

Die numerische Modellierung von Strömungen und Sedimenttransport in Wattgebieten

VON HARRO HEYER, REGINA HEWER, JÜRGEN SÜNDERMANN

Zusammenfassung

Besonderheiten bei der Modellierung von Strömungen und Sedimenttransport in Wattgebieten werden erläutert. Anhand eines zweidimensionalen Modells für die gezeitenbedingte Strömung und dem daraus resultierenden Sedimenttransport im südlichen nordfriesischen Wattenmeer wird gezeigt, welche Ergebnisse sich schon mit relativ einfachen Annahmen erzielen lassen und inwieweit diese die aus Messungen gewonnenen Kenntnisse erweitern.

Summary

Special aspects associated with the modelling of currents and sediment transport in the intertidal zone are discussed. An application of a two-dimensional model for tidal currents and the associated sediment transport to the southern portion of the North Frisian intertidal zone indicates what type of results can be obtained with relatively simple assumptions and to what extent they expand the state of knowledge obtained previously from empirical data.

Inhalt

1. Einleitung	167
2. Strömungsmodellierung in Wattgebieten	168
3. Modellierung des Sedimenttransports	168
4. Das Strömungsmodell des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres	169
5. Das Sedimenttransportmodell des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres	173
6. Abschließende Bemerkungen	179
7. Schriftenverzeichnis	179

1. Einleitung

Die ausgedehnten Wattgebiete der deutschen Nordseeküste sind ein wichtiger Bestandteil des Ökosystems Nordsee. Ihre Funktionstüchtigkeit als natürliche Kläranlage und Kinderstube für Jungfische ist heute jedoch zunehmender Bedrohung ausgesetzt. Der anthropogene Stoffeintrag aus Flüssen, direkten Einleitungen und aus der Luft führt zu einer Anreicherung von Schadstoffen im Seewasser und im Sediment. Von dieser Akkumulation ist der Bereich des Wattenmeeres mit seinen Stillwasser- und Ruhezonen besonders betroffen, da sich hier organische Schwebstoffe und mit ihnen Schwermetalle, Chlorkohlenwasserstoffe u. a. bevorzugt ablagern (vgl. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 1980).

Aus diesen Gründen ist neben den sich ständig neu stellenden Fragen des Küstenschutzes und der Standsicherheit von Küstenschutzanlagen das Stromregime im Watt und der damit verbundene Feststofftransport ins Blickfeld des Interesses gerückt. Mit Hilfe meist aufwendiger Meßprogramme wird versucht, ein möglichst geschlossenes Bild der Wasser- und Sedimentbewegung in einzelnen Teilbereichen des Wattenmeeres zu gewinnen (GÖHREN, 1974;

FIGGE et al., 1980; REINECK u. SIEFERT, 1980; SIEFERT et al., 1980). Parallel dazu wurde mit der Erstellung und Erprobung hydrodynamisch-numerischer Modelle begonnen, die die Hydrodynamik und teilweise auch den Sedimenttransport ausgedehnter Wattgebiete simulieren (BACKHAUS, 1976; HEYER, 1980; SÜNDERMANN u. HEWER, 1981; HOLZ u. CROTOGINO, 1983; Projektgruppe HN-Modelle des KFKI, 1983).

Im folgenden wird anhand eines Modells für den gezeitenbedingten Wasser- und Sedimenttransport im südlichen nordfriesischen Wattenmeer gezeigt, welche Besonderheiten bei der Modellierung von Bewegungsvorgängen im Watt zu beachten sind, und welche grundlegenden Phänomene sich mit einem derartigen Modell erklären lassen.

2. Strömungsmodellierung in Wattgebieten

Die Wattgebiete der deutschen Nordseeküste zeichnen sich durch eine reichstrukturierte Topographie aus. Ausgedehnte Wattflächen, die über eine Tideperiode zeitweilig trockenfallen, wechseln ab mit einem Netzwerk von schmalen, verhältnismäßig tiefen Prieln, die die Haupttransportadern für die Wassermassen der ein- und auslaufenden Tidewelle bilden. In den Wattenbereichen sind die Wassertiefen und Tidewellhöhen von gleicher Größenordnung, so daß nichtlineare Wechselwirkungen eine besondere Rolle spielen und sich eine ins Watt einlaufende Gezeitenwelle stark verformt. In Wechselwirkung mit einer komplexen Topographie bilden sich Oberschwingungen aus, die sogenannten „Seichtwassertiden“, die die ursprünglich relativ glatte Sinuswelle zu einer sägezahnförmigen Gestalt wandeln. Im Zusammenhang damit kann eine große periodische Nettoverdriftung von Wassermassen vonstatten gehen. Das Überfluten und Trockenfallen der Platen und Sände wird im wesentlichen über den Wassertransport durch die Priele gesteuert, in denen die Strömung hohe Geschwindigkeiten erreichen kann (etwa 1,5 m/s). Wichtig ist außerdem die – wenn auch geringe – Neigung der Wattflächen, die Richtung und Geschwindigkeit des Ablaufens von den Platen und damit wiederum die Beschickung der einzelnen Priele mit Wasser bestimmt.

Um alle diese Phänomene bei einer Simulation zu erfassen, erfordern Wattmodelle eine hohe räumliche Auflösung, die in manchen Gebieten wenige hundert Meter keinesfalls überschreiten und im Extremfall für besondere Fragestellungen in lokal eingrenzbaeren Gebieten Horizontalskalen im Meterbereich auflösen sollten; denn die Genauigkeit der numerisch gewonnenen Ergebnisse hängt in erster Linie von der hinreichenden Approximation der hydrodynamischen und morphologischen Randbedingungen ab. Wegen der großen Anzahl von Rechenpunkten, die sich dadurch ergibt, sind Wattmodelle natürlich recht aufwendig und rechenintensiv, liefern aber auch sehr detaillierte Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung von Wasserständen und Strömungen, wie sie mit Messungen praktisch nicht zu erhalten sind. Um die Simulation von Trockenfall- und Überflutungsprozessen zu ermöglichen, müssen die geschlossenen Ränder numerischer Wattmodelle beweglich gehalten werden. Angesichts der extrem geringen Wassertiefen, die sich im Laufe einer Rechnung auf den Platen ergeben, sind außerdem einige Terme in den diskreten Gleichungen, die Impuls- und Massenerhaltung gewährleisten, den Gegebenheiten entsprechend zu modifizieren.

3. Modellierung des Sedimenttransports

Sediment kann von einer Strömung auf zwei Arten transportiert werden: am Boden rollend oder hüpfend (Geschiebetransport) oder im Wasser schwebend (Suspensionstrans-

port) (YALIN, 1972). Beiden Arten liegt im Prinzip der gleiche Mechanismus zugrunde: Das am Boden deponierte Material wird bei Überschreiten einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe (kritische Erosionsgeschwindigkeit) in Bewegung gesetzt und bei Unterschreiten einer kritischen Sedimentationsgeschwindigkeit wieder abgelagert. Während der Geschiebetransport zum Erliegen kommt, sobald die Erosionsgeschwindigkeit unterschritten wird (krit. Erosionsgeschwindigkeit = krit. Sedimentationsgeschwindigkeit für das am Boden transportierte Material), kann in Suspension befindliches Material von geringeren Geschwindigkeiten in der Schwebelage gehalten und weitertransportiert werden. Im Falle suspendierter Feststoffe ist die kritische Sedimentationsgeschwindigkeit also sehr viel kleiner als die Erosionsgeschwindigkeit anzusetzen. Die kritischen Geschwindigkeiten hängen ebenso wie die absolute Größe des Sedimenttransports von Materialparametern des Sediments ab. Zu diesen sedimentologischen Kenngrößen zählen u. a. der mittlere Korndurchmesser und die Form der Teilchen, ihre Lagerungsdichte und ihr spezifisches Gewicht.

In den Wattgebieten finden sich in der Regel die verschiedenartigsten Sedimente, so daß bei der Berechnung des Sedimenttransports mit Hilfe eines Modells heute noch stark vereinfachende Annahmen gemacht werden müssen. In vielen Fällen wird deswegen einfach ein homogenes Material mittlerer Korngröße angenommen und damit der Sedimenttransport unter Verzicht auf jegliche Quantifizierung der Aussagen qualitativ bestimmt. Mit diesem „relativen Sedimenttransport“ lassen sich jedoch viele beobachtete Phänomene gut reproduzieren und die Kenntnisse über Verlagerungstendenzen von Prielen und Platen erweitern.

4. Das Strömungsmodell des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres

Der südliche Teil des nordfriesischen Wattenmeeres, dessen Gebiet sich von der Halbinsel Eiderstedt im Süden bis zur Hallig Langeneß im Norden (Abb. 1) erstreckt, nimmt im „amphibischen Küstensaum“ der Deutschen Bucht aufgrund einer vergleichsweise großen Anzahl von Inseln, Halligen und Außensänden eine Sonderstellung ein. Diese vielgestaltige Topographie ist das Ergebnis unablässiger Einwirkungen von Tide und Wind auf das tiefliegende Küstengebiet Nordfrieslands. Dessen starke morphologische Umgestaltung wurde mit der Zerstörung der Marscheninsel Altnordstrand durch die schwere Sturmflut des Jahres 1634 eingeleitet und hat damit zur Ausbildung des Wattstromes Norderhever geführt, der bis heute ein stetig zunehmendes Übergewicht im Stromregime erlangen konnte und einen anhaltenden Substanzverlust im südlichen Teil dieses Wattenmeeres bewirkte.

Zur hinreichenden räumlichen Diskretisierung der komplexen morphologischen Verhältnisse wurde eine Modelltopographie in einem konstanten Gitternetz von 450 m Kantenlänge erstellt. Die Neigung der Wattflächen wurde mit einem speziellen Verfahren approximiert, das auf der Anwendung einer Diffusionsgleichung basiert (HEYER, 1980). Am seewärtigen Rand des Modells, etwa 6 km westlich der Außensände, werden als Randwerte die zeit- und ortsabhängigen Wasserstände der halbtägigen Hauptmondtide M2 vorgegeben, die aus einem übergeordneten Nordseemodell (RAMMING, 1978) gewonnen wurden. Das Modell ist mit einem der Wasserlinie folgenden beweglichen Rand ausgestattet.

Die Güte der Gezeitsimulation läßt sich am besten anhand der berechneten räumlichen und zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung überprüfen, da diese auf topographische Einflüsse besonders sensibel reagiert. Bei der folgenden Gegenüberstellung von gerechneten und gemessenen Zuständen ist jedoch zu beachten, daß letztere immer auch Anteile enthalten, die auf Wirkungen des Windes, weiterer Gezeitenanteile und, bei geringen Wassertiefen, auch des

Seeganges zurückzuführen sind. Eine vollständige Übereinstimmung darf also nicht erwartet werden, zumal das Modell von den vertikal integrierten Gleichungen ausgeht.

Abb. 2 zeigt einen Vergleich von Geschwindigkeitszeitreihen an Orten, die im Bereich der Hauptströme des Gebietes liegen, wobei die Messungen in der Zeit vom 20. Juni bis zum 7. Juli 1956 durchgeführt und über diesen Zeitraum gemittelt wurden (KNOP, 1961). Offensichtlich herrscht eine gute Übereinstimmung in der Stromverteilung und den Eintrittszeiten der Geschwindigkeitsmaxima und -minima. Vereinzelt werden die aus Messungen abgeleiteten Höchstgeschwindigkeiten nicht ganz erreicht, was neben den genannten Effekten zum Teil auch durch die Modellauflösung begründet werden kann, die in einigen Bereichen mit 450 m noch zu grob ist.

Aus der außerordentlichen Fülle detaillierter Ergebnisse, die sich aus einem mathematischen Modell gewinnen lassen, sind hinsichtlich der Beurteilung morphologischer Entwicklungen die Vektordarstellungen tidegemittelter Transporte bzw. tidegemittelter Geschwindigkeiten (Restströme) von besonderer Aussagekraft. Aufgrund einer komplexen Topographie kann sich eine räumlich sehr variable Reststromverteilung ergeben.

Die an einigen Orten gemessenen Restströme (Abb. 3), die in ihrer räumlichen Auflösung immer lückenhaft bleiben müssen, sind einerseits zur Beurteilung eines mathematischen Modells geeignet (Modellverifikation), andererseits können die Modelle das Bild der gemessenen Reststromverteilung wesentlich vervollständigen. Die in Abb. 4 dargestellte berechnete

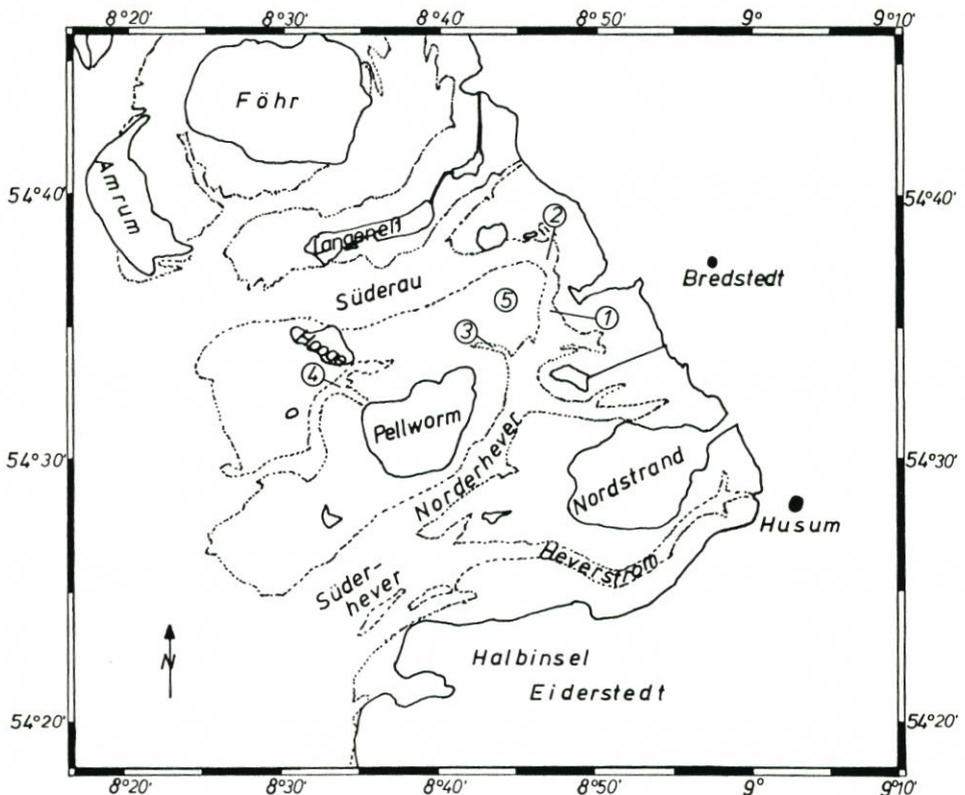


Abb. 1. Südliches nordfriesisches Wattenmeer – 1 Strand, 2 Strandley, 3 Rummelloch-Ost, 4 Rummelloch-West, 5 Pellwormer Plate

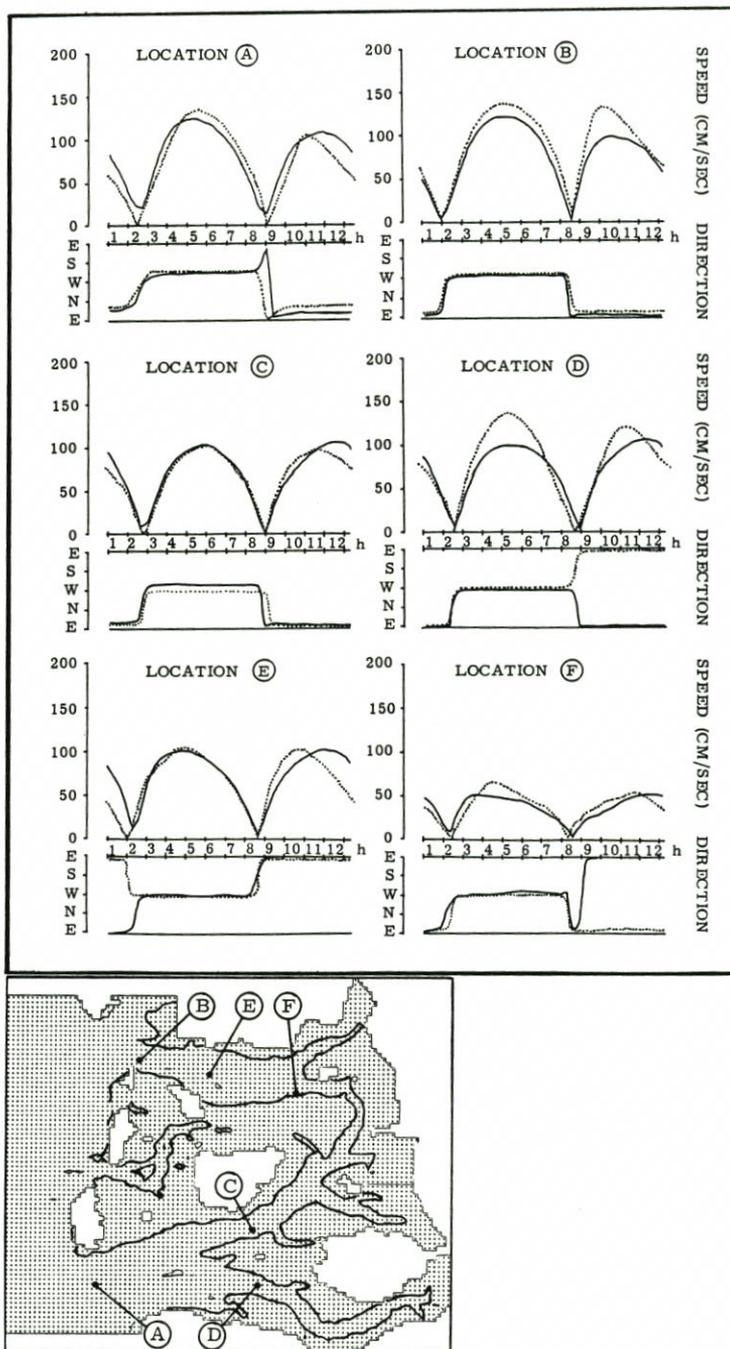


Abb. 2. Ein Vergleich beobachteter (punktierter Linie) und berechneter (durchgezogene Linie) Geschwindigkeitsverläufe. Die Beobachtungen wurden über einen Zeitraum von 17 Tagen gemittelt

Reststromverteilung steht mit den Beobachtungen in Abb. 3 gut im Einklang. Auffällig ist die vorherrschende Orientierung der Restströme nach Nordwesten, denn durch das höhere Auflaufen der Gezeitenwelle im Bereich der Norderhever werden durch ausgleichende Gefälleströme pro Gezeitenperiode Wassermassen in das nördlicher gelegene Teiltidebecken der Süderau verdriftet. Die wichtigsten Verdriftungsgebiete sind der Strand, eine landwärtige Verbindungsrinne zwischen Norderhever und Süderau, die Pellwormer Plate mit dem Rummeloch-West und -Ost und die Wattwasserscheiden zwischen Pellworm – Süderoog – Süderoogsand. Im Strandley sind jedoch die errechneten Reststromgrößen zu gering, da das Modellauflösungsvermögen nicht ausreicht, diese schmale Rinne naturgetreu zu approximieren. Dafür zeigt sich aber deutlich die große Nettoverdriftung von Wassermassen von der Norderhever in die Süderau über den Bereich der Pellwormer Plate. Auch der starke Ausstrom zwischen den Außensänden und die nach Nordwesten gerichteten Restströme zwischen Süderoog und Pellworm sind deutlich erkennbar.

Der Heverstrom ist im Gegensatz zur Norderhever ein Wattstrom, der sich morphologisch recht gut stabilisiert hat. In seinem Bereich weist die räumliche Verteilung der Reststromvektoren eine Aneinanderreihung von Walzen aus, die sich gegenseitig zu treiben scheinen. Derartige Reststromzirkulationen werden z. B. auch von ZIMMERMANN (1976) für den Bereich der Westfriesischen Inseln dargestellt.

Tidegemittelte Geschwindigkeiten können keine quantifizierbaren Aussagen über die verdriftenden Wassermengen machen. Aus diesem Grunde sind in Abb. 5 die tidegemittelten

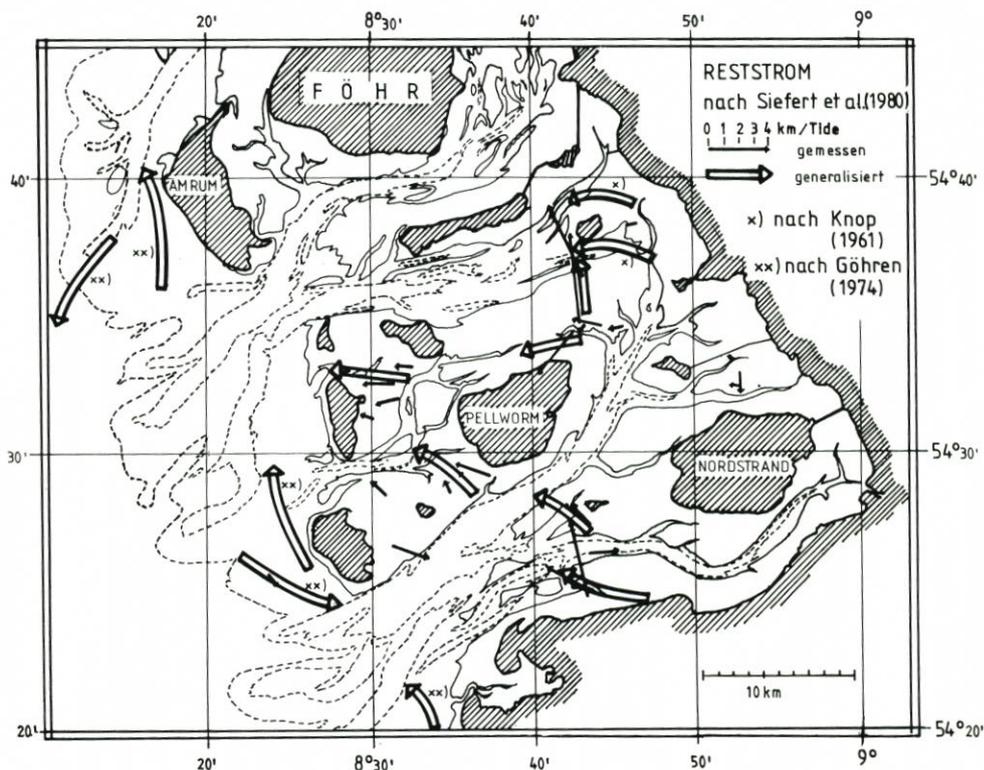


Abb. 3. Gemessene Reststromverteilung im südlichen nordfriesischen Wattenmeer nach Siefert et al. (1980), Göhren (1974) und Knop (1961)

Transporte dargestellt, aus denen durch Multiplikation solcher Transportvektoren, deren Betrag die Pfeilspitzenlänge übersteigt, mit der Gitterlänge von 450 m und der Tidedauer von 44 700 s der Nettotransport in Kubikmeter pro Tide abgeschätzt werden kann.

Ein eingehender Vergleich beider Vektorplots (Abb. 4 u. 5) zeigt, daß die Richtung der resultierenden Größen an bestimmten Orten (z. B. innerhalb der Norderhever südwestlich von Pellworm) vollständig voneinander abweichen können. Dieser Umstand kann dadurch erklärt werden, daß die Überlagerung der in das nordfriesische Wattenmeer einlaufenden Tidewelle durch vielfältig reflektierte Anteile in den Hauptstromrinnen zu einem bezüglich der Tidephase unterschiedlichen Eintreten der Kenterpunkte sowie der Maximalgeschwindigkeiten führen kann.

5. Das Sedimenttransportmodell des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres

Das Sedimenttransportmodell verarbeitet die vom Strömungsmodell errechnete raumzeitliche Geschwindigkeitsverteilung. Da das zweidimensionale Strömungsmodell vertikal gemittelte Geschwindigkeiten berechnet, werden diese zunächst mit einem empirischen Ansatz (ZANKE, 1977) auf die Geschwindigkeit in Bodennähe reduziert. Dieser Ansatz macht

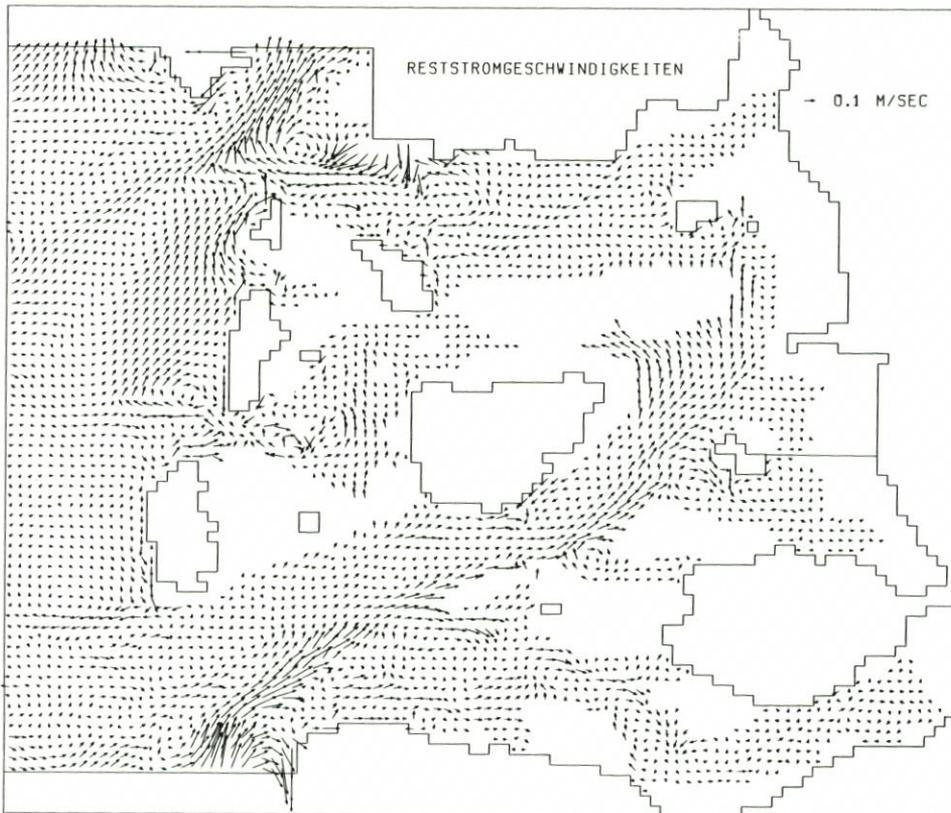


Abb. 4. Mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell berechnete Reststromverteilung im südlichen nordfriesischen Wattenmeer

das Verhältnis von mittlerer zu bodennaher Geschwindigkeit hyperbolisch von der Wassertiefe abhängig. Mit Hilfe zweier weiterer empirischer Relationen für den Geschiebe- und den Suspensionstransport (ZANKE, 1978), die für den zweidimensionalen Fall entsprechend dem NEWTON-TAYLORSchen Schubspannungsansatz modifiziert wurden, wird sodann der gesamte Feststofftransport aus einem mittleren, einheitlichen Korndurchmesser von 0,1 mm qualitativ bestimmt, was sicherlich eine grobe Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse darstellt. In beide Relationen gehen neben den Materialparametern des Sediments und des Wassers die Differenzen von Schubspannungs- und kritischer Erosionsgeschwindigkeit sowie Schubspannungs- und kritischer Sedimentationsgeschwindigkeit in jeweils zweiter Potenz ein, so daß die Geschwindigkeiten in insgesamt vierter Potenz berücksichtigt werden. Mit den Materialkonstanten für Feinsand (FIGGE et al., 1980) ergibt sich für den Geschiebe- und Suspensionstransport eine kritische Erosionsgeschwindigkeit von 20 cm/s entsprechend der kritischen Sedimentationsgeschwindigkeit für den Geschiebetransport. Für den Suspensionstransport errechnet sich eine kritische Sedimentationsgeschwindigkeit von 2,5 cm/s.

Das Sedimenttransportmodell berechnet den Feststofftransport aus den mittleren Geschwindigkeiten für jeden Punkt des hydrodynamisch-numerischen Modells in einem zeitlichen Abstand von fünf Minuten, mit dem die Variabilität des Geschwindigkeitsfeldes über eine Tideperiode gut aufgelöst wird. Anschließend werden die so errechneten Transporte über die gesamte Periode für jeden Punkt summiert, um den mittleren Sedimenttransport einer

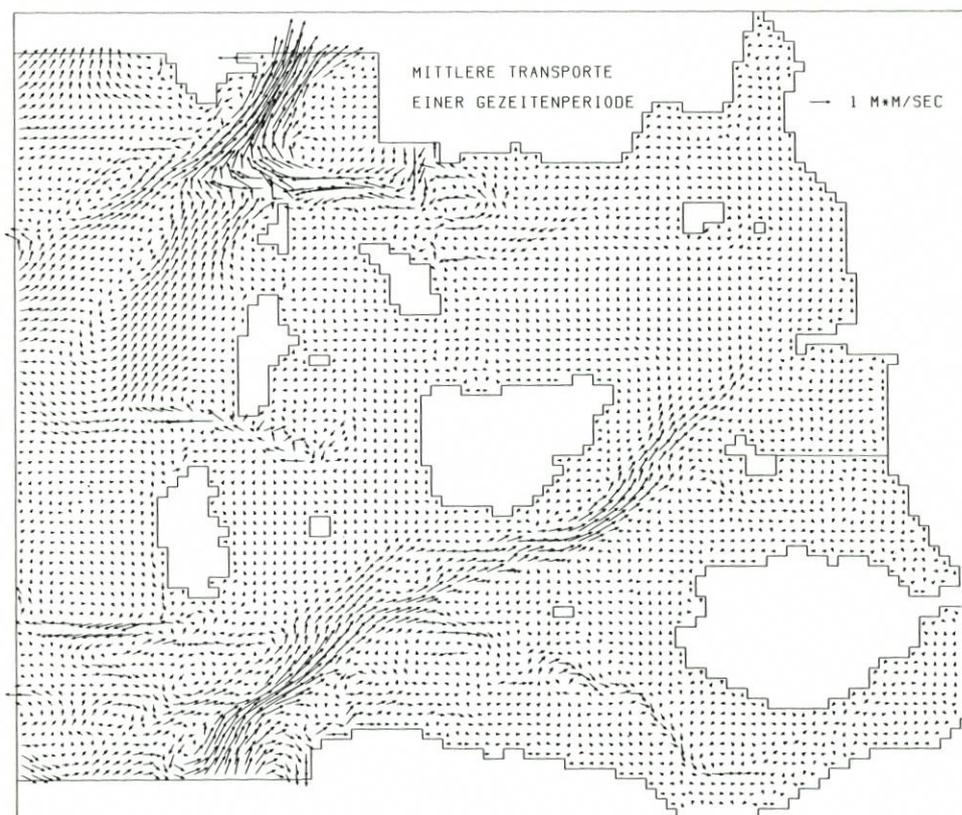


Abb. 5. Mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell berechnete mittlere Transporte einer Gezeitenperiode im Untersuchungsgebiet

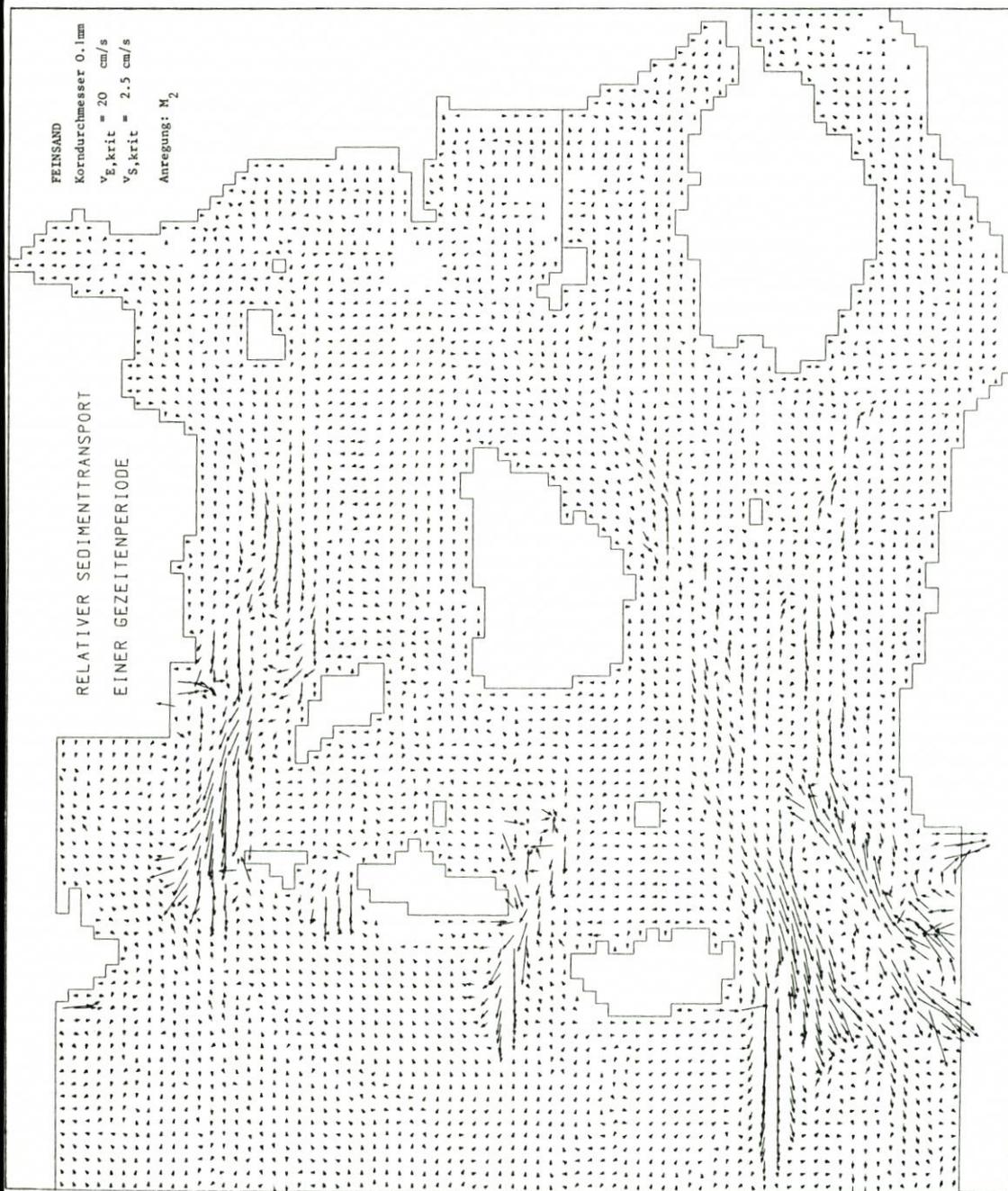


Abb. 6. Mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell berechneter relativer Sedimenttransport einer Gezeitenperiode

Tideperiode zu erhalten (Abb. 6). Es zeigt sich, daß die auf diese Weise ermittelte Transportverteilung in etwa der Verteilung der Restströme entspricht. Aufgrund einer Berücksichtigung der vierten Potenz der Geschwindigkeiten werden bestimmte Effekte jedoch deutlicher hervorgehoben. Hierzu gehört zum Beispiel die Aufteilung der land- und seewärts gerichteten Transporte im Bereich der Süderhever in voneinander nahezu vollständig getrennte Arme, eine Erscheinung, die sich ebenso im Mündungsbereich des Heverstromes zeigt, dort aber längst nicht so ausgeprägt ist. Im Inneren des Heverstromes sind die schwachen Transporte überwiegend landwärts gerichtet; sie deuten jedoch mit ihrer wirbelartige Struktur darauf hin, daß in diesem Gebiet lokale Umlagerungen vorherrschen. Im Vergleich mit den Ergebnissen einer sedimentpetrographischen Untersuchung (DECHEND, 1950), die allerdings schon mehr als 30 Jahre zurückliegt, zeigt sich gute Übereinstimmung im untersuchten Gebiet (Abb. 7). Dies gilt sowohl für die Transportscheiden im Heverstrom wie auch für die starken seewärtigen Transporte im Bereich der Außensände. Im Norden des Gebietes errechnet das Modell nord- und westwärts gerichtete Transporte, die durch neuere geodätische Messungen bestätigt werden (Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum [ALW] – pers. Mitt.). So gilt mittlerweile als gesichert, daß mit der Nettoverdriftung beträchtlicher Wassermassen über die Pellwormer Plate und durch den Priel zwischen Norderhever und Süderau eine Nordwestverlagerung der Plate selbst einhergeht.

Die Bilanzierung des Feststofftransports über die Berandung jeder Gitterzelle des

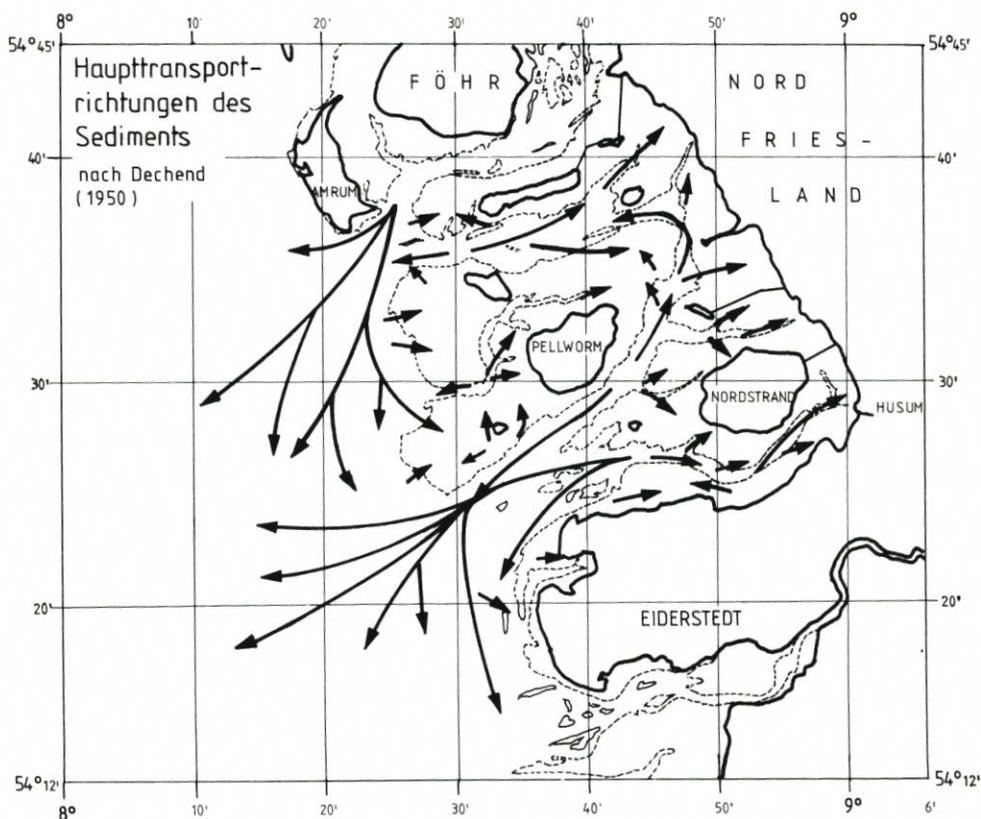


Abb. 7. Mit Hilfe sedimentpetrologischer Untersuchungen bestimmte Haupttransportrichtungen des Sediments nach Dechend (1950)

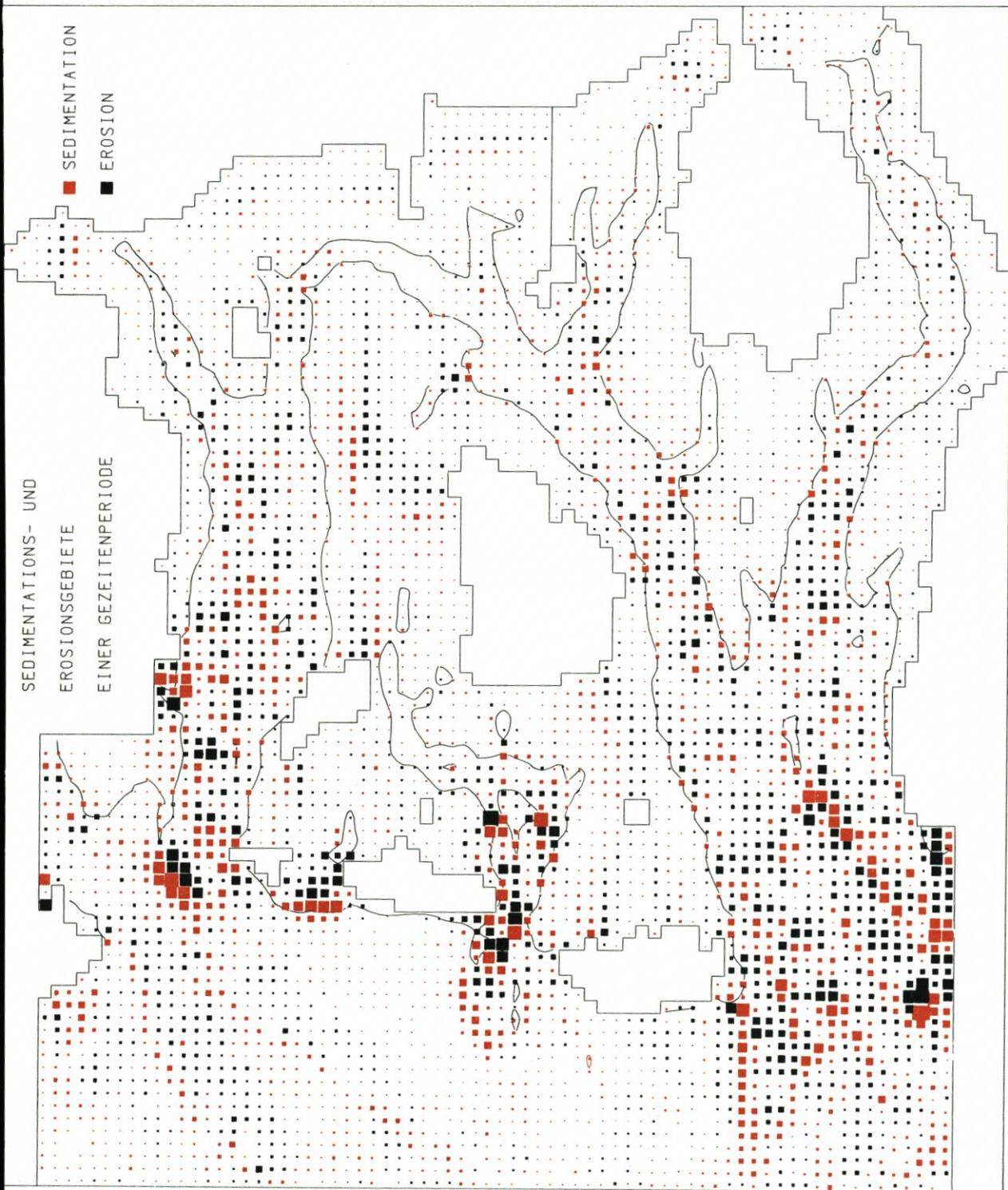


Abb. 8. Bilanz des Sedimenttransports für jede Gitterzelle des hydrodynamisch-numerischen Modells

Modellgitters liefert eine Aussage über Sedimentzufuhr oder Ausräumung innerhalb jeder Gittermasche für den Zeitraum einer Tideperiode, d. h., ob mit Erosion oder Sedimentation im Bereich einer bestimmten Zelle zu rechnen ist (Abb. 8). Abb. 9 zeigt Erosions- und Sedimentationsgebiete, wie sie sich als Ergebnis der Transportbilanzen für einige Abschnitte des Untersuchungsgebietes darstellen. Hier wird zum Beispiel die Nordwestverlagerung der Pellwormer Plate an der Lage der Erosionsgebiete im Südosten der Plate und der Sedimentationsgebiete in ihrem Nordwesten deutlich erkennbar (Abb. 9a).

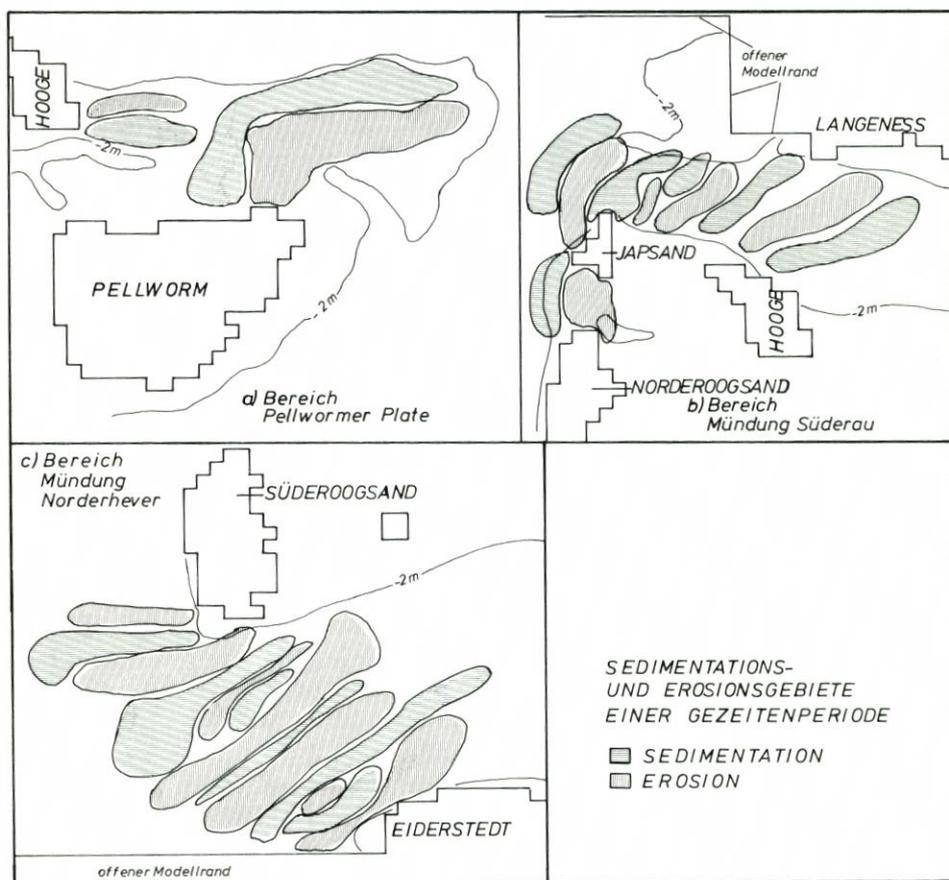


Abb. 9. Mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell ermittelte Sedimentations- und Erosionsgebiete einer Gezeitenperiode
 a) im Bereich der Pellwormer Plate, b) in der Mündung der Norderhever, c) in der Mündung der Süderau

Auffällig ist jedoch vor allem die starke Zergliederung der Erosions- und Sedimentationsgebiete im Bereich der großen Wattströme. Zonen der Erosion liegen unmittelbar neben Sedimentationszonen. Es entstehen regelrechte Streifenmuster, die meist quer zur Prielachse verlaufen und die Bildung von Barren und Großriffeln andeuten, wie sie für Priele in diesem Gebiet charakteristisch sind (Abb. 9b).

Abb. 9c zeigt die Lage der Erosions- und Sedimentationsgebiete im Bereich der Mündung der Norderhever, wie sie sich aus den Untersuchungen mit dem mathematischen Modell

ergeben. Hier verlaufen Erosions- und Sedimentationszonen parallel zur Prielachse. Eine derartige Barrenbildung zwischen Ebb- und Flutstromast in der Hevermündung wird von Messungen des ALW Husum bestätigt.

6. Abschließende Bemerkungen

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß es gelungen ist, mit Hilfe eines guten Strömungsmodells für die gezeitenbedingte Bewegung im Wattenmeer und relativ einfachen Ansätzen für den daraus resultierenden Sedimenttransport ein geschlossenes Bild des gezeitenbedingten Sedimentationsgeschehens zu erhalten. Das Maß an Übereinstimmung mit sedimentpetrologischen und geodätischen Messungen, die auch die Auswirkungen des Windes, des Seegangs und der inhomogenen Bodenbeschaffenheit enthalten, zeigt, daß der großräumige Sedimenttransport im nordfriesischen Wattenmeer überwiegend vom gezeitenbedingten Stromregime bestimmt wird. Sturmfluten können zwar kurzfristig große lokale Umlagerungen verursachen, das langfristige Sedimentationsgeschehen aber wird offensichtlich durch die dauernde Einwirkung der Gezeitenströme dominiert. Es wäre zu wünschen, daß durch noch kleinräumigere Untersuchungen eines gut vermessenen Areals (etwa der Holmer Fähre) systematisch verschiedene Modellansätze, z. B. auch mit Einbeziehung des Seegangs, getestet würden.

6. Schriftenverzeichnis

- BACKHAUS, J. O.: Zur Hydrodynamik im Flachwassergebiet. Ein numerisches Modell. Dt. hydr. Z., Bd. 29, H. 6, 1976.
- DECHEND, W.: Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. Dt. hydr. Z., Bd. 3, H. 5/6, 1950.
- FIGGE, K., KÖSTER, R., THIEL, H. u. WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht – Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. Die Küste, H. 35, 1980.
- GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamburger Küstenforschung, H. 29, 1974.
- HEYER, H.: A Numerical Model of the North Frisian Shallow Water Areas with an Especially Adjusted Bottom Topography. Mitt. des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg, H. 26, 1980.
- HOLZ, K.-P. u. CROTOGINO, A.: Arbeiten im SFB 205 „Küsteningenieurwesen“, TP A5, Großräumiger Sedimenttransport im Küstenvorfeld. 1983.
- KFKI, Projektgruppe HN-Modelle des KFKI: Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht – Abschlußbericht. Die Küste, H. 38, 1983.
- KNOP, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegungen und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau und Grundbau der TH Braunschweig, H. 1, 1961.
- RAMMING, H. G.: Ein numerisches Nordseemodell mit hoher Gitternetzauflösung im Elbemündungsgebiet und in der Elbe. Mitt. der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Nr. 23, 1978.
- Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Umweltprobleme der Nordsee – Sondergutachten. Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, 1980.
- REINECK, H. E. u. SIEFERT, W.: Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuerker Watt. Die Küste, H. 35, 1980.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIEßNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste, H. 35, 1980.

- SÜNDERMANN, J. u. HEWER, R.: Mathematisches Modell des Sedimenttransports im nordfriesischen Wattenmeer (unveröffentlicht), 1981.
- YALIN, M. S.: Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press., 1971.
- ZANKE, U.: Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß. Mitt. des Franzius-Instituts, TU Hannover, H. 46, 1977.
- ZANKE, U.: Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport. Teil 1: Berechnung des Sedimenttransports – allgemeiner Fall. Mitt. des Franzius-Instituts, TU Hannover, H. 47, 1978.
- ZIMMERMANN, J. T. F.: Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea, part I and II. Neth. J. Sea Res. 10, 1976.