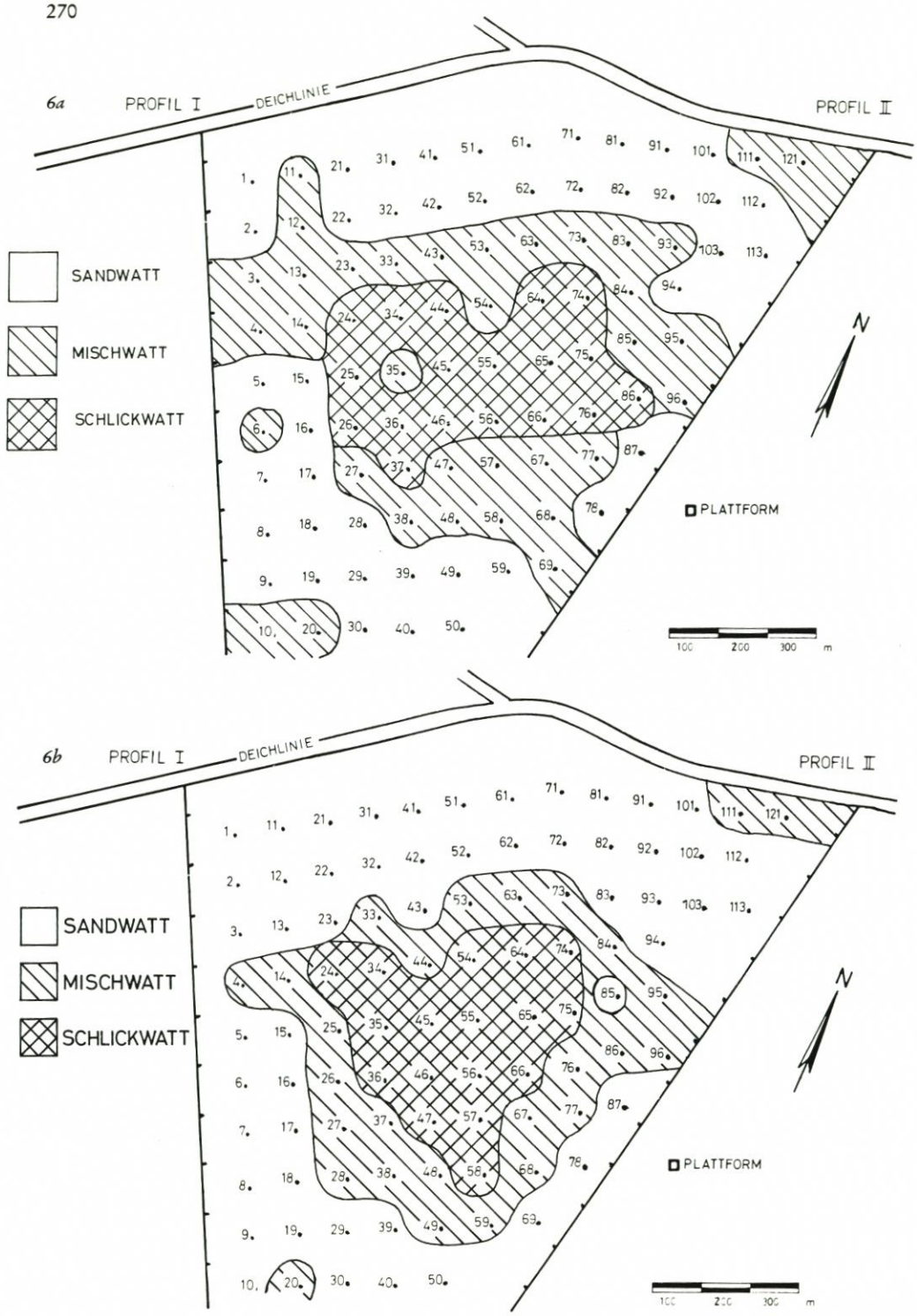


Abb. 6. Die Sedimentverteilung im Testfeld des Büsumer Watts nach der Oberflächenfotografie
6a = im Sommer und Herbst 1978; 6b = von April bis Oktober 1979

seinen Randzonen zu einem Mischwatt geworden, und seine Schlickmächtigkeit war deutlich zurückgegangen. 1979 war der gesamte Schlick- und Mischwattbereich des Testfeldes von einem Sandwatt umgeben. Außer dem zentralen Gebiet mit hohem Schlickanteil war im Testfeld nur noch um die Stationen 111 und 121 ein kleiner schlickiger Bereich verblieben.

Für die Berechnung der Wasserbedeckungszeiten aller Probenorte und Termine von 1978 und 1979 wurde die Watthöhenaufnahme des Jahres 1979 verwendet. Der Bereich über NN ± 0 m hatte sich von 1976 (Abb. 3a) bis 1979 (Abb. 3b) nur unwesentlich verändert, so daß die Verwendung der Höhendaten von 1979 auch für 1978 zulässig war.

3.2 Seston

Im Oktober 1978 und im Juni 1979 wurden 25 Oberflächen-Schöpfwasserproben auf ihren Sestongehalt untersucht. Die Proben wurden von der im Büsumer Watt in der Nähe des Testfeldes aufgestellten Forschungsplattform aus entnommen und ergaben im Juni bei ruhiger Wetterlage Suspensionswerte von 28 bis 80 mg Trockengewicht pro Liter. Der höchste Wert wurde zwei Stunden vor, der niedrigste bei Hochwasser gemessen. Mit der Sedimentprofil-Kamera waren Trübungsunterschiede im bodennahen Wasser direkt zu erkennen.

Der Mittelwert von 28 Sestonproben des Juni-Termins (41 mg/l) wurde für die Berechnung der Filtrations- und Depositionsleistung von *Cerastoderma edule* im Büsumer Watt verwendet.

3.3 Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wassergehalt des Sediments

Der Gesamtkohlenstoffgehalt des von makroskopisch erkennbarer Fauna gesäuberten Sediments lag in typischen Arealen des Untersuchungsgebiets im Büsumer Watt zwischen 0,5 und 5 % des Trockengewichts (Tab. 2). Die Werte lagen um so höher, je größer der Siltanteil im Sediment war (vgl. hierzu Degens u. Kempe, 1980).

In Abb. 7 wird ein Beispiel für die Kohlenstoffgehalte einer typischen Stationsabfolge im Büsumer Watt während des Sommers 1979 wiedergegeben.

Die Werte für das Verhältnis C/N lagen im Büsumer Watt bei 14 und damit relativ hoch. Jedoch fand Kempe (1980) identische Werte.

Tabelle 2
Kohlenstoffgehalt verschiedener Wattsedimente im Büsumer Testfeld, nach unterschiedlichen Methoden bestimmt. Kohlenstoff in % des Trockengewichts

	ohne makroskopisch erkennbare Fauna C-N Analyse	mit Fauna geglüht bei 485 °C	bei 600 °C
Sandwatt	0,5–1	3	4,5
Mischwatt	1,5–2,8	3–7	6–9
Schlickwatt	2,5–5	7	9

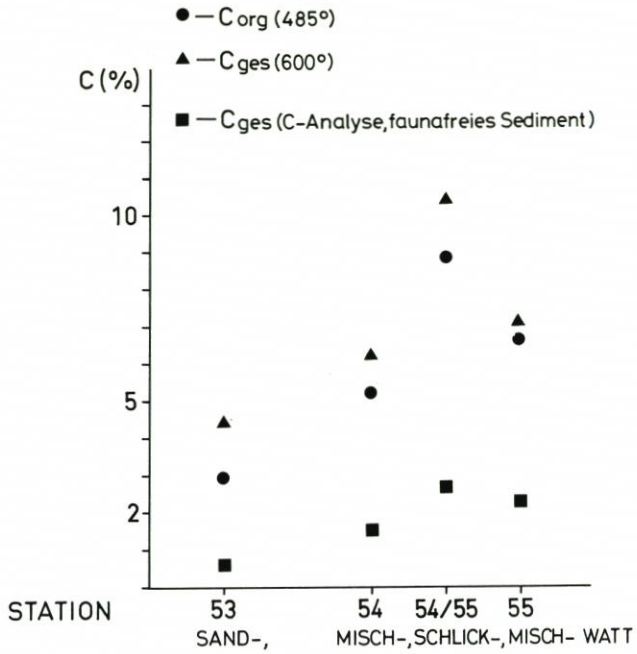


Abb. 7. Kohlenstoffwerte an vier Stationen des Testfeldes mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen (August 1979)

Der Wassergehalt der Sedimente lag im Testgebiet in der Regel zwischen 20 und 30 % (1 Stunde nach Freifallen der Oberfläche in den obersten 2 cm), wobei mit steigendem Siltanteil auch der Wassergehalt stieg. Für reine Schlickgebiete (Siltanteil > 50 %) wird im allgemeinen ein höherer Wassergehalt gefunden (POSTMA, 1967; RAGUTZKI, 1973), doch treten solche Werte im Testgebiet nur vereinzelt auf.

3.4 Makrofauna und Pflanzenbedeckung sowie deren Auswirkungen auf das Sediment

Im Verlauf der Untersuchungen wurden aus 310 ausgewerteten Stechrohrproben aus dem Büsumer Watt die in Tab. 3 aufgeführten 29 Tierarten bestimmt. Mit * sind diejenigen Arten gekennzeichnet, die mit Hilfe der Wattoberflächen-Fotografie gezählt werden konnten. Nach Abschluß der Bestimmungsarbeiten und der Auszählungen wurden die Tiere zur Feststellung der Biomassen verwendet.

Wesentliche ökologische Bedeutung haben in marinen Lebensräumen häufig nur wenige Arten, und das gilt auch für das Watt (z. B. BEUKEMA, 1981). In der Darstellung beschränken wir uns daher auf die acht Arten, in Tab. 3 mit + gekennzeichnet, die durch die Auswirkungen ihrer Lebensäußerungen auf den Sedimentverband Bedeutung haben. Die anderen Arten sind für das von uns untersuchte Watt bezüglich der biogenen Sedimentgestaltung weniger wichtig, obwohl sich ähnliche Einflüsse von Tieren mit sich entsprechenden Lebensweisen in der Wirkung addieren können.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Tabelle 3
Artenliste

GASTROPODA			
Hydrobia ulvae	(PENNANT 1777)	+	*
Littorina littorea	(LINNÉ 1758)		*
Retusa truncatula	(BRUGUIÈRE 1792)		
BIVALVIA			
Mytilus edulis	LINNÉ 1758		*
Cerastoderma edule (Cardium edule)	(LINNÉ 1758)	+	*
Spisula subtruncata	(DA COSTA 1778)		
Macoma balthica	(LINNÉ 1758)	+	
Angulus tenuis	(DA COSTA 1778)		
Mya arenaria	LINNÉ 1758	+	*
Mysella bidentata	(MONTAGU 1803)		
POLYCHAETA ERRANTIA			
Eteone longa	(FABRICIUS 1780)		
Anaitides maculata	(LINNE 1767)		
Anaitides mucosa	(OERSTEDT 1843)		
Nereis diversicolor	MÜLLER 1776	+	
Nephtys hombergii	SAVIGNY 1818		
Nephtys longosetosa	OERSTEDT 1843		
POLYCHAETA SEDENTARIA			
Scoloplos armiger	(MÜLLER 1776)		
Polydora ligni	WEBSTER 1879		
Pygospio elegans	CLAPARÈDE 1863	+	*
Tharix marioni	(SAINT-JOSEPH 1894)		
Heteromastus filiformis	(CLAPARÈDE 1864)	+	*
Scolelepis squamata	(MÜLLER 1798)		
Arenicola marina	(LINNÉ 1758)	+	*
Lanice conchilega	(PALLAS 1766)		*
Capitella capitata	(FABRICIUS 1780)		
OLIGOCHAETA			
Peloscolex benedeni	(UDEKEM 1855)		
CRUSTACEA			
Corophium volutator	(PALLAS 1766)		*
Crangon crangon	(LINNÉ 1758)		
Carcinus maenas	(LINNÉ 1758)		

\+ im Text behandelte Arten * fotografisch erfaßte Arten

Unsere Angaben zur Verbreitung der einzelnen Arten beruhen auf den Auswertungen der Stechrohrproben und der fotografischen Aufnahmen. Mit der Fotografie werden allerdings nur diejenigen Arten erfaßt, die an der Sedimentoberfläche vorkommen oder sichtbare Hinweise wie Kriechspuren, Löcher und Kothaufen hinterlassen. Dafür ließen sich aber auch Arten, die in tieferen Sedimentschichten vorkommen, wie z. B. *Arenicola marina* oder *Mya arenaria*, also nicht mit dem Stechrohr erfaßt wurden, gut quantifizieren. Auch die Dichte so empfindlicher Organismen, wie z. B. *Heteromastus filiformis*, die beim Sieben leicht zerstört werden, ließ sich durch Auszählen ihrer Kothaufen besser durch die Fotografie bestimmen. Auch die Algen- und Diatomeenbestände konnten fotografisch in ihrer Ausdehnung erfaßt werden.

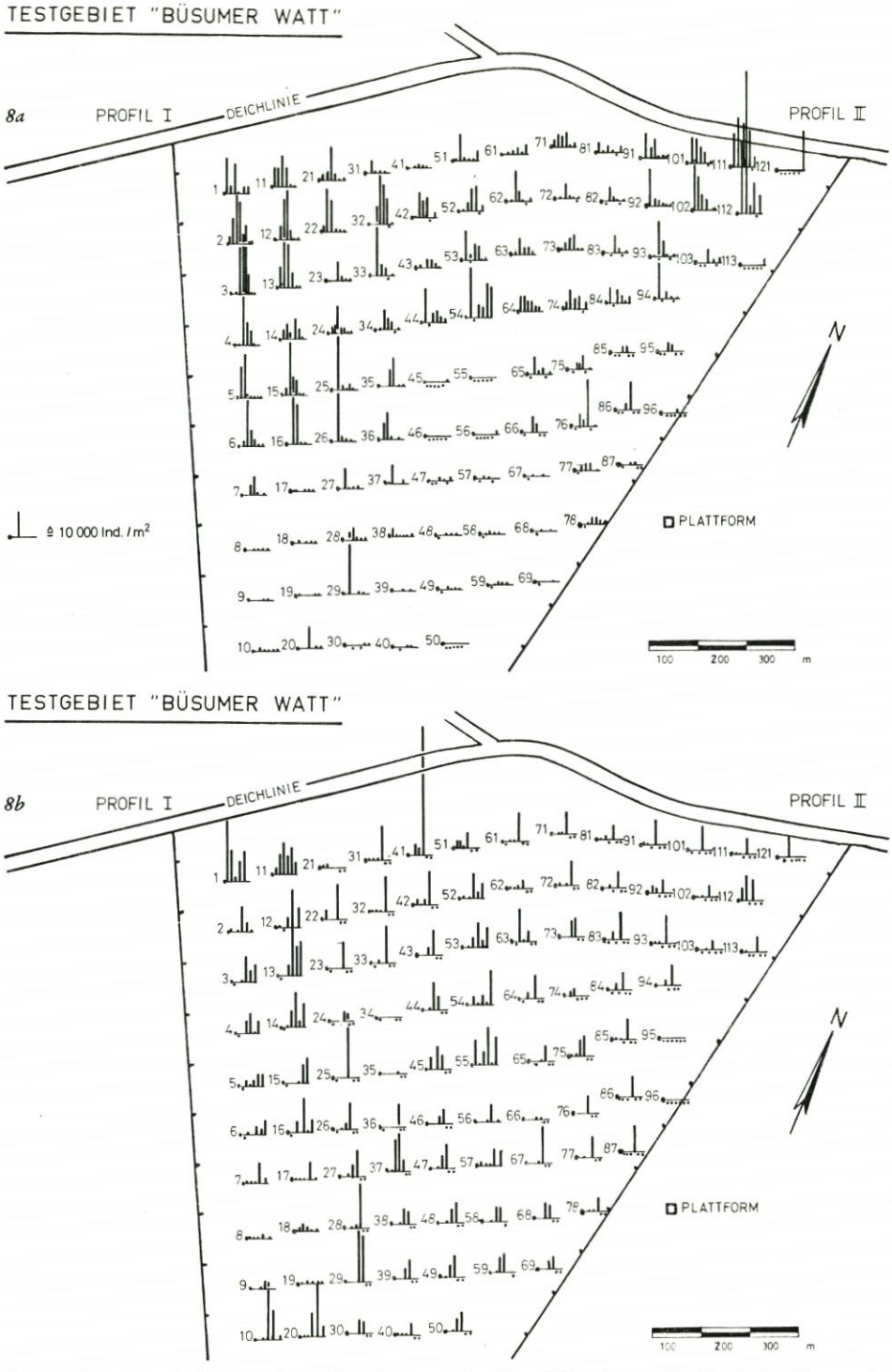


Abb. 8. Besiedlungsdichte von *Hydrobia ulvae* nach der Oberflächenfotografie. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, daß keine auswertbare Fotografie vorliegt.
8a = 1978: 18. 7., 28. 8., 11. 10., 8. 11.; 1979: 14. 4., 15. 5.
8b = 1979: 14. 6., 3. 7., 16. 8., 10. 10.; 1980: 4. 6., 15. 9.

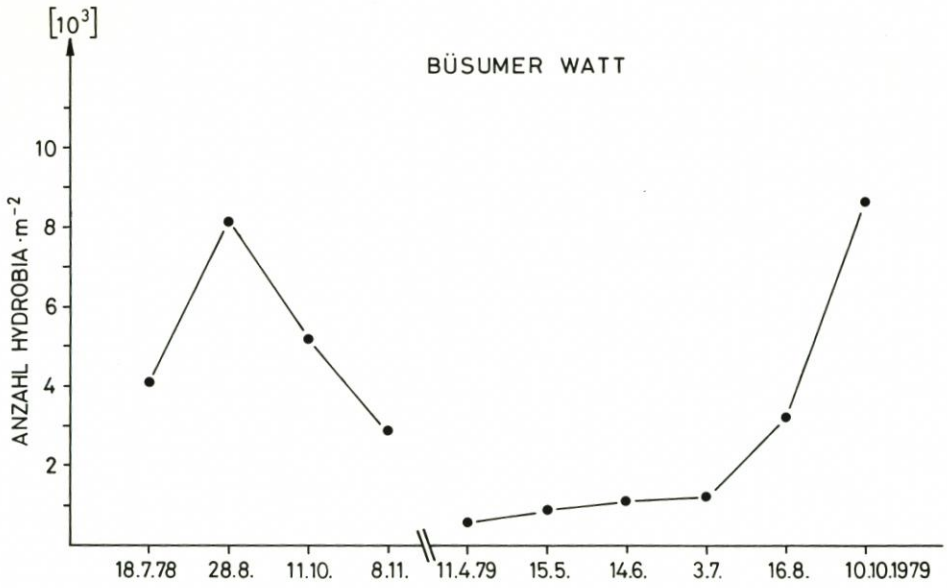


Abb. 9. Durchschnittliche Besiedlungsdichte von *Hydrobia ulvae* im Testfeld des Büsumer Watts von Juli 1978 bis Oktober 1979

3.4.1 *Hydrobia ulvae*

Beobachtungen: Im Büsumer Watt wurde *H. ulvae* das ganze Jahr hindurch auf allen Sedimenttypen mit allerdings unterschiedlichen Besiedlungsdichten gefunden (Abb. 8a und b). Abhängigkeiten in der Verbreitung von der Wasserbedeckungszeit konnten nicht festgestellt werden. Bevorzugt wurden von Pflanzen bedeckte Areale, die auch erhöhte Siltkonzentrationen aufwiesen. Beziehungen zum Diatomeenvorkommen ließen sich nicht feststellen. Hohe Abundanzen im Nordwesten des Testfeldes konnten nicht erklärt werden. Die höchsten Besiedlungsdichten lagen im Zeitraum August bis Oktober, die niedrigsten im April bis Mai (Abb. 9, Tab. 4).

Das erhöhte Individuenaufkommen im Spätsommer läßt sich mit dem vermehrten Auftreten von Jungtieren erklären, da die Reproduktionszeit der Wattschnecke im Frühsommer liegt. Diesen durchschnittlichen Besiedlungsdichten entsprechen die in Tab. 4 wiederge-

Tabelle 4
Mittel und Maximum der Besiedlungsdichte und der Biomasse von *Hydrobia ulvae* im Büsumer Watt

Zeit	Individuen/m²		Biomasse in g/m²	
	Mittel	Maximum	Mittel	Maximum
August 1978	8 100	55 000	1,3	9
Oktober 1979	8 600	53 500	1,4	8,7
April/Mai 1979	750	14 500	0,12	2,4

gebenen Biomassenwerte. Die durchschnittliche Abundanz im Untersuchungsgebiet über das Jahr gemittelt betrug 3450 Ind./m² mit einer mittleren Biomasse von 0,6 g/m².

Diesen Werten für die Besiedlungsdichte liegt das aus der Fotoauswertung stammende Zahlenmaterial zugrunde. Da die Fotografie allerdings nicht diejenigen Schnecken erfassen kann, die unterhalb der Sedimentoberfläche leben, handelt es sich um Minimalwerte. So fanden wir z. B. im September 1978 in den Stechrohrproben durchschnittlich 134 200 Ind./m² (max. Dichte 673 000 Ind./m²!). Dies entspräche einem Faktor von 16, verglichen mit der Fotoauswertung vom Ende August 1978. Ein genereller Umrechnungsfaktor ließ sich nicht aufstellen. Eine Abschätzung der Besiedlungsdichte über das gesamte Gebiet aufgrund der Stechrohrproben ist nicht zulässig, da die Wattschnecke ein fleckenhaftes Verteilungsmuster aufweist, das durch die relativ geringe Öffnung des Stechrohrs nicht ausreichend erfaßt werden konnte.

Im Juni 1980 wurden auf dem Teststreifen im Sahlenburger Watt 20 900 Ind./m², im Meldorfer Watt auf dem Kleintestfeld zur gleichen Zeit 53 500 Ind./m² (Stechrohrproben) gefunden. Die gefundenen Durchschnittswerte liegen zwischen denen von Beukema (1976) und Muus (1967).

Biologie: Im Frühling bis Sommer reproduziert sich die Wattschnecke durch Eier, die häufig an die eigene Schale geheftet werden. Nach etwa 10 Tagen schlüpfen die Larven und machen eine kurze pelagische Phase durch (Pilkington, 1971). Eine wirksame Verbreitungsmöglichkeit dieser Schneckenart ist das „floating", eine Verdriftung durch Anheften an der Unterseite der Wasseroberfläche (Anderson, 1971). Untersuchungen von Smidt (1951) ergaben, daß sie nicht älter als 1,5 Jahre wird.

Die Schnecke ist in der Lage, Material, das an Sedimentkörnern haftet, als Nahrung aufzunehmen, indem sie kleine Partikel schluckt („deposit-feeder") oder die Partikeloberfläche „abgrast" („epipsammic-browsing"). Eine sehr wichtige Nahrungsquelle sind benthische Diatomeen (Lopez u. Kofoed, 1980). *Hydrobia ulvae* lebt auf und in verschiedenen Sedimenttypen. Lopez u. Kofoed beobachteten sie sowohl im Sand als auch im Wattenschlick. Im holländischen Wattenmeer fand Beukema (1976) eine durchschnittliche Besiedlungsdichte von 866 Ind./m² und eine Biomasse von 0,2 g/m². Muus (1967) stellte Besiedlungsdichten von 20 000 bis 30 000 Ind./m² fest.

Auswirkungen auf das Sediment: Die Auswirkungen dieser kleinen Schnecke auf die Sedimentbeschaffenheit sind bisher nicht untersucht worden. Es sind drei Aktionen, die sich auf den Sedimentverband auswirken dürften. Das Kriechen der Schnecken ist mit Schleimabsonderung und Partikelbindung verbunden, die auch durch die Ausscheidung von Kot bewirkt werden kann. Beim Fressen werden Partikel aus ihrem Verband gelöst, so daß mit einer gewissen Lockerung der Sedimentstruktur zu rechnen ist. Die gleiche Wirkung hat auch das Kriechen in der Sedimentoberfläche, die dabei aufgerauht und von Strömungen dann leichter erodiert wird. Diese Vorgänge sind nicht zu quantifizieren, die hohe Anzahl von Hydrobien läßt jedoch vermuten, daß ein Einfluß auf die Stabilität der Sedimente vorhanden ist. Lopez u. Kofoed (1980) fanden bei Schnecken von 4–4,5 mm eine Freßrate von 0,6 mg Sediment/Tier und Stunde bei einer Korngröße von 40–80 µm, 0,46 mg bei 80–100 µm. Bei Individuendichten von 20 000 Exemplaren werden also etwa 10 g Oberflächensediment/Stunde aufgenommen, im Darmtrakt umgearbeitet und ausgeschieden. Es ist allerdings nicht möglich, diesen Wert zu extrapolieren, da die Tiere nicht dauernd fressen. Das ist einerseits von der Wasserbedeckungszeit am Standort abhängig, andererseits zeigt *Hydrobia* auch Aktivitätsunterschiede zur Flutzeit, wie dieses aus den Aufnahmen mit der Sedimentprofil-Kamera in der Zeitrafferdarstellung deutlich wurde. Die Wanderungs- und wahrscheinlich auch die Freßaktivität waren für 1,5 Stunden vor und nach Hochwasser eingeschränkt.

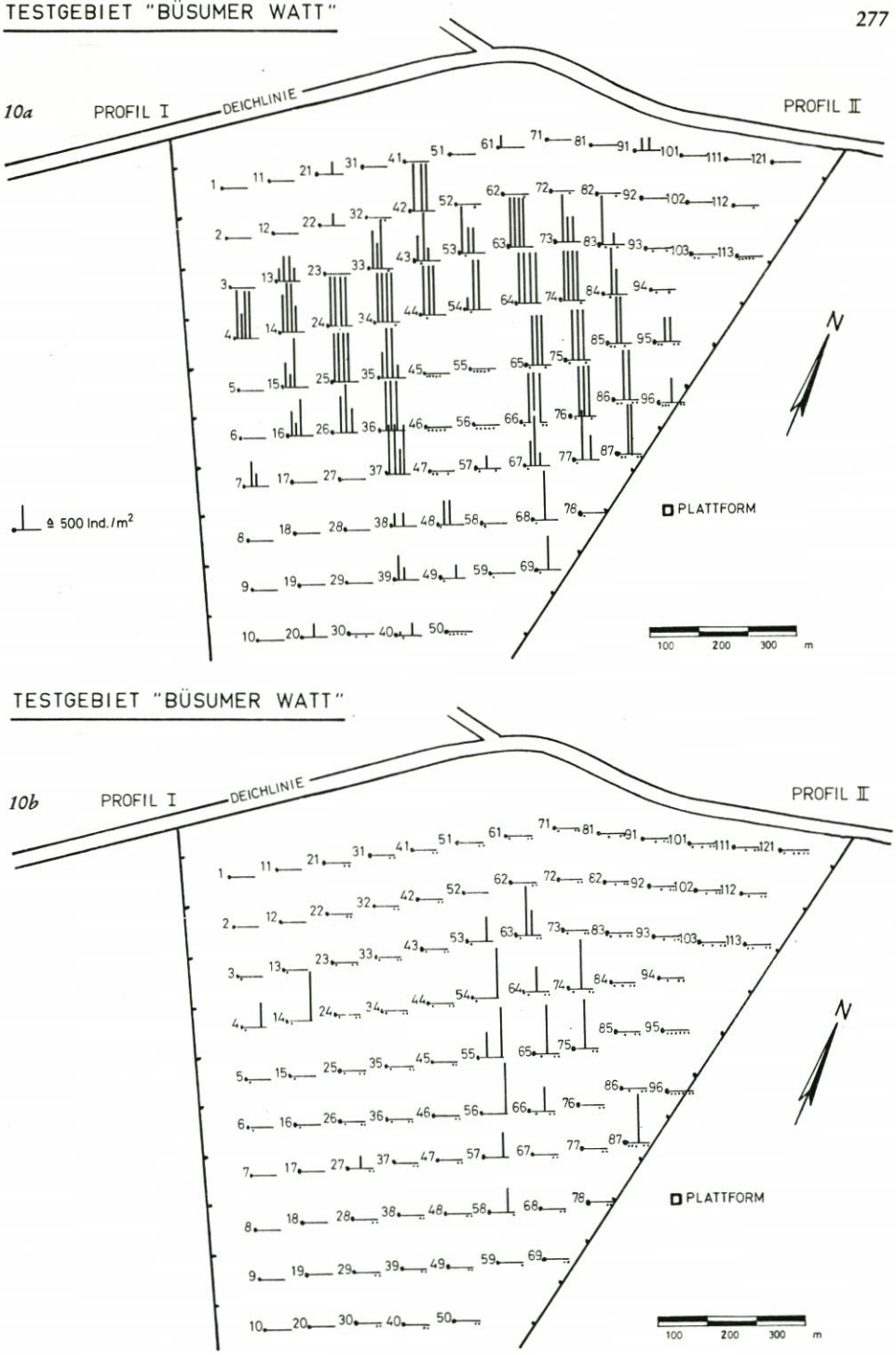


Abb. 10. Besiedlungsdichte von *Cerastoderma edule* (früher *Cardium edule*) nach der Oberflächenfotografie. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, daß keine auswertbare Fotografie vorliegt.
10a = 1978: 18. 7., 28. 8., 11. 10., 8. 11; 1979: 14. 4., 15. 5.
10b = 1979: 14. 6., 3. 7., 16. 8., 10. 10; 1980: 4. 6., 15. 9.

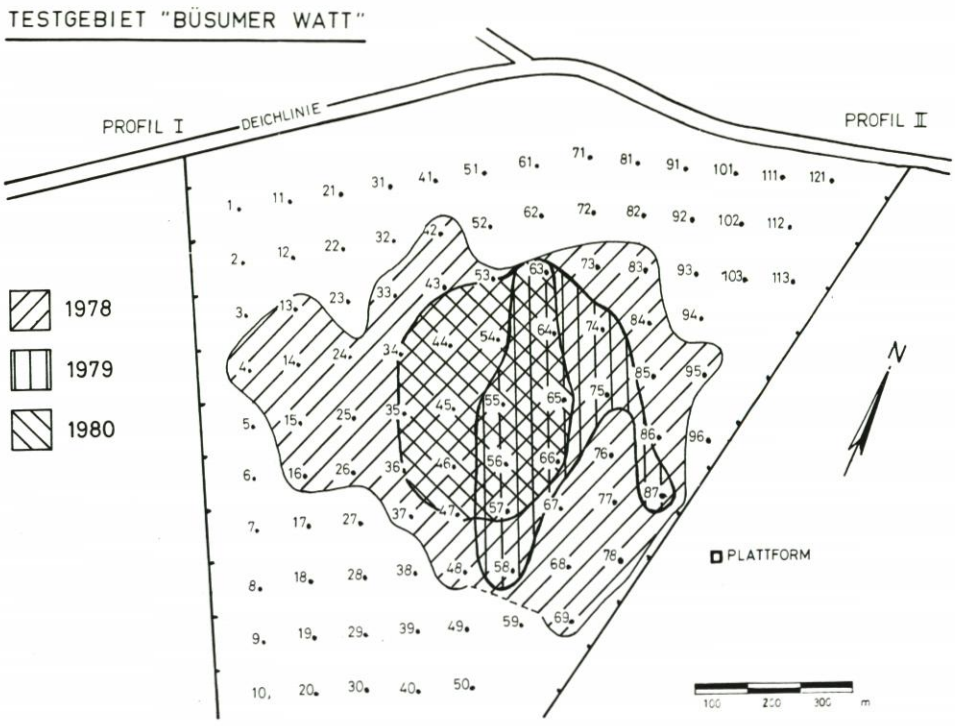


Abb. 11. Die Verlagerung des *Cerastoderma edule*-Feldes im Testfeld 1978–1980

3.4.2 *Cerastoderma edule* (früher: *Cardium edule*)

Beobachtungen: Verbreitung und Häufigkeit von *C. edule* im Büsumer Watt sind in den Abb. 10a und 10b wiedergegeben. Im Büsumer Testfeld sowie im Sahlenburger Watt trat diese Art nach unseren Feststellungen nicht in den höheren Wattbereichen auf. Der Silt-Ton-Gehalt bei 20 % der Stationen lag bei < 15 %, bei weiteren 20 % der Stationen wurde ein Silt-Ton-Gehalt von 15–35 % festgestellt; die übrigen Stationen wiesen gröbere Anteile dieser Korngrößenfraktionen auf. Nach Gast, Köster u. Runte (1984) kommt *C. edule* in der Meldorfer Bucht stets auf Schlicksandflächen und seltener im Schlickwatt vor. Der bei diesen Autoren definierte Schlicksand 2 enthält 20–30 % Ton-Silt-Anteile.

Die höchsten Besiedlungsdichten traten im Büsumer Watt im Zeitraum Juli 1978 bis November 1978 auch an den Schlickstationen mit durchschnittlichen Dichten von 800 adulten Ind./m² und einer Biomasse von 115 g/m² auf (Abb. 10a und 10b). Die Maximalwerte erreichten 1400 Ind./m² im Sommer. An den schlickigen Sandstationen fanden sich in diesem Zeitraum 300 Ind./m², an den Stationen mit sandigem Sediment nur 100 Ind./m². Im strengen Winter 1978/79 wurden im Büsumer Watt alle Herzmuscheln durch die langanhaltenden niedrigen Temperaturen getötet. Während bis Anfang Juli eine Neubesiedlung noch nicht stattgefunden hatte, fanden sich Ende Juli und Mitte August 8600 bzw. 7700 Exemplare/m² ($\bar{x}$ aus 18 bzw. 21 Proben). Bis zum Frühsommer 1980 war die Population stark dezimiert. Die Veränderungen des *Cerastoderma*-Feldes während der Jahre 1978/1980 sind in Abb. 11 dargestellt.

Die Individuenzahlen in den Stechrohrproben waren etwa doppelt so hoch wie die aus der Fotoauswertung stammenden Werte. Es zeigte sich aber, daß etwa 50 % der in den Stechrohrproben erfaßten Tiere kleiner als 1 cm waren und daß die Werte für die Adulten gut übereinstimmten. Da für die Abschätzung der Filtrier- bzw. Biodepositionsleistung nur Anzahlen der adulten Organismen verwendet wurden, stellten die Daten aus der Fotoauswertung eine gute Berechnungsgrundlage für die Leistung der Herzmuscheln im Büsumer Watt dar.

Biologie: Die Laichperiode von *C. edule* beginnt im späten Frühling und zieht sich bis in den Sommer hinein. Die planktisch lebenden Larven werden während des ganzen Sommers gefunden (JÖRGENSEN, 1946). Nach der Metamorphose können die Juvenilen vier Wochen mit der Strömung transportiert werden, bis sie eine Größe von etwa 2 mm erreicht haben. Diese Phase endet mit der Ablagerung der jungen Muscheln an ruhigen Plätzen mit feinkörnigen Sedimenten (BAGGERMANN, 1953). Die Herzmuschel gräbt sich direkt unter die Sedimentoberfläche ein. Nach KREGER (1940) und nach KRISTENSEN (1957) toleriert diese Art verschiedene Sedimenttypen, besiedelt aber hauptsächlich muddigen Sand. EISMA (1966) beobachtete die Bevorzugung von Sedimenten zwischen Korngrößen von 2,75 und 3,30 Phi° und einem Silt-Ton-Gehalt von mindestens 5 %. *C. edule* wird nicht so sehr von der Sedimentbeschaffenheit als vielmehr von den begleitenden hydrodynamischen Bedingungen beeinflußt. Die Strömungsgeschwindigkeit darf nicht so hoch sein, daß die Muscheln aus dem Sediment gewaschen werden, sie sollte aber so groß sein, daß genügend Nahrung herantransportiert wird und keine Überschichtung mit Detritus erfolgt.

OHDE (1981) hat Ergebnisse aus Korrelationsanalysen vorgelegt, in denen die Organismenverteilung in ihrer Abhängigkeit von Strömungs- und Transportbedingungen für das Neuwerker Watt analysiert werden. Dabei zeigte sich, daß die Verteilung von *C. edule* in starkem Maße von hydrodynamischen Faktoren bestimmt wird und die ursprünglichen Besiedlungsmuster durch die Larven selten erhalten bleiben. Die stark kugelförmigen Muscheln bieten der Strömung eine relativ große Angriffsfläche, und sie werden daher auch leicht transportiert. Das ist auch auf unseren Aufnahmen mit der Sedimentprofil-Kamera erkennbar. Schon bei relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten wurden große *C. edule* durch das Blickfeld der Kamera rollend oder schwebend gedriftet. Die Muscheln werden frühzeitig aus dem Sediment gespült, wenn sie bei aktiver Ortsveränderung in der Sedimentoberfläche wandern und über diese hinausragen. Die Strömungen wirken sich natürlich auch auf den Sedimenttransport aus, so daß dem Äquivalentdurchmesser entsprechend eine gemeinsame Ablagerung und eine Korrelation zwischen Korngröße und Muschelvorkommen zustande kommen. Es müssen jedoch auch historische Aspekte der Populationen in diese Überlegungen einbezogen werden. Während der Larvenfall zunächst in weiten Bereichen geschehen kann, kommt es für die Verteilung der Muscheln auf die späteren Transportbedingungen an. Die Position unter der Sedimentoberfläche führt zu Freispülungen und zum Transport schon bei schwachen Strömungen; die Muscheln graben sich jedoch später wieder in die obere Sedimentschicht ein. Hat *C. edule* jedoch die Möglichkeit, über einen längeren Zeitraum an einem Standort liegenzubleiben, so kann sie aus dem örtlichen Transportgeschehen „herauswachsen", also aufgrund ihrer Größe liegenbleiben und folglich in gröberen Sedimenten auftreten. Das geschieht offensichtlich in stärkerem Maße in den tiefer gelegenen Teilen des Wattes, wo bei längerer Wasserbedeckungszeit die Freßzeit länger und damit das Wachstum stärker ist. Andererseits wird das Korngrößenspektrum durch die Filtrierleistungen und die Abgabe von Kotballen, die nach einiger Zeit in feinpartikuläres Material zerfallen, mitbestimmt.

Die Exposition des Standortes und die hydrodynamischen Bedingungen im Ablauf eines

Jahres spielen also eine wesentliche Rolle für die Verteilung von *C. edule*, und lokale Unterschiede, in der Meldorfer Bucht oder im Büsumer Watt, dürften daraus erklärbar, wenn auch im einzelnen nicht nachweisbar sein.

Auswirkungen auf das Sediment: *C. edule* gewinnt ihre Nahrung durch Filtration des Bodenwassers, in dem sie ihren Einströmsipho kurz über die Sedimentoberfläche streckt. Durch die Abgabe von Kotballen ist sie für die Biodeposition und die damit verbundene Schlickbildung im Watt von großer Bedeutung. WILLEMSEN (1952) beobachtete eine Pumprate von 0,5–2,5 l/h (17–20 °C). Die Pumpaktivität betrug mindestens 12 h/Tag. Nach VAHL (1972) liegt die Pumprate noch höher und erreichte 2 l/h bei einer Temperatur von 10 °C. Die Diskrepanz wird damit erklärt, daß WILLEMSEN im Gegensatz zu VAHL kleinere geschlossene Systeme ohne Sand zum Eingraben für seine Experimente benutzte. Daher scheinen VAHLS Werte eher den natürlichen Bedingungen zu entsprechen. DAMAS (1935) berechnete eine „fecal pellet"-Produktion von 10 800 fecal pellets/Tier und Tag, entsprechend einem Volumen von 3240 mm^3 Faeces/Tier und Tag.

Nach VAHL wurden in Experimenten etwa 0,5 g Kotmaterial von adulten Individuen pro Tag abgegeben. Verwenden wir diesen Wert zur Berechnung für das Büsumer Watt mit maximaler Besiedlungsdichte von 1400 Ind./m^2, so würden 700 g Schlicksediment/m^2 und Tag entstehen. Bei einem spezifischen Gewicht von 2 würde eine Aufschlickung von 0,35 mm/Tag oder von 10,5 mm/Monat bewirkt werden. In diesem Maximalwert der Biodeposition sind die Juvenilen nicht mit einbezogen.

Tatsächlich findet man zeitweise im Watt die obere Bodenschicht ausschließlich aus Kotballen zusammengesetzt (siehe auch GAST, KÖSTER u. RUNTE, 1984). Sie besitzen durch Schleimabsonderungen der Muscheln eine gewisse Stabilität. Mechanisch und bakteriell werden sie nach einiger Zeit abgebaut und zerfallen wieder in ihre ursprünglichen, kleinen Bestandteile der Schwebstofffracht. Während die Kotballen wegen ihrer Größe weniger leicht transportiert werden, können die feinen Grundbestandteile resuspendiert und umgelagert werden. Dadurch kommt es zwar regelmäßig zur Biodeposition aus den Schwebstoffen und durch Einarbeitung des Materials in das Sediment auch zur Materialvermehrung, die Aufschlickung am selben Ort bleibt jedoch langfristig nur gering oder kann sogar durch Strömungen ganz verhindert werden. Diese Abhängigkeit vom Wassertransport führt auch zu jahreszeitlichen Unterschieden in der Sedimentzusammensetzung. In den Sommer- und Herbstmonaten sind die Biodepositionsraten höher und die mechanischen Einflüsse geringer als in den Winter- und Frühlingsmonaten.

3.4.3 *Macoma balthica*

Beobachtungen: Sowohl im Büsumer als auch im Sahlenburger Watt wies die Plattmuschel nach den Stechrohrproben vorwiegend eine gleichmäßige Verteilung über die Sedimenttypen auf. Im August 1978 traten im Büsumer Testfeld bis zu 550 Ind./m^2 (Biomasse: 8,4 g/m^2) auf. Im September 1978 wurden Sedimente mit hohem Siltgehalt bevorzugt besiedelt: 360 Ind./m^2 (< 15 % Silt), 730 Ind./m^2 (15–35 % Silt) und 2580 Ind./m^2 (> 35 % Silt). Im Gegensatz zu *C. edule* überlebte diese Art den extremen Winter 1978/79, da sie in einer Sedimenttiefe bis 10 cm vorkommt (BEUKEMA, 1981). Im April 1979 stellten wir eine durchschnittliche Besiedlungsdichte von 160 Ind./m^2 auf dem Schnitt von Station 51 bis 59 fest, im Juni 1980 waren es 770 Ind./m^2. Im Sahlenburger Watt betrug die Dichte hingegen 1500 Ind./m^2. Die Organismen waren wieder gleichmäßig über die Sedimenttypen verteilt. Zu den

Adultbeständen kam im Sommer 1979 eine Neuansiedlung Juveniler mit Durchschnittswerten von 13 000 (Anfang Juli), 14 400 (Ende Juli) und 9000 (Mitte August) Ind./m^2.

Biologie: Die Plattmuschel laicht in den Monaten April und Mai (LAMMENS, 1967). Sie hat pelagische Larven (JÖRGENSEN, 1946). Die Muschel ernährt sich als selektiver Substratfresser und Filtrierer (BRAFIELD u. NEWELL, 1961) und nimmt Nahrung von der Sedimentoberfläche oder aus dem bodennahen Wasser auf. *M. balthica* kommt auf allen sandigen Sedimenten vor, bevorzugt jedoch feinere Korngrößen (WOLFF, 1973). KÖSTER u. GAST (1984) fanden diese Art in der Meldorfer Bucht hauptsächlich in schlickigen Arealen (z. B. Wöhrdener Hafen). *M. balthica* ist die Charakterart der Wattenbiozönosen, obwohl sie oft nur in geringer Anzahl vorkommt. SMIDT (1951) fand im dänischen Wattenmeer Besiedlungsdichten von 100 Ind./m^2, BEUKEMA (1976) im holländischen Watt Durchschnittszahlen von 113 Ind./m^2 mit einer Biomasse von 2,2 g/m^2. Nach MUUS (1967) liegt die geringe Häufigkeit an der Kombination von starken Temperatur- und Salzgehaltsfluktuationen, wie sie im Watt auftreten.

Auswirkungen auf das Sediment: *M. balthica* ist zwar nicht so häufig wie *Cerastoderma edule,* sie ist aber regelmäßig auf groben Flächen anzutreffen und ist deswegen für Bioturbation und Biodeposition von Bedeutung. Auf der Grundlage der von BUBNOVA (1972) bestimmten Depositionswerte errechnet sich für 200 adulte Individuen eine Kotballenabgabe von 8,6 g/m^2 und Tag, entsprechend etwa 4,3 cm^3. Bliebe alles Material auf der Sedimentoberfläche liegen, so ergäbe sich eine Zuwachsschicht von 0,14 mm/Monat bei maximaler Freßaktivität. Bei maximaler Besiedlungsdichte von 2850 Ind./m^2 errechnet sich eine Tagesrate von 122 g oder 66 cm^3/m^2. Freß- und Biodepositionsleistung der Juvenilen sind nicht bekannt.

3.4.4 *Mya arenaria*

Beobachtungen: Im Büsumer Watt war *M. arenaria* über den gesamten Untersuchungszeitraum anzutreffen. Quantitative Aussagen zu ihrem Vorkommen können wir jedoch nur mit Einschränkungen machen, da bei der Stechrohr-Probenentnahme der große Anteil der adulten Tiere, die tiefer als 10 cm im Sediment leben, nicht erfaßt wurde und auf der Fotografie nur die intakten Sipholöcher auswertbar sind. Diese können je nach Sedimentbeschaffenheit und Größe der Muschel einstürzen, so daß Zählungen der Löcher in den meisten Fällen zu geringe Werte ergeben.

1979 konnte nach dem kalten Winter die Neubesiedlung durch Juvenile dokumentiert werden. Anfang Juli wurden 18 000, Ende Juli 100 000 und Mitte August 78 000 Ind./m^2 beobachtet. Nach dem Larvenfall findet dann – wie bei allen Arten – eine drastische Verringerung statt. Im Juni 1980 wurden in den oberen 10 cm im Büsumer Watt an den Stationen 51–59 des Teststreifens 130 Ind./m^2 gefunden, auf dem Sahlenburger Teststreifen 300 Ind./m^2. Nach stürmischer Witterung konnten jedoch wiederholt freigespülte adulte Klaffmuscheln in Lebendstellung beobachtet werden, die großflächige Felder bildeten, von uns aber nicht erfaßt worden waren (Abb. 12).

Biologie: Die Reproduktionszeit von *M. arenaria* liegt im Sommer (JUTTING, 1943). Sie ernährt sich als „langsamer" Filtrierer (THAMPDRUP, 1935; MANN, 1952). Die Larven siedeln zunächst auf fast allen Sedimenttypen; sie können dann aber durch Strömungen und Wellen umverteilt werden, ein Vorgang, der auch als sekundärer Larvenfall bezeichnet wird. Die Neuansiedlung der Jungtiere ist dann im starken Maße von der Größe und dem resultierenden Transport abhängig (OHDE, 1981). Erst bei einer Schalenlänge von 6 cm graben



Abb. 12: Bei starker Erosion wird *Mya arenaria* in Lebendstellung im Watt freigespült

sie sich so tief ins Sediment ein, daß ihr Transport durch Strömungen nicht mehr möglich ist (OHDE, 1981). Wegen ihres geringen Grabvermögens bevorzugen sie feine, relativ erosionsfreie Sedimente (WOLFF, 1973). Nach Stürmen sieht man im Watt häufig freigespülte *Mya*, die dann absterben müssen (KÜHL, 1955). Diese Art ist gegenüber kalten Wintern sehr viel resistenter als die näher an der Oberfläche lebende Herzmuschel. BEUKEMA (1976) fand im holländischen Watt durchschnittliche Besiedlungsdichten von 8 Ind./m^2, entsprechend einer Biomasse von 4,6 g/m^2.

Auswirkungen auf das Sediment: Im Verhältnis zu ihrer Größe filtriert *Mya arenaria* nach ALLEN (1962) nur sehr wenig Material. 100 Exemplare erbringen eine Leistung von 2,5 g/m^2 und Tag, etwa 1,3 cm^3, oder nur 0,04 mm/m^2 u. Monat. In dichten Ansiedlungen von Jungmuscheln dürfte die Ablagerung von Sediment höher sein.

Kurzzeitig kann das Sediment durch die Juvenilen von *M. arenaria* stabilisiert werden. Die erst wenige Millimeter großen Tiere spinnen Byssus-Fäden, die nach LINKE (1939) bei hoher Siedlungsdichte das Sediment als enges Geflecht durchziehen und so die Erosion mindern.

3.4.5 *Nereis diversicolor*

Beobachtungen: Die Besiedlungsdichte von *N. diversicolor* war im Büsumer Watt fast durchgehend relativ gleichmäßig. Als Durchschnittswert wurden 200 Ind./m^2 (Biomasse 2 g/m^2) ermittelt. Die Besiedlungsdichte lag an den schlickigen Stationen über dem Durchschnitt. Im Frühjahr 1979 wurden nach dem extremen Winter zunächst keine Exemplare gefunden, im Mai aber war die Art wieder im Gebiet vertreten. Auf dem Teststreifen im Sahlenburger Watt betrug die Besiedlungsdichte im Juni 1980 160 Ind./m^2. Diese Werte

basieren auf den Stechrohrproben, da die Fährten dieses Polychaeten auf den Fotos nicht immer eindeutig zu identifizieren waren.

Biologie: Die Reproduktion von *N. diversicolor* wurde unter anderem von DALES (1950) untersucht. Das Laichen findet meistens im Frühling bei Wassertemperaturen über 5 °C statt. Die Laichzeit kann sich jedoch auch bis in den August erstrecken (HEIP u. HERMAN, 1979). Die Eier werden durch Zerreißen der Körperwand in die Grabgänge der Tiere abgelegt. Die Larven sind nicht pelagisch, aber so leicht, daß sie von der Strömung aufgewirbelt und forttransportiert werden können (WOLFF, 1973). Die jungen Bodenstadien wandern innerhalb der Gezeitenzone (SMIDT, 1951).

N. diversicolor verfügt über verschiedene Ernährungsmethoden (GOERKE, 1966 u. 1971; MUUS, 1967). Er ist ein Substratfresser, der unsortiert oder auch selektiv lebende und tote Nahrung von der Sedimentoberfläche aufnimmt. GOERKE (1966) beobachtete, daß *N. diversicolor* mit Hilfe eines Sekretes zwischen den Borsten der vorderen Parapodien ein trichterförmiges Filternetz zu bauen in der Lage ist. Durch Undulationsbewegungen des Körpers erzeugt er einen Wasserstrom, so daß Partikel im Netz hängen bleiben, die dann zusammen mit dem Netz aufgenommen werden.

N. diversicolor ist eine ausgesprochen euryöke Art. Im lotischen Bereich der Küsten ist sie in gröberen bis feinen Sanden, im lenitischen Bereich vom sandigen Schlick bis zum Faulschlamm anzutreffen. Sie besiedelt auch sandige Sedimente mit Zostera- oder Ulvabewuchs (HARTMANN-SCHRÖDER, 1971). In der Nordsee findet man die Art sowohl in detritusreichen Sänden, z. B. in der Corophium-Pygospio- und in der Arenicola-Cerastoderma-Zone, als auch auf Weichböden mit H_2S-Bildung in der Peloscolex-Capitella-Region (LINKE, 1939; REMANE, 1940). Sie besiedelt auch Wattflächen, die nur 1 bis 2 Stunden pro Tag überflutet werden (HARTMANN-SCHRÖDER, 1971).

Trotz dieses hohen ökologischen Potentials fehlt diese Art an einigen Stellen im Bereich der Nordsee. Dies mag an der Instabilität der Sedimente liegen, welche den Bau von Gängen verhindert, kann aber auch durch Räuber oder Konkurrenten bedingt sein. Die Besiedlungsdichten variieren stark, z. B.: im Tees Ästuar 55–300 Ind./m^2, in dänischen Ästuarien 5000 Ind./m^2 (MUUS, 1967), im Diviengat 5–17 Ind./m^2 (HEIP u. HERMAN, 1979), im holländischen Watt 36 Ind./m^2 (BEUKEMA, 1976). BEUKEMA fand eine durchschnittliche Biomasse von 1,4 g/m^2 (Trockengewicht).

Auswirkungen auf das Sediment: *N. diversicolor* hat einen relativ hohen Anteil an den bioturbaten Vorgängen im Sediment. Er gräbt Gänge im Sediment, die sich unregelmäßig verzweigen und mehrfach an der Oberfläche ausmünden. Dieses Gangsystem reicht bis in eine Tiefe von 20–40 cm, und der Einzelgang mißt 3–7 mm im Querschnitt. Die relativ stabilen Gänge sind mit einer Schleimschicht ausgekleidet, in der sich häufig Eisenoxidhydrat durch den Transport sauerstoffreichen Wassers innerhalb anoxischer Sedimente abscheidet. Die Mündungen der Gangsysteme sind oft durch sternförmige Kriechspuren auf der Sedimentoberfläche zu erkennen (THAMDRUP, 1935; LINKE, 1939). Wird der Bau von neuen Sedimentschichten überlagert, so mußt der Wurm zur neuen Oberfläche durchstoßen. *Nereis* ruft im Sediment zwei verschiedene Spuren hervor: Hohlformen mit verfestigten Wänden und einfache Schichtzerstörung und Flexuren, die den Wühlweg des Wurmes bezeichnen (SCHÄFER, 1956). RENFRO (1973) quantifiziert die Wühlaktivitäten von *Nereis diversicolor* wie folgt: Wühltiefe: bis 30 cm; Wühlgeschwindigkeit: bis 3,2 cm/h; Wühlleistung: 0,1 cm^3/h. Da die Tiere sicherlich nicht dauernd aktiv sind, läßt sich der Sedimenttransport durch die Wühltätigkeit jedoch nicht hochrechnen.

3.4.6 *Pygospio elegans*

Beobachtungen: Im Büsumer Watt konnten auf freigespülten Flächen oder abgebrochenen Wattkanten „Pygospiorasen" beobachtet werden. Die Stechrohrproben ergaben im Spätsommer 1978 eine Durchschnittsbesiedlung von 1500 Ind./m² (max. Dichte 10 9000 Ind./m²), im Frühling 1979 wurden 770 Ind./m² (max. Dichte 8400) beobachtet, und im Frühsommer 1980 waren es 800 Ind./m². Die Besiedlungsdichte blieb also über die Jahreszeiten relativ konstant. Auch im Sahlenburger Watt traten ähnliche Werte (1000 Ind./m²) auf, wobei diese Besiedlungsdichte einer Biomasse von 0,13 g/m² entsprach. *P. elegans* stellt keine besonderen Ansprüche an das Sediment, bevorzugt aber diatomeen- und detritusreiche feine Substrate.

Biologie: Die Weibchen von *P. elegans* legen eine zusammenhängende Kette von bis zu 16 Eikapseln in ihren Wohngängen ab. Jede Eikapsel enthält bis zu 80 Eier. Die Larven werden über das ganze Jahr gefunden, jedoch tritt im Frühling/Sommer ein Maximum auf (Smidt, 1951; Giere, 1968). Neben der sexuellen wurde auch eine asexuelle Fortpflanzung bei *P. elegans* beobachtet: Bei Verletzungen oder unter ungünstigen Bedingungen können die Tiere fragmentieren und 3 bis 4 neue Individuen bilden (Muus, 1967).

P. elegans ernährt sich als Taster, indem sie mit dem Vorderende aus ihrem Wohnbau herausragend mit den Tentakeln die Umgebung nach abgestorbenem Plankton, Algenresten und Sandkörnern – von denen Diatomeen abgeweidet werden können – absucht (Hartmann-Schröder, 1971). *P. elegans* stellt keine besonderen Ansprüche an das Sediment, weist aber deutliche Präferenz für feine Substrate, die diatomeen- oder detritusreich sind, auf. Die Tiere bewohnen verzweigte Wohngänge, die senkrecht im Sediment ausgebildet sind. Innen besteht der Gang aus gehärteter Schleimtapete, außen haften Sandkörner und Detritus an. Die Art siedelt manchmal so dicht, daß bei Freispülung die röhrenartigen Wohngänge einen dichten Rasen bilden (Hartmann-Schröder, 1971). Thamdrup (1935) und auch Smidt (1951) fanden im dänischen Wattenmeer Besiedlungsdichten von 200–20 000 Ind./m². Bei einem „Rohgewicht" von 1 mg/Tier (Muus, 1967) entspräche diese Dichte einer Biomasse von 0,2–20 g/m². In der Wattrinne vor Büsum zählten Reineck et al. (1968) etwa 2000 Ind./m².

Auswirkungen auf das Sediment: Die Bedeutung von *P. elegans* für die Stabilität des Sedimentes ist schwierig zu beurteilen und nicht näher untersucht worden. Einerseits können die Röhren – besonders in dichten Beständen – stabilisierend auf den Sedimentverband wirken, andererseits ist denkbar, daß bei stärkeren Strömungen die Erosion durch Wirbelbildung und Auskolkung gefördert wird.

3.4.7 *Heteromastus filiformis*

Beobachtungen: Im Büsumer Watt (Abb. 13a und 13b) besiedelt *Heteromastus filiformis* bevorzugt schlickhaltige Sedimente mit einem Siltanteil > 15 %. Der Jahresdurchschnittswert für Sand lag bei 555 Ind./m² mit einer Biomasse von 5,2 g/m², und der durchschnittliche Jahreswert für schlickhaltige Sedimente erreichte 1420 Ind./m², entsprechend einer Biomasse von 13,3 g/m² (Tab. 5). Bemerkenswert waren sporadisch auftretende Massensiedlungen von *H. filiformis* im Büsumer Watt, die in den meisten Fällen jedoch nur von kurzer Dauer waren.

H. filiformis stellt im Büsumer Watt also einen erheblichen Anteil der vorhandenen Biomasse. Nach dem Extremwinter lag im April 1979 die geringste Besiedlung mit durchschnittlich 640 Ind./m², gleichmäßig auf alle Sedimenttypen verteilt, vor. Im Sahlenburger

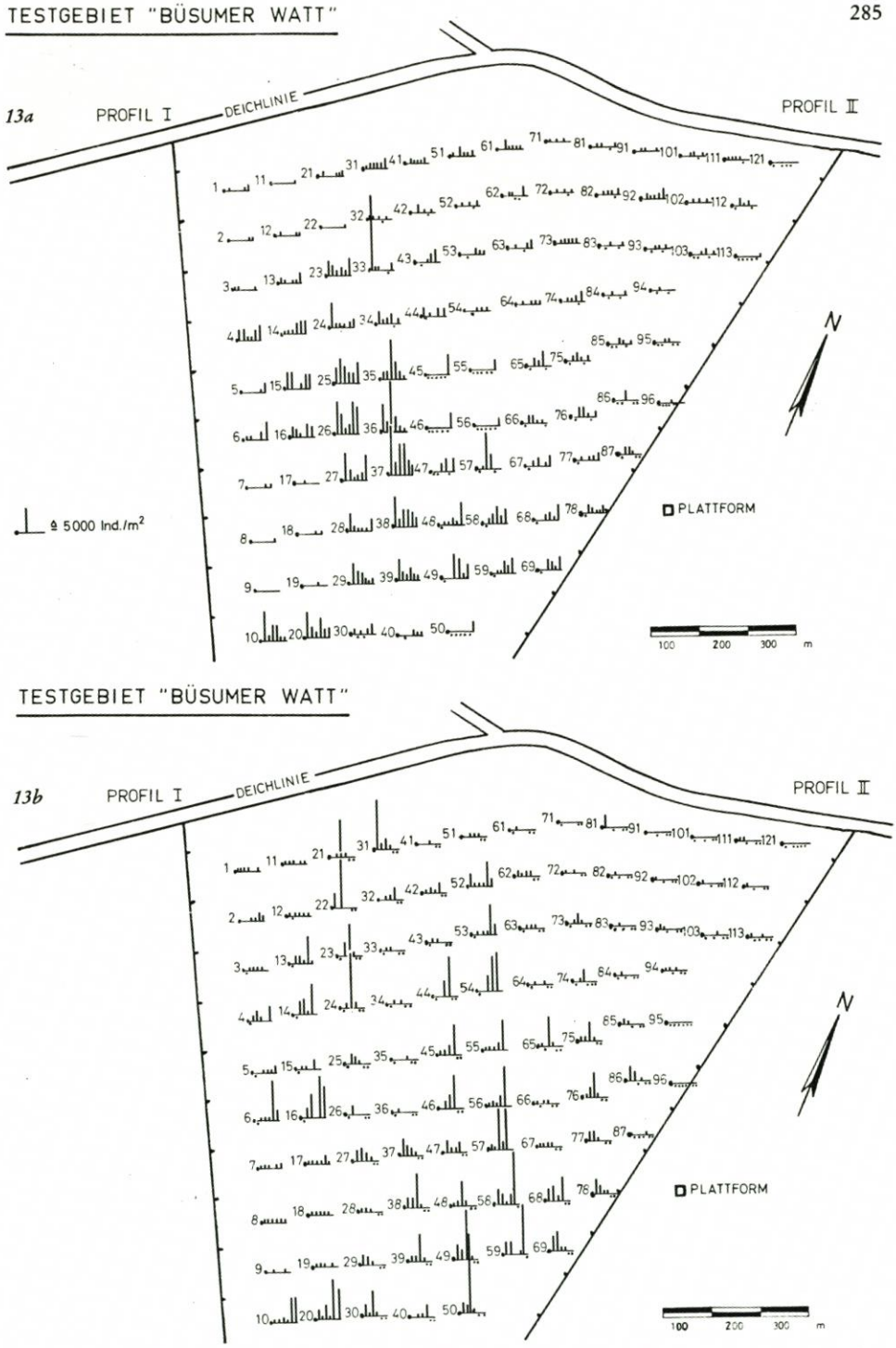


Abb. 13. Besiedlungsdichte von *Heteromastus filiformis* nach der Oberflächenfotografie. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, daß keine auswertbare Fotografie vorliegt.
13a = 1978: 18. 7., 28. 8., 11. 10., 8. 11; 1979: 14. 4., 15. 5.
13b = 1979: 14. 6., 3. 7., 16. 8., 10. 10.; 1980: 4. 6., 15. 9.

Tabelle 5
Besiedlungsdichten von *Heteromastus filiformis* im Büsumer Watt von Juli 1978 bis Juni 1979 auf verschiedenen Sedimenttypen (Ind./m²)

Siltgehalt	< 15 %	15–35 %	> 35 %
Datum			
18. 07. 78	106	2200	3600
28. 08. 78	640	780	1180
11. 10. 78	240	1212	1835
08. 11. 78	540	920	1160
11. 04. 79	700	590	783
15. 05. 79	1060	1700	1110
14. 06. 79	600	2250	560
$\bar{x}$	555	1380	1460

Watt fanden wir im Juni 1980 eine Durchschnittsbesiedlung von 2250 Ind./m² (entsprechend einer Biomasse von 21 g/m²) für alle Sedimenttypen. Die in den Untersuchungsgebieten gefundenen Werte lagen erheblich höher als die von BEUKEMA (1976) im holländischen Watt beobachteten Zahlen. Zum Teil könnte die Differenz an der unterschiedlich angewandten Methodik liegen. Unsere Werte beruhen auf den Ergebnissen der Fotoauswertung, da die Kothaufen sehr gut zu identifizieren sind. CADÉES (1977) Beobachtung, daß das Auszählen der Kothaufen sicherer wäre als das Aussieben der Tiere, traf auch für das Büsumer Watt zu. Die Stechproben lieferten zum größten Teil unvollständige Individuen, so daß auch eine genaue Biomassenbestimmung nicht möglich war. Die angegebenen Biomassen wurden nach den Werten von BEUKEMA berechnet.

Biologie: In der Nordsee liegt die Laichperiode von *H. filiformis* im Frühling, selten auch im Herbst (RASMUSSEN, 1956). Die Eier werden in gelben, gallertigen Kugeln auf dem Substrat abgelaicht. In einem Konglomerat liegen mehrere 100 Eier. Die Larven durchleben ein planktisches Stadium. *H. filiformis* ist ein nicht-selektiver Substratfresser. Er besiedelt hauptsächlich Weichböden. Im Schlickwatt kann es zu hohen Besiedlungsdichten kommen. LINKE (1939) fand 7000 Ind./m², BEUKEMA (1976) zählte Durchschnittswerte von 32 Ind./m².

H. filiformis lebt in schlickigen Sedimenten, wo er feine, unregelmäßig verzweigte Gänge anlegt. Die Freßgänge liegen in dem schwarzen Sediment der Reduktionszone, was auch an der dunklen Färbung der Kothaufen an der Sedimentoberfläche zu erkennen ist. Die Tiere sind gut an dysaerobe Bedingungen adaptiert, da ihr Hämoglobin eine besonders hohe Affinität zum Sauerstoff hat (PALS u. PAUPTIT, 1979).

Auswirkungen auf das Sediment: Während das durch Schleim verfestigte Gangsystem eine gewisse stabilisierende Wirkung hat, besitzt dieser Polychaet durch seine Wühl- und Freßaktivität auch einen wichtigen Anteil an der Bioturbation im Watt. Die „sediment-reworking-rate" hängt von der Besiedlungsdichte ab, die sowohl von Jahr zu Jahr als auch jahreszeitlich stark schwanken kann. Bei einer Besiedlungsdichte von 500 Ind./m² beträgt die Sedimentumsatzrate 100 ml/Tag, entsprechend einer Sedimentschicht von 4 cm/Jahr. 9000 Ind./m² lagerten 2500 ml/Tag um, entsprechend einer Sedimentschicht von 30 cm in den vier Monaten der hohen Individuendichte (CADÉE, 1979). Das an der Sedimentoberfläche ausgeschiedene Sediment wird vom auflaufenden Wasser eingeebnet bzw. resuspendiert und oxidiert, so daß *H. filiformis* dazu beiträgt, die oxidierte Sedimentschicht aufrechtzuerhalten (conveyer belt species; RHOADS, 1974).

Die Küste, 40 (1984), 1-318

3.4.8 *Arenicola marina*

Beobachtungen: Im Büsumer Watt fanden wir *A. marina* zu allen Jahreszeiten und in unterschiedlicher Dichte in allen Sedimenttypen. Die Abbildungen 14a und 14b lassen jedoch die vorwiegend starke Besiedlung sandiger Sedimente erkennen. Die höchsten Abundanzen der Art waren im Testgebiet regelmäßig auf der ca. 300 × 500 m großen Sandfläche im Südwesten und auf dem Sandstreifen vor dem Deich festzustellen. Auch nach dem Eiswinter 1978/79 war *A. marina* etwa in der im Vorjahr ermittelten Verteilung vorhanden. An den Stationen mit Siltgehalten unter 15 % zählten wir die durchschnittlich höchsten Besiedlungsdichten von 22 Ind./m², entsprechend einer Biomasse von 6,5 g/m² (Umrechnung nach BEUKEMA, 1976), und auf Sedimenten mit hohem Siltanteil (> 35 %) die geringsten Dichten mit 8 Ind./m², entsprechend einer Biomasse von 2,4 g/m² (Tab. 6).

Aus Tab. 6 wird deutlich, daß die geringste Abundanz im November auftrat, die höchste im Juli und August. Die hohen Werte im August waren auf die Jungtiere zurückzuführen. Sie zeigten noch keine Präferenz für Sedimenttypen. Unsere Werte für die Besiedlungsdichte basieren auf der fotografischen Erfassung der gut zu erkennenden Kothaufen von *A. marina*. Da der Sandpier häufig sehr tief im Sediment vorkommt, konnten wir ihn nur vereinzelt mit dem Stechrohr erfassen.

Biologie: Im holländischen Watt hat *A. marina* zwei Laichperioden: Die Hauptperiode liegt im August und September, die Nebenperiode im November (DE WILDE u. BERGHUIS, 1979). Die Eier entwickeln sich im Wohngang des Weibchens. Die Larven von *A. marina* sind in der Lage zu schwimmen (FARKE et al., 1979). *A. marina* ernährt sich als Substratfresser von der nährstoffreichen Oberflächenschicht des Sediments. Sie lebt in J-förmigen Röhren, deren blindes Ende durch eine dünne Sedimentsäule mit dem Freßtrichter an der Sedimentoberfläche verbunden ist. Das Sediment sinkt je nach Zähigkeit im Trichter ab, wenn der Wurm am unteren Ende der Säule Sediment aufnimmt. Wegen des geringen Säulendurchmessers (5 mm) erreicht das Oberflächensediment den Wurm erst nach einigen Stunden. Fütterungsexperimente zeigten ein gutes Wachstum bei Zugabe von Diatomeen und Bakterien zum Sediment (RIJKEN, 1979). Nach KRÜGER (1959) dient Plankton als Nahrung,

Tabelle 6
Besiedlungsdichten von *Arenicola marina* im Büsumer Watt von Juli 1978 bis Juni 1979 auf den verschiedenen Sedimenttypen (Ind./m²)

Siltgehalt	< 15 %	15–35 %	> 35 %
Datum			
18. 07. 78	22	26	16
28. 08. 78	25 (80)	22 (105)	27 (73)
11. 10. 78	22	15	3
08. 11. 78	15	13	1
11. 04. 79	22	10	5
15. 05. 79	23	14	3
14. 06. 79	24	16	4
$\bar{x}$	22	16	8

$\bar{x}$ = Mittelwerte ohne die maximalen Augustwerte; ( ) = Maximalbesiedlung

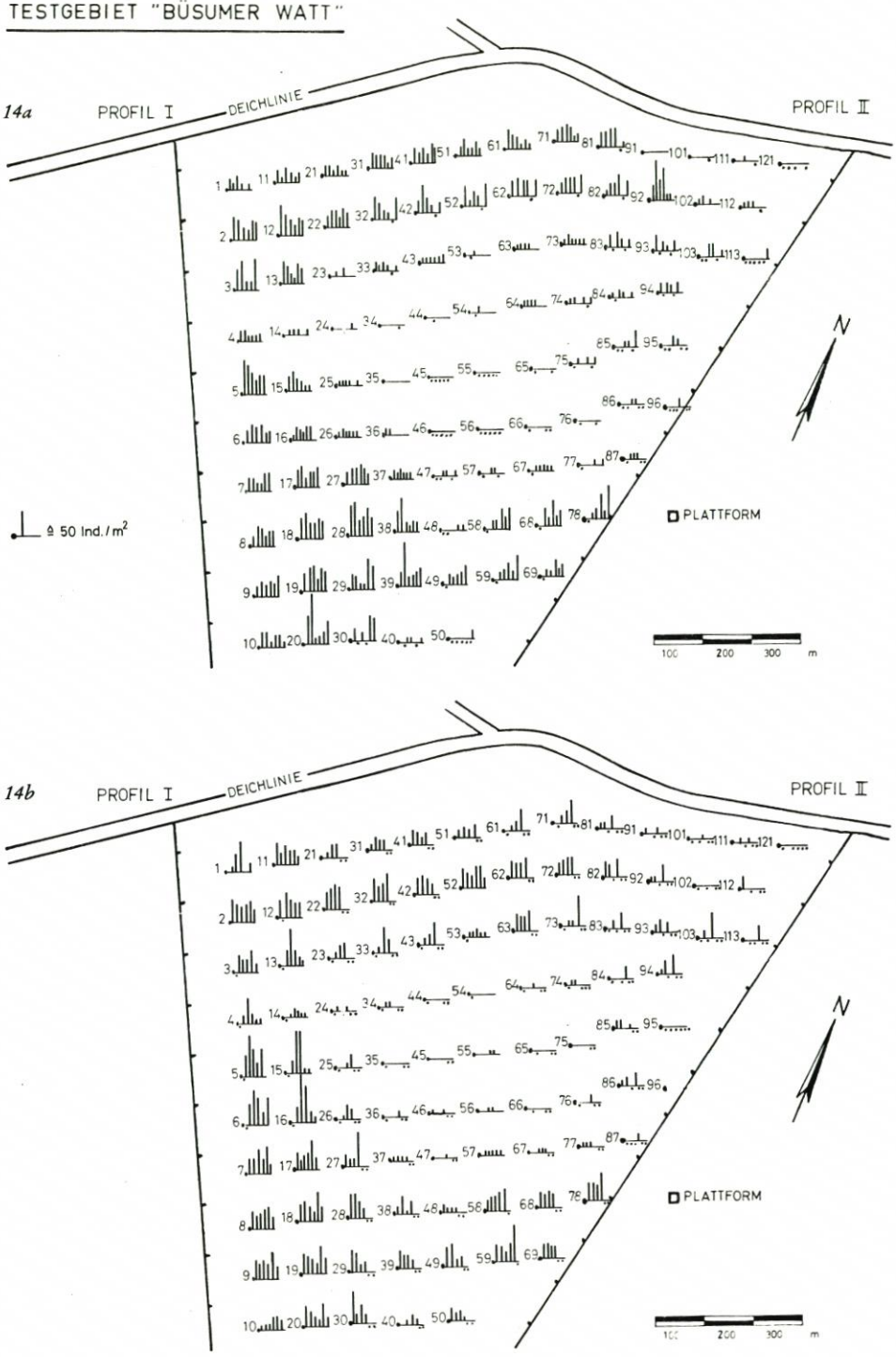


Abb. 14. Besiedlungsdichte von *Arenicola marina* nach der Oberflächenfotografie. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, daß keine auswertbare Fotografie vorliegt.
14a = 1978: 18. 7., 28. 8., 11. 10., 8. 11.; 1979: 14. 4., 15. 5.
14b = 1979: 14. 6., 3. 7., 16. 8., 10. 10.; 1980 = 4. 6., 15. 9.

das mit dem Atemwasser in die Röhre gelangt. Es erscheint nicht ausgeschlossen, daß beide Ernährungsweisen nebeneinander bestehen.

A. marina kommt weder in reinem Grobsand noch in zähem oder weichem Schlick vor. Dies läßt sich damit erklären, daß in der Regel keine Sandkörner größer als 2 mm aufgenommen werden können (KRÜGER, 1971) und daß zäher Ton nicht gut in der Sedimentsäule nachsackt. Zu weicher Schlick verhindert den Röhrenbau. GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984) beobachteten *A. marina* in der Meldorfer Bucht nur bis zu einer Watthöhe von 1,40 m über NN. Sie fanden die Art nicht im trittfesten, dichtgelagerten Schlicksand (Siltanteil 20–30 %).

Diese Art bildet im Wattenmeer einen großen Prozentsatz der benthischen Biomasse. So fand BEUKEMA (1976) eine durchschnittliche Besiedlungsdichte von 17 Ind./m^2 (Biomasse 5 g/m^2) und im Gezeitenbereich mit wenig Schlick 100 Ind./m^2.

Auswirkungen auf das Sediment: Für die Bioturbation ist *A. marina* ein wichtiger Organismus. Bei der Sedimentaufnahme wählt der Wurm nur die feinen Partikel aus, so daß gröberes Material in seinem Freßhorizont eine deutliche Anreicherung erfährt, die als Schicht, z. B. die „Hydrobia-layer", erkennbar ist. Dieser Vorgang wird als „biogenic graded bedding" bezeichnet (VAN STRATEN, 1956; SCHÄFER, 1962). BAUMFALK (1979) fand, daß die Zunahme der heterogenen Verteilungen der verschiedenen Korngrößenfraktionen an der Sedimentoberfläche durch die ausgeschiedenen Faeces bedingt wird, die durch Strömung eingeebnet und deren Partikel dabei sortiert werden. Nach Beobachtungen mit der Sedimentprofil-Kamera können die Kothaufen innerhalb weniger Sekunden zerfallen, wenn leichte Strömungen herrschen. Das „durchgearbeitete" Sediment weist einen relativ geringen Prozentsatz an groben Partikeln auf. Der Wassergehalt des Sediments wird nicht von *A. marina* beeinflußt (CADÉE, 1976).

Nach ALLER (1977) werden im Sommerhalbjahr von jedem Individuum 13–15 g Sediment täglich umgelagert. Bei einer Maximalbesiedlung von 100 *A. marina*/m^2 ergibt sich eine Umsatzleistung von 1,3–1,5 kg/m^2 u. Tag. Im Ablauf des Jahres, mit verringerter Aktivität im Winter, dürfte eine Sedimentschicht von 15–20 cm Tiefe einmal umgelagert werden. Dabei ist zu bedenken, daß die Wirkung nicht so tiefgreifend ist und entsprechend die obere Sedimentschicht mehrfach durch *A. marina* geschleust wird.

3.4.9 Diatomeen

Beobachtungen: Die fotografische Erfassung der Sedimentoberfläche gestattete es, die Bedeckung mit Diatomeen im Jahresablauf abzuschätzen. Der Grad der Bedeckung des Sediments mit Diatomeenrasen ist auf den Stationen in der Nähe des Hauptpriels höher als auf den landwärts gelegenen sandigen Bereichen (Abb. 15a und 15b). Es gab Stationen, die Diatomeenrasen an den Untersuchungstagen regelmäßig aufwiesen (10, 20, 58, 59) und an denen der Bedeckungsgrad mit nur geringen Abweichungen im Verlauf der Untersuchungen annähernd gleich stark war. Der Jahresgang der Bedeckung des Sediments durch Diatomeenrasen für die verschiedenen Sedimenttypen wird in Tab. 7 und in Abb. 15 wiedergegeben. Die Bedeckungsgrade sind für die verschiedenen Sedimenttypen des Untersuchungsgebietes gemittelt worden. Sedimente mit höherem Schlickgehalt (Schlickwatt, Mischwatt) weisen dichteren Diatomeenbewuchs auf als die sandigen Sedimente. Dieser Zusammenhang geht auch aus Abb. 16 hervor. Die höchste Bedeckung wurde mit durchschnittlich 54 % auf Schlickstationen im Juni 1979 gefunden. Der darauffolgende Fotografie-Termin im Juli 1979 wies für dieselben Stationen dagegen nur durchschnittlich 5 %, den Minimalwert, auf. Vermutlich waren die (nach einer Massenentwicklung) abgestorbenen Diatomeenauflagerun-

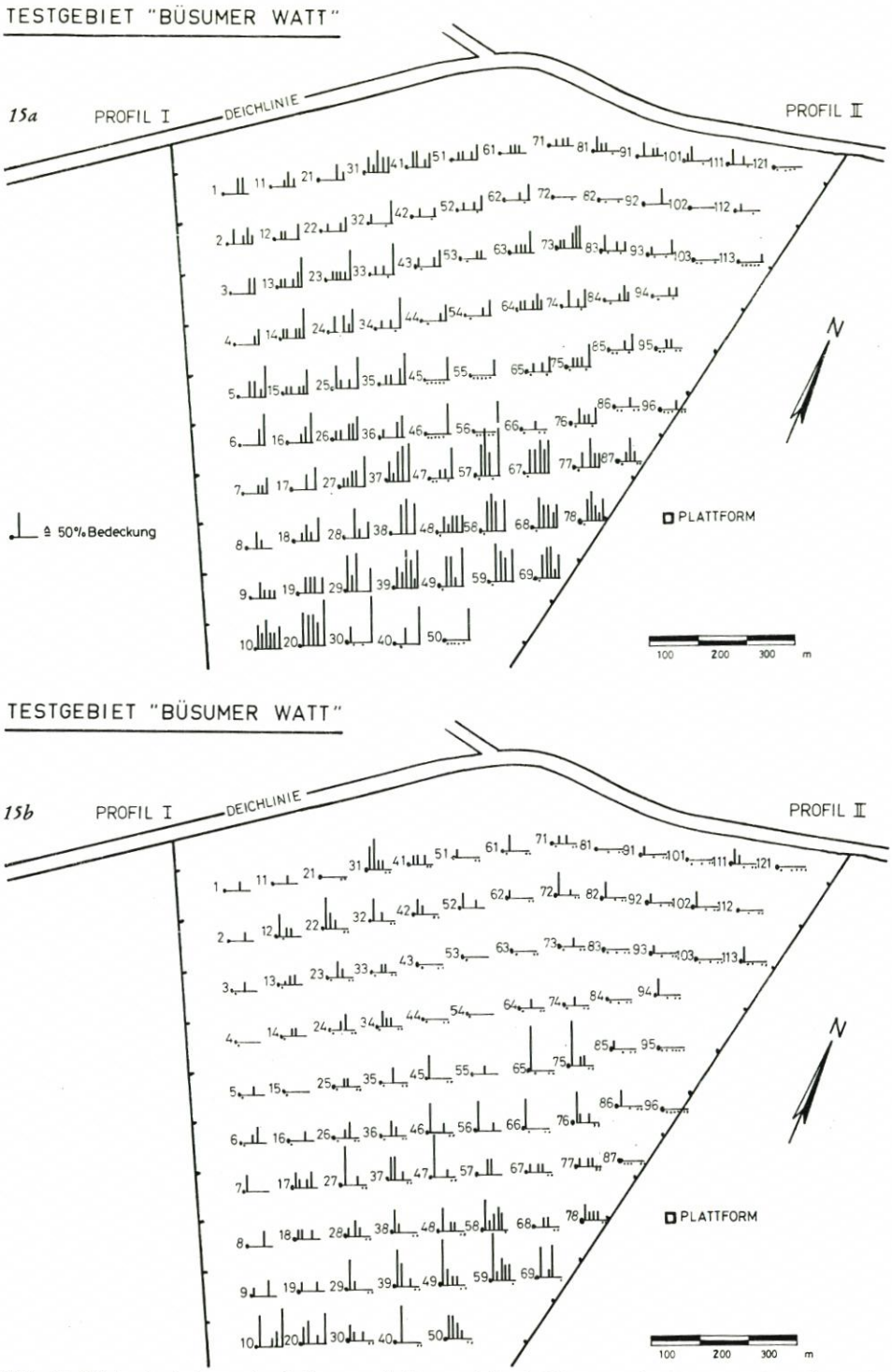


Abb. 15. Flächenbedeckung des Sedimentes (in Prozent) durch Diatomeen im Büsumer Watt. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, daß keine auswertbare Fotografie vorliegt.
15a = 1978: 18. 7., 28. 8., 11. 10., 8. 11.; 1979: 14. 4., 15. 5.
15b = 1979: 14. 6., 3. 7., 16. 8., 10. 10.; 1980: 4. 6., 15. 9.

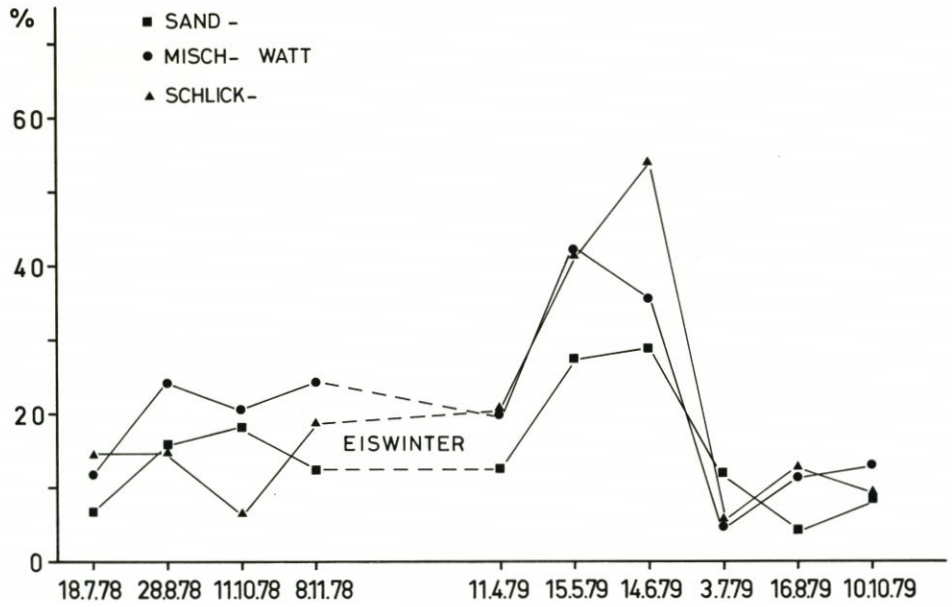


Abb. 16. Prozentuale Flächenbedeckung durch Diatomeen im Sand-, Misch- und Schlickwatt des Testfeldes

gen durch Strömung abgehoben und verfrachtet oder in das Sediment eingearbeitet worden.

Auswirkungen auf das Sediment: Diatomeen sind in den Oberflächenschichten der Sedimente stets vorhanden. Sie bilden zeit- und stellenweise dichte Auflagen auf dem Sediment, die durch Schleimabsonderung einen geschlossenen Verband darstellen, so daß bei schwachen Intensitäten die Strömung nahezu laminar über die glatte Oberfläche läuft und der Sedimenttransport verhindert werden kann. Wie aus Tab. 7 und Abb. 16 hervorgeht, ist

Tabelle 7
Diatomeenrasen (prozentuale Sedimentbedeckung) im Testgebiet Büsumer Watt von Juli 1978 bis Oktober 1979.
(In der Regel 2 Aufnahmen pro Station und Termin)
+ = Maximum; − = Minimum

Aufnahmedatum	Sandwatt (44 Stationen)	Mischwatt (37 Stationen)	Schlickwatt (18 Stationen)
18. 07. 78	7	12	14
28. 08. 78	15	24	15
11. 10. 78	18	21	6
08. 11. 78	12	24	19
11. 04. 79	12	20	21
15. 05. 79	27	42+	42
14. 06. 79	28+	36	54+
03. 07. 79	12	4−	5−
16. 08. 79	4−	11	8
10. 10. 79	8	13	9

diese Wirkung der Diatomeen besonders bei feinkörnigen Sedimenten ausgeprägt. Erst nach Überschreiten der Erosionsgrenzgeschwindigkeit wird der Diatomeenrasen aufgerissen. Das geschieht besonders vom Rande her, wo es dann zu flachen Auskolkungen und zu verstärktem Sedimentabtransport kommen kann.

3.4.10 Pflanzenbedeckung

Beobachtungen: Der Teststreifen im Sahlenburger Watt war ganz und das Testgebiet im Büsumer Watt überwiegend frei von größeren Pflanzenbeständen. Lediglich im nordöstlichen Teil dieses Gebietes war ein andauernder, fleckenhafter Pflanzenbewuchs als Ufergürtel zu erkennen. Dieser wurde annähernd von der 1-m-Höhenlinie umgrenzt und bestand in der Hauptsache aus den Arten *Spartina townsendii* und *Zostera nana*. Im nordwestlichen Teil des Gebietes (Stationen 1, 11, 21) gab es ebenfalls einen kleinräumigen Zosterabestand. *Salicornia europaea* kam nur in einzelnen Exemplaren vor. Vereinzelt wurden im Testgebiet Algen gefunden *(Ulva lactuca, Enteromorpha spec., Cladophora spec.)*, die sich jedoch nur einige Wochen halten konnten.

Auswirkungen auf das Sediment: Die Bedeutung dichter Pflanzenbestände für die Sedimentation und Aufschlickung sind bekannt (WOHLENBERG, 1937), jedoch blieben im Büsumer Watt die Wirkungen wegen der geringen Bestandsdichten unbedeutend. Einen geringen, die Sedimentation fördernden Einfluß mag der Bestand von *Z. nana* im Nordosten des Testfeldes gehabt haben. Von lokaler Bedeutung waren die Aufsandungen, die sich unter den bei Ebbe flach auf dem Sediment liegenden Thalli von *Cladophora* bildeten (Abb. 17).



Abb. 17. Erhöhung des Wattniveaus unter *Cladophora*

Die Küste, 40 (1984), 1-318

3.4.11 Verteilung der Biomasse

Anhand der Stechrohrproben von August/September 1978 und Juni 1980 wurden die Biomassenwerte für die Makrofauna der Untersuchungsgebiete ermittelt. Zusätzlich wurden die durch die Oberflächenfotografie und aus Literaturdaten bekannten Besiedlungsdichten von *Arenicola marina* und *Mya arenaria* dazu verwandt, Gesamtbiomassen hochzurechnen.

Tabelle 8
Biomassen-Mittelwerte, Büsumer Watt, für August/September 1978

Sediment	Biomasse (aschefreies Trockengewicht) g/m² Stechproben (10 cm tief)	einschließlich *A. marina* und *M. arenaria*
Sandwatt (44 Stationen)	44,88 ∓ 11,17	ca. 50
Mischwatt (37 Stationen)	26,08 ∓ 6,08	ca. 30
Schlickwatt (18 Stationen)	74,88 ∓ 21,98	ca. 75
Gesamt 99 Stationen		ca. 47

In Tab. 8 werden die Biomassen-Mittelwerte der Makrofauna in den oberen 10 cm des Sediments, ermittelt als Glühverlust, angegeben. Für die Berechnung der mit den Stechrohrproben nicht erfaßten Arten *A. marina* und *M. arenaria* wurden die von BEUKEMA (1976) und von BEUKEMA u. VLAS (1979) gemachten Angaben über die Biomassen dieser Arten verwendet. Es wird deutlich, daß diese beiden großen Arten nur im Sandwatt wesentlich zur Biomasse beitragen. Berücksichtigt werden muß hierbei noch, daß die Biomasse der übrigen Fauna unterhalb der 10-cm-Oberschicht (z. B. *Heteromastus filiformis*) nicht in die Berechnungen eingeht. Die Biomassenwerte sind daher einerseits unterschätzt, andererseits finden sich im Watt während des Sommers allgemein die Jahres-Höchstwerte.

Für die Stationen 1–39, die das Testfeld begrenzenden Profile I und II (Büsumer Watt) sowie das Profil III (Sahlenburger Watt) wurden die Gesamtbiomassen bestimmt bzw. hochgerechnet und in den Graphiken mit den entsprechenden Watthöhen wiedergegeben (Abb. 18–25). Die Werte sind aus je zwei Parallelproben gemittelt. Zu berücksichtigen ist, daß die Höhe der Biomasse durch Besiedlung mit verschiedenen Arten zustande kommt, so daß der Gesamtbiomassenwert nur als pauschale Information zu werten ist.

Auf dem Profil I mit den Stationen 1001–1011 (Abb. 18) läßt sich eine Tendenz zur Verringerung der Biomassenwerte in Richtung auf den Hauptpriel erkennen, der außerhalb des Testfeldes an die Stationen 10–50 anschließt. Auf diesem hauptsächlich sandige Sedimente aufweisenden Profil stellt *A. marina* den größten Anteil an der Biomasse. Auf dem Schnitt mit den Stationen 1–10 (Abb. 19) steigt die Biomasse bis zur Station 6 an und fällt dann bei Annäherung an den Hauptpriel deutlich ab. Der Nebenpriel, der sich ca. 400–500 m vom Deich im Testgebiet befindet (s. Watthöhenkarte 2a und 2b), scheint einen Einfluß auf die Biomasse zu haben: Die Schwankungen der Biomassenwerte auf dem Profil I sind bei noch flachem Nebenpriel geringer als auf den Stationen 1–10 (Abb. 19), 11–20 (Abb. 20), 21–30 (Abb. 21) und 31–39 (Abb. 22). Dort wird der Nebenpriel breiter und tiefer. Auf diesem Schnitt konnten einerseits wegen des Priels, andererseits wegen der Schlickmächtigkeit nicht alle Stationen beprobt werden.

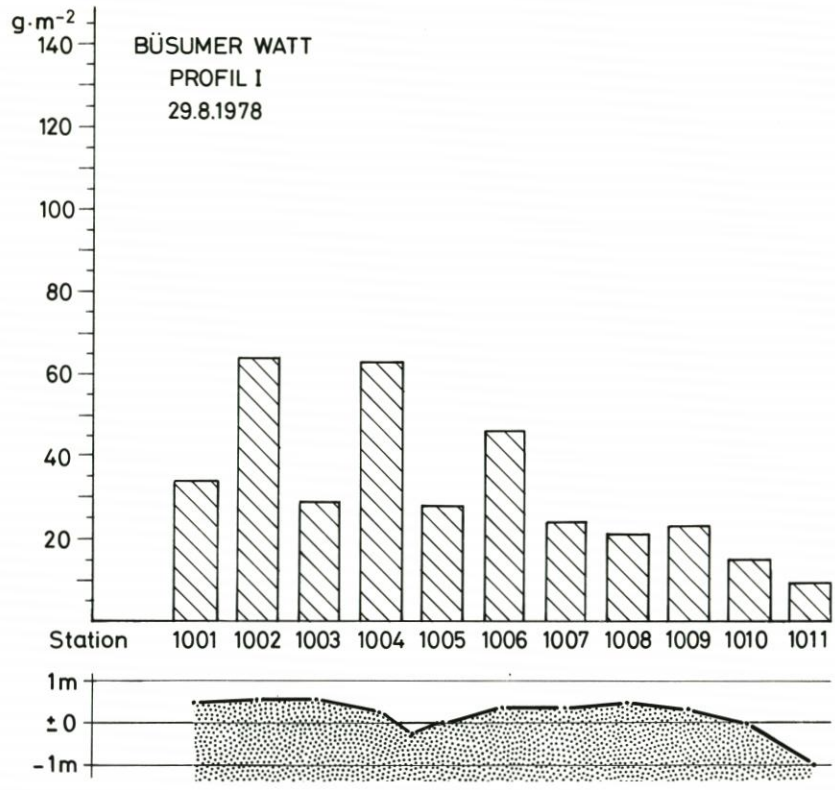


Abb. 18. Biomasse (aschefreies Trockengewicht) und Watthöhe auf Profil I, Stationen 1001–1011

Profil II weist bis zur Station 2006 eine annähernd gleich geringe Biomasse auf. Die hohen Werte der Stationen 2007 und 2008 resultieren aus der hohen *Arenicola*-Dichte. *A. marina* benötigt eine Mindestwasserbedeckungszeit, die sie erst ab Station 2007 findet (Abb. 23).

Abb. 24 zeigt, daß auf dem Profil I im Juni 1980 im Vergleich mit August 1978 die Biomassenwerte nahezu aller Stationen höher lagen. Das gilt auch für die meisten anderen Stationen des Testfeldes und ist durch den Brutfall nach dem strengen Eiswinter zu erklären.

Auf dem Profil III (Sahlenburger Watt) liegen die Biomassenwerte ähnlich wie auf dem Profil I im Büsumer Watt, das ihm in seiner Charakteristik sehr ähnlich ist. Herausragend ist lediglich die Station 3010, auf der eine starke Besiedlung durch juvenile *M. arenaria* die Biomassenwerte erheblich beeinflußte (Abb. 25).

3.4.12 Beziehungen zwischen dem Vorkommen der wichtigsten Tierarten und den Korngrößenklassen der Sedimente

Eine früher angenommene, direkte Abhängigkeit der Besiedlung des Sediments durch die verschiedenen Arten vom prozentualen Siltanteil (Fraktion $< 63\,\mu m$) konnte im Untersuchungsgebiet nicht festgestellt werden. Auch von anderen Autoren (z. B. Beukema, 1976) wird dieses für andere Wattgebiete bestätigt.

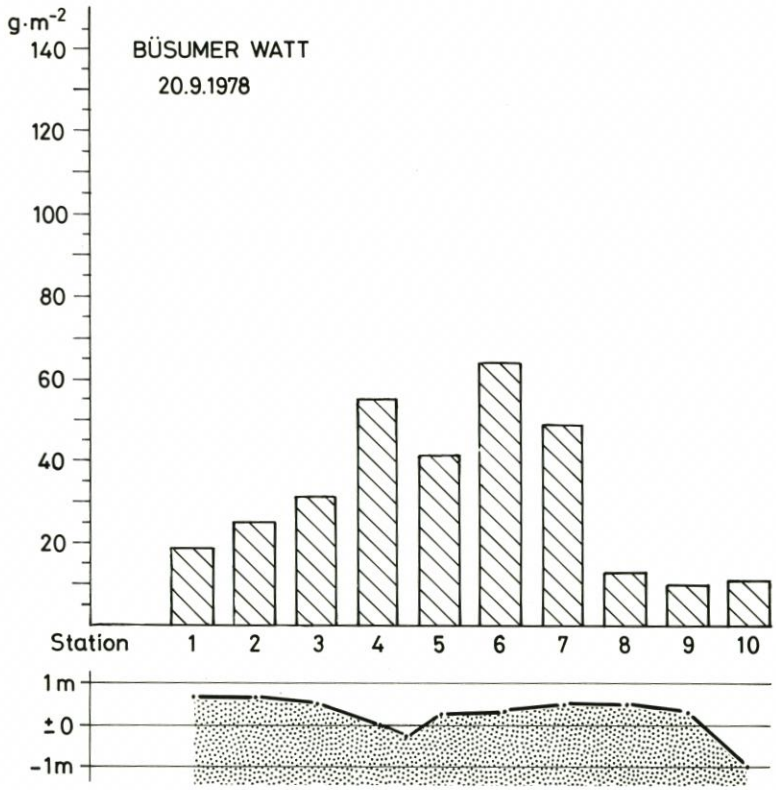


Abb. 19. Biomasse und Watthöhe, Stationen 1–10

Die am 20. 9. 1978 genommenen Stechrohrproben wurden als Grundlage für eine eingehende Betrachtung der einzelnen Arten und ihrer Beziehung zur Sedimentbeschaffenheit benutzt. In Tab. 9 wird diese Beziehung wichtiger Arten zum Sediment wiedergegeben. Die genannten Beziehungen stellen allerdings nur Tendenzen dar. Eine deutliche oder ausschließliche Bevorzugung eines bestimmten Sedimentes ist bei keiner der Arten zu konstatieren. Die Zu- bzw. Abnahmen der Arten bei wechselndem Siltanteil des Sediments sind nur gering, und die überwiegende Zahl der Arten scheint Sedimente mit mittlerem Siltanteil tolerieren zu können. Der für die einzelnen Arten bestimmende Faktorenkomplex aus biotischen und abiotischen Parametern ist so umfangreich, daß sich zwischen den Faktoren Korngröße und Besiedlungsdichte keine signifikante Korrelation nachweisen läßt. Besonders die biotischen Parameter sind stark variabel und verändern das Besiedlungssystem kleinräumig. OHDE (1981) weist auf die Bedeutung von Strömung und Transport für die Verbreitung einiger Arten hin, die sich nicht nur auf die Larvenansiedlung auswirken, sondern auch auf die Adulten verschiedener Arten. Die Verteilung der Arten ist daher auch vom Wettergeschehen abhängig, und dieses wirkt sich in unterschiedlicher Weise auf die verschiedenen Altersstadien bzw. Größen der Individuen aus.

In Abb. 26 werden, nach den Sedimenttypen untergliedert, die durchschnittliche Besiedlungsdichte, die Maximaldichte, das Trockengewicht und das aschefreie Trockengewicht der Makrofauna aus den oberen 10 cm des Sediments für August/September 1978 im Testgebiet Büsumer Watt wiedergegeben.

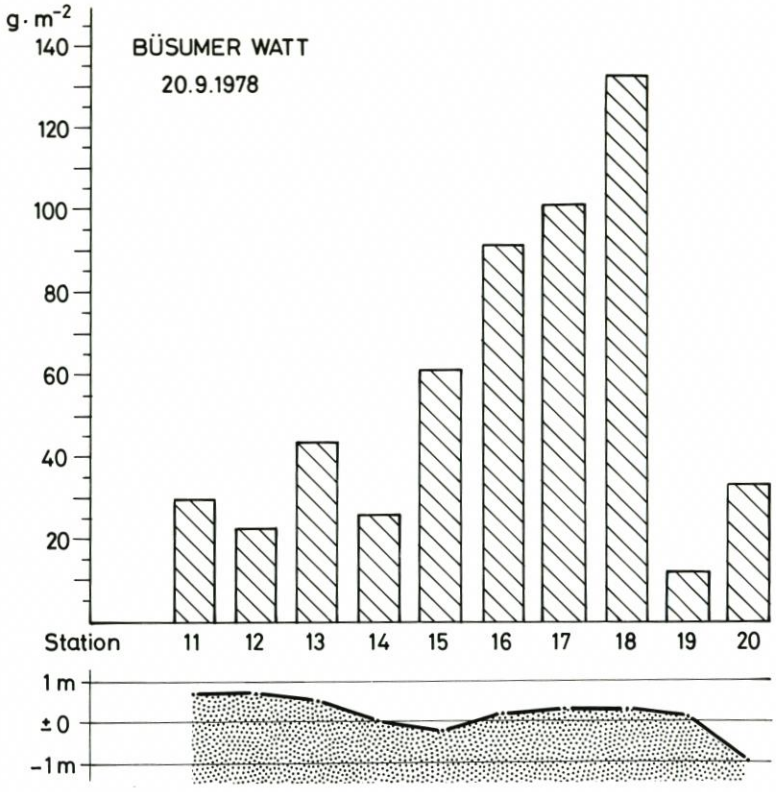


Abb. 20. Biomasse und Watthöhe, Stationen 11–20

Tabelle 9
Beziehung einiger Arten zum Sediment

Bezug zum Sediment	Art
Keine erkennbare Abhängigkeit vom Siltgehalt des Sediments	*Cerastoderma edule* *Hydrobia spec.* *Eteone longa*
Maximum bei mittlerem Siltanteil	*Littorina littorea* *Anaitides maculata* *Anaitides mucosa* *Tharyx marioni* *Capitella capitata* *Peloscolex benedeni*
Zunahme bei steigendem Siltanteil	*Macoma balthica* *Mya arenaria* *Heteromastus filiformis*
Rückgang bei steigendem Siltanteil	*Nereis virens* *Pygospio elegans*

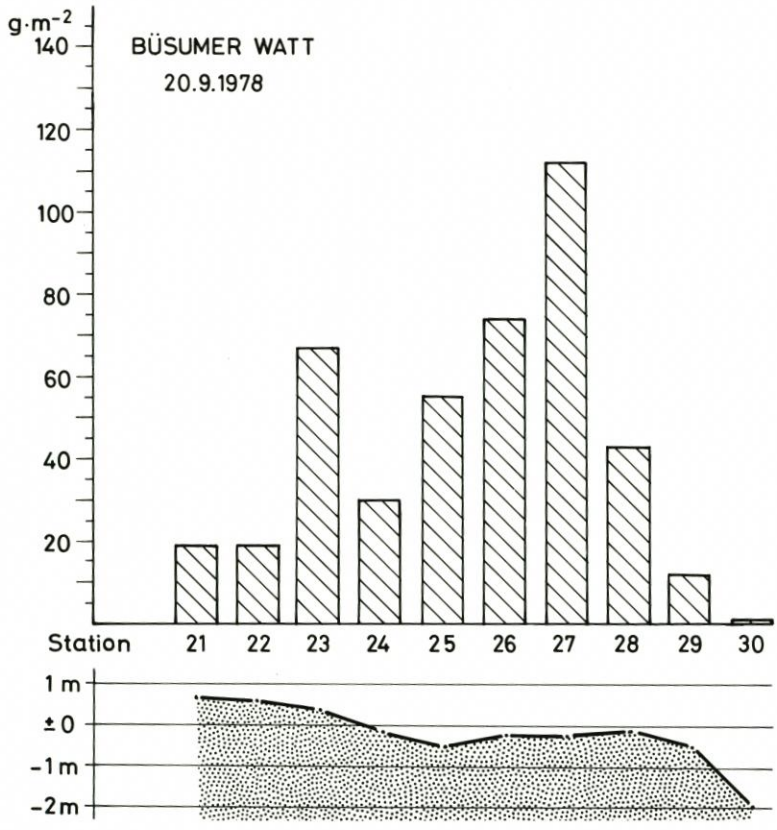


Abb. 21. Biomasse und Watthöhe, Stationen 21–30

4. Diskussion

4.1 Probleme der Quantifizierung biogener Sedimentbeeinflussung

Die Leistungen des Benthos, der auf und im Sediment lebenden Organismen, können unter den Gesichtspunkten verschiedener Fachrichtungen klassifiziert werden. Unter biologischen Aspekten interessiert die Produktion, der Aufbau organischer Substanz durch die Organismen; unter geologischen und hydrologischen Gesichtspunkten stehen die Auswirkungen der Organismen auf das Sediment im Vordergrund des Interesses. Im Zusammenhang mit der vorgegebenen Fragestellung sollen diejenigen Leistungen der Organismen besprochen werden, die unter Biodeposition und Bioresuspension, Bioturbation und Biostabilisation zusammengefaßt werden können. Einzelne Aspekte sind in früheren Arbeiten beschrieben worden (z. B. Thamdrup, 1935; Wohlenberg, 1937; Müller, 1960 und Schäfer, 1962). Ragutzki (1973) erwähnt den Mangel an quantitativen Daten über das Zusammenwirken und die Wechselbeziehungen zwischen Bodenfauna und hydrologischen Bedingungen. Wichtige, teils zusammenfassende Arbeiten aus den letzten Jahren sind diejenigen von Gray (1974), Rhoads (1974), Aller (1977) und Führböter (1983).

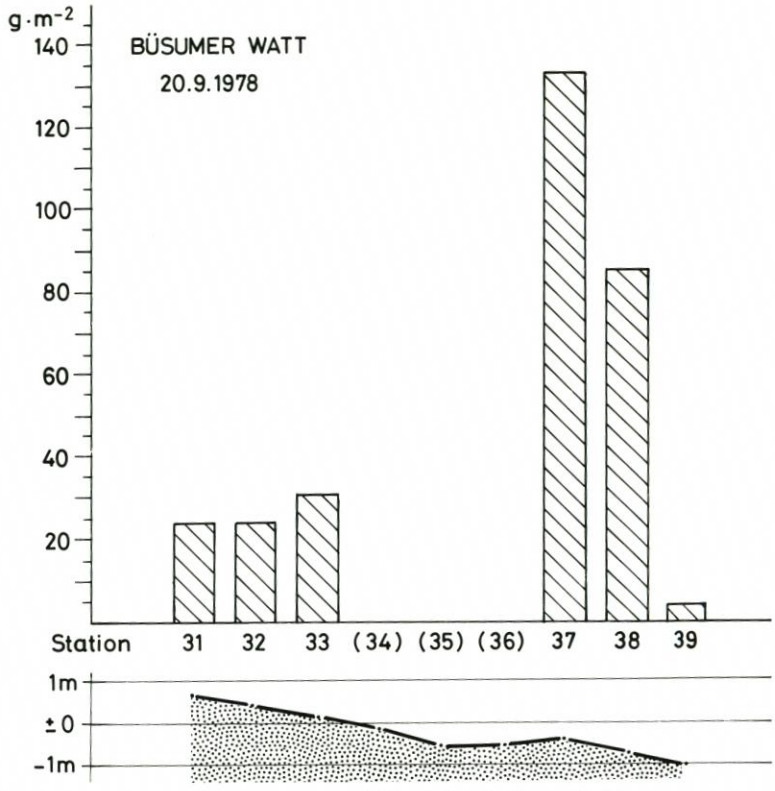


Abb. 22. Biomasse und Watthöhe, Stationen 31–39

Produktionsleistung und Biodeposition stehen in enger Beziehung zueinander, sind doch Faeces und Pseudofaeces Ablagerungsprodukte, die aus dem als Nahrung aufgenommenen Material ihre Energie gewinnen und diese teils zur Produktion verwenden. Erst die Quantifizierung der einzelnen Prozesse dieser biogenen Sedimentdynamik läßt ihre Bedeutung für den Schichtenverband erkennen. Die mengenmäßige Erfassung des Sedimenttransportes basiert allerdings auf der Summe von Einzelleistungen und kann aufgrund unseres Kenntnisstandes lediglich eine Abschätzung sein. Das liegt in der Lebensweise der Organismen begründet: Verschiedene Altersstadien erbringen unterschiedliche Leistungen; diese ändern sich mit den Jahreszeiten bzw. der Temperatur im Lebensraum. Die Filtrations- bzw. Biodepositionsraten sind vom nutzbaren Energiegehalt der partikulären Fracht abhängig, und schließlich kommt eine allgemeine Variabilität von Lebensprozessen hinzu, die nicht gedeutet werden kann. Cadée (1976) gibt ein Beispiel für einige Individuen von *Arenicola marina*, die unter weitgehend natürlichen Bedingungen gehalten wurden. Die Menge täglich abgegebener Faeces schwankte beim Vergleich der Individuen zwischen 1 : 1 und 1 : 5, und für die einzelnen Individuen lagen die Schwankungen innerhalb weniger Wochen ähnlich hoch. Cadée hat auch gezeigt, daß *A. marina* mehrtägige Ruhephasen einlegen kann, in denen wenige oder sogar keine Kotstränge produziert werden, also offensichtlich keine Nahrung aufgenommen wird.

Auch der Vergleich von Wattgebieten untereinander stößt auf Schwierigkeiten, da einerseits die methodischen Ansätze der verschiedenen Autoren nicht immer ausreichend

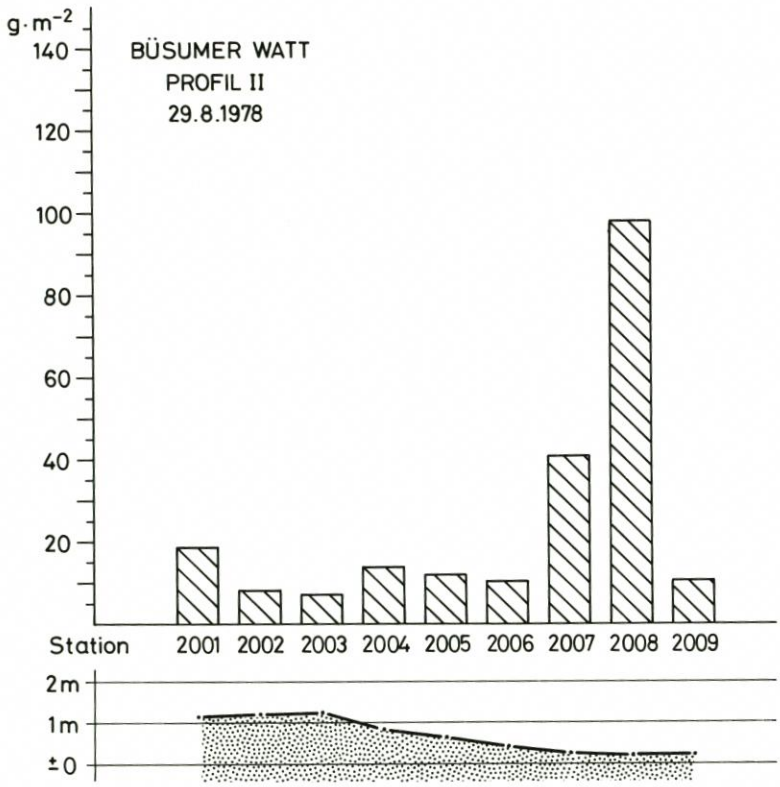


Abb. 23. Biomasse und Watthöhe, Profil II, Stationen 2001–2009

übereinstimmen, andererseits die Artenzusammensetzungen unterschiedlich sind, wie aus den Notizen zur Biologie der wichtigsten Arten in Kapitel 3 hervorgeht.

Mit der Artenzusammensetzung verändern sich auch das Leistungsspektrum bezüglich der Sedimentbeeinflussung und die Gesamtleistung der Lebensgemeinschaft. In diesem Sinne sind auch die Gesamtbiomassen für die verschiedenen Wattgebiete nur eingeschränkt vergleichbar. Während wir im Testfeld des Büsumer Watts eine Biomasse von durchschnittlich 47 g/m² fanden, gibt BEUKEMA (1976) für das gesamte holländische Watt 26,2 g/m² an, in einem Streifen von 1–3 km vor der Küste jedoch 41,6 g/m², und im südwestlichen Teil wurden nach WOLFF (in BEUKEMA, 1976) 45 g/m² erreicht. In der Leybucht liegen die Werte bei nur 21 g/m² (HÜPPOP, 1983). Die Angaben von REISE (1981) für die Nordstrander Bucht liegen in ähnlicher Größenordnung und zeigen gleichzeitig die starke lokale Veränderlichkeit mit 18,2 g/m² ± 61 % im Frühjahr und 67,0 g/m² ± 31 % im Sommer in den Bestandsdichten an. Diese komplexen Verhältnisse lassen nur eine größenordnungsmäßige Abschätzung über die Auswirkungen der Organismen auf die Sedimente zu. Im Vergleich zu den physikalischen Vorgängen von Sedimentation und Resuspension kann deren potentielle Bedeutung jedoch erkannt werden.

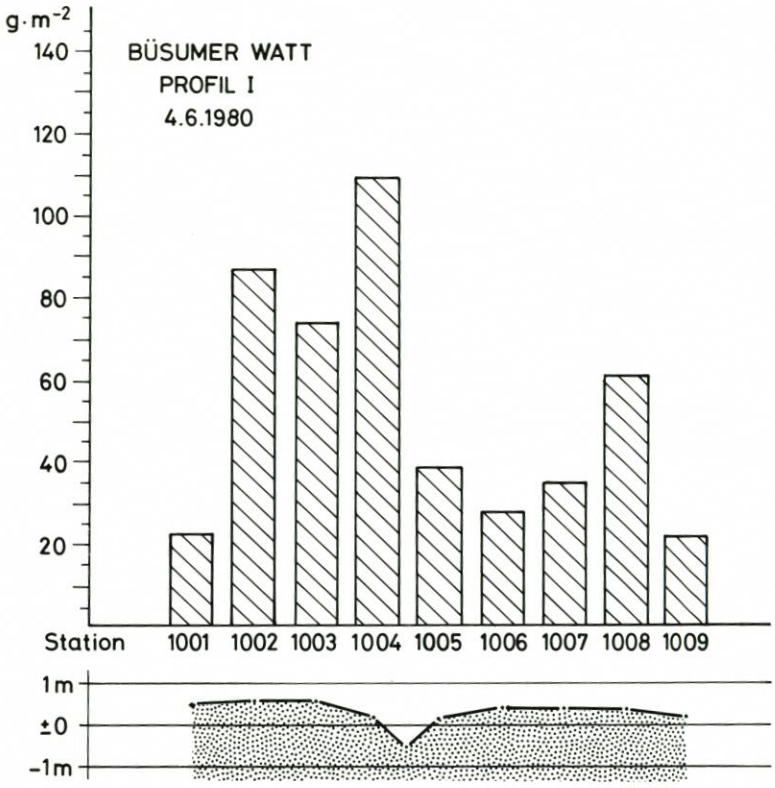


Abb. 24. Biomasse und Watthöhe, Profil I, Stationen 1001–1009

4.2 Biodeposition

Mengenbestimmungen des Seston zeigen im allgemeinen ein Defizit des Ebbstromes im Watt gegenüber dem vorhergegangenen Flutstrom. Diese Erscheinung hängt sowohl mit den physikalischen Transportbedingungen zusammen als auch mit den Auswirkungen der Lebensweisen einiger in dem Gebiet vorkommender Organismen.

Die Auswirkungen von Pflanzenbeständen auf die Sedimentation sind bekannt, und sie sollen an dieser Stelle mit erwähnt werden, obwohl sie die Ablagerung der Partikel nur passiv physikalisch beeinflussen. Enge Pflanzenbestände verringern die Strömungen, und das bedeutet: Sedimentation und Bodenerhöhung. In früheren Jahren wurden in großen Wattbereichen Anpflanzungen im Küstenvorfeld zur Erhöhung des Wattniveaus vorgenommen (z. B. Wohlenberg, 1937). Im untersuchten Testgebiet des Büsumer Watts ist dieser Einfluß aufgrund der geringen Pflanzenbestände jedoch nicht von Bedeutung. Auf den Wattflächen siedeln im Frühjahr *Cladophora spec.*, die im Sommer und Herbst in kleinen Beständen das Watt fleckig bedecken. Zur Ebbezeit liegen sie auf dem Sediment, und zwar regelmäßig auf einer flachen Sedimenterhöhung, die sich unter dem Algenflecken abgelagert hat (Abb. 17).

Passive Förderung der Sedimentation ist auch durch Tiere denkbar, die über die Sedimentoberfläche hinausragen, jedoch kommt es zu einer wesentlichen Ablagerung partiku-

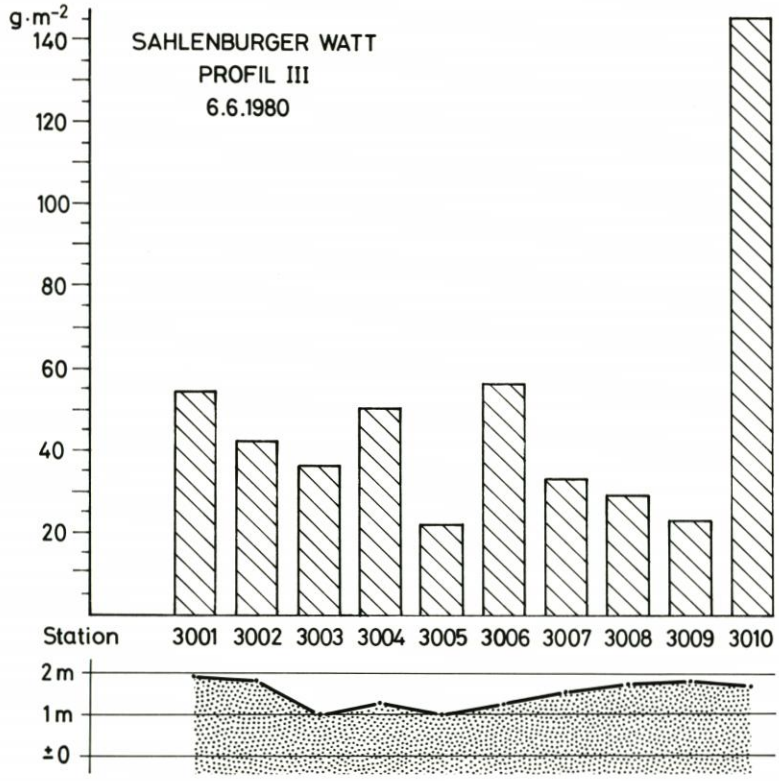


Abb. 25. Biomasse und Watthöhe, Profil III (Sahlenburger Watt), Stationen 3001–3010

lärer Substanz wohl nur bei hoher Individuendichte, wie beispielsweise im Bereich von Muschelbänken.

In größeren Beständen bestimmter Tierarten tritt die aktive Biodeposition in den Vordergrund. Insbesondere verschiedene Arten der Bivalvia filtrieren partikuläres Material aus dem Wasser *(Cerastoderma edule, Mya arenaria)* oder pipettieren es von der Sedimentoberfläche *(Macoma balthica)*. Ein Teil dieses Materials wandert durch den Magen-Darm-Trakt, wird mit Schleim versetzt zu Kotballen geformt, bei einigen Arten mit einer Schleimhülle umgeben und ausgestoßen (Haven u. Morales-Alamo, 1966). Dieses stabile Konglomerat hat einen sehr viel höheren hydrodynamisch wirksamen Äquivalentdurchmesser und bedarf sehr viel höherer Resuspensionskraft als die ursprünglichen Partikel. Während die Schwebfracht aus Partikeln von vorwiegend 1–5 µm besteht, fallen die Kotballen in einen Korngrößenbereich von etwa 0,05–0,4 mm (Gast, Köster u. Runte, 1984). Die Pseudofaeces sind meist weniger stabil als die Faeces, da sie bereits ausgestoßen werden, ehe sie in den Darmtrakt aufgenommen werden. Die stärkere Ablagerungstendenz dieser Großpartikel geht nach einiger Zeit wieder verloren, da die Konglomerate bakteriell angegriffen oder mechanisch, z. B. durch Welleneinwirkung, zerlegt werden. Zunächst einmal ist dieses Material jedoch dem Transportgeschehen entzogen. Dadurch steht es für eine gewisse Zeit am Entstehungsort zur Verfügung und kann durch andere Organismen in das Sediment eingearbeitet werden.

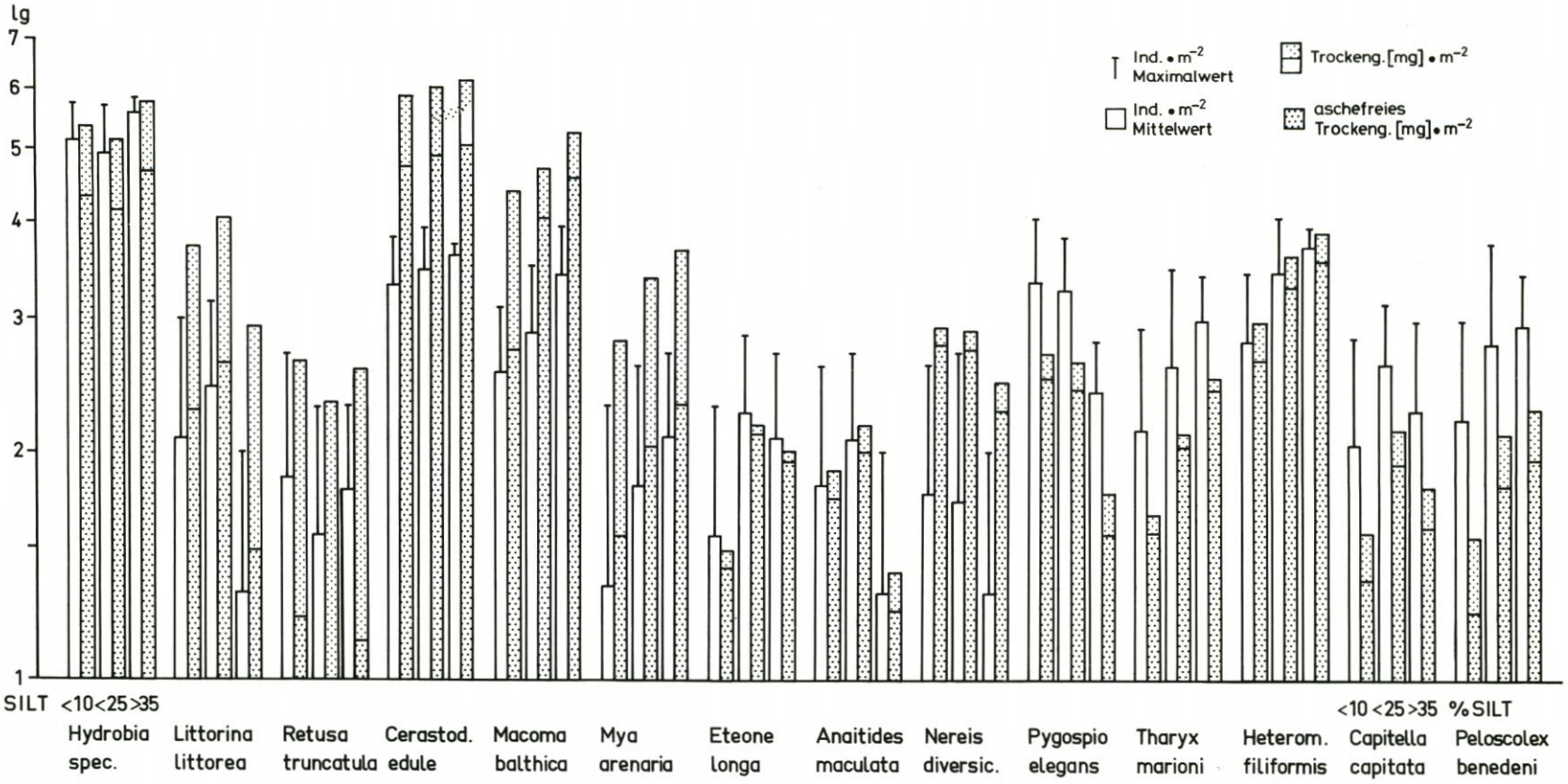


Abb. 26. Die Beziehungen einiger Arten zum Sediment nach Stechrohrproben aus den Monaten August und September 1978. Für jede der aufgeführten Arten sind zwei Säulen über jeweils < 10 %, 10–35 % und > 35 % Siltanteil im Sediment gezeichnet.
Weiße Säule: Individuen/m² (Mittelwert mit aufgesetztem Maximalwert (T); gepunktete Säule: ganze Länge = Trockengewicht (mg/m²), unterer Teil = aschefreies Trockengewicht (mg/m²)

Die Intensität der Biodeposition wird aus den Massenansammlungen von Kotballen deutlich, die im Watt beobachtet werden können. Quantitative Abschätzungen für die einzelnen für das Testfeld wichtigen Arten sind im Kapitel 3 gegeben. Tab. 10 stellt eine Zusammenfassung für das Büsumer Watt dar.

Zu diesen Leistungen addieren sich die Biodepositionsraten anderer Organismen, die das Seston ebenfalls als Nahrungsgrundlage nutzen. Wegen der geringen Filtrationsraten oder Bestandsdichten der Arten besitzen sie jedoch kaum eine Bedeutung für das Sedimentationsgeschehen.

Tabelle 10

Maximale Biodepositionsleistungen filtrierender Organismen im Testfeld des Büsumer Watts (Abundanzen nach eigenen Untersuchungen, Leistungsberechnungen nach verschiedenen Autoren)

Art	Maximale Dichte Ind./m^2	Deposition pro Tag in g/m^2 (Autor)	Volumen (cm^3) bei spez. Gew. = 2	Schichtzunahme mm/Monat
Cerastoderma edule	1400	700 (VAHL, 1972)	350	10,5
Macoma balthica	1000	43 (BUBNOVA, 1972)	21,5	0,1
Mya arenaria	100	2,5 (ALLEN, 1962)	1,3	0,04

In der Summe ist die in Tab. 10 angegebene maximale Biodeposition aller Arten zusammen höher anzusetzen. Allerdings handelt es sich bei diesen Raten um Sommer- und Maximalwerte, die dazu dienen, das Leistungspotential aufzuzeigen. Biologische Umsatzrate, Filtrationsrate und Biodepositionsrate folgen dem Jahresgang von Temperatur und Nahrungsangebot. In der kalten Jahreszeit sind die Leistungen nur gering. Andererseits beziehen sich die Biodepositionswerte auf adulte Tiere, während die großen Massen der Juvenilen unberücksichtigt bleiben mußten, da ihre Leistungen kaum bekannt und nicht abschätzbar sind. Nahrungsaufnahme und damit Filtrationsleistung sind in bezug auf die Biomasse bei den Juvenilen höher als bei den Adulten, so daß die artspezifische Biodeposition im Sommer und Herbst wesentlich höher sein kann, als sie in Tab. 10 angegeben ist.

Die Biodeposition in ihrer Auswirkung auf den Lebensraum einer Art darf das Sediment allerdings nicht in zu starkem Maße verändern. *Cerastoderma edule* könnte sich beispielsweise in weichem Schlick nicht in ausreichender Nähe der Sedimentoberfläche halten, ihre kurzen Siphonen nicht in das Wasser ausstrecken und folglich keine Nahrung einstrudeln. Bei hoher Biodeposition muß also aus biologischen Gründen durch Abtransport des feinpartikulären Materials eine zu starke Veränderung der Sedimenteigenschaften verhindert werden. Das geschieht durch die physikalischen Bedingungen, die ihrerseits am Standort von *C. edule* herrschen.

Für Biodeposition in anderen deutschen, holländischen und dänischen Watten können andere Arten von Bedeutung sein, die im Büsumer Watt nicht auftreten. In diesem Zusammenhang ist insbesondere *Mytilus edulis* zu nennen, die einerseits umfangreiche Muschelbänke bilden kann, in denen sich Schlick ansammelt, die andererseits in fischereilichen Kulturen zu lockeren Verbänden ausgesät wird und dann großflächig zur Biodeposition beiträgt.

4.3 Bioresuspension

Die Bioresuspension ist die Rückführung von Partikeln in das Wasser; sie wirkt der Biodeposition entgegen, indem bereits sedimentierte Partikel durch Organismen erneut in die Wassersäule gebracht werden. Meist werden diese nicht hoch über den Boden geführt und sinken deshalb auch schnell und im Nahbereich wieder ab, aber in Abhängigkeit von der herrschenden Strömung können feine Partikel auch weit fortgetragen werden.

Als Beispiel für resuspendierende Organismen können die Arten der Gattung *Corophium* angeführt werden. Diese Tiere liegen in einer wenig stabil gebauten Röhre in der Sedimentoberfläche. Atem- und Nahrungsstrom werden durch die Extremitäten erzeugt. Und dabei werden ständig Partikel aufgewirbelt. Besonders in den Schlickwatten können diese Schlickkrebse in großen Massen auftreten und Sediment bewegen.

Zu den resuspendierenden Tieren gehören auch die größeren Krebse wie *Carcinus maenas* (Strandkrabbe), die beim Umherlaufen und Graben Sediment aufwirbeln und auch *Crangon crangon* (Garnele), die in großer Zahl zur Flutzeit das Watt aufsuchen können. Sowohl die im Boden wühlenden und grabenden Fische als auch die tauchenden und gründelnden Enten, Gänse, Schwäne und Watvögel können zur Resuspension beitragen. Die Plattfische wühlen sich mit undulierendem Flossensaum in das Sediment und erzeugen dabei eine Wolke feiner Partikel, die mit der Strömung fortgetragen werden kann. Quantifiziert sind diese Vorgänge wohl in keinem Falle, und da sie meist unregelmäßig stattfinden, erscheint eine Berechnung der Gesamtleistung auch kaum möglich.

Zur Herabsetzung der kritischen Geschwindigkeit für den Erosionsbeginn und damit zu früher Resuspension führen Aktionen von Organismen in der Sedimentoberfläche, die in die Bereiche von Biodeposition und Bioturbation fallen. Nowell, Jumars u. Eckman (1981) beobachteten den Erosionsbeginn im Strömungskanal bei ebener Sedimentoberfläche und nach deren Aufrauhung durch Organismen. Durch die Kriechspuren einer kleinen Muschel (4 mm), *Transenella tantilla*, wurde die Sedimentoberfläche durch Furchen und flache Seitenwälle (1 mm hoch) aufgerauht. Die kritische Strömungsgeschwindigkeit wurde dadurch von 1,74 cm/sec auf 1,39 cm/sec herabgesetzt. Ähnliche Auswirkungen werden junge Muscheln, kleine Schnecken und andere Tiere im Watt haben, die die Sedimentoberfläche strukturieren. Die stabilisierende Wirkung durch Schleimabsonderung beim Kriechen von *Hydrobia ulvae* wirkt zwar entgegengesetzt, aber die Seitenwälle der Kriechspuren werden rein mechanisch aufgeworfen, und die Partikel werden leichter transportiert und resuspendiert.

Bei vielen Arten dürfte die Bioresuspension mit der Bioturbation in den Oberflächenschichten des Sedimentes eng verbunden sein. Beide Vorgänge werden durch dieselben Aktionen der Organismen ausgelöst.

4.4 Bioturbation

Unter Bioturbation ist die Verwühlung der Sedimente durch Organismen zu verstehen und in dem in dieser Arbeit betrachteten Zusammenhang insbesondere die Lockerung und Umlagerung des Substrates, die zu verstärkter Erosion und Resuspension von Partikeln und damit zum Sedimenttransport führen. Bioturbation wird von allen Organismen bewirkt, die sich auf und im Sediment bewegen und dabei Sedimentpartikel umlagern. Kenntnisse über Umsatzvolumina besitzen wir nur von wenigen Arten, die aber bedeutsam für die Gesamtbilanz der Bioturbation sind. Wie auch schon in den vorhergehenden Abschnitten müßte aber auch die Summe der übrigen Wühler miteinbezogen werden. In diesem Zusammenhang ist die

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Meiofauna (Evertebraten kleiner als 1 mm) von Bedeutung, jedoch ist sie bisher nur von CULLEN (1973) unter dem Gesichtspunkt der Bioturbation berücksichtigt worden. Diese Größenklasse, vorwiegend *Nematoda* (Fadenwürmer) und *Harpacticoidea*, kommt in Bestandsdichten von 2×10^6 Individuen je m^2 vor, und ihre Lebensaktivität, insbesondere in der Sedimentoberfläche, lockert und rauht den Boden auf, so daß Erosion und Resuspension insbesondere in siltreichen Ablagerungen schon bei geringen Strömungsaktivitäten einsetzen können.

Quantitative Abschätzungen für das Büsumer Watt lassen sich nur für *Arenicola marina* und *Heteromastus filiformis* vornehmen (Tab. 11), deren Umsatz an Sediment durch die Kotabgabe gemessen werden kann und als im Jahresablauf umgelagerte Sedimentschicht angegeben worden ist.

Tabelle 11
Besiedlungsdichte und Umlagerungsleistungen von *Arenicola marina* und *Heteromastus filiformis*

Gebiet	maximale Besiedlungsdichte Ind./m^2	theoretisch im Jahr umgelagerte Sed.-Schicht (cm)	Autor
Arenicola marina			
Jadebusen	40	27	LINKE, 1939
Watt vor Holland	15	15	VAN STRAATEN, 1956
Watt vor Holland	17	6–7	CADÉE, 1976
Barnstable Harbor, Cape Cod	85	60	ALLER, 1977
Büsumer Testfeld	26	10–25	diese Arbeit
Heteromastus filiformis			
Watt vor Holland	1000	2	CADÉE, 1979
Büsumer Testfeld	600	1,5	diese Arbeit

Die „theoretische umgelagerte Sedimentschicht" soll die Vorstellung vermitteln, welche Massen von Sedimenten durch diese Polychaeten bewegt werden können. Für das Büsumer Testfeld sind bei *A. marina* die Werte der drei zuerst genannten Arbeiten für die Abschätzung zugrunde gelegt worden. Tatsächlich stammt das von *A. marina* transportierte Material jedoch aus der Sedimentoberfläche. Unter der Annahme, daß es sich dabei um eine nur 1 cm starke Herkunftsschicht handelt, würde diese 10- bis 25mal durch den Darm der Polychaeten geschleust und wieder ausgestoßen werden.

Anders als bei *A. marina* entnimmt *H. filiformis* sein Freßsediment aus der reduzierten Sedimentschicht, lagert dieses aber auf der Sedimentoberfläche ab, so daß eine Vertikalbewegung der Sedimentschichten erfolgt. Da Freß- und Ausscheidungshorizont unterschiedlich sind, dürfte die Rate des wiederholten Transportes derselben Sedimentpartikel durch *H. filiformis* gering sein.

In dieser Arbeit wird das Hauptgewicht auf das Aktionspotential gelegt, auf die Auswirkungen, die die Organismen durch ihre Lebensweise maximal haben können, und dieses Potential wird auf das Testfeld des Büsumer Watts angewandt (Tab. 11). Deswegen soll nochmals auf Unterschiede hingewiesen werden, die in den Bestandsdichten und in den Leistungen auftreten können. Die jahreszeitlichen und die langfristigen Veränderungen sind insbesondere von CADÉE (1976) für *Arenicola marina* und von CADÉE (1979) für *Heteromastus filiformis* dargestellt worden. In Abschn. 4.1 ist bereits die Faeces-Produktion von *A. marina*

in ihrer Unterschiedlichkeit für einzelne Individuen und zwischen den Individuen beschrieben worden. An dieser Stelle muß zusätzlich auf den Jahresgang dieser Leistung hingewiesen werden. Während die Faeces-Produktion von zwei Beständen im Winter (Dezember–Februar) bei 20 ml/m² und Tag oder darunter lag, erreichte sie im Juli maximale Werte von 1000 bzw. 2500 ml/m² und Tag. Winter- und Sommerleistungen der untersuchten Populationen von *H. filiformis* stehen etwa im Verhältnis 1 : 20, die Individualleistungen erreichen jedoch nur eine Relation von 1 : 2. Während in den Jahren 1975 und 1976 die Jahreskurven der Faeces-Produktion zwar unterschiedlich verliefen – die Maxima von Besiedlungsdichte und Sediment-Umsatzrate fallen in den Herbst bzw. in den Sommer –, blieben die Größenordnungen jedoch gleich. Im Gegensatz dazu lagen 1978 die Werte für die Besiedlungsdichte und die Umsatzrate bei gleicher Individualleistung aber um den Faktor 10 über denen der früheren Jahre.

Die biologischen Erscheinungen und ihre Variabilität lassen sich häufig nicht auf bestimmte Ursachen zurückführen, da die erforderlichen Beobachtungen und multivariate Faktorenanalysen für Einzelfälle fehlen. Diese sind wegen der hohen Komplexität auch kaum zu erstellen, und damit sind auch Vorhersagen über den Umfang der Bioturbation an einem bestimmten Ort und unter gegebenen Umständen kaum möglich.

Um die Auswirkungen der Bioturbation ergänzend zu erläutern, sei ein Beispiel aus der Literatur angefügt, für das aus dem Testfeld allerdings keine entsprechenden Beobachtungen vorliegen. RHOADS u. YOUNG (1970) stellten fest, daß die Muschel *Nucula proxima* durch ihre Wühltätigkeit den Wassergehalt in der Sedimentoberfläche (0–5 cm) von 45–53 % auf 53–60 % und damit gleichzeitig die Erodierbarkeit des Sedimentes erhöhen kann.

4.5 Biostabilisation

Wie „Bioresuspension" ist „Biostabilisation" als Begriff bisher nicht verwendet worden; allerdings sprechen FÜHRBÖTER (1983) und seine Mitarbeiter von der Stabilisation der Sedimente durch Organismen. In Anlehnung an Biodeposition und Bioturbation soll die Wortbildung mit „Bio" auch für diese biogene Wirkung die Bedeutung der Organismen herausstellen.

So wie der Pflanzenbewuchs zur Biodeposition beiträgt, so wird ebenfalls passiv die Biostabilisation durch Pflanzen bzw. die kritische Geschwindigkeit für den Beginn der Erosion erhöht. Bei den Seegräsern ergibt sich eine zusätzliche Stabilisation durch das Wurzelwerk im Sediment.

Auch die dichten Diatomeenüberzüge wirken bei geringen Strömungsintensitäten besonders durch den Schleimverbund der Partikel, durch die Glättung der Sedimentoberfläche und die dadurch bedingte bodennahe laminare Strömung zunächst stabilisierend. Erst wenn an einer Stelle der Diatomeenrasen aufgebrochen wird, kommt es zum Abheben des Rasens in kleinen Flächen und zu randständigen Auskolkungen.

In ähnlicher Weise können Bakterien und blaugrüne Algen (Cyanophyceen, Cyanobakterien) durch ausgeschiedene Substanzen und durch fädige Strukturen die Bindigkeit der Sedimente erhöhen. Erhebliche Sedimentstabilisation durch Cyanobakterien ist in neuen Forschungsarbeiten für Sandwatten und für die Zone des Farbstreifen-Sandwatts festgestellt worden (FÜHRBÖTER, 1983; FÜHRBÖTER, DETTE, MANZENRIEDER u. NIESEL 1983; STAL, KRUMBEIN u. GEMERDEN, im Druck). Diese Autoren geben erste quantitative Werte. Der biologische Stabilisierungsfaktor ist das Verhältnis der kritischen Geschwindigkeit für den Erosionsbeginn bei besiedelten Sedimenten zur kritischen Geschwindigkeit ohne Organismen

(steril) in den Sedimenten. Nach FÜHRBÖTER et al. (1983) würde der Feststofftransport im Watt nach ingenieurmäßigen Ansätzen bei einer Strömungsgeschwindigkeit von rund 0,2 m/sec beginnen; durch biogene Einflüsse steigt die kritische Geschwindigkeit auf 0,5–1,5 m/sec an. An diesem Beispiel wird nicht nur deutlich, was gemessen werden kann und wie sich die Biostabilisation auswirkt, sondern es wird auch demonstriert, daß einer physikalischen Meßgröße – dem Wert für das sterile Sediment – ein breites Spektrum an Werten für das „lebende Sediment" gegenübersteht. Unter dem Einfluß abiotischer und biotischer Faktoren kann die Biostabilisation außerordentlich stark schwanken. In der Bodenstabilität dürfte dadurch eine kleinräumige starke Variabilität vorhanden sein, wie sie in allen Besiedlungsmustern zu finden ist, die sicherlich zu starker Streuung der für den Erosionsbeginn kritischen Geschwindigkeiten führen dürfte.

Ebenso können sich auch Foraminiferen auf den Sedimentverband auswirken. Sie verkleben mit ihren Pseudopodien Sedimentpartikel, deren Erosion dann erst bei stärkerer Strömungsintensität möglich wird. LAMADE (1978) fand im Watt bei Büsum maximal 75 Foraminiferen unter 1 cm^2 Oberfläche und bis 2 cm Sedimenttiefe.

Schleimabsonderungen binden und stabilisieren Sedimente durch die Bildung von Aggregaten. *Hydrobia spec.* kommt in großen Zahlen in bestimmten Bereichen des Watts vor. Im Büsumer Watt wurden bis zu 55 000/m^2 gefunden (etwa 3450/m^2 im Mittel), deren Auswirkungen durch Schleimproduktion beträchtlich sein dürften. Hinzu kommen die Absonderungen von bis zu 7600 *Littorina littorea*/m^2 und einigen *Retusa truncatula.* Auch Muscheln können sich kurz nach dem Brutfall stabilisierend auf die Sedimente auswirken. Im Büsumer Watt kamen sie nach eigenen Beobachtungen 1979 in Dichten bis zu 100 000/m^2 *(Cerastoderma edule)*, 15 000/m^2 *(Macoma balthica)* und 100 000/m^2 *(Mya arenaria)* vor. Durch Byssusfäden heften sie sich am Sediment fest und bilden dabei Aggregate, die weniger leicht transportiert werden, als dies mit Sediment und Muscheln in nicht verbundenem Zustand möglich wäre.

Weitere Stabilisation ist durch Röhrenbau möglich. Während die Röhrenwände von *Heteromastus filiformis* dünn und häutig sind, werden in diejenigen von *Pygospio elegans* und *Lanice conchilega* gröbere Partikel eingelagert. Die Wirkung solcher Röhren bezüglich der Sedimentstabilität wird von FÜRBÖTER et al. (1983) beschrieben, die in Experimenten mit künstlichen Röhren feststellten, daß zwar die Stabilität der Sedimente erhöht wurde, aber bei einer bestimmten mittleren Besatzdichte Turbulenzen und lokale Erosionen hinter den Röhren auftraten.

Als stabilisierend dürften sich auch die Röhrenbildungen und die Flächenüberzüge auswirken, die die Polychaeten *Capitella capitata* und *Polydora ciliata* erzeugen. Insbesondere bei dichtem Besatz bilden sie eine schützende Haut aus verklebten Partikeln über dem Sediment, und ihre Röhren vermindern zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit in der Boden-Wasser-Grenzschicht.

FÜHRBÖTER et al. (1983) erwähnen auch die Lockerung der Sedimente durch biogene Gasblasenbildung und die Resuspension durch Muscheln, kommen aber insgesamt zu dem Ergebnis, daß eine Zunahme der Festigkeit des Sedimentes durch Biostabilisation erfolgt, und zwar im Mittel um 300 % und max. um 770 % gegenüber reinem Sand. Diese Wirkung der Organismen zusammen mit der Biodeposition könnte zu einer langsamen Aufhöhung der Watten führen.

4.6 Zur Sedimentdynamik im Büsumer Watt

Die Sedimentdynamik eines Wattenbereiches ist abhängig von einem Komplex biogener und hydrodynamischer Faktoren. Da für den biogenen Teilkomplex keine Gesamtanalysen der das Sediment stabilisierenden und lockernden Einflüsse möglich ist, wurden bei den Betrachtungen in den vorhergehenden Kapiteln maximale Besiedlungsdichten und Sedimenttransportraten berücksichtigt.

Aus den Untersuchungen von WIELAND (1984) im Bereich der Meldorfer Bucht und speziell im Büsumer Watt geht hervor, daß das Testfeld während der Jahre 1974 bis 1980 erwartungsgemäß einer wechselnden Dynamik unterworfen war. Die Watthöhen und die Korngrößenanteile $< 63\,\mu m$ sind in den Abb. 27a und 27b für die – auch von uns in die Untersuchungen einbezogenen – Profile I und II mit den jeweils 100 m auseinanderliegenden Stationen dargestellt. Die Abbildungen zeigen Veränderungen für die einzelnen Stationen auf, aus denen zwar die langfristigen Aspekte deutlich werden, die jedoch die wahre, kurz- und mittelfristige Dynamik pro Jahr nicht wiederzugeben vermögen. Eine jährlich durchgeführte Watthöhenbestimmung kann kurz- und langzeitige Schwankungen nicht ausreichend erfassen, zumal die zu- und abnehmenden Tendenzen in der Watthöhe von Station zu Station unterschiedlich sind. Für den Zeitraum von 1942–1976 lag die Gesamtzunahme um 3,9 cm pro Jahrzehnt für den Bereich zwischen Normal Null und + 0,5 m; oberhalb dieses Niveaus ergab sich ein Wert von 4,9 cm pro Jahrzehnt. Die Änderungen können jedoch sehr viel stärker sein, wie Abb. 27a für die Stationen + 600, + 700 und + 800 (m vom Deich entfernt, unsere Stationen 1006–1008 auf Profil I) zeigt. Von 1974 bis 1976 waren Abnahmen in der Watthöhe von 32, 38 resp. 45 cm festzustellen, von 1976 bis 1980 hingegen Wattaufhöhungen von 27, 25 resp. 32 cm.

Besonders stark waren kurzfristige und kurzzeitige Aufschlickungen im Frühjahr 1979, als nach eigenen Beobachtungen eine Schlickauflage bis 20 cm Stärke nach dem Abschmelzen des Eises auf dem Watt verblieb und nach etwa 2 Wochen durch die Strömungen wieder abgetragen war (vgl. auch GAST, KÖSTER u. RUNTE, 1984). Dieses Beispiel zeigt die kurzfristigen Ereignisse besonders gut, die bei der Darstellung langfristiger Aspekte nicht in Erscheinung treten.

In ähnlicher Weise lassen sich für die einzelnen Stationen Veränderungen in den Korngrößenverteilungen feststellen. Bezogen auf die Siltfraktion $< 63\,\mu m$ lassen die Abb. 27a und 27b Häufigkeitsveränderungen bis zu 20 % innerhalb von zwei Jahren erkennen. Auch dieses Merkmal variiert kurzfristig unter dem Einfluß von Biodeposition und hydrographischen Bedingungen. Bei ruhiger Wetterlage und starker Biodepositionsleistung ergibt sich eine Verschiebung im Korngrößenspektrum zu feineren Komponenten. KÖSTER u. GAST (1984) haben ebenfalls geringere Anteile der Korngrößen unter 125 µm in den Winter-Frühjahrs-Monaten als in den Sommer-Herbst-Monaten gefunden.

Die Diskrepanz zwischen den Meßergebnissen und der tatsächlichen Dynamik gestattet es nicht, den Einfluß der Organismen auf dieses Geschehen aus dem Gesamtprozeß zu isolieren. Von der Fauna mit hoher Depositionsleistung kommt im Büsumer Testfeld nur *Cerastoderma edule* vor. Die anderen Arten tragen nur geringe Mengen zur Sedimentbildung bei, so daß sich die Abschätzung der Deposition für das Testfeld auf *C. edule* beschränken soll. Wir gehen dabei von einer Filtrationsleistung von 0,5–2,5 l/h, einer Filtrationsdauer von 12 Stunden (vgl. Abschn. 3.4.2) und einer partikulären Fracht von 100 mg/l aus. Die Berechnungen der Filtrationsleistungen pro Tag, bezogen auf die einzelne Station mit 10 000 m^2, und die Tagesleistung des gesamten Bestandes im Testfeld sind in Tab. 12 zusammengefaßt.

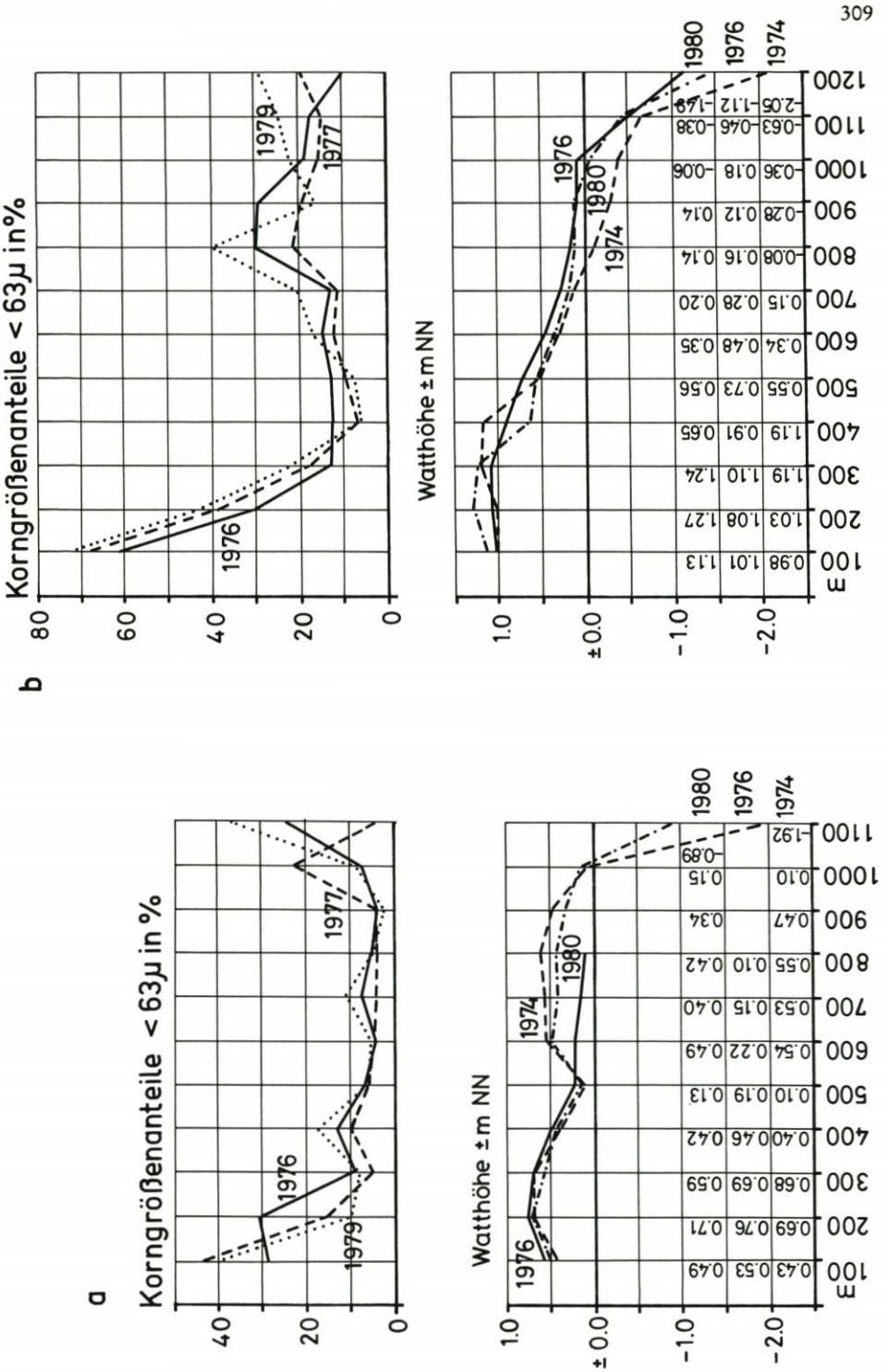


Abb. 27. Watthöhen und Korngrößenanteile < 63 µm *in Prozent auf den Profilen I (27a) und II (27b) in den Jahren 1974, 1976 und 1980 (aus* WIELAND, 1984)

Tabelle 12
Abgeschätzte Filtrationsleistung von *Cerastoderma edule* für verschiedene Bestandsdichten und Sedimenttypen im Testfeld des Büsumer Watts

Beobachtungen:			
Seston Filtrationsleistung/Individuum Filtrationsdauer/Tag	100 mg/l 0,5–2,5 l/h (WILLEMSEN, 1952) 12 h (VAHL, 1972)		
Berechnungen:			
Filtrationsleistung/Tier	0,6–3 g		
Bestandsdichte/m²	Sandwatt: 100 Ind.	Mischwatt: 300 Ind.	Schlickwatt: 800 Ind.
Tagesleistung des Bestandes/m²	60–300 g	180–900 g	480–2400 g
Sedimentauflage/Tag	0,03–0,15 mm	0,09–0,45 mm	0,24–1,2 mm
Tagesleistung des Bestandes/Station (10 000 m²)	600–3 000 kg	1 800–9 000 kg	4 800–24 000 kg
Anzahl der Stationen	4	20	16
Tagesleistung des Bestandes im Testfeld	2,4–12 t	36–180 t	76,8–384 t

Der Verbrauch der im Seston vorhandenen organischen Substanz durch die Muscheln ist im Vergleich mit der Gesamtabschätzung gering und wird darum nicht berücksichtigt. Für die unterschiedlichen Sedimentgebiete mit ihren charakteristischen Bestandsdichten beträgt die Biodeposition rund 0,6–24 t/Tag und Station. In dem Bereich der von *C. edule* besiedelten 40 Stationen werden bei Addition der minimalen bzw. maximalen Leistungen (Tab. 12) 115 bzw. 576 t Schlick täglich abgelagert. Diese Leistungen werden allerdings nur in den Sommermonaten erreicht. Für die kälteren Jahreszeiten liegen keine Basisdaten zur Abschätzung der Leistungen vor. Abschätzungen dieser Art haben stark spekulativen Charakter, aber sie können die Größenordnungen aufzeigen.

Biodepositionsraten dieser Größenordnung können über einen längeren Zeitraum Einfluß auf die Sedimente in ihrer Korngrößen-Zusammensetzung und auf die Schichtdicken haben. Auch die Verschiebung des Korngrößenspektrums zu kleineren Partikeln während der Sommer-Herbst-Monate ist sicherlich wenigstens teilweise durch die Biodeposition erklärbar. Die biogene Ablagerung der Partikel geschieht in den agglutinierten Kotballen, die Einarbeitung in das Sediment kann in dieser Form oder nach dem Zerfall in die Ausgangspartikel geschehen und zur Aufhöhung des Watts beitragen.

Die mittelfristigen Sedimentationserscheinungen wurden im Zeitraum einiger Wochen von GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984) untersucht. In orientierten Stechproben wählte er einen auch in später gewonnenen Proben wiederauffindbaren Leithorizont aus. Von dieser Marke ausgehend, ließen sich Sedimentations- oder auch Erosionsereignisse für den Zeitraum zwischen aufeinanderfolgenden Proben feststellen. In unterschiedlich orientierten Proben und

an verschiedenen Stationen stellten die Autoren Sedimentwachstum oder -abtragung fest. Wir gehen nur auf Station 54 und auf die Ost-West-orientierten Proben ein, die einfache Verhältnisse ergaben, auch wenn die Ansprache der Sedimentschichten durch die direkte Beobachtung und durch die Radiographie etwas voneinander abweichen (Tab. 13).

Tabelle 13
Sedimentzunahme nach Beobachtungen an Probenkernen durch GAST, KÖSTER u. RUNTE (1984)

Datum 1980	Anzahl Tage	Tiefe des Leithorizontes in mm	Sedimentzunahme aus direkter Beobachtung in mm	mittlere Zunahme in mm/Tag
21. 05.		27		
06. 07.	46	50	23	0,5
01. 09.	101	66	16	$<0,3$
18. 10.	148	81	15	$>0,3$

Eine Sedimentauflagerung von 0,3–0,5 mm/Tag wird bei hohen Individuendichten durch Biodeposition erreicht. Station 54 liegt während des Untersuchungszeitraums im Bereich des Schlicksedimentes, die Besiedlungsdichte von *Cerastoderma edule* erreicht 800 Ind./m^2, entsprechend einer Biodepositionsleistung (Tab. 12) von 0,24–1,2 mm/Tag. Die von GAST, KÖSTER u. RUNTE festgestellte Sedimentationsrate kann also größenordnungsmäßig durch die Biodeposition von C. edule bewirkt werden.

Die Überlegungen zur Sedimentdynamik im Testfeld des Büsumer Watts machen deutlich, daß Biodeposition und Bioresuspension, Bioturbation und Biostabilisation Prozesse sind, die das Sediment erheblich beeinflussen können. Die wesentlichen Veränderungen scheinen aber doch eher unter abiotischen Einflüssen wie Strömung und Seegang zu geschehen. Die langfristigen Watthöhenmessungen zeigen Sedimentations- und Erosionsgeschehnisse an, die bei unveränderten Randbedingungen das Wattniveau schwanken lassen. Es ist jedoch offensichtlich keine gleichgerichtete Tendenz vorhanden oder auch gar vorherzusagen. Biogene und mechanische Faktoren stehen über lange Zeiträume in einem Gleichgewicht. Andererseits läßt sich aus diesem Gleichgewicht ableiten, daß eine wesentliche Veränderung des biologischen Systems im Watt – z. B. unter dem Einfluß anthropogener Belastung – auch zu unvorhersehbaren Veränderungen im sedimentologischen System führen wird.

Das Testfeld im Büsumer Watt umfaßt nur einen kleinen Ausschnitt des Wattenmeeres. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen werden teils auf andere Gebiete übertragbar sein, an den meisten Orten werden jedoch andere Faktorenkombinationen die ausgewogenen Systeme beherrschen. Um diese biologisch-physikalischen Gleichgewichte verstehen zu lernen, bedarf es der biologisch-physikalisch orientierten in situ-Gemeinschaftsforschung in ausgewählten, sehr kleinen Testfeldern.

5. Schriftenverzeichnis

ALLEN, J. A.: Preliminary experiments on the feeding and excretion of bivalves using Phaeodactylum labelled with ^{32}P. J. mar. biol. Ass. U. K., 42, 1962.

ALLER, R. C: The influence of macrobenthos on chemical diagenesis of marine sediments. Dissertation, Yale University, 1977.

ANDERSON, A.: Intertidal activity, breeding, and the floating habit of *Hydrobia ulvae* in the Ythan estuary. J. mar. biol. Ass. U. K., 51, 1971.

BAGGERMAN, B.: Spatfall and transport of *Cardium edule* L. Arch. néerl. Zool., 10, 1953.

BAUMFALK, Y. A.: Heterogeneous grain size distribution in tidal flat sediment caused by bioturbation activity of *Arenicola marina* (Polychaeta). Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.

BEUKEMA, J. J.: Biomass and species richness of the macro-benthic animals living on the tidal flats of the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 10, No. 2, 1976.

BEUKEMA, J. J.: Quantitative data on the benthos of the wadden sea proper. In: Dankers, N., Kühl, H. u. Wolff, J. W. (Eds.): Invertebrates of the Wadden Sea. Mar. Zool., 4, 1981.

BEUKEMA, J. J. u. VLAS, J. de: Population parameters of the lugworm, *Arenicola marina*, living on the tidal flats of the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.

BRAFIELD, A. E. u. NEWELL, G. E.: The behaviour of *Macoma balthica* L. J. mar. biol. Ass. U. K., 41, 1961.

BUBNOVA, N. P.: The nutrition of the detritusfeeding mollusks *Macoma balthica* L. and *Portlandica arctica* (Gray) and their influence on bottom sediments. Oceanol. 12, 1972.

CADÉE, G. C.: Sediment reworking by *Arenicola marina* on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 10, No. 4, 1976.

CADÉE, G. C.: Het effect van pierenspitten op de worm *Heteromastus*. Waddenbulletin, Vol. 12, No. 2, 1977.

CADÉE, G. C.: Sediment reworking by the polychaete *Heteromastus filiformis* on a tidal flat in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.

CREUTZBERG, F. u. POSTMA, H.: An experimental approach to the distribution of mud in the southern North Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 1, 1979.

CULLEN, D. J.: Bioturbation of superficial marine sediments by interstitial meiobenthos. Nature, 242, 1973.

DALES, R. P.: The reproduction and larval development of *Nereis diversicolor* O. F. M. J. mar. biol. Ass. U. K., 29, 1950.

DAMAS, D.: Le rôle des organismes dans la formation des vases marines. Annales Soc. géologique Belgique, 58, 1935.

DEGENS, E. T. u. KEMPE, S.: Geochemische und elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt. – Abschlußbericht für das Schlickprojekt des Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. Unveröffentlicht, 1980.

EISMA, D.: The distribution of benthic marine molluscs off the main Dutch coast. Neth. J. Sea Res., 3, 1966.

ELWERT, D.: Erläuterungen zur Bodenkarte 1 : 10 000 Speicherkoog Dithmarschen, Nordteil I und II. Geol. Landesamt Schleswig-Holstein, Kiel, 1977.

FARKE, H., WILDE, P. A. W. J. DE u. BERGHUIS, E. M.: Distribution of juvenile and adult *Arenicola marina* on a tidal mud flat and the importance of nearshore areas for recruitment. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.

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.

FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, 3, 1983.

FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H., MANZENRIEDER, H. u. NIESEL, S.: In-situ-Untersuchungen der Erosionsstabilität von Wattböden – 2. Meßzeitraum 1982 –. Bericht Nr. 552 d. Leichtweiß-Inst. d. TU Braunschweig, 1983.

GAST, R., KÖSTER, R. u. RUNTE, K.-H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.

GIERE, O.: Die Fluktuationen des marinen Zooplanktons im Elbe-Ästuar. Arch. Hydrobiol., 31, (Suppl. Elbe-Ästuar 3), 1968.

GOERKE, H.: Nahrungfiltration von *Nereis diversicolor* O. F. MÜLLER (Polychaeta, Nereidae). Veröffentl. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven, 10, 1966.

GOERKE, H.: Ernährungsweise der Nereisarten (Polychaeta, Nereidae) der deutschen Küsten. Veröffentl. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven, 13, 1971.

GRAY, J. S.: Animal sediment relationship. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 12, 1974.

HARTMANN-SCHRÖDER, G.: Annelida, Borstenwürmer, Polychaeta. In: DAHL, Tierwelt Deutschlands, 58. Teil, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1971.

HAVEN, D. S. u. MORALES-ALAMO, R.: Aspects of deposition by oysters and other invertebrate filter-feeders. Limnol. Oceanogr., 11, 1966.

HEIP, C. u. HERMAN, R.: Production of *Nereis diversicolor* O. F. Müller (Polychaeta) in a shallow brackish water. Estuar. Coast. Mar. Sci., 8, 1979.

HÜPPOP, O.: Jahresgang und Ökologie des Makrobenthos in der Leybucht. Dipl. Arb. Universität Hamburg, 1983.

JØRGENSEN, C. B.: Lamellibranchia. In: G. THORSON, Reproduction and larval development of danish marine bottom invertebrates. Medd. Komm. Dan. Fisk.-Havunders. (Plankton), Vol. 4, No. 1, 1946.

JUTTING, N.: Mollusca C. Lamellibranchia. Fauna van Nederland, 12, 1943.

KREGER, D.: On the ecology of *Cardium edule* L. Arch. néerl. Zool., 4, 1940.

KRISTENSEN, I.: Difference in density and growth in a cockle population in the Dutch Wadden Sea. Arch. néerl. Zool., 12, 1957.

KRÜGER, F.: Zur Ernährungsphysiologie von *Arenicola marina* (L.). Zool. Anz. (Suppl.), 22, 1959.

KRÜGER, F.: Bau und Leben des Wattenwurms *Arenicola marina*. Helgoländ. wiss. Meeresunters., 22, 1971.

KÜHL, H.: Studien über die Klaffmuschel *Mya arenaria*. 3. Das Junggut. Arch. Fischereiwiss., 6, 1955.

LAMADE, S.: Die räumliche Verteilung der Foraminiferen-Arten *Nonion depressulum, Elphidium excavatum* und *Elphidium selseyense* im Gezeitenbereich der Meldorfer Bucht. Dipl. Arb. Universität Hamburg, 1978.

LAMMENS, J. J.: Growth and reproduction in a tidal flat population of *Macoma balthica* (L.). Neth. J. Sea Res., 3, 1967.

LINKE, O.: Die Biota des Jadebusens. Helgoländ. wiss. Meeresunters., Jg. 1, H. 3, 1939.

LOPEZ, G. R. u. KOFOED, L. H.: Epipsammic browsing and deposit-feeding in mud snails (Hydrobiidae). J. Mar. Res., Vol. 38, No. 4, 1980.

MANN, H.: Vergleichende Untersuchungen an einigen Muscheln des Watts. Zool. Anz. Suppl., 16, 1952.

MÜLLER, C. D.: Fauna und Sediment in der Leybucht. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1959, Bd. 11, 1960.

MUUS, B. J.: The fauna of Danish estuaries and lagoons. Medd. Dan. Fisk.-Havunders. (n. s.), Vol. 5, 1967.

NOWELL, A. R. M., JUMARS, P. A. u. ECKMAN, J. E.: Effects of biological activity on the entrainment of marine sediments. Mar. Geol., 42, 1981.

OHDE, J.: Entstehung von Besiedlungsmustern der Makro-Endofauna im Wattenmeer der Elbe-Mündung. Dissertation, Universität Hamburg, 1981.

PALS, G. u. PAUPTIT, E.: Oxygen binding properties of the coelomic haemoglobin of the polychaete *Heteromastus filiformis* related with some environmental factors. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.

PILKINGTON, M. C.: The veliger stage of *Hydrobia ulvae* (Pennant). Proc. Malacol. Soc. London 39, 1971.

POSTMA, H.: Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: G. H. LAUFF, Estuaries. Am. Ass. Advancement Science, Washington D. C., 1967.

RAGUTZKI, G.: Vergleichende bodenphysikalische Untersuchung über die Eigenschaften von Schlick in Verlandungsfeldern. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1972, Bd. 24, 1973.

RASMUSSEN, E.: Faunistic and biological notes on marine invertebrates III. Biol. Medd., 23, 1956.

REINECK, H.-E., DÖRJES, J., GADOW, S. u. HERTWECK, G.: Sedimentologie, Faunenzonierung und Faziesabfolge vor der Ostküste der inneren Deutschen Bucht. Senckenberg. leth., 49, 1968.

REISE, K.: Gutachten zur Bodenfauna im Gebiet der Nordstrander Bucht. Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein, 12, 1981.

REMANE, A.: Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee. In: DAHL, Die Tierwelt der Nord- und Ostsee, 34. Lieferung, 1940.

RENFRO, W. C.: Transfer of ^{65}Zn from sediments by marine polychaete worms. Mar. Biol., 21, 1973.

RHOADS, D. C.: Organism-sediment relations on the muddy sea floor. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 12, 1974.

RHOADS. D. C. u. CANDE, S.: A sediment profil camera for in situ study of animal-sediment relations. Limnol. Oceanogr., 16, 1971.

RHOADS, D. C. u. YOUNG, D. K.: The influence of deposit-feeding organisms on sediment stability and community trophic structure. J. Mar. Res., 28, 1970.

RHOADS, D. C. u. YOUNG, D. K.: Animal-sediment relations in Cape Cod Bay, Massachusetts; II.

Reworking by *Molpadia oolitica* (Holothuroidea). Mar. Biol., Vol. 11, No. 3, 1971.
RIJKEN, M.: Food and food-uptake in *Arenicola marina*. Neth. J. Sea Res., 13, 1979.
SCHÄFER, W.: Wirkungen der Benthosorganismen auf den jungen Schichtverband. Senckenb., Bd. 37, H. 3/4, 1956.
SCHÄFER, W.: Aktuopaläontologie, nach Studien in der Nordsee. Frankfurt, 1962.
SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964–1977 aus dem Sahlenburger Watt. Strom- und Hafenbau Hamburg, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Studie 41, 1979.
SMIDT, E. L. B.: Animal production in the Danish Wadden Sea. Medd. Komm. Dan. Fisk.-Havunders. (Fisk.), Vol. 11, No. 6, 1951.
STAL, L. J., KRUMBEIN, W. E. u. GEMERDEN, H. v.: Das Farbstreifen-Sandwatt – ein laminiertes, mikrobiologisches Ökosystem im Wattenmeer. Mitt. naturforsch. Ges. Emden (im Druck), 1984.
STEPHEN, A. C.: Notes on the biology of *Tellina tenuis* da Costa. J. mar. biol. Ass. U. K., 15, 1928.
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). Geol. Mijnb., 18, 1956.
THAMDRUP, H. M.: Beiträge zur Ökologie der Wattenfauna auf experimenteller Grundlage. Medd. Komm. Dan. Fisk.-Havunders. (Fisk.), Vol. 10, No. 2, 1935.
VAHL, O.: Porosity of the gill, oxygen consumption and pumping rate in *Cardium edule* L. (Bivalvia). Ophelia, 10, 1972.
WIELAND, P.: Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.
WILDE, P. A. W. J. DE u. BERGHUIS, E. M.: Spawning and gametic production in *Arenicola marina* in the Netherlands Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 13, No. 3/4, 1979.
WILLEMSEN, J.: Quantities of water pumped by mussels *(Mytilus edulis)* and cockels *(Cardium edule)*. Arch. néerl. Zool., 10, 1952.
WOHLENBERG, E.: Die Wattenmeer-Lebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgol. wiss. Meeresunters., 1, 1937.
WOLFF, W. J.: The estuary as a habitat. Zool. Verhandl., 126, 1973.

Die Küste, 40 (1984), 1-318

Dichtemessung im Watt vor Büsum (Kurzbericht)

Von Dieter Rechlin

In der Zeit vom 12. bis 21. 8. 1980 hat die Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste/Fachgruppe Geologie – im Rahmen des Schlickprojektes des KFKI Dichte-Messungen mit verschiedenen Verfahren an Wattsedimenten in der Dithmarscher Bucht durchgeführt*). Das Arbeitsprogramm ist in enger Absprache mit dem Amt für Land- und Wasserwirtschaft, Dezernat Gewässerkunde, Büsum, und dem Geologischen Institut der Universität Kiel aufgestellt worden.

Die Meßpunkte wurden anhand der geologischen Kartierungen (Beitrag Gast et al. in diesem Heft) festgelegt. Sie können als repräsentativ angesehen werden. Es wurden folgende Geräte von der Fachgruppe Geologie eingesetzt:

- Isotopenflächensonde mit Einsteckstab, System Berthold
- Entnahmezylinder nach DIN 4021, Blatt 1
- Leichte Rammsonde nach DIN 4094

Das Arbeitsschema sah vor, an jeder Meßposition vier Rammsondierungen über Kreuz und dazu Isotopenmessungen und Zylinderprobeentnahmen durchzuführen. Als Sondierabstand sind ca. 4 m festgelegt worden. Die Rammsondiertiefen betrugen 2 m. Der Meßbereich der Isotopensonde mit Einsteckstab reicht bis 0,5 m unter Wattoberkante. Die Zylinder sind direkt unter Oberkante Watt und dort, wo es möglich war, nochmals auf der gleichen Position 30 cm darunter entnommen worden. Insgesamt sind 45 Rammsondierungen, 62 Isotopenmessungen und 56 Zylinderentnahmen durchgeführt worden.

An den Zylinderproben wurden Wassergehalt, Dichte- und Körnungslinien bestimmt. Die Abb. 1 zeigt vier Körnungslinien, die die Schwankungsbreite und das repräsentative

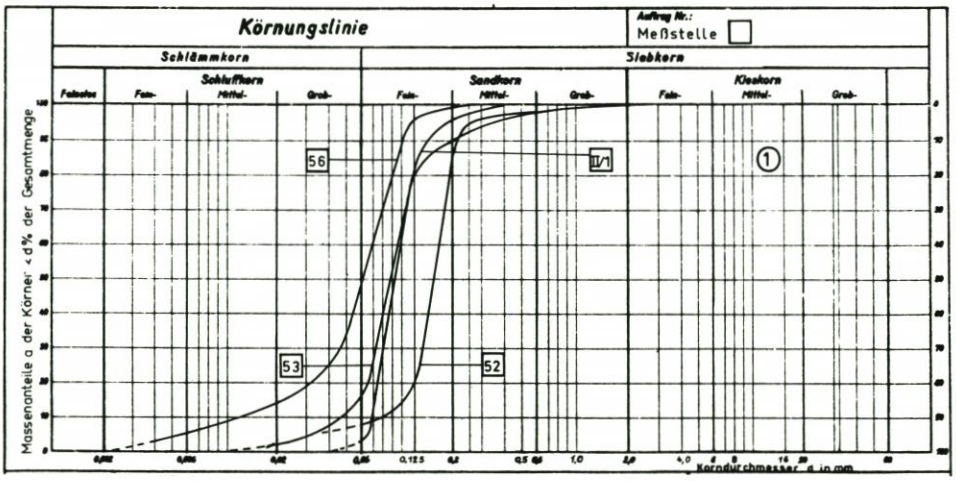


Abb. 1. Charakteristische Kornverteilungskurve der untersuchten Sedimente

*) Ausführlicher Bericht: Dichtemessungen im Watt vor Büsum im Rahmen des KFKI-Schlickprogramms, Bundesanstalt f. Wasserbau, Kiel, 1981.

Mittel des angetroffenen Bodens abdecken. In der Tabelle sind für die einzelnen Meßstellen die Ergebnisse zusammengestellt. Sie zeigen die jeweils höchsten und tiefsten Werte sowie den Mittelwert des untersuchten Bodens in bezug auf die Dichte (durch Zylinder und Isotopensonde gemessen), auf den Wassergehalt und auf die Schlagzahl n_{10} der leichten Rammsonde. Es ist ersichtlich, daß selbst auf einer Meßposition sowohl die Dichte wie der Wassergehalt z. T. erheblich schwanken können. Als Beispiel mag die Meßstelle P 56 dienen: Dichte $1{,}71 < \varrho < 2{,}01$ t/m³ und Wassergehalt $0{,}282 < w < 0{,}552$.

Weiter sind vier graphische Darstellungen (Abb. 2–5) entwickelt worden, die die Abhängigkeit der Dichte durch Messung mittels Zylinderentnahme und der Isotopensondemessung

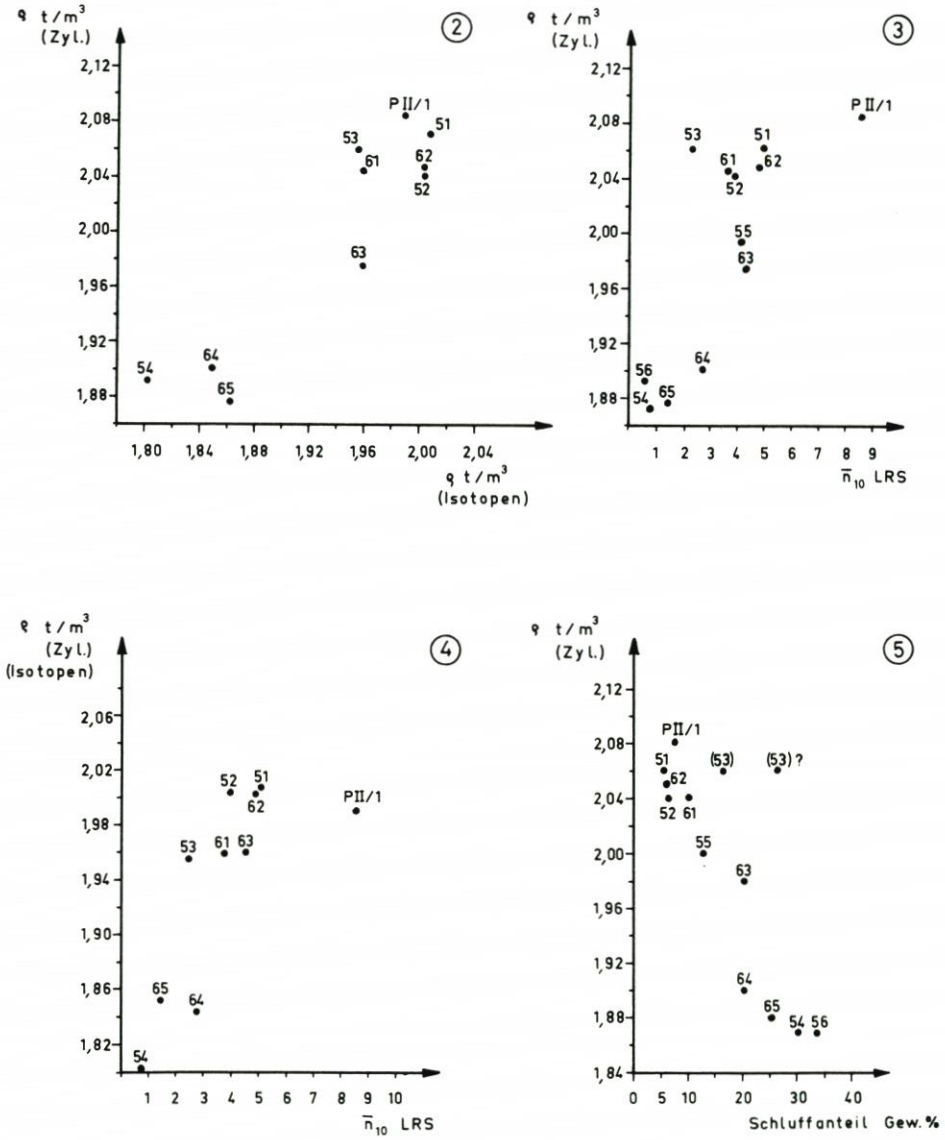


Abb. 2.

untereinander und zu einigen Parametern verdeutlichen sollen. Es zeigt sich dabei, daß im Prinzip eine Dreiteilung des Untersuchungsbereiches nach unterschiedlicher Dichte vorgenommen werden kann, wobei die Einteilung als Relativierung aufzufassen ist

- Position 54, 56, 64, 65 „geringe Dichte"
- Position 55, 63 „mittlere Dichte"
- Position 51 bis 53, 61, 62, P II/I „hohe Dichte"

Abb. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der Dichte der Isotopensonde und der Zylinder. Die niedrigeren Werte der Isotopenmessungen (Minderung i. M. 5 %) sind wahrscheinlich auf die größeren Maße des Wirkungsbereiches der Isotopensonde gegenüber der Zylinderprobe zu erklären.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Abhängigkeit der Dichten zu den Schlagzahlen n_{10} der leichten Rammsonde. Auch hier ist recht deutlich ein Zusammenhang zwischen niedriger Dichte und geringen Schlagzahlen und höherer Dichte und höheren Schlagzahlen zu erkennen.

Es ist bekannt, daß eine Reihe bodenmechanischer Parameter für die Kennzeichnung unterschiedlicher Dichten herangezogen werden können. In Abb. 5 ist die Dichte in Abhängigkeit zum Schluffanteil gesetzt worden. Es ist aus der Graphik abzulesen, daß auch hier ein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Selbst bei dem Boden mit höheren Schluffgehalten handelt es sich immer noch um einen holozänen Wattsand und nicht um Klei.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß alle drei Untersuchungsarten miteinander zu korrelieren sind. Während dieses Ergebnis für den Zusammenhang zwischen Isotopensonde und Zylinderentnahmegerät als selbstverständlich angenommen werden konnte, waren für die Rammsonde bei den geringen Meßtiefen nur mit Bedenken Ergebnisse zu erwarten. Es zeigen sich aber auch bei dieser Methode gute Ergebnisse. Die gemessenen Mittelwerte der Dichte mit 1,98 t/m³ bzw. 1,93 t/m³ sind als hoch einzustufen. Sie liegen im Bereich eines dicht gelagerten Sandes. Es wäre deshalb wünschenswert, mit dieser kombinierten Methode einen Wattbereich mit unterschiedlichen Bodenarten, Kornaufbau und Festigkeiten zu untersuchen, um genauere und umfassendere Aussagen machen zu können.

Tabellarische Zusammenstellung der Meßergebnisse

Mess-stelle	Zylinder								Isotopensonde				Leichte Rammsondierung					Bemerkungen
	Dichte ϱ t/m³				Wassergehalt W bezogen auf 1				Dichte ϱ t/m³				Schlagzahl auf n = 10 cm (n_{10})				Messbereich t	
	ϱ	ϱ_{max}	ϱ_{min}	N	$\bar{W}$	W_{max}	W_{min}	N	$\bar{\varrho}$	ϱ_{max}	ϱ_{min}	N	$\bar{n}_{10}$	n_{10max}	n_{10min}	N	m	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P 51	2,07	2,18	2,03	5	0,239	0,248	0,235	5	2,01	2,03	1,98	6	5,0	5,3	4,8	4	0,4 – 1,0	
P 52	2,04	2,11	2,00	5	0,241	0,251	0,234	5	2,00	2,01	1,99	6	3,9	4,6	2,7	4	3 x 0,4 – 0,9 1 x 0,4 – 1,0	
P 53	2,06	2,16	1,97	4	0,261	0,272	0,249	4	1,96	1,99	1,94	7	2,4	3,2	2,0	4	1 x 0,4 – 1,0 1 x 0,4 – 0,9 2 x 0,4 – 0,8	
P 54	1,87	1,94	1,70	4	0,372	0,482	0,327	4	1,80	1,85	1,75	7	0,8	1,0	0,2	4	0,4 – 1,0	
P 55	2,00	2,06	1,94	4	0,278	0,299	0,267	4	–	–	–	–	4,2	4,8	3,8	4	3 x 0,4 – 1,0 1 x 0,4 – 0,8	keine Isotopenmessung durchzuführen (Wetter)
P 56	1,89	2,01	1,71	5	0,358	0,552	0,282	5	–	–	–	–	0,6	0,8	0,2	4	0,4 – 1,0	keine Isotopenmessung durchzuführen (Wetter)
P 61	2,04	2,11	1,96	4	0,106	0,116	0,097	4	1,96	1,98	1,93	6	3,7	–	–	2	0,4 – 1,0	
P 62	2,05	2,12	2,01	5	0,090	0,097	0,079	5	2,00	2,01	1,98	6	4,8	5,7	4,5	4	0,4 – 1,0	
P 63	1,98	2,06	1,91	5	0,134	0,150	0,118	5	1,96	1,99	1,92	6	4,4	4,8	3,8	3	2 x 0,4 – 0,8 1 x 0,4 – 0,7	
P 64	1,90	1,98	1,82	3	0,206	0,217	0,200	3	1,84	1,87	1,82	6	2,7	3,5	1,3	3	0,4 – 1,0	eine 4. LRS nicht gewertet
P 65	1,88	1,94	1,77	6	0,192	0,223	0,163	6	1,85	1,87	1,83	6	1,4	1,8	1,0	3	0,4 – 1,0	eine 4. LRS nicht gewertet
P II / 1	2,08	2,25	2,00	6	0,256	0,279	0,243	6	1,99	2,01	1,95	6	8,5	10,2	7,2	4	3 x 0,4 – 1,0 1 x 0,4 – 0,9	

Abb. 10. Luftbild Dithmarscher Bucht 1979. Maßstab: 1,4 cm = 1 km



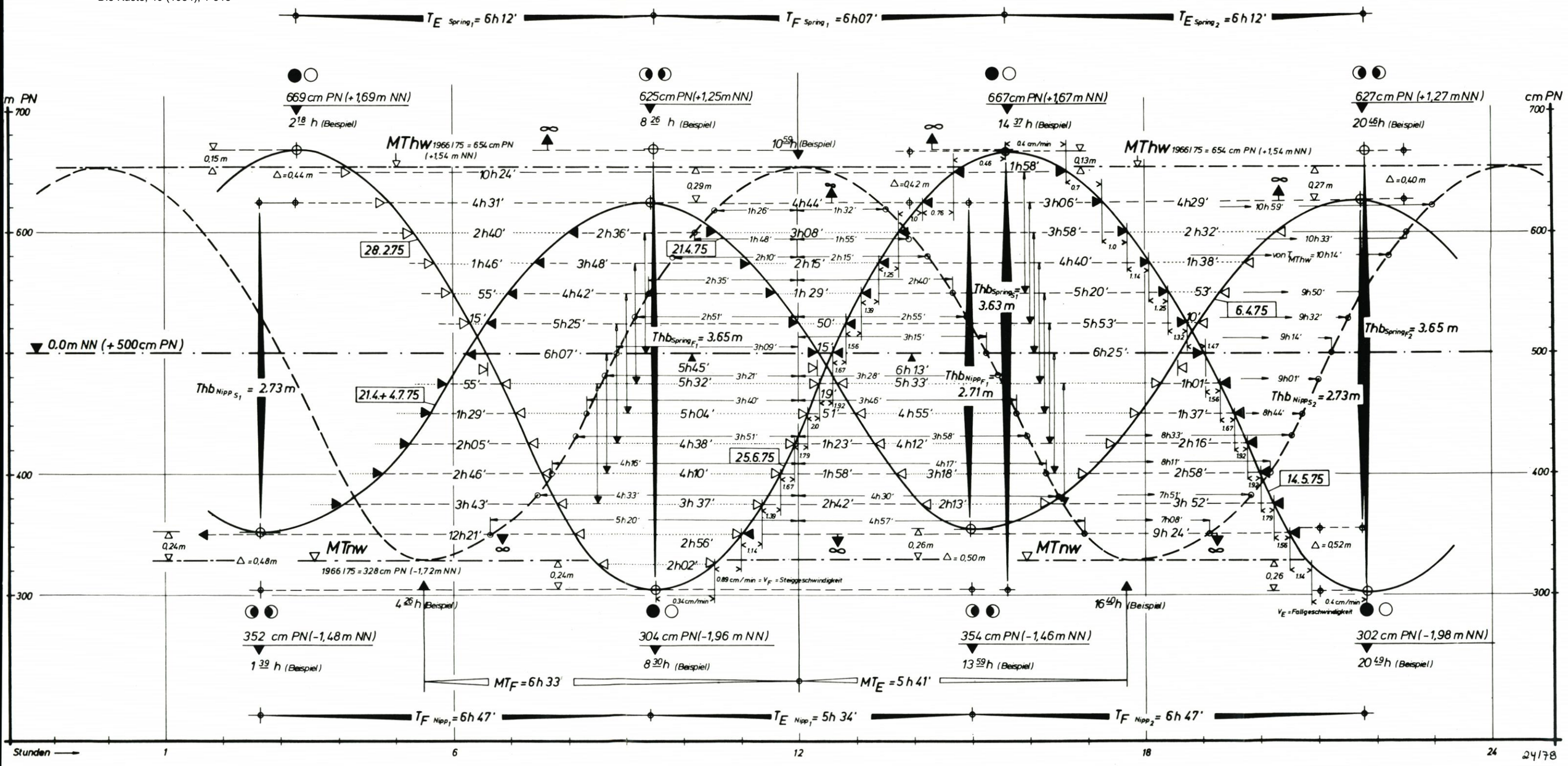


Abb. 3. Mittlere Tideganglinien mit Über- und Unterschreitungszeiten sowie Steig- und Fallgeschwindigkeiten am Pegel Büsum 1966/75