

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Fischer, Karsten

Numerische Modelle für Tide und Salzgehaltsverteilung im Mündungsbereich der Ems

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/20.500.11970/101147>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fischer, Karsten (1979): Numerische Modelle für Tide und Salzgehaltsverteilung im Mündungsbereich der Ems. In: Die Küste. Heide, Holstein: Boyens. S. 29-39.

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 Modelle für Tide und Salzgehaltsverteilung im Mündungsbereich der Ems

Von Karsten Fischer

Zusammenfassung

Zur Simulation der Tidebewegung und der Salzgehaltsausbreitung im Mündungsbereich der Ems werden zwei numerische Modelle vorgestellt. Das eine Modell arbeitet mit vertikal gemittelten Zustandsgrößen, während das andere ein dreidimensionales, vertikal diskretisiertes Modell ist. Es wird gezeigt, daß das dreidimensionale Modell die Tidebewegung und die Salzgehaltsausbreitung mit nur drei Modellparametern in befriedigender Weise wiedergibt, während das vertikal gemittelte Modell eine wesentlich kompliziertere Parametrisierung benötigt.

Summary

Two numerical models for simulating the tidal motions and salinity intrusion in the Ems estuary are described. One model makes use of vertically averaged state variables, while the other is a three-dimensional, vertically discretized model. It is shown that the three-dimensional model represents the tidal motions and the salinity distribution in a satisfactory way by using only three model parameters, while the vertically averaged model needs a much more complicated set of parameters.

Inhalt

1. Einführung	29
2. Beschreibung der numerischen Modelle	30
2.1 Das eindimensionale Modell	31
2.2 Das zweidimensionale Horizontalmodell	31
2.3 Das zweidimensionale Vertikalmodell	32
2.4 Das dreidimensionale Modell	32
2.5 Randbedingungen	32
3. Modellanwendungen	33
3.1 Das vertikal gemittelte Modell für die Hydrodynamik	33
3.2 Das barokline, vertikal diskretisierte Modell	33
4. Modelleichung und Ergebniskontrolle	35
5. Schlußfolgerungen	38
6. Würdigungen	39
7. Schriftenverzeichnis	39

1. Einführung

Infolge der zunehmenden wirtschaftlichen Nutzung von Mündungsgebieten hat der Bedarf an Ästuarmodellen für Forschung und Vorhersage zu großen Entwicklungen auf diesem Gebiet und zur Herausbildung einer komplexen Modelltechnologie in neuerer Zeit geführt. Je nach Art des vom Ingenieur zu bearbeitenden Problems können die Komplexität der Modelle und die Kosten beim Betreiben dieser Modelle sehr unterschiedlich sein, und es ist nicht immer von vornherein klar, welche physikalischen Effekte mit Sorgfalt behandelt und

welche vernachlässigt werden können, damit man ein Modell erhält, das zugleich genau und wirtschaftlich arbeitet.

Tide- und Salzgehaltsmodelle werden benutzt, um Informationen über Salzgehaltsverteilung und Sedimenttransport in Ästuarien zu erhalten. Sie können als Ausgangsbasis für kompliziertere ökologische Modelle benutzt werden (KROGH et al., 1978).

Zwei Probleme ergeben sich bei der Konstruktion von Salzgehaltsmodellen: Erstens sind die numerischen Fehler der einfacheren Lösungsverfahren für die Advektionsgleichung nicht vernachlässigbar, und zweitens ist die Anwendung vertikal gemittelter Modelle fraglich, da die treibenden Kräfte der Salzintrusion eine starke Veränderlichkeit in der Vertikalen aufweisen.

Andererseits ist eine Lösung von Bewegungs- und Transportgleichungen mit sehr aufwendigen numerischen Verfahren in einem dreidimensionalen Gitternetz von genügend feiner Diskretisierung selbst auf den schnellsten, heute allgemein verfügbaren Rechenanlagen kaum möglich. Daraus ergeben sich zwei wesentliche Fragestellungen für numerische Tide- und Salzgehaltsmodelle:

- a) Welches Maß an numerischem Aufwand wird benötigt, um welches Maß an Genauigkeit der Ergebnisse zu erzielen und
- b) welche Vereinfachungen (durch Vernachlässigungen und Mittelungen usw.) sind möglich, wenn eine vorgegebene Genauigkeit erreicht und das Modell auf die wesentlichen physikalischen Wechselwirkungen beschränkt werden soll?

Die erste Frage ist sehr schwierig zu beantworten und ist (nach Meinung des Autors) noch niemals in etwas allgemeinerer Form untersucht worden.

Unter der Annahme, daß die zweite Frage unabhängig von der ersten behandelt werden kann, wird dieses Problem in der vorliegenden Arbeit durch Anwendung verschiedener Modelle auf das Ems-Ästuar untersucht.

2. Beschreibung der numerischen Modelle

Die komplizierte Struktur von geometrischen und physikalischen Bedingungen, die man gewöhnlich in Ästuarien vorfindet, war der Grund zur Entwicklung einer Familie von Computer-Programmen zur Berechnung von Tide- und Salzgehaltsbewegungen. Informationen über die einzelnen Glieder dieser Programmfamilie werden im folgenden gegeben. Die einzelnen Programme vollziehen eine Simulation der wesentlichen partiellen Differentialgleichungen auf der Grundlage eines expliziten Differenzenverfahrens unter Verwendung eines geschachtelten Gitternetzes mit massenerhaltenden und transportartigen (stromauf-) Differenzenausdrücken. Die Modelle sind ähnlich wie die Modelle von HANSEN (1962), LEENDERTSE (1967), SÜNDERMANN (1971) und SIMONS (1973). Sie können als selbständige Einheiten oder als Unterprogramme betrieben werden, und sie sind leicht einsetzbar für Kopplung und Schachtelung von Teilmodellen. Die vorliegende Arbeit gibt ein Beispiel für die Kopplung von zwei Teilmodellen. Anwendungen der Programmfamilie werden durch eine dynamische Speicherplatzverteilung stark erleichtert. Da es sich um Programme für Forschungs- und Entwicklungszwecke handelt, sind alle Einheiten streng gegliedert, damit man Untereinheiten leicht austauschen und ersetzen kann. Es wurde keine komfortable Ein-/Ausgabestruktur (z. B. eine problemorientierte Sprache) entwickelt, weil man davon ausgehen kann, daß eine solche Struktur nur sinnvoll ist, wenn das Modellkonzept nicht mehr geändert werden muß; ein derartiger Grad der Modelltechnik ist jedoch nach Auffassung des Autors für Tide- und Salzgehaltsmodelle noch nicht erreicht.

2.1 Das eindimensionale Modell

Bewegungsgleichung:

$$u_t + u u_x + \frac{r}{h} |u| u - \frac{\lambda}{h} |W| W - A u_{xx} + \frac{1}{\bar{\rho}} \bar{p}_x = 0 \quad (1)$$

Hier und im folgenden wird die Differentiation durch untere Indizes dargestellt. t ist die Zeitkoordinate, u die Geschwindigkeit längs der x -Achse, h die Wassertiefe, ρ die Dichte, \bar{p} der mittlere hydrostatische Druck, W die Windgeschwindigkeit, r der Bodenreibungsparameter, λ der Windschubparameter und A die horizontale turbulente Viskosität.

Hydrostatische Druckgleichung:

$$p(z) = g \int_z^h \bar{\rho}(z) dz \quad (2)$$

Hier ist z die vertikale Koordinate und g die Erdbeschleunigung.

Kontinuitätsgleichung:

$$b \zeta_t + (Fu)_x = 0 \quad (3)$$

wobei ζ der tide-veränderliche Anteil von h ist, b die Breite der Oberfläche und F die Querschnittsfläche.

Transportgleichung:

$$FQ_t + (uFQ)_x = (BFQ_x)_x \quad (4)$$

wobei B der horizontale Dispersionskoeffizient ist.

2.2 Das zweidimensionale Horizontalmodell

Bewegungsgleichungen:

$$u_t + uu_x + vu_y - fv - A(u_{xx} + u_{yy}) + \frac{1}{\bar{\rho}} \bar{p}_x + \frac{r}{h} |u| u - \frac{\lambda}{h} |^x W|^x W = 0 \quad (5)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + fu - A(v_{xx} + v_{yy}) + \frac{1}{\bar{\rho}} \bar{p}_y + \frac{r}{h} |v| v - \frac{\lambda}{h} |^y W|^y W = 0 \quad (6)$$

wobei u und v die Geschwindigkeitskomponenten längs der horizontalen Ortskoordinaten x und y sind, $^x W$ und $^y W$ die Komponenten der Windgeschwindigkeit und f die Coriolisbeschleunigung.

Kontinuitätsgleichung:

$$\zeta + (uh)_x + (vh)_y = 0 \quad (7)$$

Transportgleichung:

$$hQ_t + (uqh)_x + (vqh)_y = (BhQ_x)_x + (BhQ_y)_y \quad (8)$$

2.3 Das zweidimensionale Vertikalmodell

Bewegungsgleichung:

$$u_t + uu_x - Au_{xx} - {}^zAu_{zz} + \frac{1}{\rho}p_x = 0 \quad (9)$$

wobei zA die vertikale turbulente Viskosität ist.

Kontinuitätsgleichung:

$$({}^xFu)_x + ({}^zFw)_z = 0 \quad (10)$$

wobei w die Vertikalgeschwindigkeit ist, xF und zF die Querschnittsflächen des Kontrollvolumens, senkrecht zur x - und z -Achse genommen.

Transportgleichung:

$$bq_t + (ubq)_x + b(wq)_z = (bBq_x)_x + b({}^zBq_z)_z \quad (11)$$

wobei zB die vertikale turbulente Diffusivität ist.

2.4 Das dreidimensionale Modell

Bewegungsgleichungen:

$$u_t + uu_x + vu_y - f v - A(u_{xx} + u_{yy}) - {}^zAu_{zz} + \frac{1}{\rho}p_x = 0 \quad (12)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + f u - A(v_{xx} + v_{yy}) - {}^zAv_{zz} + \frac{1}{\rho}p_y = 0 \quad (13)$$

Kontinuitätsgleichung:

$$({}^xFu)_x + ({}^yFv)_y + ({}^zFw)_z = 0 \quad (14)$$

Transportgleichung:

$$q_t + (uq)_x + (vq)_y + (wq)_z = (Bq_x)_x + (Bq_y)_y + ({}^zBq_z)_z \quad (15)$$

2.5 Randbedingungen

In den vertikal diskretisierten Modellen 2.3 und 2.4 sind die Transportgleichungen für die oberste und die unterste Schicht etwas komplizierter als Gl. (11) oder (15) wegen der variablen Schichtdicke, aber diese Formeln wurden der Kürze halber weggelassen. Windschub und Bodenreibung werden für die oberste bzw. unterste Schicht vorgegeben, und durch die entsprechenden Reibungskoeffizienten wird die Verringerung der Turbulenz in der Nähe dieser Berandungen berücksichtigt. Die vertikalen Viskositäts- und Diffusionsterme werden mit impliziten Differenzenausdrücken dargestellt, damit einige Stabilitätseinschränkungen entfallen. Oberfläche, Boden und seitliche feste Ränder werden durch verschwindende Dichtegradienten in Normalrichtung und (teilweise) durch Haftbedingungen für die Geschwindigkeiten simuliert. An den offenen Rändern werden Wasserstand (oder Normal-

komponente der Geschwindigkeit), Dichte und Normalkomponenten des Geschwindigkeitsgradienten benötigt, wobei die letzteren häufig zu Null gesetzt werden können.

3. Modellanwendungen

Verschiedene Modelle wurden auf das Gebiet der Emsmündung angewandt. Abb. 1 zeigt das Modellgebiet und die Berandungen.

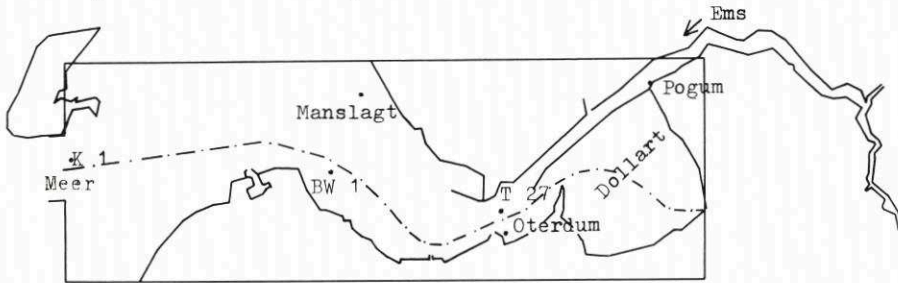


Abb. 1. Lageplan Ems-Ästuar

Teile der seeseitigen offenen Berandung wurden durch geschlossene Berandungen ersetzt, wie in Abb. 1 dargestellt, aber diese künstlichen geschlossenen Ränder liegen in Gebieten flachen Wassers und niedriger Strömungsgeschwindigkeiten. Das Ästuar wurde durch ein horizontales, zweidimensionales Gitternetz von 1,5 km Gitterweite dargestellt, ergänzt durch einen horizontalen, eindimensionalen Anhang von 1,0 km Schrittweite für den Oberlauf der Ems; der Zeitschritt war 90 s, bedingt durch eine maximale Tiefe von etwa 16 m. Da nur eine begrenzte Anzahl von Meßdaten verfügbar war, mußten mehrere Annahmen gemacht werden. Als Tidebewegung wurde ein Tidezyklus ausgewählt, der einer Normaltide nahekam, und dieser Zyklus von 12 Std. 25 Min. wurde als periodische Randbedingung für den seeseitigen Wasserstand vorgegeben. An drei verschiedenen Stellen wurde ein mittlerer Süßwasserzufluß vorgegeben. Als Randbedingung für den Salzgehalt wurde ein geeignet ausgewählter und gemittelter Satz von Meßdaten am Ort K 1 vorgegeben und zum Vergleich mit den Rechenergebnissen an den Punkten BW 1 und T 27 benutzt (siehe Abb. 1).

3.1 Das vertikal gemittelte Modell für die Hydrodynamik

Der erste Schritt bei der Modellentwicklung war die Aufstellung eines vertikal gemittelten Modells für die Tidedynamik. Dieses Modell wurde benutzt, um Informationen über Bodenreibungskoeffizienten zu erhalten und die Modellgeometrie zu überprüfen. Später wurde das Modell durch den Teil mit Salzgehaltstransport ergänzt und zum Zwecke des Vergleichs mit dem vertikal diskretisierten Modell betrieben.

3.2 Das barokline, vertikal diskretisierte Modell

Dieses Modell hatte sechs Schichten von 2 bis 3 m Dicke in den horizontal zwei- und eindimensionalen Modellteilen. Die Kopplung der Modellteile wurde unter vollständiger

Massenerhaltung für Wasser und Salzgehalt durchgeführt. Folgende Parameter ergaben die beste Übereinstimmung zwischen Rechenergebnissen und Meßdaten:

Bodenreibung	$r = 0.006$
turbulente Viskositäten	$z_A = 0.0019 \text{ m}^2/\text{s}$
	$A = \text{O}$
turbulente Diffusivität	$z_B = 0.00023 \text{ m}^2/\text{s}$
	$B = \text{O}$

Einige Ergebnisse der Rechnung werden in Abb. 2 gezeigt.

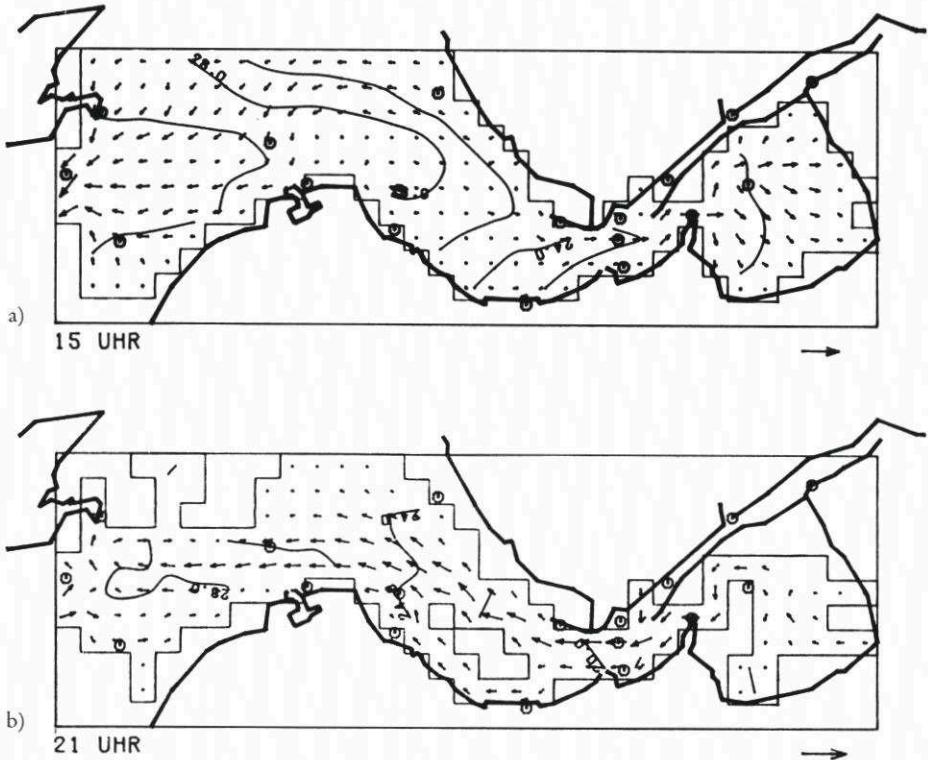


Abb. 2. Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt a) beim Flut-Kenterpunkt, b) beim Ebbe-Kenterpunkt; Pfeile unterhalb der Grafik: 1 m/s; Salzgehalt in ‰

Hierbei sind die Daten für Geschwindigkeit und Salzgehalt vertikal gemittelte Werte aus dem dreidimensionalen Modell. Große Wattflächen erscheinen in Abb. 2b; der Mechanismus des Überflutens und Trockenfallens wurde in der obersten Modellschicht simuliert. In Abb. 2a ist die relative Unbeweglichkeit des Salzgehalts in flachen Gebieten und Uferzonen zu erkennen; dieser Mechanismus ist von größter Bedeutung für die Dispersion. Die Unregelmäßigkeiten der Geschwindigkeiten am offenen Rand sind ein rechnerischer Effekt und haben keinen Einfluß auf die Ergebnisse im Inneren, weil hierdurch nur die Tangentialkomponenten am Rand beeinflusst werden.

Man sieht in Abb. 2, daß die Umgebung des Dollart nur sehr schematisch durch das Modell dargestellt wird, und hier treten auch die größten Abweichungen auf.

Der Informationsgehalt eines dreidimensionalen Modells ist sehr groß; der Kürze wegen

soll hier nur noch ein weiteres Detail gezeigt werden. Abb. 3 stellt die zeitliche Variation der Vertikalprofile

- a) der West-Ost-Komponente der Geschwindigkeit und
 - b) des Salzgehalts
- im Punkt BW 1 dar.

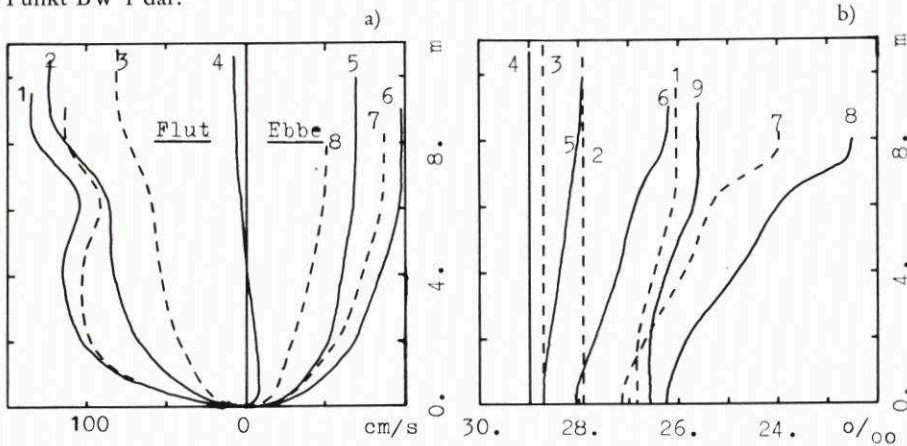


Abb. 3. a) Vertikale Geschwindigkeitsprofile, b) vertikale Salzgehaltsprofile am Ort BW 1. Zahlen an den Kurven bezeichnen die zeitliche Abfolge

Die typischen Deformationen der Vertikalprofile durch die baroklinen Kräfte sind in Abb. 3a nicht zu erkennen, denn diese Deformationen sind zwei Größenordnungen kleiner als die Tidegeschwindigkeiten. Dennoch sind diese Deformationen von größter Wichtigkeit für den Prozeß der Salzausbreitung. Die Anomalie in den Kurven während der Flutphase wird durch Corioliskräfte und geometrische Effekte bewirkt.

Die zugehörigen Salzgehaltsprofile in Abb. 3b zeigen während der Ebbphase eine bestimmte Schichtung an, die während der Flutphase wieder verschwindet. Dieser Effekt wird durch die schnellere Bewegung der oberen Schichten verursacht; während der Flut kann eine instabile Schichtung entstehen, der eine rasche Durchmischung in der Vertikalen folgt.

Eine Testrechnung ohne barokline Kraftterme zeigt keine wesentlichen Änderungen in den Vertikalprofilen von Abb. 3 für einen vollen Tidezyklus.

4. Modelleichung und Ergebniskontrolle

Testrechnungen mit dem vertikal gemittelten Modell zeigten, daß eine befriedigende Simulation der Tidebewegungen mit einem konstanten Bodenreibungskoeffizienten für das gesamte Modellgebiet mit Ausnahme des Dollart erreicht werden konnte. Weil nur eine begrenzte Menge von Meßdaten zur Verfügung stand und weil diese Arbeit eine erste Studie zur Erkundung der Modelleigenschaften war, wurde eine Beschränkung auf globale, örtlich und zeitlich konstante Parameter vorgenommen. Diese Beschränkung ist von praktischem Interesse, weil der Eichaufwand minimal wird; denn ein dreidimensionales Modell ist wegen seines numerischen Aufwandes schwierig zu eichen.

Als erster Schritt wurde die Tidedynamik durch Anpassung von Bodenreibungskoeffizient und vertikaler turbulenter Viskosität geeicht. Der Programmteil für Salzgehaltstransport

wurde in dieser Phase nicht benutzt. Als zweiter Schritt wurde der Salztransport durch Änderung der vertikalen turbulenten Viskosität geeicht; daraufhin mußte die Bodenreibung korrigiert werden, um die Tidedynamik wieder zu optimieren. Dieser zweite Schritt mußte mehrmals wiederholt werden. Für jede Berechnung des Salztransports wurden sechs Tidezyklen gerechnet, ausgehend von dem vorher erreichten Zustand. Schließlich wurde die Schichtung durch Variation des vertikalen turbulenten Diffusionskoeffizienten angepaßt; dieser Schritt hatte keine Rückwirkung auf die vorhergehende Eichung. Testrechnungen zeigten, daß die horizontalen Austauschparameter A und B zu Null gesetzt werden konnten.

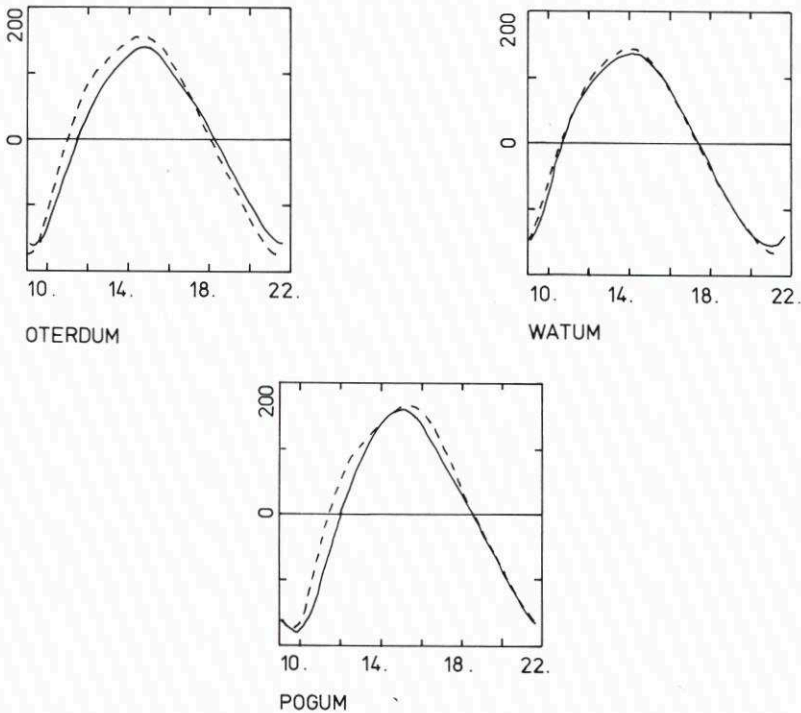


Abb. 4. Berechneter (—) und gemessener (----) Wasserstand in Abhängigkeit von der Zeit

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse für die Wasserstandsberechnungen an drei Orten im Ästuar. Die Abweichungen der berechneten Werte von den Meßdaten werden hauptsächlich durch die zu starke Schematisierung des Dollart verursacht; sie zeigen sich in den Kurven für Oterdum (nahe der Zusammenführung von Ems und Dollart) und Pogum (stromauf). Die Schematisierung der seeseitigen offenen Berandung führt zu keinen wesentlichen Abweichungen.

Abb. 5 zeigt Salzgehaltskurven für drei Orte im Ästuar. Die oberen Kurven (K1) zeigen die „gemessenen“ und die vorgegebenen Randbedingungen; für das Modell wurde eine vertikal vollständig durchmischte Randbedingung angenommen. Der Salzgehalt im Inneren des Modellgebietes ist systematisch zu hoch wegen der starken numerischen Diffusion des verwendeten Differenzschemas. Andererseits sind die „gemessenen“ Daten Mittelwerte von mehreren Meßeinsätzen unter verschiedenen Tidebedingungen (STRÖHMER et al., 1976), und man muß ihnen beträchtliche Streuungen zuordnen. Daher sollte die Übereinstimmung mit der berechneten Modelltide nicht allzu eng sein. Offenbar sind Tidephase und -amplitude, mittlerer Salzgehalt und Schichtung für praktische Zwecke hinreichend genau wiedergegeben.

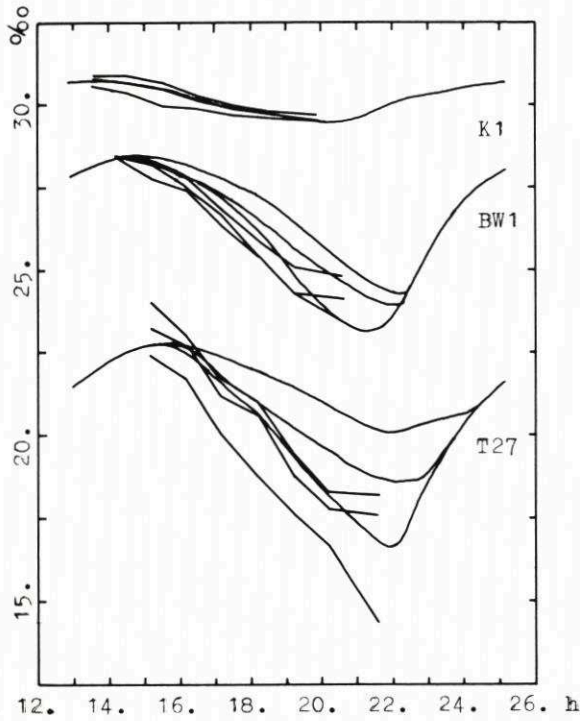
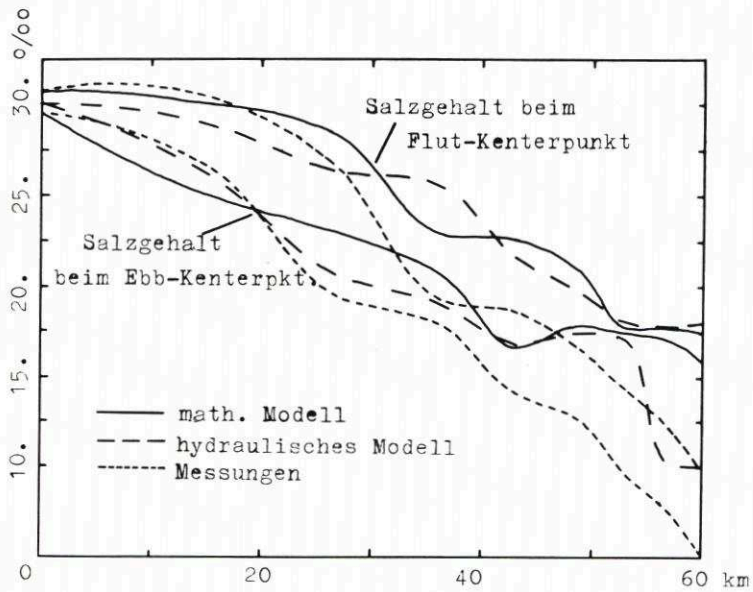


Abb. 5. Berechneter (glatte Linien) und „gemessener“ (Polygonzüge) Salzgehalt in Abhängigkeit von der Zeit. Jedes Kurventripel stellt den Salzgehalt am Boden, in der Mitte und an der Wasseroberfläche dar



Das Verschwinden der Schichtung während der Flutphase wird in der Abbildung deutlich, und es ist in den Meßdaten ebenfalls schwach angedeutet.

Der Salzgehalt am offenen Rand K1 wurde variiert, um die Auswirkung dieser Randbedingung im Innenbereich zu untersuchen. Bei einem konstanten Wert von 30 ‰ anstelle der zeitlichen Variation in Abb. 5 änderten sich die Ergebnisse im Inneren des Modellgebietes kaum. Dieses Ergebnis zeigt, daß der Mittelwert des Salzgehalts am Rande wichtig ist, aber kleine zeitliche Variationen die Ergebnisse nicht stark beeinflussen. Folglich ist es nicht nötig, die offene Modellberandung so weit außen in die See zu legen, daß es praktisch keine Tideschwankungen des Salzgehalts gibt; im vorliegenden Fall war ein konstanter Salzgehalt vollkommen ausreichend. Wegen des verwendeten Differenzverfahrens (stromauf) war es nicht notwendig, ein- und ausströmende Randbedingungen besonders zu unterscheiden.

Schließlich ist in Abb. 6 noch eine Ergebniskontrolle dargestellt.

Hier werden die Extremwerte des Salzgehalts während eines Tidezyklus entlang der Mittellinie des Ästuars (strichpunktierte Linie in Abb. 1) für die Rechnung, die hydraulischen Modelluntersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (VOLLMERS et al., 1976) sowie ein Satz von gemittelten Meßdaten aufgetragen. Da die verschiedenen Kurven unter verschiedenen Tide- (und möglicherweise Durchfluß-)bedingungen ermittelt wurden, kann man keine perfekte Übereinstimmung erwarten. Die größten Abweichungen treten im Dollart auf, sowohl für das mathematische als auch für das hydraulische Modell. Die Abbildung zeigt, daß die Approximation der Meßdaten durch beide Modelle von vergleichbarer Güte ist.

Eine weitere Simulation der Salzausbreitung wurde mit dem vertikal gemittelten Modell unternommen. Wie in einem anderen Bericht (FISCHER, 1978) erläutert, gelang es nicht, durch Anpassung eines Bodenreibungsparameters und eines einzigen horizontalen Diffusionsparameters zufriedenstellende Ergebnisse für den Salzgehalt zu errechnen. Weitere Versuche mit orts- und zeitabhängigen Diffusionsparametern wurden nicht unternommen, aber vermutlich kann man mit hinreichend vielen Freiheitsgraden gute Modellergebnisse erreichen.

5. S c h l u ß f o l g e r u n g e n

Eine zufriedenstellende Simulation der Salzausbreitung in einem durchmischten Ästuar ist in einem räumlich dreidimensionalen Modell mit drei freien Parametern durchgeführt worden. Die Ergebnisse des mathematischen Modells sind vergleichbar mit Resultaten von hydraulischen Modelluntersuchungen. Die Salzausbreitung wird hauptsächlich durch die kombinierte Wirkung von vertikaler turbulenter Viskosität und Bodenreibung beeinflusst. Der vertikale turbulente Diffusionsparameter konnte separat angepaßt werden und hat nur eine Auswirkung auf die vertikale Schichtung. Die Genauigkeit der Simulation war eingeschränkt durch die Grobheit des Gitternetzes und künstliche Diffusion auf Grund des numerischen Verfahrens. Eine analoge Simulation mit einem vertikal gemittelten Modell mit konstantem horizontalem Diffusionsparameter ergab keine ausreichenden Resultate.

Ausgehend von einer bestimmten, in den Ergebnissen zu erreichenden Genauigkeit, die hauptsächlich durch die Genauigkeit der verfügbaren Daten gegeben ist, konnte unter den folgenden Einschränkungen ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden:

- a) konstante vertikale turbulente Viskosität,
- b) konstante Bodenreibung,
- c) konstante vertikale turbulente Diffusivität,
- d) konstanter Salzgehalt am offenen Rand,

- e) ein grobes Gitternetz in der horizontalen Ebene und
- f) nur sechs Gitterpunkte in der Vertikalen.

Diese Einschränkungen ermöglichten die Simulation der vertikalen und lateralen dispersiven Strömungen in einem Modell bei mäßigem Rechenzeitbedarf.

Für praktische Zwecke kann die folgende Einteilung von Modellen und ihren Anwendungen vorgenommen werden. Vertikal gemittelte Modelle sind zur Berechnung der Tidedynamik nützlich, und hierbei können die baroklinen Kräfte weggelassen werden. Bei starker lateraler Tiefenvariation ist eine laterale Diskretisierung notwendig. Für die Salzausbreitung in einem *d u r c h m i s c h t e n* Ästuar sollte ein vertikal diskretisiertes Modell benutzt werden; auch hier sollte eine laterale Diskretisierung bei starker lateraler Tiefenvariation verwendet werden. Für die Salzausbreitung in einem *g e s c h i c h t e t e n* Ästuar gelten dieselben Bedingungen; in diesem Fall muß jedoch vermutlich eine vertikale Viskosität benutzt werden, die vom Grade der Schichtung abhängig ist.

6. W ü r d i g u n g e n

Die vorliegende Arbeit wurde durch Mittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Sonderforschungsbereich 79, finanziert. Der Autor ist den Herren D. Steen vom Wasser- und Schiffsamt Emden für den größten Teil der Meßdaten, Dr. P. Ströhmer von der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz für einen Bericht über Salzgehaltsmessungen in der Ems sowie der Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg für die hydraulischen Meßergebnisse zu Dank verpflichtet.

7. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- FISCHER, K.: Numerical Salinity Intrusion Models. Proc. Int. Conf. on Water Resources Engineering, Bangkok, 1978.
- HANSEN, W.: Hydrodynamical Methods Applied to Oceanographic Problems. Mitt. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg, 1, 1962.
- KROGH, O., DAHL-MADESEN, K. I., GARGAS, E., SCHRÖDER, H.: A Numerical Model of Oxygen Conditions in a Two-Layered Marine Environment. Proc. Int. Conf. on Water Resources Engineering, Bangkok, 1978.
- LEENDERTSE, J. J.: Aspects of a Computational Model for Long-Period Water Wave Propagation. Rand Memorandum 5294, 1967.
- SIMONS, T. J.: Development of Threedimensional Numerical Models of Great Lakes. Canada Center for Inland Waters, Scientific Series 12, Burlington, 1973.
- STRÖHMER, P. u. WANDER: Untersuchungen über den chemischen und biologischen Zustand, über das Selbstreinigungsvermögen und über die Belastbarkeit des Ems-Ästuars. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1976.
- SÜNDERMANN, J.: Die Hydrodynamisch-Numerische Berechnung der Vertikalstruktur von Bewegungsvorgängen in Kanälen und Becken. Mitt. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg, 19, 1971.
- VOLLMERS, H. u. OHLMEYER, F.: Modellversuche für die Umleitung der Ems, Teil 3, Salzgehaltsverteilung. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 1976.