

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Markofsky, Mark; Lang, Günther; Schubert, Reiner Numerische Simulation des Schwebstofftransportes auf der Basis der Messkampagne MASEX - 83

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/20.500.11970/101250>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Markofsky, Mark; Lang, Günther; Schubert, Reiner (1986): Numerische Simulation des Schwebstofftransportes auf der Basis der Messkampagne MASEX - 83. In: Die Küste 44. Heide, Holstein: Boyens. S. 171-189.

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.



Numerische Simulation des Schwebstofftransportes auf der Basis der Meßkampagne MASEX '83

Von Mark MARKOFSKY, Günther LANG und Reiner SCHUBERT

Zusammenfassung

Im Herbst 1983 wurde in der Unterweser im Bereich der Trübungswolke und der Schlickzone die Meßkampagne MASEX '83 (Mud And Suspended Sediment Experiment) zur Beobachtung des Sediment- und Schwebstoffverhaltens durchgeführt. Parallel zur empirischen Datenauswertung (FANGER et al., 1985) wurden mit Hilfe eines numerischen Modells die Daten auf Konsistenz überprüft. Es konnte eine erste Eichung des Modells durchgeführt werden, obwohl die Daten lückenhaft sind und das Gebiet mit 4,45 km Länge sehr kurz war. Die Schlußfolgerungen aus der Modellierung spielten in der Planung des im Jahre 1985 durchgeführten Nachfolgemessungsprogramms eine zentrale Rolle.

Summary

A field survey was undertaken in the fall of 1983 in order to measure bottom and suspended sediment transport in the vicinity of the turbidity maximum and mud zone of the lower Weser Estuary. The data from this "MASEX '83" survey (Mud And Suspended Sediment Experiment) were both empirically evaluated (FANGER et al., 1985) and tested for consistency using a two-dimensional numerical transport model. A first model calibration could be made, although the data set was incomplete and the survey reach short, i.e. 4.45 km. The conclusions drawn from the modelling effort played a central role in the planning of the MASEX '85 field survey.

Inhalt

1. Einleitung	171
2. Das numerische Modell	172
2.1 Stationäres Konzentrationsprofil	177
2.2 Sedimentation ohne Erosion	177
2.3 Sedimentation mit zeitweiliger (periodischer) Erosion	178
2.4 Stationäres Trübungsmaximum	179
3. Der Einsatz der Messungen von MASEX '83 im numerischen Modell.	181
3.1 Datenlücken	181
3.2 Pegelmessungen	181
3.3 Attenuationsmessung	181
4. Die numerischen Ergebnisse.	184
5. Schlußfolgerung	189
6. Schriftenverzeichnis	189

1. Einleitung

Der Schwebstofftransport in Tidegewässern wird im wesentlichen durch die folgenden Parameter bestimmt:

- Oberwasserzufluß,
- Morphologie,
- Salz- und Temperaturgradienten,

- Erosion und Sedimentation am Boden,
- effektive Sinkgeschwindigkeit des Schwebstoffes unter Berücksichtigung der Turbulenz,
- physikochemische Prozesse (Flockung),
- biologische Vorgänge.

In vielen Ästuaren (z. B. Themse [OWEN u. ODD, 1981], Seine [SALOMON, 1982], Weser [WELLERSHAUS, 1981]) führt die Wechselwirkung der o. g. Parameter zu einem Trübungsmaximum, d. h. einer Anhäufung von Schwebstoffpartikeln innerhalb eines bestimmten Gebietes, was eine erhöhte Absetzung mit hohen Baggerungskosten zur Folge hat. Hinzu kommt die Umweltbelastung durch die Beseitigung des mit Schwermetallen belasteten Baggerguts.

Im Jahre 1983 wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ eine 5tägige intensive Meßaktion in einem 4,5 km langen Weserabschnitt in der Nähe von Nordenham durchgeführt*). Eine detaillierte Beschreibung des Meßprogramms und der Ergebnisse ist aus FANGER et al. (1985) zu entnehmen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Sonderforschungsbereiches 205 der Universität Hannover ist ein dreidimensionales, vertikal strukturiertes numerisches Modell zur Simulation der Entstehung und Ausbreitung von Schlick in der Brackwasserzone eines Ästuars in Entwicklung. Die Leistungsfähigkeit des Modelles ist an vielen zweidimensionalen Prinzipbeispielen gezeigt worden (s. MARKOFISKY, LANG, SCHUBERT, 1985, 1986). Vorhandene Naturmessungen der Meßkampagne MASEX '83 der KFKI-Projektgruppe wurden herangezogen, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Strömung, Salzgehalt, Temperatur und Schwebstoff am Naturfall zu untersuchen und damit einen Beitrag zur Interpretation der Meßergebnisse zu leisten.

Vorteile mathematischer Modelle bestehen darin, daß mit verhältnismäßig einfachen Mitteln Prognoserechnungen für geänderte Anfangs- und Randbedingungen und für eine geänderte Topographie bei Baumaßnahmen durchgeführt werden können. Die Massen- und Volumenströme können bilanziert werden. Durch Testrechnungen können Aussagen getroffen werden für die Planung eines Meßprogramms, z. B. welche Daten sinnvollerweise an welchen Stellen und mit welcher zeitlichen Auflösung gemessen werden sollen.

In diesem Aufsatz wird das Modell kurz beschrieben; seine Eigenschaften werden anhand von Prinzipbeispielen dargestellt, die Anwendbarkeit der Naturdaten zur Steuerung, Eichung und Verifikation des Modells wird erläutert und die Modellergebnisse ausgewertet. Physikochemische und biologische Prozesse werden nicht behandelt.

2. Das numerische Modell

In den vergangenen Jahren wurde am Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover die Modellfamilie TISAT zur Simulation der Tidedynamik sowie der Salzgehalts- und Temperaturverteilungen in Ästuaren erstellt. Die Entwicklung der Grundversion dieses Programmsystems erfolgte im Rahmen von Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs 79 „Wasserforschung im Küstenbereich“ unter Projektleitung von K. FISCHER (1978). TISAT umfaßt vier Finite-Differenzen-Programme, die in Tab. 1 aufgeführt sind.

*) An der Meßaktion waren die folgenden Institutionen beteiligt: GKSS, Geesthacht; Institut für Meeresforschung, Bremerhaven; Strom- und Hafengebäudeamt, Hamburg; Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven.

Tabelle 1. Modellfamilie TISAT

P1	Eindimensional	Gut durchmischte Ästuarrien mit regelmäßiger Geometrie
P2H	Zweidimensional (vert.integr.)	Gut durchmischte Ästuarrien, unregelmäßige Geometrie, Wattgebiete
P2V	Zweidimensional (horiz.integr.)	Geschichtete Ästuarrien mit regelmäßiger Geometrie
P3	Dreidimensional	allgemein

Für eine ausführliche Beschreibung der unterschiedlichen Modelltypen einschließlich der Gleichungen siehe BLOSS et al. (1982). Die laufenden Forschungsaktivitäten sehen eine Erweiterung der Modellfamilie, insbesondere des Modells P3 auf die Simulation von Schwebstofftransporten vor.

Die MASEX '83 Daten zeigen sowohl starke Längs- als auch Vertikalgradienten von Salzgehalt und Schwebstoff. Quermessungen lagen nicht vor. Daher wurde das zweidimensionale, vertikal strukturierte Modell zur Simulation der tideabhängigen Strömungs-, Salzgehalts-, Temperatur- und Schwebstofffelder gewählt (P2V).

Im einzelnen lauten die verbleibenden Gleichungen:

1. Kontinuitätsgleichung

$$(bu)_{,x} + (bw)_{,z} - q = 0 \quad (1)$$

2. Bewegungsgleichung

$$u_{,t} + uu_{,x} + wu_{,z} + (uq)/b - A_x u_{,xx} - A_z u_{,zz} + p_{,x}/\rho = 0 \quad (2)$$

3. Hydrostatische Druckverteilung

$$\frac{1}{\rho} p_{,x} = gZ_{,x} \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{g}{\rho} \int_z^Z \rho_{,x} d\zeta \quad (3)$$

4. Transportgleichung für Salz ($\Phi = s$), Temperatur ($\Phi = T$) und Schwebstoff ($\Phi = c$)

$$\Phi_{,t} + (ub\Phi)_{,x} + b((w - w_s)\Phi)_{,z} = K_x(b\Phi_{,xx})_{,x} + K_z b\Phi_{,zz} + q_{zu}\Phi_{,zu} - q_{ab}\Phi_{,ab} \quad (4)$$

Für s und T ist $w_s = 0$

5. Zustandsgleichung

$$\rho = \rho_0 \{1 - [7(T - T_0)^2 - 750s] \cdot 10^{-6}\} \quad (5)$$

mit $\rho_0 = 999.972 \text{ kg/m}^3$, $T_0 = 3.98 \text{ }^\circ\text{C}$ und ρ in kg/m^3 , T in $^\circ\text{C}$ und s in %

Die Zeit ist mit t bezeichnet, die horizontale bzw. vertikale Koordinate mit x bzw. z . Die abhängigen Variablen sind die Horizontalgeschwindigkeit u , die Vertikalgeschwindigkeit w , der aktuelle Wasserstand Z , der hydrostatische Druck p , die Dichte ρ , der Salzgehalt s , die Temperatur T und die Schwebstoffkonzentration c . Die mit Kommata versehenen Indizes x, z

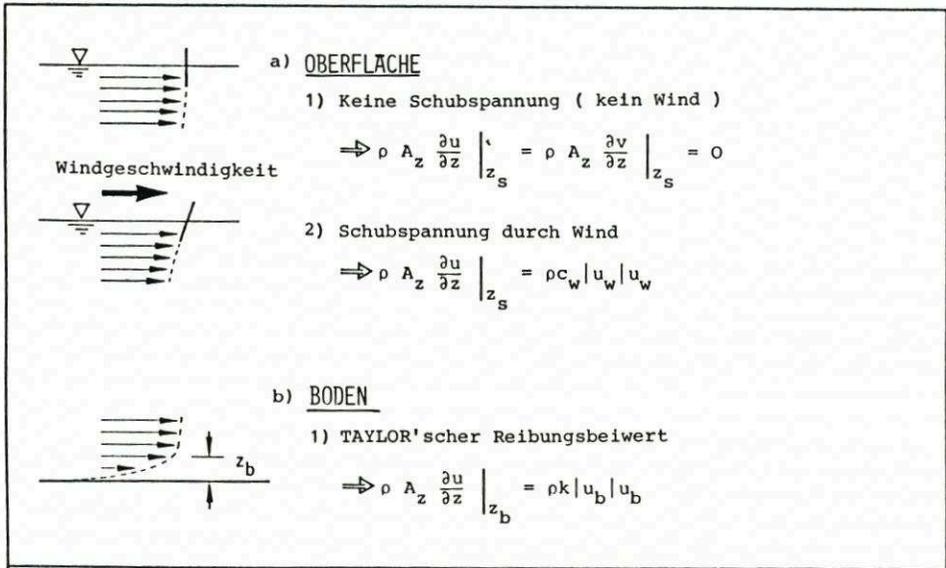


Abb. 1. Die Randbedingungen zur Lösung der NAVIER-STOKES-Gleichungen

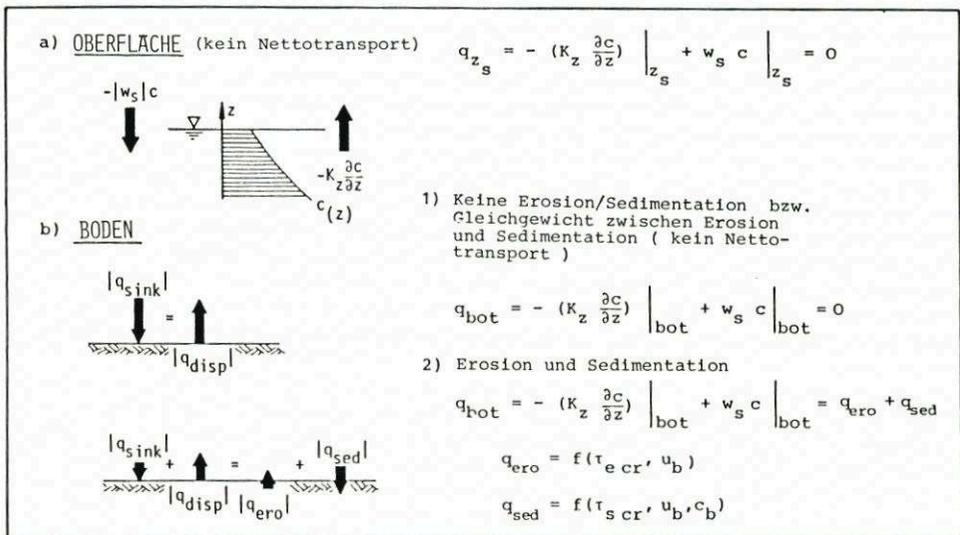


Abb. 2. Die Randbedingungen zur Lösung der Transportgleichung

und t an diesen Variablen bezeichnen die (ggf. mehrfache) Ableitung nach der jeweiligen Größe. Als Eichparameter sind die turbulenten Zähigkeiten A_x und A_z sowie die Dispersionskoeffizienten K_x und K_z eingeführt. Die lokale Breite des Ästuars ist mit b , mit q sind die seitlich eingeleiteten (Index zu) oder entnommenen (Index ab) Volumenströme pro Flächeneinheit bezeichnet. Die Erdbeschleunigung ist g , die Sinkgeschwindigkeit w_s .

Die Turbulenz der Strömung ist durch sogenannte „Dispersionskoeffizienten“ parametrisiert. Die Koeffizienten sind im allgemeinen Funktionen der Geschwindigkeit, der Zeit und der Dichte (RICHARDSON-Zahl).

Das Geschwindigkeitsfeld ist über den Druckterm mit dem Temperatur- und dem Salzgehaltsfeld gekoppelt.

Zur Lösung der Gleichungen sind an allen Rändern des Lösungsgebietes Randbedingungen vorzugeben. Abb. 1 zeigt die Randbedingungen an der Oberfläche und am Boden des Gewässers zur Lösung der Bewegungsgleichungen, Abb. 2 dasselbe zur Lösung der Transportgleichung. Die hydrodynamische Randbedingung an der Oberfläche ist bei Windstille durch einen vertikalen Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichnet, d. h., es ist keine Scherspannung vorhanden. Diese tritt erst bei der Simulation von Wind auf, so daß ein Gradient in den Geschwindigkeiten auch an der Oberfläche vorhanden ist. Am Boden wird der Geschwindigkeitsgradient als proportional zum Quadrat der 1,0 m über Grund vorhandenen Geschwindigkeit angenommen.

Die Oberflächenrandbedingung für die Transportgleichung wird beschrieben durch ein Gleichgewicht zwischen dem nach unten gerichteten Transport infolge der Sinkgeschwindigkeit und dem nach oben gerichteten Transport durch die Turbulenz, d. h., es findet kein Materialtransport durch die Oberfläche statt. Die Randbedingung am Boden wird in gleicher Weise beschrieben, wenn keine Erosion oder Sedimentation stattfindet. Sonst werden zwei weitere Terme zur Beschreibung dieser Effekte in die Randbedingung eingeführt (s. Abb. 2). Zur mathematischen Beschreibung von Erosion und Sedimentation gibt es viele Ansätze. Für die hier betrachteten Teilchen mit einer Größe von $< 100 \mu\text{m}$, und damit geringen Sinkgeschwindigkeiten, bietet sich der Ansatz von PARTHENIADES (1962) und KRONE (1962) an (Abb. 3). Dieser Ansatz beinhaltet eine kritische Scherspannung für den Beginn der Erosion und eine kritische Scherspannung, bei der die Sedimentation aufhört. Wenn diese Scherspannungen erreicht werden, sind beide Phänomene direkt proportional dem Quadrat der Bodengeschwindigkeit (1,0 m über Grund).

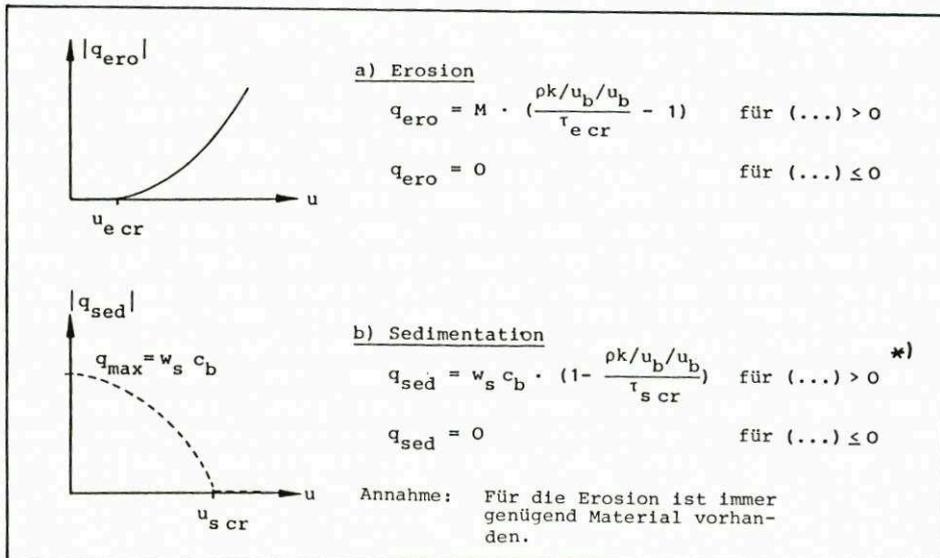


Abb. 3. Die Parametrisierung von Erosion und Sedimentation (nach PARTHENIADES, 1962, und KRONE, 1962)

*) In der Literatur wird bei der Sedimentation ein zusätzlicher Faktor eingeführt, um die Verkleinerung der Sinkgeschwindigkeit in Bodennähe zu erfassen (s. SHENG, 1983). Dies ist auch im Modell berücksichtigt

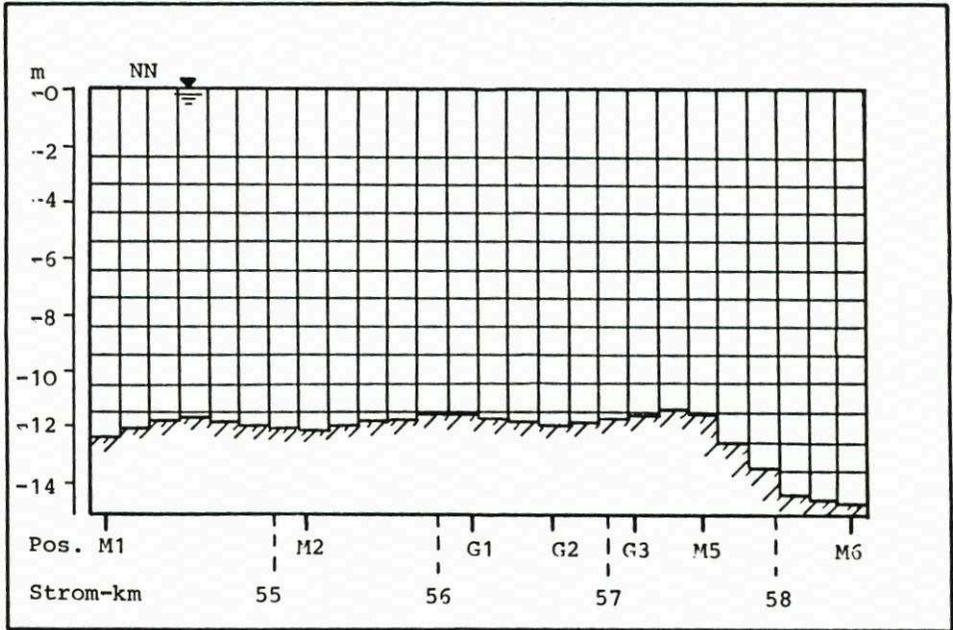


Abb. 4. Schematisierung des Weserästuars zwischen Strom-km 54,00 und 58,45

An den geschlossenen Rändern des Gebietes wird die Geschwindigkeit = 0 gesetzt.

An den offenen Rändern ist immer der Wasserstand oder das vertikale Geschwindigkeitsfeld sowie die Temperatur, der Salzgehalt und die Schwebstoffkonzentration vorzugeben.

Die Schematisierung des Gebietes ist in Abb. 4 dargestellt. Der Abstand der Tiefenschritte und deren Anzahl (bis zu 14) über die Tiefe ist variabel (zwischen 1,0 und 2,5 m). Der Längsschritt beträgt 178,0 m. Die Oberflächenelementdicke ist mit den Wasserstandsänderungen variabel. Die Bodenelementdicke wird nach der vorgegebenen Gesamttiefe der Wassersäule berechnet. Es wird ein versetztes numerisches Gitternetz (staggered grid) eingesetzt. Dieses besagt, daß die vom Volumen abhängigen Größen (Dichte, Temperatur, Salzgehalt und Konzentrationen) in der Mitte der Elemente berechnet werden, aber die Geschwindigkeiten an den Rändern. Die horizontalen advektiven und diffusiven Terme werden explizit berechnet, während die vertikalen konvektiven Terme implizit berechnet werden. Durch einen Wichtungsfaktor kann das Maß der Impliztheit bestimmt werden. Durch diese gemischte explizit-implizite Vorgehensweise erhält man eine befriedigende numerische Genauigkeit und Stabilität auf ökonomischem Weg (vgl. PERRELS u. KARELSE, 1981). Näheres ist aus MARKOFSKY (1984) zu entnehmen.

Für die Eichung des Geschwindigkeitsfeldes stehen die Reibungs- und Austauschkoefizienten zur Verfügung. Die Berechnung des Temperatur- und Salztransportes wird durch die Wahl der Austauschkoefizienten beeinflusst. Bei der Berechnung des Schwebstofftransportes sind zusätzlich die Sinkgeschwindigkeit und die kritische Bodenschubspannungen für Erosion und Sedimentation anzugeben.

Vier Prinzipbeispiele zeigen die Eigenschaften des Modells:

2.1 Stationäres Konzentrationsprofil

Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen den durch die Gleichung 6 (ROUSE, 1937)

$$\frac{c}{c_a} = \exp\left(\frac{-w_s}{K_z}(z - a)\right) \quad (6)$$

gegebenen und numerisch berechneten stationären Konzentrationsprofilen, wie sie z. B. in einem Fluß zu erwarten sind. Der Schwebstoff ist gekennzeichnet durch seine Sinkgeschwindigkeit w_s , die vertikale Turbulenz durch den vertikalen Dispersionskoeffizienten K_z . Es

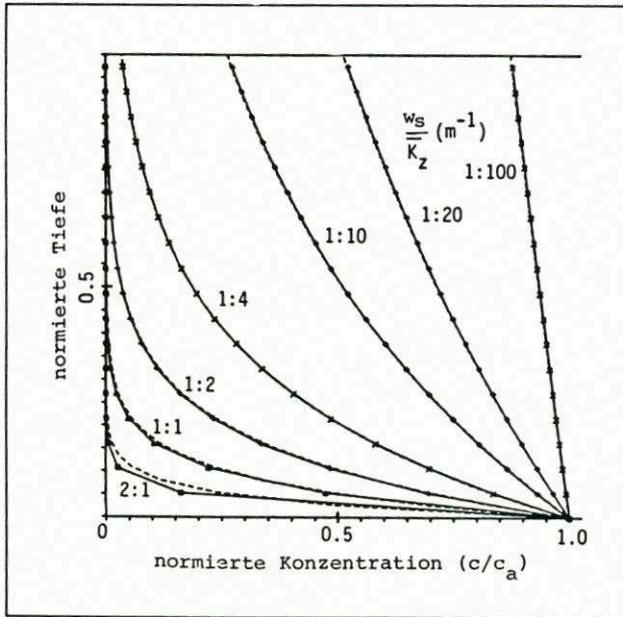


Abb. 5. Stationäres Konzentrationsprofil

Anm.: Turbulente Diffusivität K_z konstant über die Tiefe Sinkgeschwindigkeit w_s konstant über die Tiefe keine Sedimentation/Erosion am Boden

entsteht eine Kurvenschar nach dem Parameterverhältnis w_s/K_z (m^{-1}). Mit zunehmendem Verhältnis (von rechts nach links in Abb. 5) nimmt die bodennahe Konzentration zu. Bei kleinem Verhältnis, z. B. 1:20, d. h. kleine Sinkgeschwindigkeit (kleine Partikel), ist die Verteilung über die Tiefe weitgehend homogen.

2.2 Sedimentation ohne Erosion

Zum Zeitpunkt $t = 0 \cdot s$ ist ein exponentieller Verlauf der Konzentration über die Tiefe vorhanden. Danach wird Sedimentation am Boden simuliert. Der Fluß durch die Wasseroberfläche ist gleich 0. In diesem Fall stellt sich zu Zeiten $t > 0 \cdot s$ ein Nullgradient in der Konzentration am Boden ein. Abb. 6 zeigt vertikale Konzentrationsprofile zu sechs unterschiedlichen Zeiten nach dem Einsetzen der Sedimentation (numerische, analytische [nach DOBBINS, 1943] und experimentelle Ergebnisse).

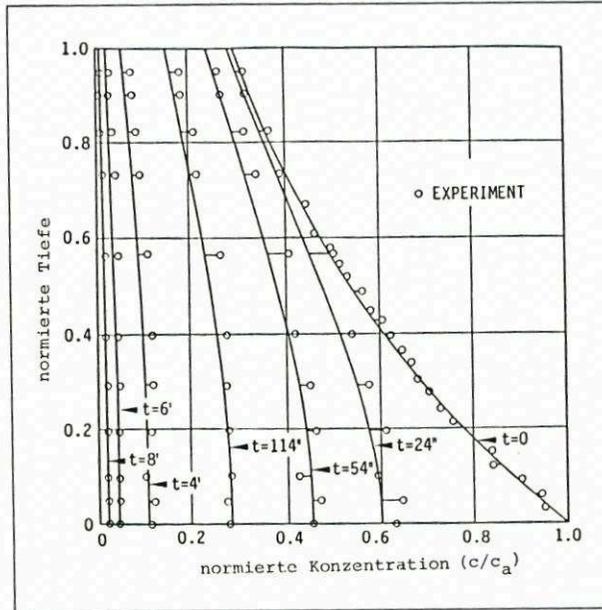


Abb. 6. Vertikales Konzentrationsprofil für Sedimentation ohne Erosion. Vergleich zwischen numerischer (—), analytischer (---) Lösung und experimentellen Daten (o) (s. DOBBINS, 1943) 11 Elemente in der Vertikalen

2.3 Sedimentation mit zeitweiliger (periodischer) Erosion

Den Einfluß einer kritischen Scherspannung τ_{ecr} auf die Zeitabhängigkeit der Konzentration am Boden zeigt Abb. 7. Die Bodenschubspannung wird, wie in Abb. 3 dargestellt, beschrieben. Hier wird die Geschwindigkeit u durch eine Sinusfunktion vorgegeben. Dies wird mit zwei verschiedenen Verhältnissen für τ_{ecr}/τ_{bmax} (τ_{bmax} – maximal auftretende Bodenschubspannung) durchgeführt und zwar 1:6 (hoher Erosionsanteil) und 5:6 (geringer Erosionsanteil). Während der durch eine Schraffur auf der Zeitachse gekennzeichneten Zeiten findet Erosion statt. Die Sedimentationsrate wird durch den Massentransport $\tau_{sed} = w_s \cdot c_b$ beschrieben.

Man erhält folgende Ergebnisse:

- Je größer der Wert τ_{ecr}/τ_{bmax} (5:6) ist, desto größer ist die Asymmetrie des zeitlichen Verlaufes der Konzentration. Obwohl der Zeitraum der Erosion kurz ist, wird schlagartig eine Menge Material in Suspension gebracht. Danach setzt eine lange Phase der Sedimentation ein (exponentieller Verlauf).
- In größerem Abstand vom Boden zeigen die Kurven immer mehr einen sinusförmigen Verlauf, da die höheren Frequenzanteile durch Diffusion gedämpft werden.
- Wenn τ_{ecr}/τ_{bmax} kleiner wird (1:6), zeigen auch die Konzentrationen am Boden einen sinusförmigen Verlauf.

In Abb. 8 werden die Ergebnisse von Messungen in der Trübungswolke im Weserästuar gezeigt. Der Verlauf der Trübung zeigt den aus dem vorherigen Beispiel typischen Verlauf der Konzentration; den schnellen und heftigen Einsatz der Erosion bei Beginn der Flut und die allmähliche Sedimentation.

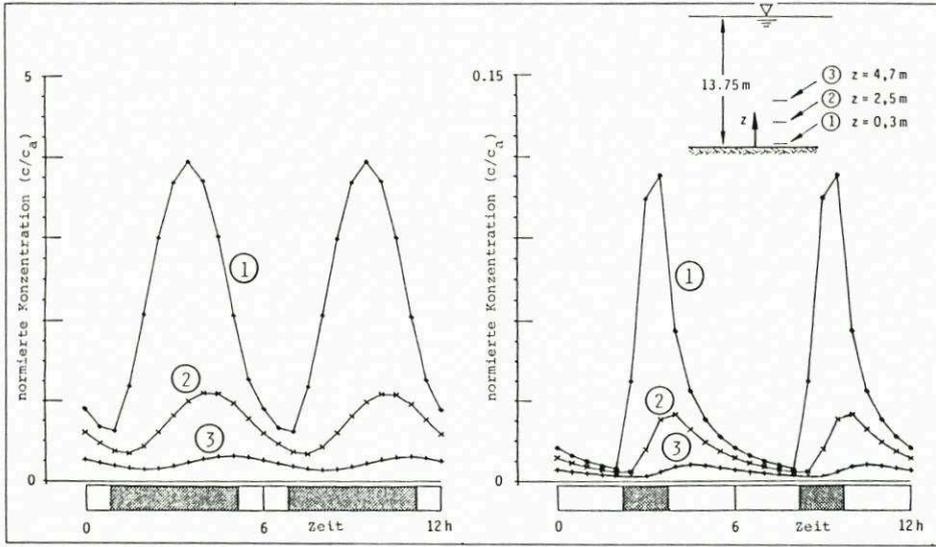


Abb. 7. Zeitabhängige Konzentration in verschiedenen Tiefen bei periodischer Erosion. Konstante Dispersion. Die Konzentrationen sind normiert, linkes Bild: $\tau_{bmax}/\tau_{ecr} = 6,0$; rechtes Bild: $\tau_{bmax}/\tau_{ecr} = 1,2$; 25 Elemente in der Vertikalen

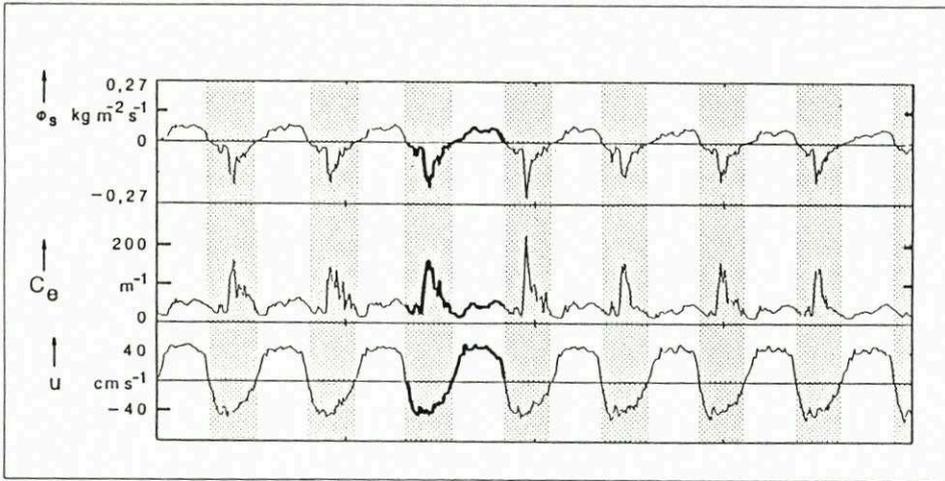


Abb. 8. Die Messungen im Weserästuar bei Blexen. Gezeigt sind Suspensionsfluß, Konzentrationen und die Geschwindigkeit

2.4 Stationäres Trübungsmaximum

Abb. 9 zeigt den Einfluß des Oberwassers auf ein berechnetes Trübungsmaximum für ein Ästuar. Das Rechenbeispiel ist an die Weser angepaßt. Es wurde ein 120 km langer, 800 m breiter Kanal simuliert. Am linken Rand wurden ein Salzgehalt s von 24 ‰ an der Oberfläche und 30 ‰ am Boden, eine Schwebstoffkonzentration $c = 0$ und ein konstanter Wasserstand vorgegeben. Am rechten Rand wurden der Salzgehalt mit $s = 0$ und ein Gleichgewichtsprofil für c nach Gl. 6 vorgegeben, wobei $w_s/K_z = 1:10$ angenommen wurde. Zwei Oberwasserzu-

flüsse, $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 9.a) und $300 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 9.b), wurden simuliert. Abb. 9 zeigt, daß mit zunehmendem Oberwasser sowohl der Salzkeil als auch das Trübungsmaximum stromab transportiert werden (hier fast 30 km). Andere, hier nicht dargestellte Ergebnisse (s. MARKOFSKY et al. 1984, 1985) zeigen eine Abschwächung des Trübungsmaximums für kleinere Sinkgeschwindigkeit oder zunehmende vertikale Dispersion (beides führt zu kleineren w_s/K_z -Werten).

Überlagert sind im Naturfall die Bodenerosion, das Absetzverhalten zu den Kenterzeiten, instationäre und ungleichmäßige Geschwindigkeiten und zeitlich variable Randbedingungen, was den Naturfall stark von dem idealisierten Fall unterscheidet. Um das Modell auf den Naturfall anwenden zu können, sind Naturmessungen erforderlich. Damit soll eine Eichung durchgeführt, d. h. die wesentlichen Parameterwerte durch einen Vergleich Messung/Rechnung bestimmt werden. Auf die Frage, inwieweit die MASEX '83 Daten dazu geeignet sind, wird im folgenden eingegangen.

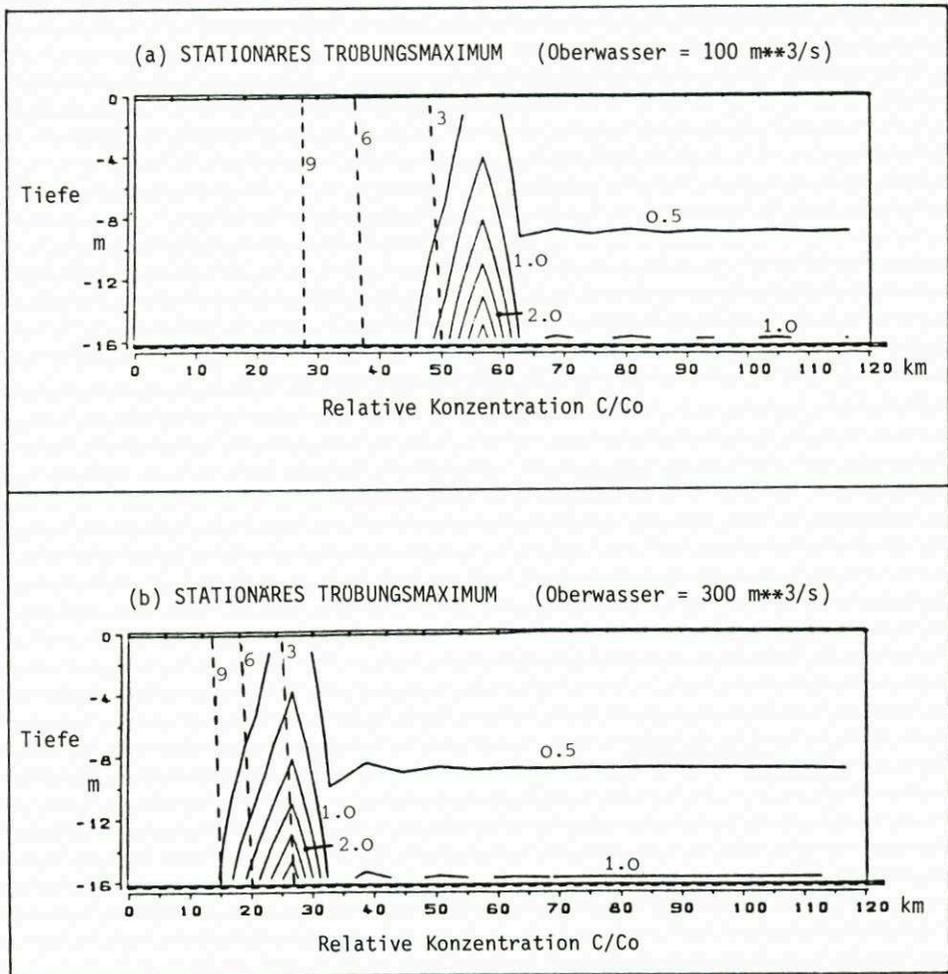


Abb. 9. Stationäres Trübungsmaximum bei unterschiedlichen Oberwasserzuflüssen
 Randbedingungen: rechts: Salzgehalt = 0, vertikales Gleichgewichtsprofil für die Trübung; links:
 Salzgehalt = 24 ‰ oben, 30 ‰ am Boden, Trübung = 0; $w_s/K_z = 1:10 \text{ m}^{-1}$;
 (—) C/C_0 , (----) Salzgehalt ‰

3. Der Einsatz der Messungen von MASEX '83 im numerischen Modell

Das Untersuchungsgebiet bei Nordenham hat eine Länge von 4,45 km und eine mittlere Tiefe von NN -12 m. Es wurden die Parameter Salzgehalt, Temperatur und Attenuation an den sieben Stationen M1, M2, G1, G2, G3, M5 und M6 (Abb. 10) ca. alle zwei Stunden über fünf Tage in den Tiefen NN -2 m bis NN -10 m gemessen. An den Positionen 1 bis 9 (Abb. 10) wurden Dauermeßstationen eingerichtet, die in einer Tiefe von 1,0 m über Grund die Parameter Salzgehalt, Temperatur und Geschwindigkeit in Richtung und Betrag gemessen haben.

Während des Zeitraumes herrschte ein mittlerer Tidehub von 3,80 m und ein Oberwasserzufluß von 180,0 m³/s.

3.1 Datenlücken

Für den Einsatz der Meßwerte im numerischen Modell ergeben sich etliche Schwierigkeiten, da folgende wichtige Größen nicht gemessen wurden:

1. Wasserstand am oberen Rand des Untersuchungsgebietes (s. Abs. 3.2)
2. Geschwindigkeitsverteilung in der Wassersäule
3. Sinkgeschwindigkeit des vorhandenen Schwebstoffes
4. Bodennahe Schwebstoff- und Salzkonzentrationen

Diese vorhandenen Datenlücken zu schließen, bedurfte es einiger Anstrengungen.

Da wesentliche Daten für die Steuerung des numerischen Modells fehlen und das Untersuchungsgebiet mit seiner Länge von 4,45 km sehr kurz für eine Modellrechnung ist, wurde beschlossen, nur die Fahrwasserrinne zu simulieren. Damit ergibt sich für das numerische Modell ein Gitternetz mit 26 Elementen mit je 178,0 m in Längsrichtung (alle 200,0 m breit) und bis zu (maximal) 14 Elementen mit je 1,0 m Höhe über die Tiefe.

3.2 Pegelmessungen

Der einzige innerhalb des Gebietes vorhandene Pegel war der bei Nordenham (Strom-km 58,00). Dieser Pegel wurde zur Steuerung des Wasserstandes am seeseitigen Rand benutzt. Der Pegel für den oberwasserseitigen Rand wurde durch eine lineare Interpolation zum Pegel Strohauser-Plate (Strom-km 49,00) berechnet. Ein Vergleich der mit diesen Randbedingungen berechneten Geschwindigkeiten mit den gemessenen zeigt eine Differenz im Verlauf und eine besonders deutliche Verschiebung der Kenterzeitpunkte. Der Verlauf des gemessenen Salzgehaltes (der zugleich ein Indikator für das Geschwindigkeitsfeld ist) deutet ebenfalls darauf hin, daß diese durch Interpolation gewonnene obere Randbedingung fehlerhaft ist. Daher wurde der Pegel am oberen Rand so lange korrigiert, bis eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Salztransport erreicht war (s. Abb. 11 und 14).

3.3 Attenuationsmessung

Die vom Schiff aus eingesetzte Meßanordnung konnte Attenuationskoeffizienten nur bis 172 m⁻¹ erfassen. Gerade in Bodennähe wurde dieser Wert bei weitem überschritten. Dieses zeigt Abb. 12, in der die vom Schiff aus gemessenen Attenuationskoeffizienten bei Pos. M6

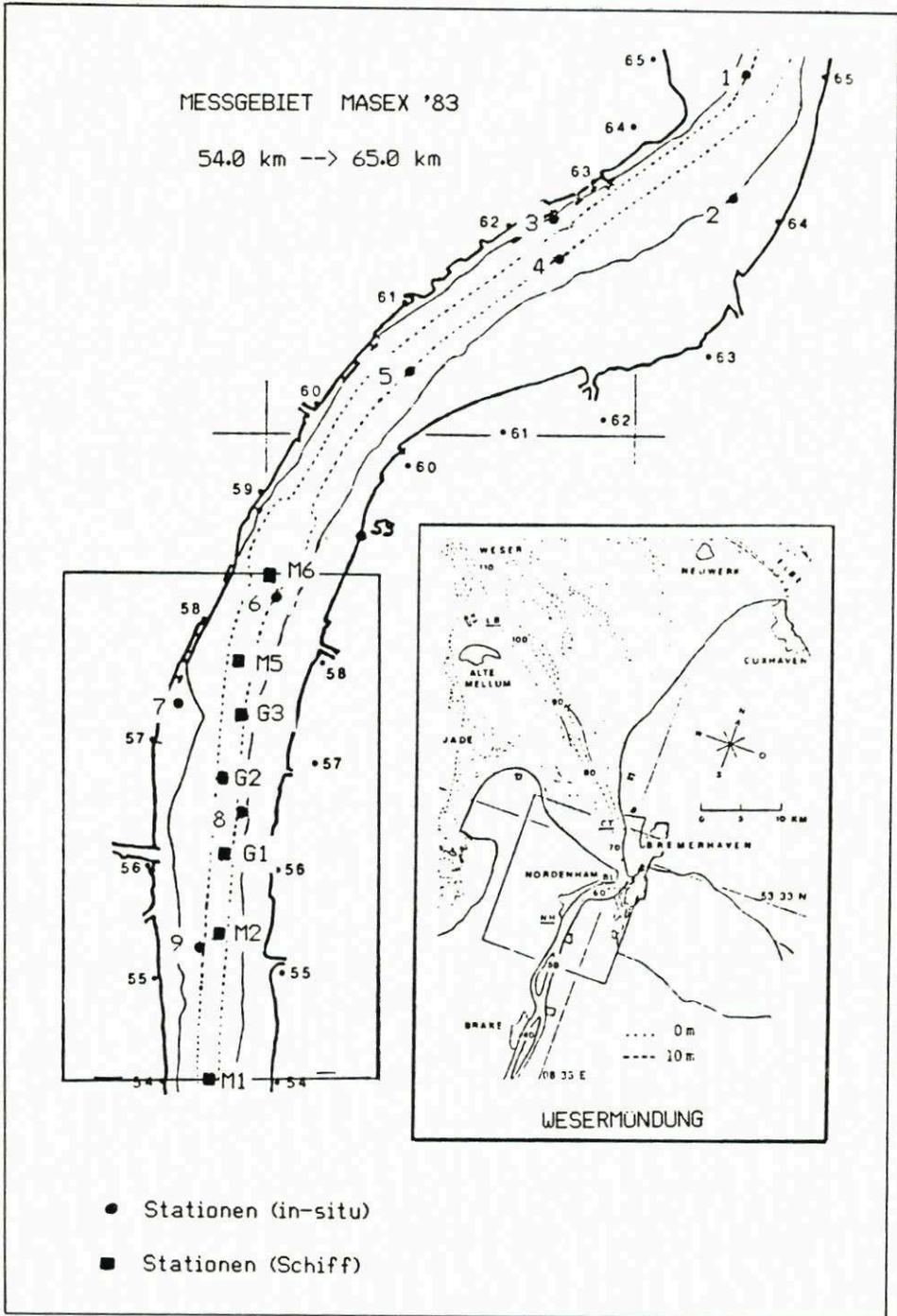


Abb. 10. Die Lage des Untersuchungsgebietes der Meßkampagne MASEX '83

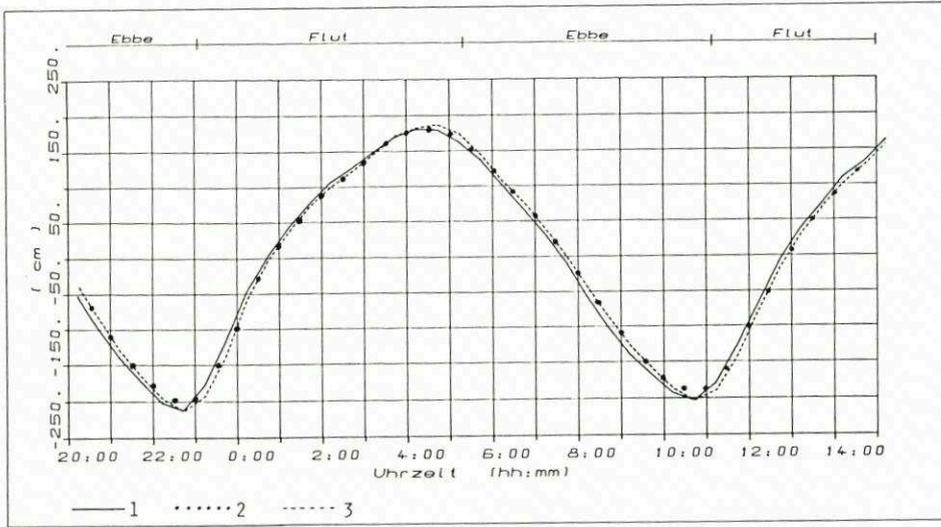


Abb. 11. Verlauf des gemessenen (1), des interpolierten (2) und des zusätzlich korrigierten (3) Pegels

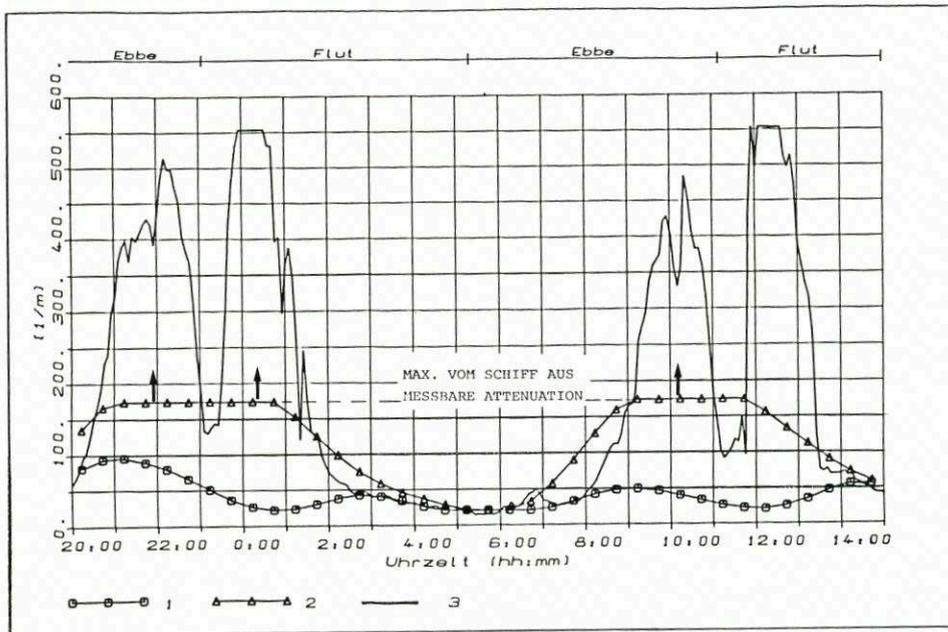


Abb. 12. Vergleich der bei Position M6 (1) NN -3 m, (2) NN -10 m gemessenen Attenuationswerte mit den Dauermessungen bei Station 5 (3)

mit denen der Station 5 der Dauermessungen gegenübergestellt sind. Die in den Tiefen größer NN -10 m nicht vorhandenen Werte der Attenuation und der durch die Kappung der Werte unvollständig wiedergegebene Verlauf erschwert eine Analyse der berechneten Werte.

Das Meßintervall von ca. 2 h ist außerdem unzureichend, wenn der zeitliche Verlauf der Attenuation (s. Abb. 12) mit seinen großen zeitlichen Gradienten genau verfolgt werden soll.

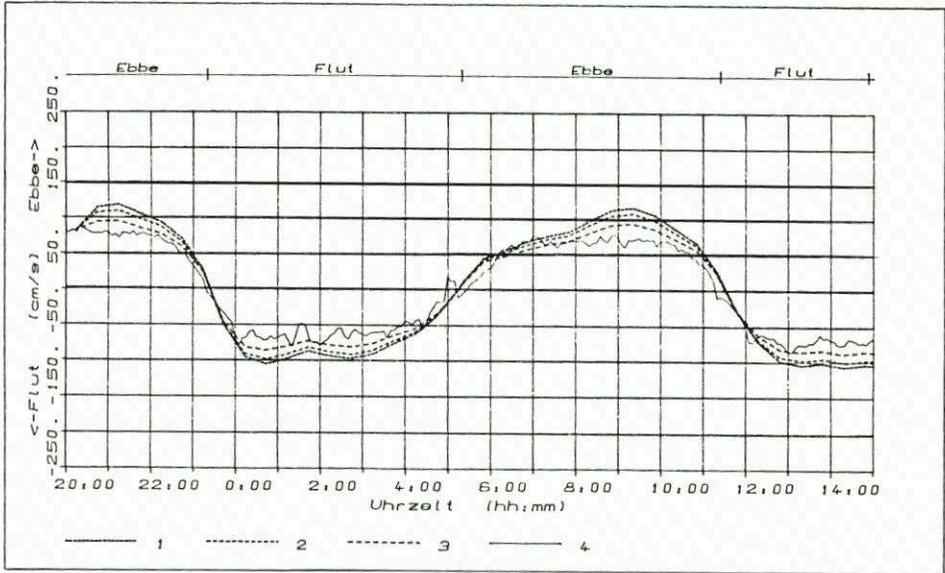


Abb. 13. Vergleich der an der Station G1 berechneten Geschwindigkeiten in (1) NN -2.m, (2) NN -6 m und (3) NN-10 m Tiefe mit denen der bei der Position 8 1 m über Grund gemessenen

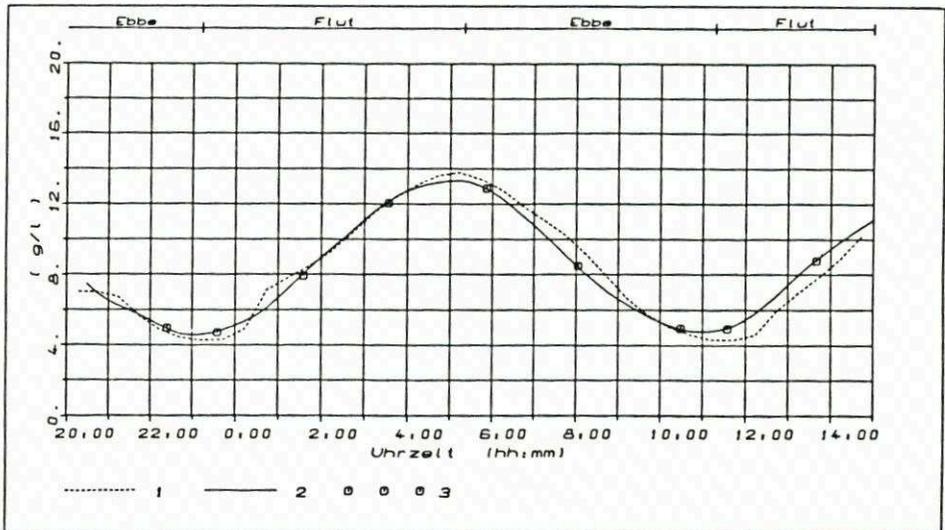


Abb. 14. Verlauf des berechneten (1) und des gemessenen (2) Salzgehaltes an der Station G1 in NN-6 m Tiefe

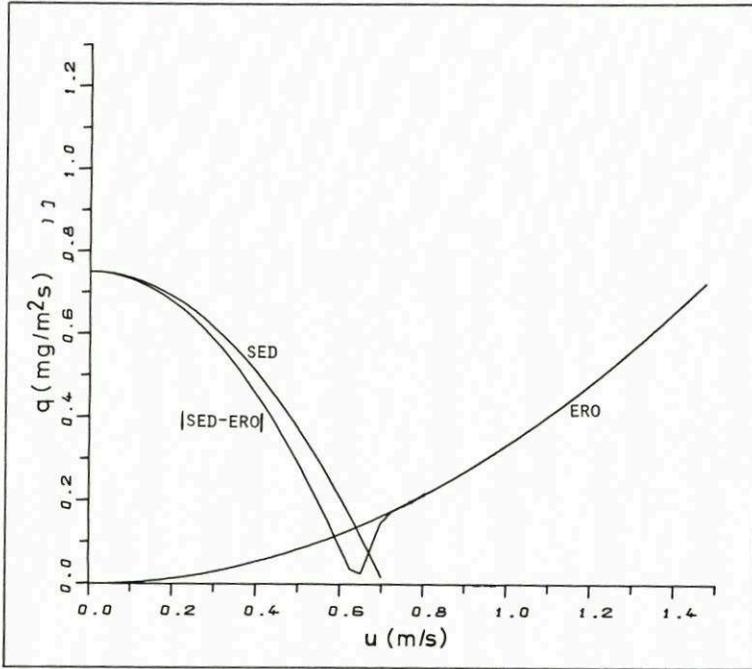


Abb. 15. Abhängigkeit der erodierten und sedimentierten Schlickmenge von der momentanen Geschwindigkeit

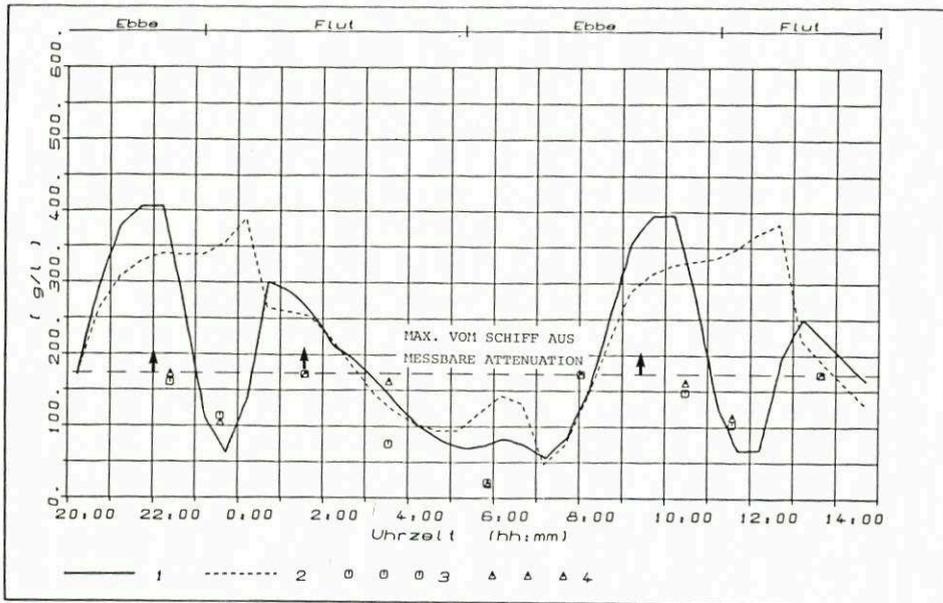


Abb. 16. Der Verlauf der bei Station G1 mit (1) und ohne (2) Erosion und Sedimentation in NN -10 m berechneten Attenuation mit der in NN -9,5 m (3) und NN -10,5 m (4) gemessenen

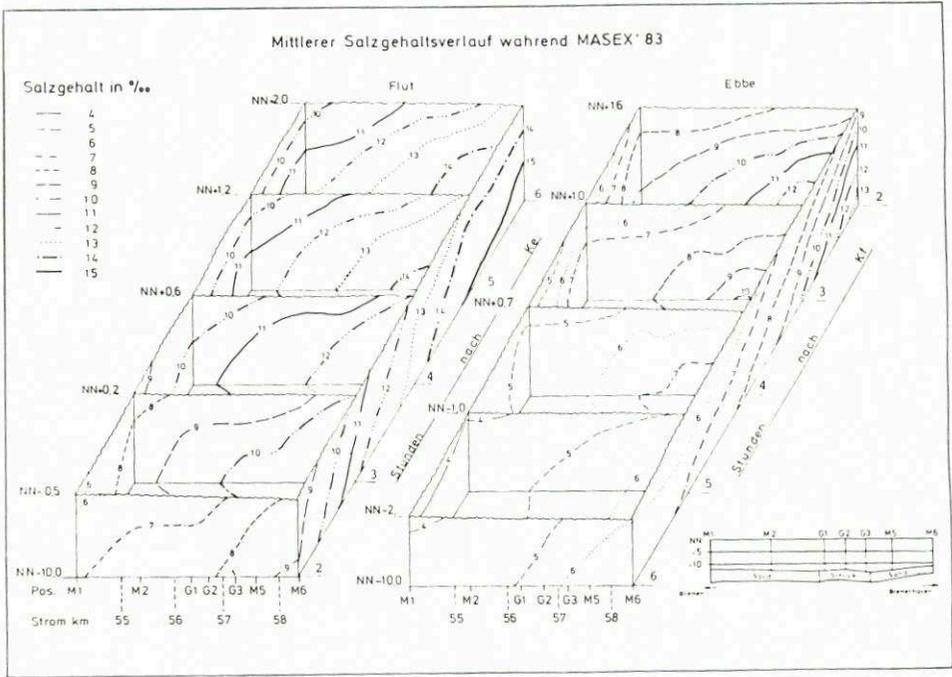


Abb. 17a. Mittlerer Verlauf des Salzgehaltes während der Meßkampagne MASEX '83 (bearb. von der MASEX-Arbeitsgruppe)

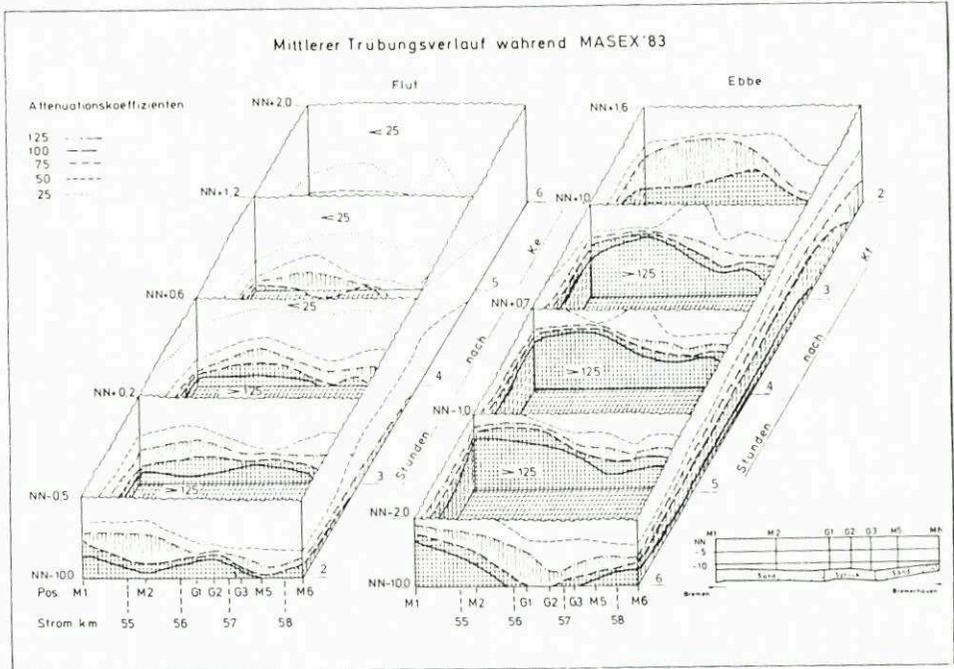


Abb. 17b. Mittlerer Verlauf der Attenuation während der Meßkampagne MASEX '83 (bearb. von der MASEX-Arbeitsgruppe)

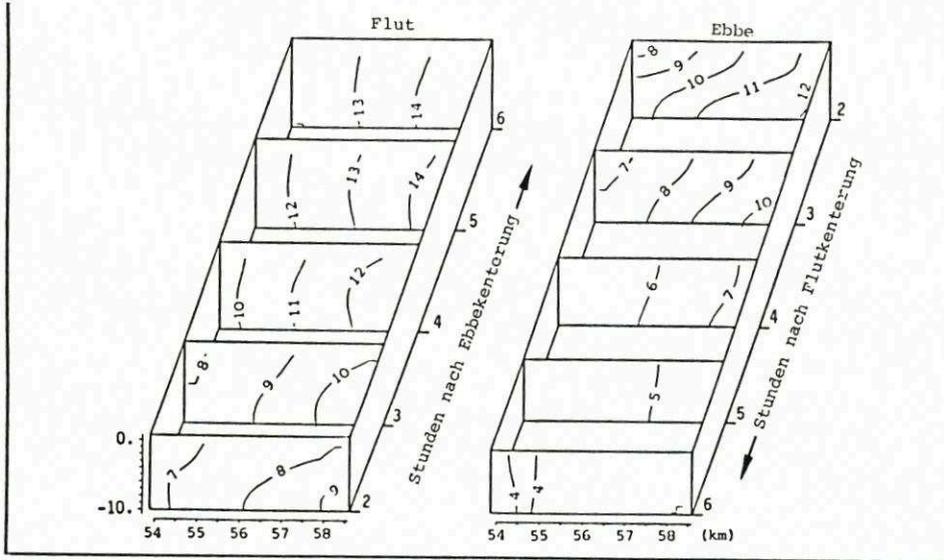


Abb. 18a. Berechneter Verlauf des Salzgehaltes für die Tide vom 26. und 27. Sept. 1983

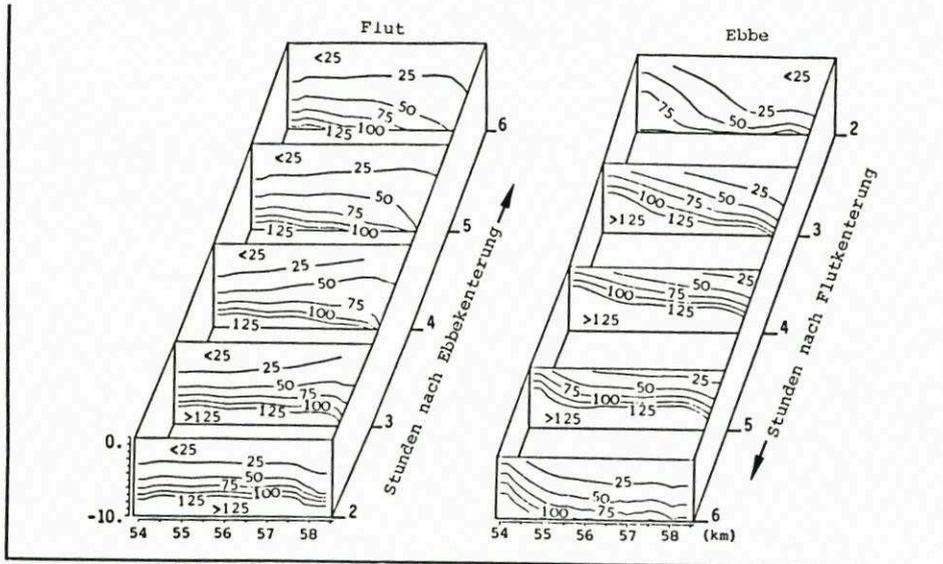


Abb. 18b. Berechneter Verlauf der Attenuation für die Tide vom 26. und 27. Sept. 1983

Bei der Interpretation der numerischen Ergebnisse muß daher berücksichtigt werden, daß die Aussagefähigkeit der berechneten Werte sehr stark von der Qualität der Randwerte abhängt.

4. Die numerischen Ergebnisse

Mit den vorhandenen Daten wurde als erstes eine Parameterstudie zur Reproduzierung des Geschwindigkeitsfeldes und des Salzgehalttransportes durchgeführt. Als die sich ergebenden Parameter wurden ermittelt:

TAYLOR'scher Reibungsbeiwert	$R_T = 0,004$
turbulente Zähigkeit	$A_z = 0,050 \text{ m}^2/\text{s}$
turbulente Dispersionskoeffizienten	$K_z = 0,005 \text{ m}^2/\text{s}$

Typische erzielte Ergebnisse für die Geschwindigkeitsverteilung und den Salztransport zeigen Abb. 13 und 14.

Für die Berechnung des Schlicktransportes sind außerdem die Parameter

- Sinkgeschwindigkeit
- kritische Spannung für Sedimentation
- Sedimentationsfaktor
- kritische Spannung für Erosion
- Erosionsfaktor

zu bestimmen.

Auch hier wurde eine Parameterstudie durch Variation dieser Werte durchgeführt. Als erstes wurde der Einfluß der Sinkgeschwindigkeit untersucht. Abb. 15 zeigt typische Ergebnisse bei nicht vorhandener Erosion und Sedimentation. Man sieht deutlich, daß ohne die Berücksichtigung von Erosion und Sedimentation der typische Verlauf der Trübung besonders in der Zeit 3 h vor bis 3 h nach Ebbekenterung nicht reproduziert werden kann.

Abbildung 16 zeigt die Menge von erodiertem und sedimentiertem Material für die gefundene Parameterkombination in Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit. Die Parameter betragen:

Sinkgeschwindigkeit	$w_s = 0,002 \text{ m/s}$
Sedimentationsspannung	$\tau_{ser} = 2,0 \text{ N/m}^2$
Sedimentationsfaktor	$f_{sed} = 75 \text{ \%}$
Erosionsspannung	$\tau_{ecr} = 0,003 \text{ N/m}^2$
Erosionskonstante	$M = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$

Diese Werte liegen in der Größenordnung von im Labor gemessenen Werten (s. PARCHURE, 1984).

Der berechnete Trübungsverlauf unter Berücksichtigung von Erosion und Sedimentation ist auch in Abb. 15 dargestellt. Der typische Verlauf wird jetzt wesentlich besser wiedergegeben. Dabei ist noch einmal zu betonen, daß ein Attenuationskoeffizient $> 172 \cdot \text{m}^{-1}$ außerhalb des Meßbereichs des vom Schiff aus eingesetzten Attenuationsmeßgerätes lag.

Einen Vergleich der aus den Messungen bestimmten Verläufe des Salzgehaltes und der Attenuation zeigen Abb. 17 und 18. Die qualitative Übereinstimmung ist als gut zu bezeichnen. Man kann sich die Probleme der Vorgabe der Randwerte im Modell vorstellen, wenn man den Bereich $> 125 \cdot \text{m}^{-1}$ für den Attenuationskoeffizienten betrachtet. Im Modell wurde der Wert von höchstens $172 \cdot \text{m}^{-1}$ vorgegeben, was zwangsläufig zu einer Unterschätzung der Attenuation führt.

5. Schlußfolgerung

Die Meßergebnisse MASEX '83 sind nur bedingt für die Simulation in einem numerischen Modell einsetzbar. Trotzdem kann mit ihnen schon eine Studie der vorhandenen Einflüsse (Erosion und Sedimentation) und eine annähernde Abschätzung der maßgebenden Parameter für den Schlicktransport erzielt werden. Die Erfahrungen mit den vorhandenen Daten sind in die Planung der Meßaktion MASEX '85 eingeflossen. Beim Vorliegen dieser Meßwerte kann mit Hilfe des Modells eine umfassendere und besser fundierte Studie des Schlicktransportes und dessen Kausalitäten durchgeführt werden.

6. Schriftenverzeichnis

- BLOSS, S., MARKOFSKY, M. u. ZIELKE, W.: Numerische Simulation von Ausbreitungsvorgängen in Ästuarien: Fallstudie „Untere Trave“, DGM, 26, H. 1/2, 1982.
- DOBBINS, W. E.: Effect of Turbulence on Sedimentation. American Society of Civil Engineers, Transactions, 109, 1943.
- FANGER, H.-U., NEUMANN, L. J. R., OHM, K. u. RIETHMÜLLER, R.: MASEX '83, eine Untersuchung in der Trübungszone der Unterweser. Die Küste, H. 42, 1985.
- FISCHER, K.: Numerical Tidal-Salinity Models of the Ems-Estuary. Proc. 16th Coast. Engr. Conf., Hamburg, 1978.
- KRONE, R. B.: Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Laboratory, University of California, Berkley, 1962.
- MARKOFSKY, M.: A Technique for Reducing the Computation Time of Two-Dimensional Thermal and Water Quality Explicit Finite Difference and Finite Element Numerical Models. Proc. 4th Congr. Asian and Pacific Regional Division International Association for Hydraulic Research. Chiang Mai, Thailand, 1984.
- MARKOFSKY, M., LANG, G. u. SCHUBERT, R.: Numerical Simulation of Unsteady Suspended Sediment Transport. Proc. of Euromech 192: Transport of Suspended Solids in Open Channels. München, FRG, 1985, Verlag Balkema, Rotterdam, 1986.
- MARKOFSKY, M., LANG, G. u. SCHUBERT, R.: Suspended Sediment Transport in Tidal Waters: Turbidity Maximum, Numerical Simulation, Physical Aspects. Proc. 21th Congress of the IAHR, Vol. 4, Melbourne, 1985.
- OWEN, M. W. u. ODD, N. V. M.: A Mathematical Model of the Effect of a Tidal Barrier on Siltation in an Estuary. Tidal Power (Ed. Gray, I. J. and Gashaus, O.K.), Plenum Press, 1972.
- PARCHURE, T. M.: Deposited Cohesive Sediments. Coastal & Oceanographic Engineering Department. University of Florida, 1984.
- PARTHENIADES, E.: A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water, Thesis, University of California, Berkley, 1962.
- PERRELS, P. A. J. u. KARELSE, M.: A Two-Dimensional Laterally Averaged Model for Salt Intrusion, in Transport Models for Inland and Coastal Waters (Ed. by Fischer, H. B.) Academic Press, New York, 1981. Experiments on the Mechanics of Sediment Suspension. Proc. 5th Int. Congr. for Applied Mechanics, Cambridge, Mass.
- ROUSE, H.: Modern Concepts of the Mechanics of Sediment Suspension. Proc. 5th Int. Congr. for Applied Mechanics, Cambridge, Mass., 1938.
- SALOMON, J. C.: Modelling the Turbidity Maximum. Ecohydrodynamics, Proc. 12th Int. Liege Cooq. Ocean Hydrod. 1982.
- SHENG, Y. P.: Mathematical Modelling of Three-Dimensional Coastal Currents and Sediment Dispersion: Model Development and Application. Aeronautical Research Associates of Princeton, Inc., 1983.
- WELLERSHAUS, S.: Turbidity Maximum and Mud Shoaling in the Weser Estuary. Arch. Hydrobiol., 92, 2, 1981.