

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Fanger, Hans-Ulrich; Neumann, Lothar J. R.; Riethmüller, Rolf

MASEX - 83, eine Untersuchung über die Trübungszone der Unterweser

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101225>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fanger, Hans-Ulrich; Neumann, Lothar J. R.; Riethmüller, Rolf (1985): MASEX - 83, eine Untersuchung über die Trübungszone der Unterweser. In: Die Küste 42. Heide, Holstein: Boyens. S. 171-187.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



MASEX '83, eine Untersuchung über die Trübungszone der Unterweser

Von HANS-ULRICH FANGER, LOTHAR NEUMANN, KLAUS OHM und ROLF RIETHMÜLLER

Zusammenfassung

Zur Beobachtung des Verhaltens von Sediment und Schwebstoffen wurde in der Unterweser im Bereich der Trübungswolke und in der Schlickzone eine Woche vom Schiff aus und mit mehreren verankerten Meßgeräten gearbeitet. Es wurden ein Gerätevergleich zwischen Gamma-sonde und Kernentnahmeggerät und Messungen zur Veränderung der Schlickmächtigkeit durchgeführt. Mit Hilfe der verankerten Strömungsmesser wurde festgestellt, daß im Wasserkörper in 1 m über Grund kein Reststrom bei Unterweserkilometer 57 vorlag. Mit der Multisonde wurden synoptische Darstellungen von Salzgehalt und optischer Attenuation gewonnen, aus deren Vergleich Erosion und Sedimentation von advektivem Transport qualitativ getrennt werden können.

Summary

A one-week survey of the turbidity maximum in the Weser Estuary was conducted in the Fall of 1983 using the survey ship RV "Victor Hensen". Supplemental measurements were taken using in-situ current - conductivity - temperature - turbidity meters. The thickness of the bottom mud was determined using a gamma-ray transmission probe and compared with core sample analysis. The location of no-net tidal averaged bottom flow was determined to be at km 57. The off-ship measurements were taken using a CTD probe combined with a light attenuation meter. A comparison between salinity and attenuation patterns gives insight into the relative importance of erosion, sedimentation and advective transport.

Inhalt

1. Einführung	172
2. Planung und Durchführung der Messungen	172
2.1 Meßstrategie	172
2.2 Meßgeräte	174
2.2.1 Geräte zur Untersuchung der Gewässersohle	174
2.2.2 Geräte für Untersuchungen im Wasserkörper	175
2.3 Durchführung der Messungen	176
3. Auswertung und Ergebnisse	176
3.1 Auswertung der Messungen an der Gewässersohle	176
3.1.1 Vergleich Gamma-sonde - Kernentnahmeggerät	176
3.1.2 Veränderung der Schlickmächtigkeit	176
3.2 Auswertung der Messungen in der Wassersäule	179
3.2.1 Die Daten der verankerten Meßsonden	180
3.2.2 Entwicklung des Salzgehalts und des Schwebstoffes	182
4. Diskussion	186
5. Danksagung	186
6. Schriftenverzeichnis	187

1. Einführung

Zur Erfassung der Bedingungen, unter denen Schlick gebildet wird, wurde im Rahmen des KFKI-Projektes „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ 1982 bei Nordenham eine Meßstation errichtet. Sie besteht aus einem Doppelpfahl mit einer Geräteplattform und einem vertikal straff gespannten Seil zum Positionieren von Geräten im Fluß. Der Ort wurde so gewählt, daß er zwar einerseits die Schifffahrt nicht behindert, andererseits aber nahe am Zentrum der Trübungswolke gelegen ist, wo am Boden auch Schlick erwartet werden konnte. Beobachtungen ergaben nun, daß im Jahr 1983 dort ungewöhnlich geringe Schlickmengen am Boden lagerten; lediglich in einer etwa 1,5 km langen Rinne im Fahrwasser stromaufwärts vom Pfahl fanden sich nennenswerte Schlickablagerungen (Abb. 1). Damit war das ursprüngliche Konzept nicht mehr haltbar. Einer neuen Meßstrategie lag folgende Fragestellung zugrunde:

Wenn die Schlickflächen so überraschend verlagert oder gar aufgelöst werden können, wie groß ist dann ihre Beweglichkeit? Sind Umlagerungen während einer oder einiger weniger Gezeiten beobachtbar? Besteht eine Korrelation zwischen Schlickmächtigkeit am Boden und Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule? Damit hängt die Frage zusammen, ob der in der Wassersäule beobachtete Schwebstoff durch Aufwirbeln des darunterliegenden Bodenmaterials (Erosion) oder aber von weiter entfernten Gebieten herantransportiert wird (advektiver Transport).

Für das außerordentlich komplexe Geschehen im Ästuar sind einige theoretische Konzepte zur Beschreibung entwickelt worden, die größtenteils gezeitengemittelte, später auch in zunehmendem Maße instationäre Aussagen liefern. Die Anwendung solcher Modelle setzt jedoch die Verfügbarkeit von Naturmeßdaten zur Eichung und Verifikation voraus. Durch Beobachtungen sollte ein Einblick in die Naturverhältnisse in der Weser gewonnen werden. Weil bei dieser Meßkampagne auch die neuentwickelte Gammasonde eingesetzt werden sollte, wurde ein Gerätevergleich mit dem Kernentnahmegesetz geplant. Das Experiment fand vom 26.–31. 9. 1983 statt und wurde MASEX '83 (Mud and Suspended Sediment Experiment) genannt.

2. Planung und Durchführung der Messungen

Diese vielfältige Fragestellung führte zu einer Reihe von gleichzeitig durchzuführenden Meßaufgaben. Die Dauer der vielen verschiedenen Arbeiten auf einer Station schränkte am stärksten die Forderung nach einem möglichst engen Netz von Daten ein. Eine weitere Beschränkung ergab sich daraus, daß nicht so viele Geräte einsetzbar waren, wie es die Aufgabe gefordert hätte. Die Durchführung selbst wurde bei den großen navigatorischen Problemen durch günstiges Wetter erleichtert.

2.1 Meßstrategie

Ein Meßprogramm in Tidegewässern sollte eine zeitliche Folge von Darstellungen der Naturverhältnisse in dem Gebiet liefern. Damit kann man die örtliche und die zeitliche Veränderung der Größen unabhängig voneinander diskutieren, was eine wichtige Grundlage der physikalischen Behandlung eines Problems darstellt. Eine synoptische Aufnahme ist hier mit mehreren Schiffen oder verankerten, synchron registrierenden Meßgeräten möglich, die

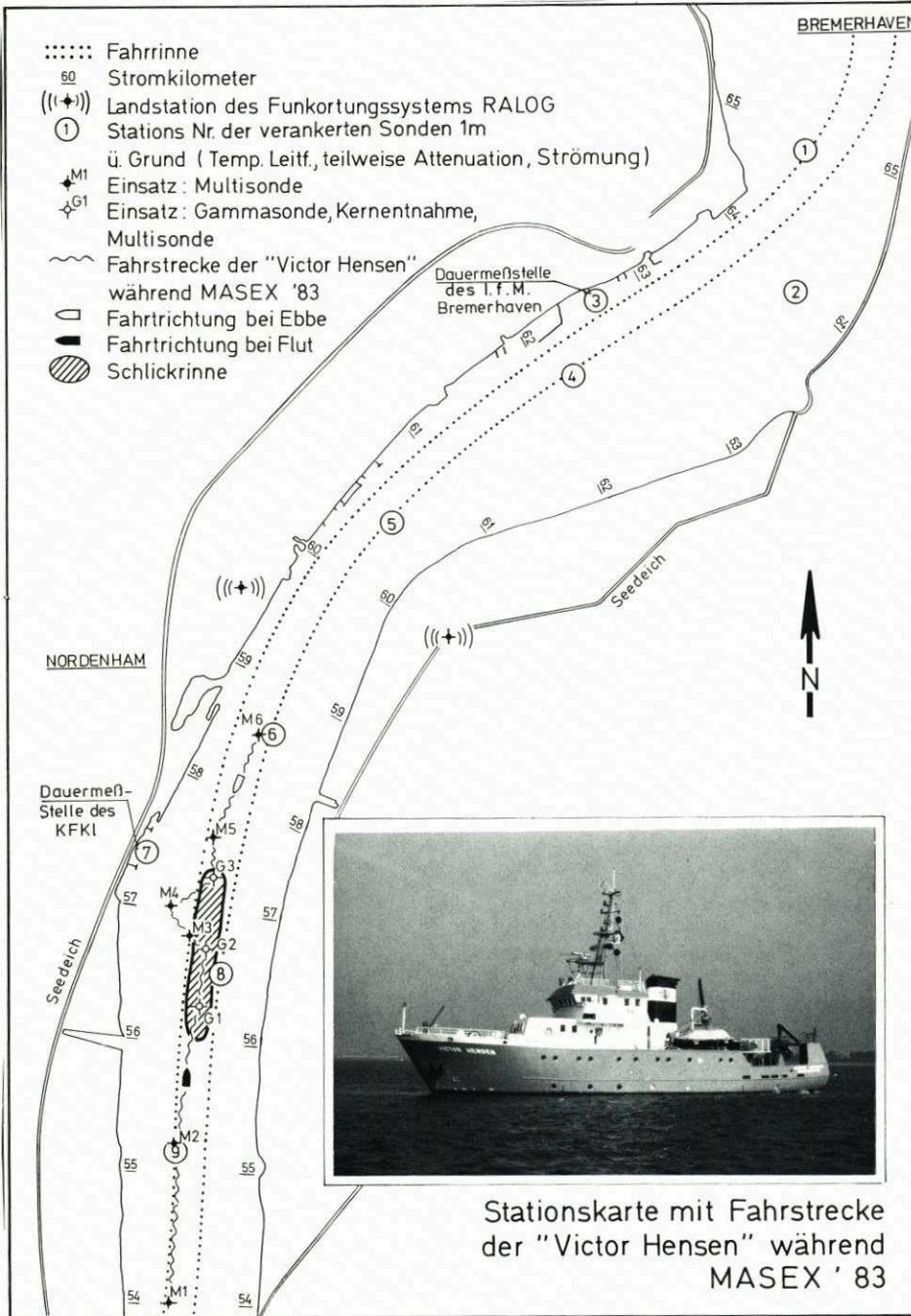


Abb. 1. Stationskarte des Untersuchungsgebietes

auf Schiffsstraßen jedoch nur am Rand des Fahrwassers eingesetzt werden können. Für Profilmessungen in der Wassersäule der Fahrrinne kommen manövrierfähige Geräteträger, also Schiffe, in Betracht. Leider konnte für die Kampagne nur ein Meßschiff abgestellt werden. Mit ihm war es nicht mehr möglich, ein größeres Gebiet um die erwähnte Schlickrinne von ca. 10 km in kurzer Zeit, verglichen mit der Tidendauer, abzufahren. So mußte ein Kompromiß gefunden werden zwischen der Größe des Gebietes, der Anzahl der Meßstationen und der Häufigkeit, mit der die Stationen angefahren werden sollten. Als Stationsabstand in Längsrichtung wurde 1 km vorgesehen (in der Schlickrinne enger), als zeitliches Intervall zwischen zwei Messungen auf derselben Position wurden 2 h zugelassen, weil damit noch sechs Meßpunkte während einer Gezeit erhalten wurden. Bei diesen Vorgaben konnte unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit und Stationsdauer ein etwa 5 km langer Flußabschnitt als Länge des Meßgebietes mit dem Schiff bearbeitet werden. Die Dauer der Messung von einer Woche sollte mehrere Gezeiten überdecken, um Mittelwerte bilden und Tendenzen der Erosion erkennen zu können; andererseits sollte die 14tägige Ungleichheit der Gezeiten noch keinen wesentlichen Einfluß haben.

Das so eingegrenzte Gebiet sollte mit neun verankerten Strömungsmessern, zum Teil auch mit optischen Aufnehmern ausgerüstet, großräumig verteilt auf 12 km, überdeckt werden. Diese Geräte, die 1 m über Grund verankert wurden, sollten Anhaltspunkte zur zeitlichen Interpolation und zum Eintrag in das eigentliche Meßgebiet liefern.

Abb. 1 zeigt die Lage der Stationen. Die verankerten Sonden sowie die Landstationen des Funkortungssystems mußten einige Zeit vor der Meßaktion ausgebracht werden. Für die Landstationen standen wegen der geforderten Antennenhöhe nur wenige Plätze zur Auswahl. Wie sich später herausstellte, hätten die überaus günstigen Signalverhältnisse es erlaubt, mit dem Schiff weiter stromaufwärts zu fahren und damit das Schlickgebiet im Zentrum des abgefahrenen Stromabschnittes zu untersuchen.

In dem Abschnitt über die Datenauswertung wird gezeigt, wie aus den in diesem Stationsnetz gemessenen Profilen durch Interpolation ein synoptisches Bild entwickelt wurde.

2.2 Meßgeräte

Gemäß dem Einsatz der Geräte ist zu unterscheiden in solche, die der Untersuchung der Gewässersohle dienen, und solche, die für die Erfassung hydrographischer Daten in der darüberliegenden Wassersäule oder in der näheren Umgebung verwendet wurden. Entsprechend werden die Geräte vorgestellt.

2.2.1 Geräte zur Untersuchung der Gewässersohle

Zur Messung der Schlickmächtigkeit stand zum einen eine im Rahmen dieses KFKI-Projektes entwickelte Gammasonde (FANGER et al., 1985a) zur Verfügung. Wesentliches Merkmal der Sonde ist eine Absorptionsmeßstrecke, bei der die Schwächung von Gammastrahlung durchs Sediment gemessen wird; hieraus kann auf die Dichte des Materials geschlossen werden. Als Hilfsgrößen werden Neigungswinkel und Druck gemessen, um Schräglage und Tiefe des Profils zu bestimmen.

Zum anderen sollte die Mächtigkeit und Konsistenz des Schlicks aus Proben mit einem Kernentnahmegesetz (Abb. 2) ermittelt werden, das vom WSA Bremerhaven entwickelt worden war. Dabei handelt es sich um ein Rohr, das in einem dreibeinigen Gestell geführt wird.

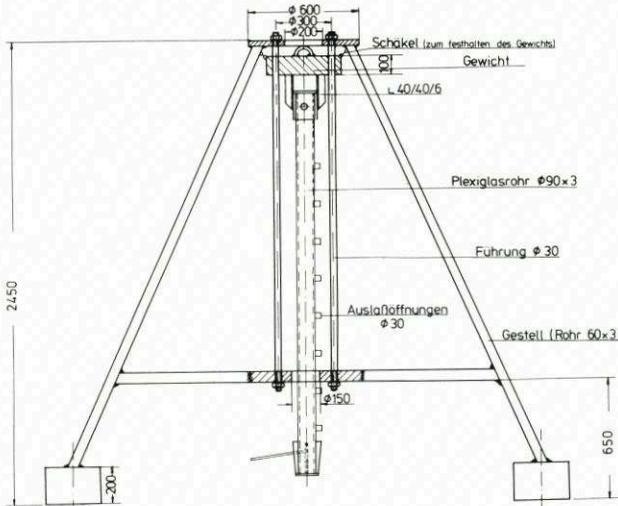


Abb. 2. Kernentnahmeggerät in Seitenansicht. Alle Maße in mm

Gegen Probenverlust wird das Rohr oben und unten mit einer Klappe verschlossen. Flüssige Proben sind durch Hähne längs des Rohrs im Abstand von jeweils 200 mm entnehmbar. Zur Tiefenbestimmung dient ein hochauflösender Druckmesser von Bell & Howell, Typ BHL-4050. Das Anzeigegerät löst die maximale Einsatztiefe von 20 m auf 10 mm auf.

Von entscheidender Bedeutung bei der Messung der Schlickmächtigkeit ist die Bestimmung des Meßortes. Hierzu wurde das Funkortungssystem RALOG 22 von Krupp-Atlas verwendet (FANGER et al., 1985b), das mit zwei Landstationen und einem Bordgerät im phasengekoppelten Sender/Empfänger-Betrieb arbeitet. Mit dem Gerät an Bord wird die Phasenverschiebung durch den Dopplereffekt, der durch die Schiffsgeschwindigkeit erzeugt wird, ausgewertet. Da auf diese Weise nur Ortsveränderungen, aber nicht die absoluten Ortskoordinaten bestimmt werden, sind systembedingt zu Beginn der Messungen die Koordinaten einer bekannten Anfangsposition einzugeben. Die Ortsauflösung beträgt 1 cm, die Genauigkeit 1 m, womit bei weitem die durch nautische Manöver erreichbare Präzision übertroffen wird. Die Sender wurden auf dem Radarturm Luneplate und dem Oberfeuer Reitsand-Flagbalg installiert. Das System arbeitete einwandfrei und wies nach einer Woche eine Drift von weniger als 1 m auf.

2.2.2 Geräte für Untersuchungen im Wasserkörper

Die Schwebstoffkonzentration an den festen Stationen der Fahrinne wurde mit Attenuationsmeßgeräten (KRAUSE u. OHM, 1984) gemessen. Es handelt sich dabei um optische Geräte, die an Strömungsmeßgeräte von Aanderaa angekoppelt werden, wobei die Meßergebnisse auf dem Magnetband des Strömungsmeßgerätes aufgezeichnet werden. Diese Geräte erfassen neben der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit noch die Leitfähigkeit und die Temperatur, so daß der Salzgehalt errechnet werden kann. Sie wurden in Verankerungen etwa 1 m über Grund ausgebracht und lagen zwischen 6 und 12 m unter NN.

Das gleiche optische System wurde am Meßpfahl bei Nordenham verwendet, nur war es hier an ein Moby-System (Hersteller: ME, Trappenkamp) zur Datenregistrierung gekoppelt.

An Bord von FS „Victor Hensen“ wurde eine fieberbare Multisonde (Hersteller: ME, Trappenkamp) eingesetzt, die mit Meßaufnehmern für Druck, Temperatur, Leitfähigkeit und Attenuation versehen war und acht Meßwertsätze pro Sekunde lieferte. Die optische Meßstreckenlänge betrug 40 mm, womit nicht so hohe Schwebstoffkonzentrationen erfaßt werden können wie mit den 10 mm langen Strecken der verankerten Meßgeräte.

2.3 Durchführung der Messungen

Mit der Multisonde wurden in der Zeit vom 26. bis 30. September 1983 an neun Positionen über 300 Profile der obengenannten Größen gemessen. Mit der Gammasonde und dem Kernentnahmeggerät wurden 159 Dichteprofile an drei Stationen während derselben Zeit aufgenommen. Es herrschten günstige Wetterbedingungen mit Windstärken unter 2 der Beaufortskala, so daß Tag und Nacht alle 15 Minuten ein Profil gemessen werden konnte, bis auf Stärke 6 aufbrisende Winde nach etwa 60 h zum Abbruch zwangen. Die hydrographischen Bedingungen waren ebenso gleichbleibend, die Abflußmenge bei Intschede war mit 130 m³/s gering, aber für die Jahreszeit normal, der mittlere Tidenhub entsprach mit 3,93 m dem erwarteten Wert, wie auch der mittlere Wasserstand von NN - 0,17 m. Von den neun verankerten Geräten wurde auf den Positionen 5, 6 und 8 über Strömung, Temperatur und Leitfähigkeit hinaus auch die optische Attenuation gemessen. Die optische Meßstrecke auf Position 8 fiel aus. Es wurde aber auch auf die Interpretation der Ergebnisse der übrigen verzichtet, weil die erwähnte ungleiche Streckenlänge den Anschluß der Werte fragwürdig erscheinen ließ.

3. Auswertung und Ergebnisse

Die Auswertungen der Messungen der Gewässersohle behandeln den Vergleich zwischen Gammasonde und Kernentnahmeggerät sowie eine Untersuchung über mögliche Sedimentation oder Erosion, ermittelt aus den Daten der Gammasonde. Die Beobachtungen in der Wassersäule zeigen eine Darstellung der Restströme 1 m über Grund und eine Zeitreihe über sechs Tiden, ausgewählt aus einer Reihe von Darstellungen der Ergebnisse der verankerten Strömungsmesser, sowie die synoptische Entwicklung von Salzgehalt und Trübung, wie sie mit der Multisonde beobachtet wurde. Das hier nicht vorgelegte Material ist in Berichtsheften zusammengefaßt (NEUMANN, 1984).

3.1 Auswertung der Messungen an der Gewässersohle

Bereits bei Durchführung der Messungen stellte sich heraus, daß trotz der hochgenauen Ortsbestimmungen die Präzision, mit der eine Schiffposition erreicht und gehalten werden konnte, nicht befriedigend sein würde. Durch die Fülle des Beobachtungsmaterials wurden dennoch genügend beieinanderliegende Meßpunkte erzielt, die zu Resultaten führten.

3.1.1 Vergleich Gammasonde - Kernentnahmeggerät

Das Kernentnahmeggerät wurde auf den Stationen G1-G3 jeweils unmittelbar nach der Gammasonde eingesetzt. Nicht alle Proben, deren Dichte bei dem GKSS - Forschungszentrum, bestimmt wurde, waren tauglich für den Vergleich: teils arbeitete der Verschluß-

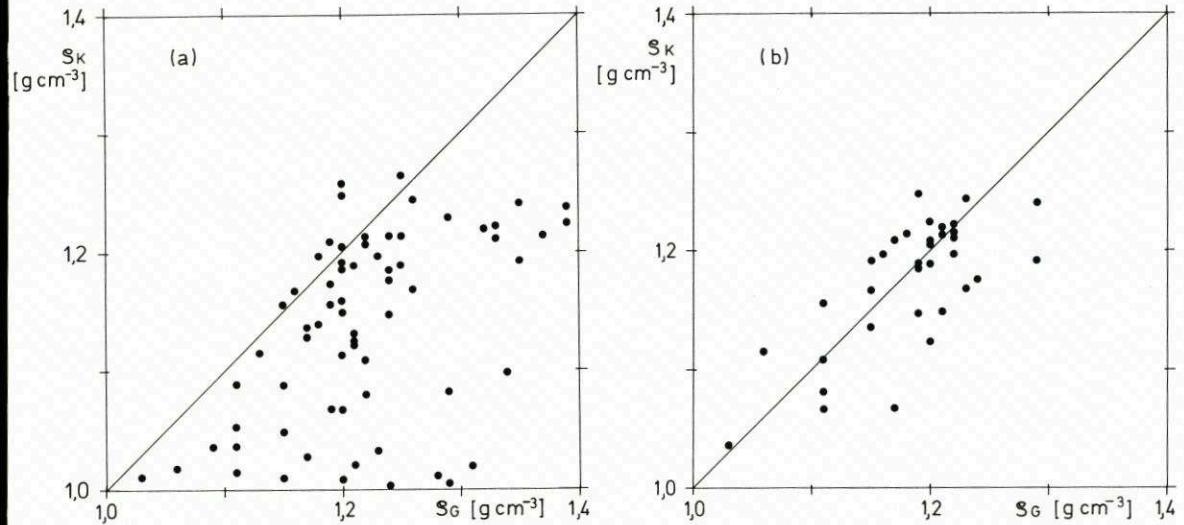


Abb. 3. Die Dichte ρ_K , gemessen mit dem Kernentnahmegesäß, aufgetragen gegen die entsprechende Dichte ρ_G , gemessen mit der Gammasonde. a) Werte ohne Tiefenkorrektur, b) Tiefenwerte des Kernentnahmegesäßes gegenüber der Gammasonde um 20 cm verringert

mechanismus des Kernentnahmegesäßes nicht zuverlässig, teils erreichte die Gammasonde durch Reibung kleinere Tiefen, oder die Dichtewerte lagen unter der Ansprechschwelle der Gammasonde von $1,02 \text{ g/cm}^3$. Das führte dazu, daß auf Position G3 keine vergleichbaren Proben vorliegen. Aber auch auf den anderen beiden Positionen weichen einige Werte stark voneinander ab. Das kann damit erklärt werden, daß nicht auf allen Stationen die Position des Schiffes in der Zeit zwischen dem Einsatz der beiden Geräte exakt zu halten war. Insgesamt konnten 68 Werte verglichen werden. Abb. 3a weist aus, daß die Gammasonde systematisch höhere Werte anzeigt. Durch den Augenschein gestützt kann man annehmen, daß im Rohr des Kernentnahmegesäßes der Kern im Vergleich zur Umgebung aufgrund der Wandreibung um etwa 20 cm verschoben wurde. Korreliert man die Meßergebnisse der Gammasonde mit jeweils denen der folgenden Tiefenstufe des Kernentnahmegesäßes, wird das Ergebnis deutlich verbessert, wie Abb. 3b zeigt.

3.1.2 Veränderung der Schlickmächtigkeit

Zur Beantwortung der Frage, ob sich während des Beobachtungszeitraumes Material verlagert hat, wurden die Messungen der Gammasonde herangezogen, weil sie zuverlässige Ergebnisse versprochen. In einer ersten Stufe der Auswertung wurden die aufgenommenen Tiefenprofile der Dichte geglättet und daraus die den Dichten $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$ und $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ zugeordneten Tiefenwerte über der Zeit aufgetragen, wobei die Tiefen mit dem Pegel Nordenham beschildert wurden (Abb. 4). Diese Isolinien schwanken um 1 m oder mehr etwa im Rhythmus der Gezeiten. Daß die Linien geringer Dichte ihre Höhenlage verändern, wurde erwartet, wenn auch in geringerem Maße. Folgende Abschätzung gibt eine Größenordnung an. In 10 m Wassersäule mit einer mittleren Schwebstoffkonzentration von 100 mg/l sind $0,1 \text{ g}$ Schwebstoff über eine Fläche von 1 cm^2 enthalten. Zu einer Dichte von $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$ sedimentiert, würde diese Schicht unter Vernachlässigung des Volumens des

Dichtemessungen der Grenzschicht Wasser-Boden während
MASEX '83
z bezogen auf NN

---○--- $S = 1,02 \text{ g/cm}^3$
-+--+ $S = 1,10 \text{ g/cm}^3$
—●— $S = 1,20 \text{ g/cm}^3$

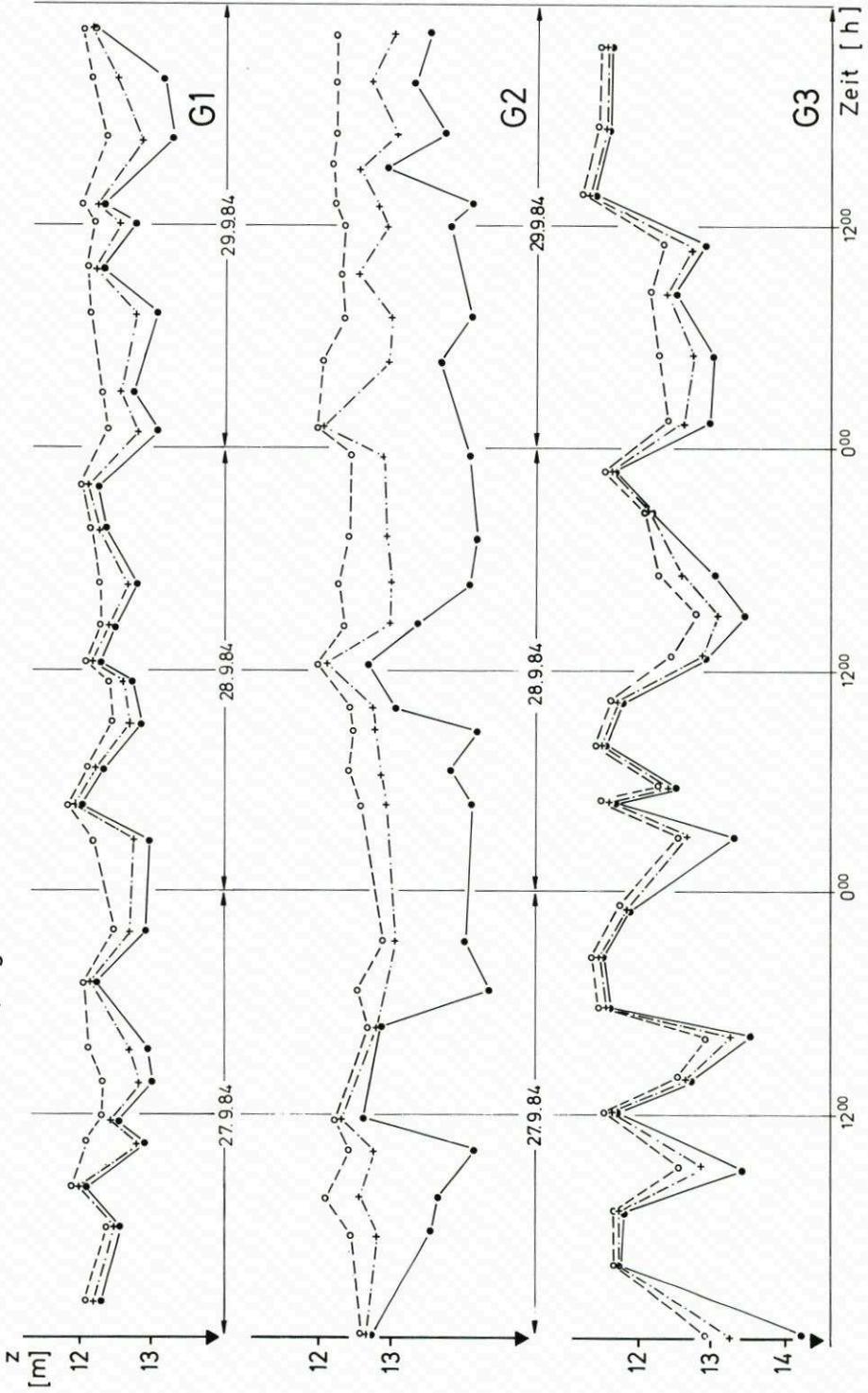


Abb. 4. Tiefenlage verschiedener Dichtehorizonte des Sediments aufgetragen über der Zeit

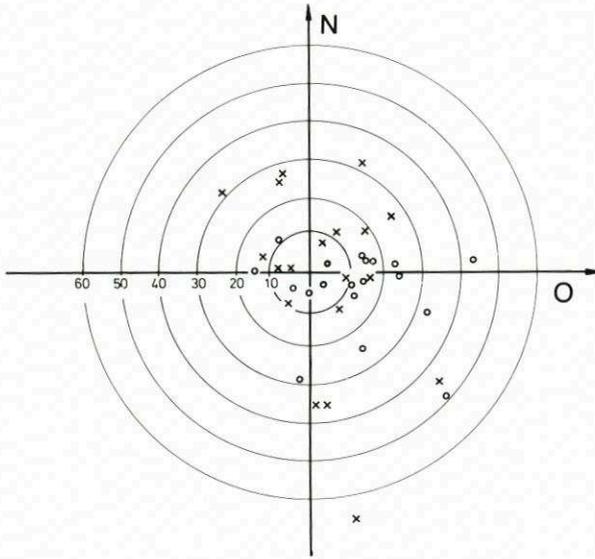


Abb. 5. Lage der Dichtemeßpositionen relativ zur Sollposition G1. Zahlenangaben in Metern. x: Positionen bei Flut. o: Positionen bei Ebbe

Schwabstoffs 2 cm stark sein. Durch Sedimentumlagerung kann aber nicht erklärt werden, warum sich der Horizont von $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ so stark verlagert. Hier handelt es sich vielmehr um den Effekt, daß die Ungenauigkeit beim Anlaufen der Station eine veränderte Höhenlage vortäuscht. Ein „Trefferdiagramm“ der Station G1 zeigt Abb. 5, der man entnimmt, daß die meisten Profile in einem Gebiet von 40 m Breite in ost-westlicher Richtung genommen wurden. In dieser Richtung genügt also eine Boden­neigung von 1 : 40, um Höhenschwankungen von einem Meter zu erzeugen. Echolotprofile bestätigen diesen Befund.

Um diesen Effekt auszuschalten, wurden solche Bodenprofile ausgewählt, deren Positionen vor allem in ost-westlicher Richtung gut übereinstimmten. Solche Beispiele sind in Abb. 6 gezeigt, wobei dann nur höchstens vier Punkte an einem Ort liegen und ein Diagramm bilden. Die Beurteilung aller dieser Darstellungen auch für die Positionen G2 und G3 legt den Schluß nahe, die Schlickmächtigkeit habe während des Meßzeitraumes leicht zugenommen; allerdings reichen für einen sicheren Befund die Daten nicht aus. Eine Veränderung während nur einer Gezeit konnte meßtechnisch nicht erfaßt werden.

3.2 Auswertung der Messungen in der Wassersäule

Wegen der eingangs erwähnten Beschränkung des Meßbereichs des Attenuationssensors der Multisonde auf $c = 125 \text{ m}^{-1}$ brachen die damit gewonnenen Attenuationsdaten 3–4 m über dem Boden ab, so daß ein Anbinden an die Ergebnisse der verankerten Geräte wegen der Lücke nicht möglich war. Daher werden für die Ergebnisse der Dauerstrommessungen hier nur zwei Beispiele gezeigt, während die Resultate der Multisonde ausführlicher dargestellt werden.

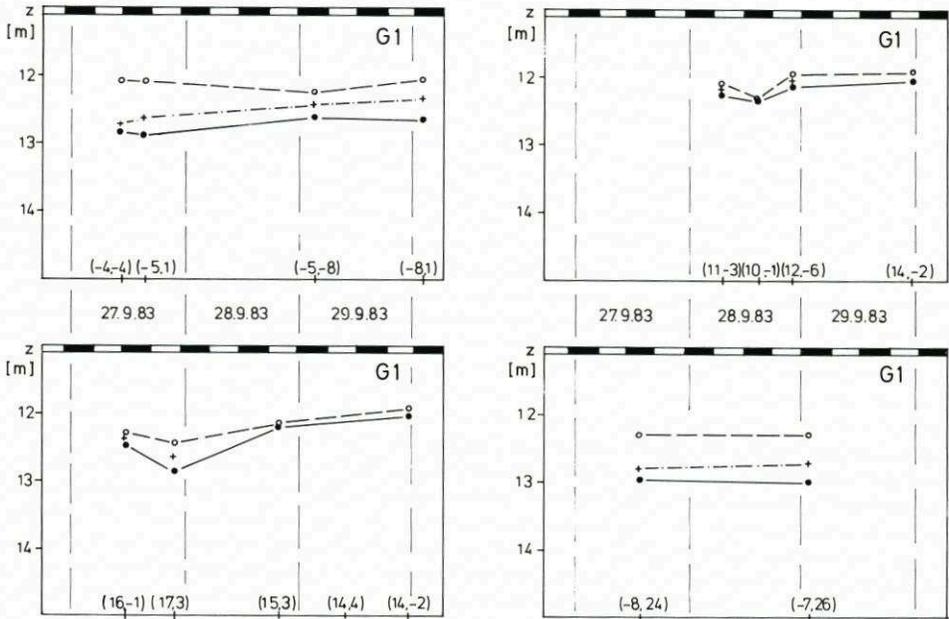


Abb. 6. Tiefenlage der Dichtehorizonte wie in Abb. 4. In jedem der vier Diagramme sind jeweils nur Meßwerte nahe beieinander gelegener Positionen eingetragen. In Klammern sind die Koordinaten (O, N) des „Trefferdiagramms“ der Abb. 5 angegeben; die Zeitachse ist bei Flut schwarz gekennzeichnet

3.2.1 Die Daten der verankerten Meßsonden

Von den sechs Dauerstationen an der Fahrrinne und der Station Nr. 2 (Abb. 7) wurden die im Abstand von 5 Minuten gemessenen Strömungswerte getrennt für Ebbe und Flut vektoriell gemittelt. Diese Mittelwerte sind in der Abbildung als Pfeile mit dem Geschwindigkeitsbetrag in cm/s an die Positionen angetragen. Der Reststrom zeigt an den Stationen 1-6 stromaufwärts, an 8 und 9 stromabwärts. Dieses Ergebnis stimmt mit der Beschreibung des Salzkeils (DYER, 1973) überein, bei dem das Süßwasser des Flusses sich über das salzreiche Meerwasser schiebt und, indem es sich mischt, Salz aus der Flußmündung heraustransportiert. Das bedingt aber aus Gründen der Kontinuität eine salzreiche Strömung an der Sohle flußaufwärts. Es gibt demnach an der Sohle einen Ort, wo keine Strömung auftritt. Wenn dieses System von Gezeiten überlagert wird, kann man nur von einer Stelle ohne Reststrom sprechen, die während des Beobachtungszeitraums bei Unterweserkilometer 57 in einer Höhe von 1 m über Grund lag.

Ein Beispiel eines Datensatzes der verankerten Meßgeräte soll von Position 5 gegeben werden. In Abb. 8 sind Temperatur T , Salzgehalt S , Attenuationskoeffizient c , Strömungsgeschwindigkeit V und Strömungsrichtung R aufgetragen. Man erkennt den gleichartigen Ablauf der Tiden. Die Attenuationsmessung hatte mit $c = 550 \text{ m}^{-1}$ entsprechend etwa 1,3 g/l Schwebstoffkonzentration ihren Maximalwert erreicht. Die Spitzen in der Geschwindigkeitsregistrierung rühren erfahrungsgemäß vom Überfahren durch große Schiffe her. Der Druck konnte nicht registriert werden, weil der Attenuationsmesser den Datenkanal belegt.

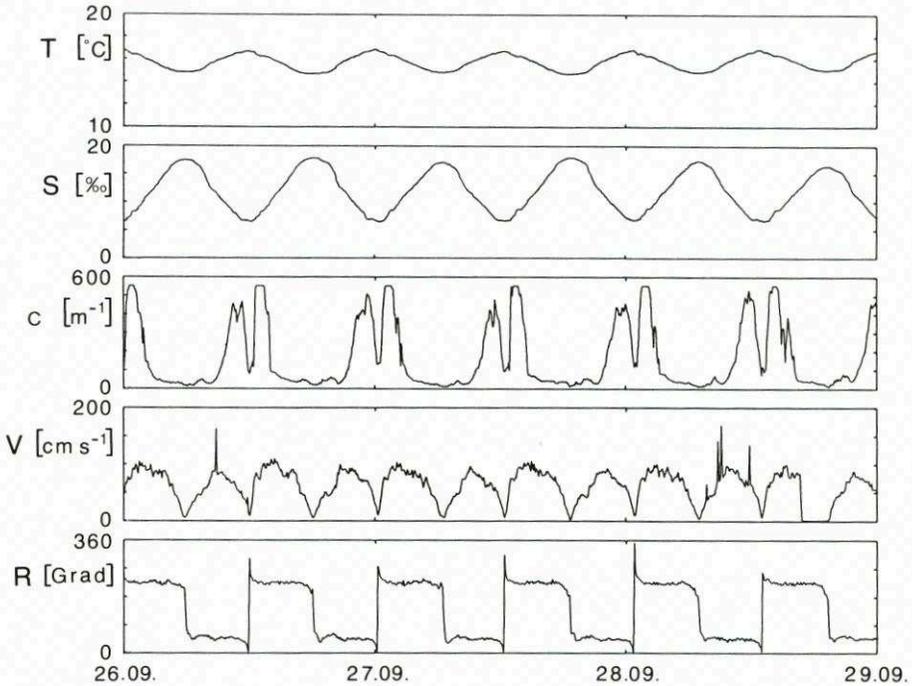


Abb. 8. Zeitreihen von Temperatur, Salzgehalt, Attenuationskoeffizient, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung auf Position 5 über die drei Meßtage

3.2.2 Entwicklung des Salzgehalts und des Schwebstoffes

Von den neun Stationen der Multisonde wurden die sieben im Fahrwasser liegenden ausgewertet. Es wird im folgenden der aus Leitfähigkeit und Temperatur berechnete Salzgehalt als Beispiel auch für die anderen Größen beschrieben. Um zu zeigen, wie aus nicht gleichzeitig gemessenen Werten eine synoptische Darstellung gewonnen wurde, soll der Gang der Datenverarbeitung skizziert werden. Mit ihrer Hilfe wurden durch mehrfache Interpolation und Mittelung Salzgehaltsprofile errechnet, auch zu Zeitpunkten, zu denen an dem Ort nicht gemessen worden ist.

Die Tiefenprofile wurden durch arithmetische Mittelung über Tiefenstufen von je 0,5 m geglättet. Aus allen Tiefenprofilen auf einer Station wurden daraufhin Zeitreihen in verschiedenen Tiefen, bezogen auf NN, gewonnen. Die Stützpunkte im Abstand von ungefähr 2 Stunden bei einer Gesamtzeit von etwa 60 Stunden wurden glatt verbunden (SPÄTH, 1978). Aus dieser Kurve über vier Gezeiten wurden zu ganzen Stunden nach den jeweiligen Kenterpunkten die entsprechenden Werte entnommen und jeweils die vier Werte einer Tidephases gemittelt. Um beurteilen zu können, wie die Mittelwerte zu den Meßwerten der ersten Tide passen, wurden diese als Dreiecke in Abb. 9 eingetragen. Abb. 9a zeigt ein gut passendes, 9b ein weniger typisches, nicht so gut passendes Beispiel. Für eine Station wurden 12 mittlere Verläufe über eine Tide in Tiefen zwischen 2 und 10 m unter NN erzeugt. Mit diesen Darstellungen kann man nun wieder Salzgehaltsprofile bilden, aber jetzt auch zu Zeitpunkten, zu denen an dem Ort nicht gemessen worden ist und die als interpolierte und über vier Tiden gemittelte Profile verstanden werden müssen.

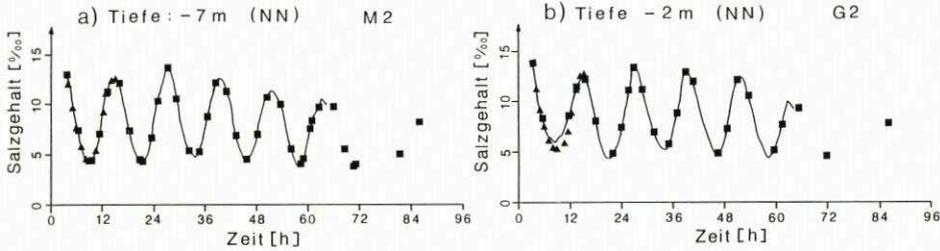


Abb. 9. Zeitlicher Verlauf des Salzgehalts über 5 Tiden in einer festen Tiefe. Die Meßwerte sind durch Splinefunktionen interpoliert. Die Dreiecke kennzeichnen die Werte der berechneten mittleren Tide

Hieraus entstand jetzt die Folge von Isoliniendarstellungen im Abstand einer Stunde, getrennt für Ebbe und Flut, dargestellt in Abb. 10 und 11. Das Verhalten der Isothermen ist nicht abgebildet; es gibt im Herbst wenig Aufschluß über die Dynamik im Ästuar, weil das Fluß- und das Seewasser etwa gleiche Temperatur haben.

Der Salzgehalt über der Schlickrinne, gekennzeichnet durch die Positionen G1-G3, schwankt zwischen 5 und 14 ‰, und die Isolinen sind schräg gestellt, wie man es auch nach dem Konzept des Salzkeils erwartet (WELLERSHAUS, 1981). Es liegt nahe, das Geschehen so zu interpretieren, daß die Gezeitenströmung eine feste Salzgehaltsverteilung bei Flut flußaufwärts, bei Ebbe flußabwärts verschiebt und dabei die Verteilung sich nicht wesentlich ändert.

Dies wurde überprüft, indem die stündlichen Längsschnitte so verschoben übereinandergelegt wurden, daß die Isolinen im Überlappungsbereich möglichst gut übereinanderpaßten. Das ergibt ein Diagramm (Abb. 12), das für die Flut einen Wasserweg von 12,5 km darstellt, für die Ebbe entsprechend 11,5 km (Abb. 13). Ähnliche Strecken erhält man, wenn man den Wasserweg an der Dauerstation 6 berechnet; er beträgt 12,5 km bzw. 11 km. An die Abszisse sind neben der Entfernung Orte und Zeiten geschrieben, um zu verdeutlichen, daß dieselbe

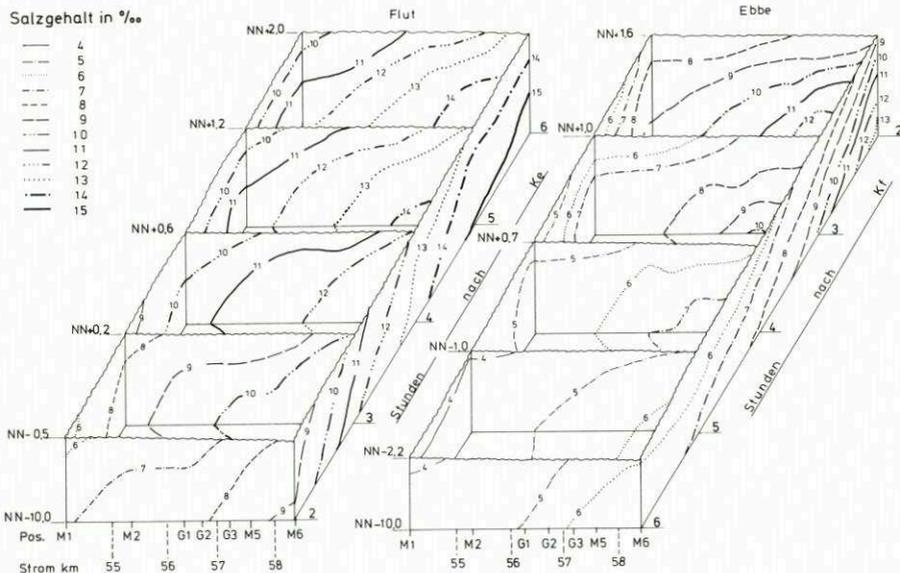


Abb. 10. Zeitliche Entwicklung des über 4 Tiden gemittelten Salzgehaltes, dargestellt in Längsschnitten von den Stationen M1 bis M6. Die Darstellung reicht nicht bis zum Grund, sondern endet bei NN - 10 m

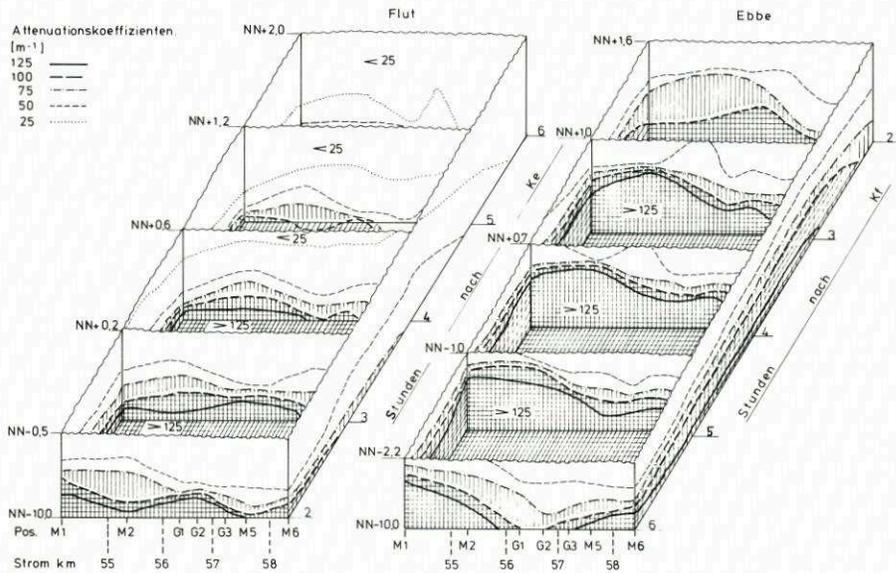


Abb. 11. Zeitliche Entwicklung des Attenuationskoeffizienten, Darstellung wie Abb. 10. In erster Näherung ist dieser Koeffizient der Schwebstoffkonzentration proportional, so daß die Abbildung direkt als zeitliche Entwicklung der Schwebstoffkonzentration verstanden werden kann

Salzverteilung sich eine bestimmte Zeit später an einem anderen Ort befindet. Das darf nun nicht großräumig so interpretiert werden, daß 11,5 km stromauf von Station M1 zum Kenterpunkt Flut der Salzgehalt an der Oberfläche 4 ‰ sei. Weil nur in einem Gebiet von 4,5 km Länge gemessen wurde, darf man auch nicht nennenswert darüber hinaus extrapolieren; das Diagramm gilt kleinräumig. Dennoch zeigt es, daß der Salzgehalt als konservative Größe einem Wasserkörper anhaftet.

Auf die gleiche Weise wie beim Salzgehalt wurden die Daten des Attenuationskoeffizienten, der für die Schwebstoffkonzentration steht, behandelt. Versucht man, diese synoptischen Isolinien darstellungen über die des Salzgehaltes zu legen, um sie ihrem tragenden Wasserkörper zuzuordnen, stellt man fest, daß die zu verschiedenen Zeiten erfaßten Isolinien häufig nicht übereinanderpassen. Wenn an einer solchen Stelle mit fortschreitender Zeit sprunghaft höhere Konzentrationen vorliegen, müssen diese durch Erosion vom Grund bzw. durch vertikalen Transport aus Tiefen größer NN - 10 m oder aus den Seitenräumen zusätzlich eingebracht sein. Umgekehrt ist Schwebstoff bei abfallenden Konzentrationen offenbar durch Sedimentation oder Transport in die Seitenräume dem advektiven Transport entzogen worden. Man entnimmt den Abb. 12 und 13, daß zum Beginn der Ebbe und der Flut Erosion stattfindet, während 5 und 6 Stunden nach Beginn der Ebbe und am Ende der Flut Material sedimentiert.

Im mittleren Bereich der Tiden ist das nicht so klar zu sehen; es finden beide Vorgänge zugleich statt. Im mittleren Bereich der Ebbe herrschen ortsfeste Strukturen vor (Abb. 13), was bedeutet, daß zugleich Erosion oberhalb M1 und Sedimentation bei G1 bis G3 stattfindet. Bei Flut, 2-4 Stunden nach Kenterpunkt Ebbe, liegt eine nicht so ausgeprägte ortsfeste Verteilung über M2 bis G3, wobei der Bereich der G-Stationen die Quelle ist.

Diese Darstellung ist noch verhältnismäßig grob und eignet sich so noch nicht zur Quantifizierung. Eine Verkleinerung der Zeitschritte würde die Darstellung verbessern, doch

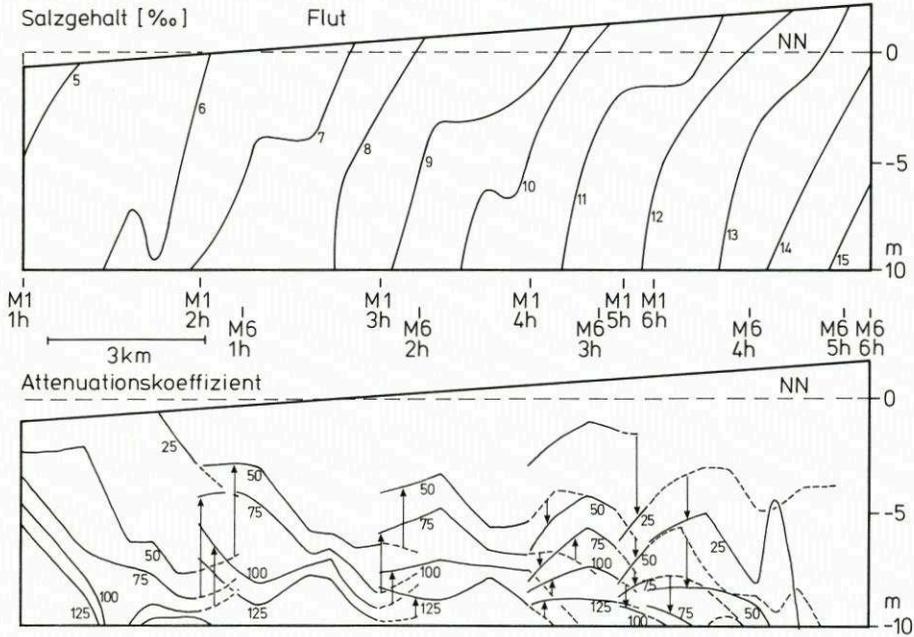


Abb. 12. Längsschnitt des Salzgehaltes und des Attenuationskoeffizienten, entwickelt aus den Abbildungen 10 und 11. Die Abszisse kann als Entfernungs- oder Zeitachse verstanden werden. Die Pfeile deuten aufwärts Erosion, abwärts Sedimentation an

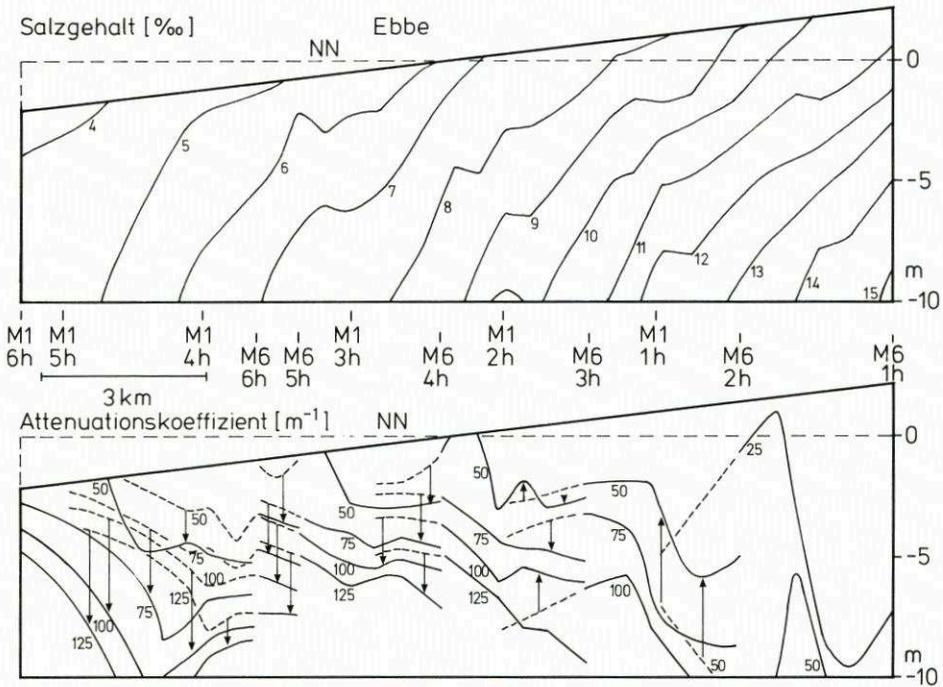


Abb. 13. Längsschnitte bei Ebbe, dargestellt wie Abb. 12. Die Zeitachse läuft hier von rechts nach links

das Meßzeitraster von 2 h läßt das kaum sinnvoll erscheinen. Immerhin ist es gelungen, an einigen Stellen die Anteile des advektiven Transports von Sedimentations- bzw. Erosionsvorgängen zu trennen. Eine solche Aussage hätte von einer Zeitserie an nur einem Beobachtungsort, z. B. einer Ankerstation, nicht gemacht werden können.

4. Diskussion

Während der Bearbeitung der sehr komplexen Aufgabenstellung, die vom Gerätevergleich bis zur Beobachtung des Schlickaustausches zwischen Boden und Wasser reichte, wurde immer deutlicher, daß man zur Zeit die Vorgänge am Boden und in der Wassersäule besser getrennt untersucht.

Die Messungen am Boden haben ergeben, daß die Gammasonde gut geeignet ist, die Dichteverhältnisse in Sedimenten flächendeckend zu kartieren. Das Kernentnahmegesetz ist dazu wegen der umständlichen Handhabung und der hohen Laborkosten weniger geeignet. Sein Einsatz ist notwendig, wenn z. B. zusätzlich zur Dichte chemische oder biologische Eigenschaften untersucht werden sollen. Bei der Tiefenzuordnung der gezogenen Proben ist wegen des diskutierten Mitnahmeeffektes Vorsicht geboten.

Die Beobachtung der Tiefe bestimmter Dichtehorizonte hat keine sichere Antwort gefunden, weil einige meßtechnische Voraussetzungen verbessert werden müßten. Insbesondere ist eine größere Präzision beim Ansteuern einer Position erforderlich; daneben wäre auch eine Erhöhung der Genauigkeit der Tiefenmessung wünschenswert. Eine große Hilfe könnte dafür ein Bezugspunkt sein, der im Boden verankert unter der Schlickoberfläche liegt; ebenso könnte der Einsatz eines kalibrierbaren Echolots hilfreich sein. Die Kenntnis der Verlagerung von Schlick ist auch unabhängig von den Vorgängen in der Wassersäule wertvoll.

Mit der gekoppelten Darstellung von Schwebstoffkonzentration und Salzgehalt ist es gelungen, advektiven Transport von Erosions- und Sedimentationsvorgängen zu trennen. Möglich wird die synoptische Darstellung von Messungen mit einem Schiff, wenn der beobachtete Vorgang periodisch abläuft. Das kann durch eine verankerte Dauerstation überprüft werden. Die Meßergebnisse der Dauerstationen haben auch gezeigt, daß man das Meßgebiet noch weiter stromaufwärts hätte ausdehnen sollen, um den Fuß des Salzkeils mehr im Zentrum des Gebiets studieren zu können. Überhaupt ist ein größeres Gebiet notwendig, wenn mit solchen Messungen Naturdaten für ein praxisorientiertes numerisches Modell gewonnen werden sollen. Die Beobachtungen passen sehr gut in das Konzept des Salzkeils als Erklärung zur Trübungswolke. Es soll aber noch weiter untersucht werden, ob dieser Mechanismus wesentlich verantwortlich für die geographische Lage des Schlicks ist oder ob noch andere Faktoren, wie z. B. der sich an dieser Stelle aufweitende Flußquerschnitt, einen entscheidenden Beitrag liefern.

5. Danksagung

MASEX '83 wurde über das KFKI-Projekt „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ vom BMFT gefördert. Neben FS „Victor Hensen“ vom Institut für Meeresforschung Bremerhaven (IfMB) hat MS „Wittesand“ vom Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven (WSA) wesentlich zum Gelingen beigetragen. Die Kapitäne und Mannschaften sowie die Herren E. BÖSSOW, Dr. J. KROHN, Dr. H. KUHN, U. MAIXNER, D. MILFERSTÄDT (GKSS, Forschungszentrum), R. JOBST (IfMB), J. BÖNING und H. H. TEBELMANN (WSA) sollen wegen ihres Einsatzes an Bord besonders erwähnt werden. Herr Dr. E. SCHWIEGER (GKSS, Forschungszentrum) hat die

Datenverarbeitung und Frau G. FRODEMANN (Strom- und Hafengebäude, Hamburg) das Anfertigen von Zeichnungen übernommen. Herr Dr. M. MARKOFKY vom Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover hat sich an der Auswertung der Ergebnisse beteiligt. Ihnen allen sei herzlich gedankt.

6. Schriftenverzeichnis

- DYER, K. R.: Estuaries: A Physical Introduction. John Wiley u. Sons, London-New York-Sydney-Toronto, 1973.
- FANGER, H.-U., BÖSSOW, E. u. KUHN, H.: Eine Gammasonde zur Schlickdichtebestimmung: Ihre Entwicklung, Erprobung und Bewährung im Feldeinsatz. Die Küste, H. 42, 1985a.
- FANGER, H.-U., KUHN, H., MAIXNER, U. u. MILFERSTÄDT, D.: Das hydrographische Meßsystem „HYDRA“. In: MICHAELIS, W. u. KNAUTH, H.-D. (Hrsg.): Das Bilanzierungsexperiment 1982 (BILEX '82) auf der Unterelbe. Bericht GKSS 85/E/3, 1985b.
- KRAUSE, G. u. OHM, K.: A Method to Measure Suspended Load Transports in Estuaries. Estuar. Coast. Shelf Sci., Vol. 19, 1984.
- NEUMANN, L.: MASEX '83, WSA-APRIL '84, Aanderaa-Meßsonden, Stand der Auswertung September 1984, Teil A: Diagramme, Korrelationen, Teil B: Datensammlung (unveröff.). Interner Bericht, 1984.
- SPÄTH, H.: Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen. R. Oldenburg, München-Wien, 1978.
- WELLERSHAUS, S.: Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser Estuary. Arch. Hydrobiol., Vol. 92, H. 2, 1981.