

Messung des Sanddurchsatzes nahe dem Seegrund

Von Dieter Wenzel

Summary

The direct and continuous measurement of the littoral drift is an essential problem with investigations on erosion of sandy coasts, as for instance at the island of Sylt. The measuring conditions require equipment of very particular features.

Recent measurements have supplied informations about the conditions of sound propagation in sediment loaded water, leading to the conception of a sand discharge measuring device. It will consist in a combination of a current meter and a sand concentration meter.

A convenient equipment is actually being developed. It is to supply an idea about the magnitude of the instantaneous sand discharge, the approximate remaining sediment transport vector, the phases of maximum and minimum sediment load, and so on. Consequently it will help to obtain a reliable statement about erosion processes, indispensable information which is essential for successful coastal engineering.

1. Einleitung

Die Insel Sylt (Norddeutschland) verliert durch Erosion ständig Substanz von ihrer Westküste. Der aus Sand bestehende Strand ist der Brandung der offenen Nordsee ausgesetzt. Die Küste des Mittelteils weicht im Mittel um 1 m je Jahr zurück. An den Enden im Norden und Süden erreicht der mittlere Verlust sogar 4 m je Jahr.

Die Aufgabe des Küsteningenieurwesens in diesem Raum ist es, die Küstenlinie zu halten, um beträchtliche materielle Werte zu schützen (Abb. 1). Jedoch ist bislang noch keine wirksame Küstenschutzmethode gefunden worden. Die jüngste Maßnahme, eine Sandvorspülung in Westerland im Jahre 1972, wird zur Zeit noch untersucht (3).



Abb. 1. Blick auf Westerland (Blickrichtung Ost). (Freigegeben unter Nr. SH-473/14 durch den Min. f. Wirtsch. u. Verkehr des Landes Schleswig-Holstein)

Wie an anderen Orten sind auch hier die tatsächlichen Beziehungen zwischen Winddaten, Wellen-Charakteristiken, Brandungsströmungen, Tideströmungen und Küstenerosion noch nicht gut bekannt. Die Zusammenhänge zwischen hydrologischen Kräften und Ergebnissen der morphologischen Vorgänge müssen aufgedeckt werden. Dieses Ziel erfordert es, einerseits die Energiebilanz aufzustellen und andererseits den Gestaltungsvorgang selbst, d. h. den Sandtransport zu messen.

Eine Vorstellung von der Intensität der Sedimentbewegung an der Sylter Westküste geben die Auswirkungen von Stürmen: Die Verluste an Dünen und Steilufern können in 3 Stunden 6 m landwärts betragen, und die Höhe des Strandes kann sich in 6 Stunden um 2 m verändern.

2. Erfordernisse

Da Wetter und Seegang sich häufig und rasch ändern können, muß ständig die Möglichkeit zu messen gegeben sein, und zwar mit hoher zeitlicher Auflösung über Stunden und mit geringer zeitlicher Auflösung über Monate hinweg. Die Meßeinrichtung darf nicht durch Färbung und Trübung des Wassers, die veränderlich sind, beeinträchtigt werden. Außerdem ist es das Ziel dieser Untersuchung, nicht nur das aufgeschwemmte Sediment zu messen, sondern vor allem das Sediment, das grober ist als das normalerweise nach dem STOKESSchen Gesetz in Suspension befindliche, d. h. bis zu etwa 2 mm ϕ . Aus den erwähnten Gründen scheidet die Verwendung von Sandfallen oder Trübungs- (Absorptions-) Messern aus.

Die Meßbedingungen in diesem Gebiet sind wegen der geringen Wassertiefe (größte Tiefe 10 m), wegen des beweglichen Seegrundes (Sand) und wegen der beträchtlichen Wellenhöhen (größte gemessene Welle bei der Sturmflut im November 1973: 6,8 m) schwierig. Unterwassereinheiten lassen sich wegen der Wetterbedingungen nur während etwa sechs Wochen im Jahr (Juni und September) einbauen und inspizieren.

Eine Meßeinrichtung, die diesen Bedingungen entspricht, muß besondere Merkmale aufweisen wie:

- ständiger Einbau auf dem Meeresboden, jedoch ortsveränderlich, um den Meßort wechseln zu können
- durch Konstruktion ohne bewegte Teile hohe mechanische Widerstandsfähigkeit gegen starke Orbitalbewegungen

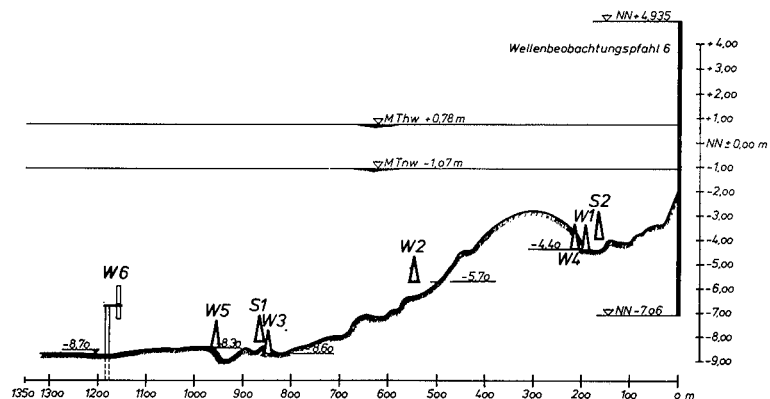


Abb. 2. Das Meßprofil bei Westerland, Blickrichtung Nord

- fortlaufender Betrieb und ständige Zuverlässigkeit während mindestens acht Monate
- Stromversorgung und Datenübertragung über eine Seekabelverbindung
- Datenübertragung, unabhängig von veränderlichen elektrischen Widerständen im Kabel und in Anschlüssen
- Anzeige und Aufzeichnung der Daten an Land

3. Eingesetzte Meßgeräte und Erfahrungen

Unter Beachtung der o. a. Forderungen wurden einige Meßgeräte eingebaut und betrieben (Abb. 2).

3.1. Strömungsmesser (S 1, S 2)

Angaben über Strömungsgeschwindigkeiten vor Sylt wurden bisher u. a. mit Hilfe von elektromagnetischen Strömungsmessern gewonnen: Das durch ein wechselndes Magnetfeld strömende Wasser erzeugt eine elektrische Induktionsspannung. Diese Strömungs-

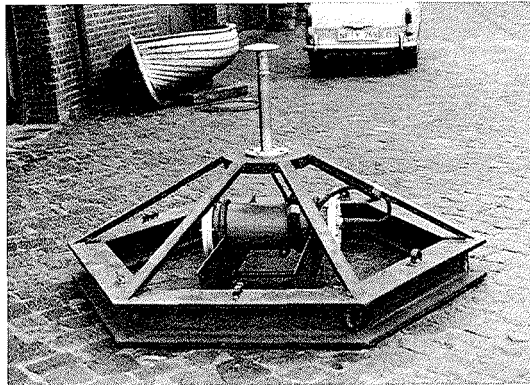


Abb. 3. Elektromagnetischer COMEX-Strömungsmesser, auf Grundgestell montiert

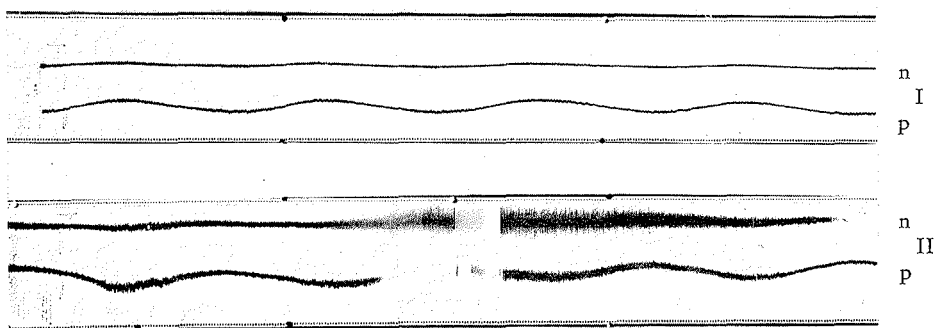


Abb. 4. Aufzeichnungen der Strömungsgeschwindigkeiten

- I: ruhiges Wetter, geringer Seegang
- II: Durchzug eines Windfeldes mit zunehmendem und abnehmendem Seegang
- n = küstennormale Komponente
- p = küstenparallele Komponente

messer gestatten sowohl die Messung von Orbitalströmungen mit einer Auflösung von 0,1 s als auch die Messung von Tideströmungen, jeweils auf zwei waagerechte Achsen projiziert. Der Abstand Meßkopf – Seegrund kann zwischen 0 und 1 m betragen, je nach der Höhenlage des Seegrundes (Abb. 3).

Die Meßergebnisse zeigen, daß die mittlere küstenparallele Komponente ihre Richtung im Rhythmus der Gezeiten wechselt und etwa 0,6 m/s erreicht (Abb. 4). Die mittlere küstennormale Komponente ändert sich sehr wenig und steigt bis 0,3 m/s an.

Sie werden von den durch die Wellen hervorgerufenen Orbitalbewegungen überlagert. Die Amplitude der Orbitalgeschwindigkeiten geht bis zu 2,9 m/s in einer Achse, je

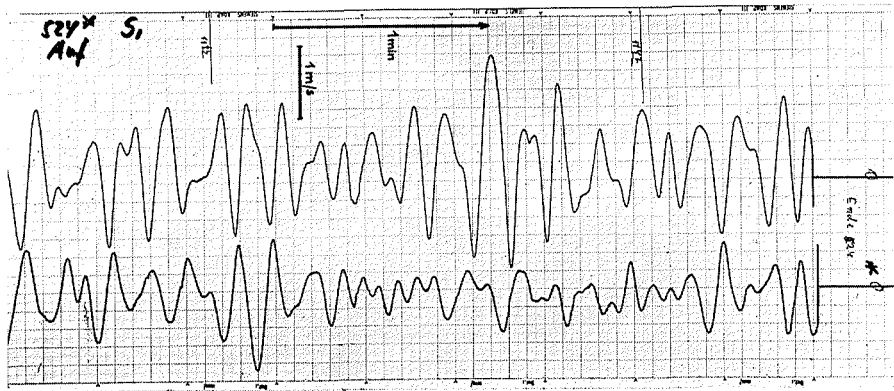


Abb. 5. Orbitalströmungen bei Sturm. Max. Wellenhöhe etwa 6 m

oben = küstennormale Komponente
unten = küstenparallele Komponente

nach Wellenhöhe und -richtung (Abb. 5). Damit läßt sich der beträchtliche Sedimenttransport in diesem Gebiet erklären: Die Orbitalbewegung bewirkt, daß der Sand emporgewirbelt wird. Dadurch wird es den Tide- und Brandungsströmungen möglich, Sedimentkörner von wesentlich größerem Durchmesser zu transportieren, als es der mittleren Geschwindigkeit entspricht (8).

3.2. Wellenmesser (W 1 – W 3, W 6)

Neuere Messungen mit Ultraschall-Wellenmessern haben die Stärke der Schallabsorption in sedimenthaltigem Wasser veranschaulicht. Diese Wellenmesser arbeiten genau wie umgekehrte Echolote, die auf dem Seegrund eingebaut sind. Sie senden Impulse mit einer Häufigkeit von 8 Impulsen/s und mit einer Schallfrequenz von etwa 100 kHz aus. Die ausgesandte Schallenergie liegt in der Größenordnung von 60 W. Der Abstand Meßkopf – Seegrund kann zwischen 0 und 1 m betragen, je nach der Höhenlage des Seegrundes. Er kann, da Mehrfachechos auftreten, von Land aus auf dem Oszilloskop geschätzt werden.

Es stellte sich heraus, daß zu Zeiten starken Seegangs kein Echo von der Seeoberfläche empfangen wurde. Auf dem Oszilloskop waren verschiedene Schichten von konzentrierten Zwischenreflektoren (Sandkörnern) zu beobachten. Sie zogen wie Wolken durch den

Schallstrahl, was gewöhnlich einige Minuten dauerte (Abb. 6). Bei sehr starkem Seegang war das Ausbleiben der Oberflächenechos sogar über Stunden festzustellen. Dieser Effekt ist stärker ausgeprägt an den Meßstationen in Strandnähe, wo die Brandungsenergie freigesetzt wird und sich in Erosion auswirkt.

Die Station W 6 ist mit einer Schallgeschwindigkeits-Meßeinrichtung ausgerüstet. Am Ausgang steht eine der Schallgeschwindigkeit proportionale Frequenz zur Verfügung. Die-

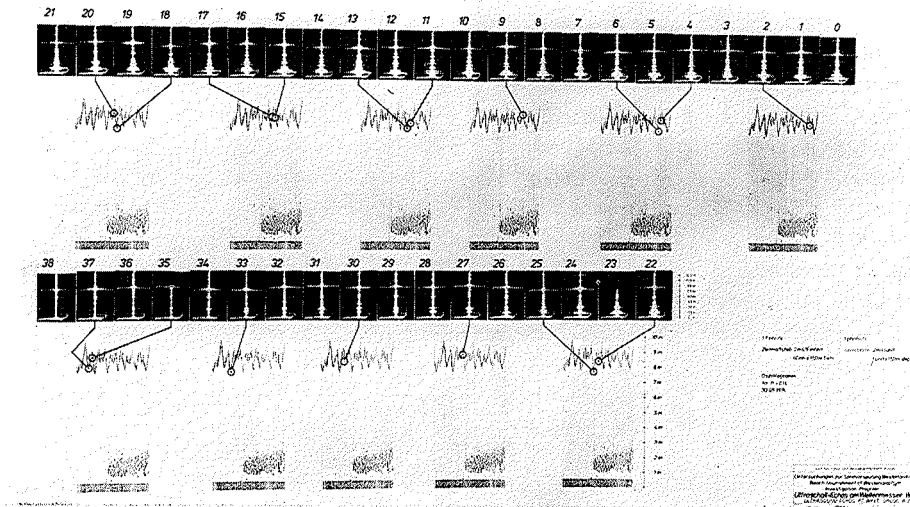


Abb. 6. Zuordnung von Wellenregistrierung und Serien-Oszillogrammen (Folge 1 Foto/s). Max. Wellenhöhe etwa 1,5 m. Von Foto Nr. 0 bis Nr. 24 Durchzug einer „Sandwolke“ (im unteren Teil der Wellenregistrierung zu erkennen)

se Maßeinrichtung ist bis jetzt nur einen Tag lang gelaufen, wird aber offenbar nützliche Daten liefern können. Die kurzzeitige Schwankung der Meßwerte beträgt nur 0,25 bis 0,35 m/s $\cong 1,8-2,5 \times 10^{-4}$, und dies scheint mit den Genauigkeitsgrenzen des Geräts selbst zusammenzuhängen.

4. Vorgesehene Durchführung

4.1. Meßgröße

Der Sanddurchsatz Q_{sed} ist definiert als das je Zeiteinheit durch einen gegebenen Meßquerschnitt A transportierte Sandvolumen. Der Sandgehalt (Sandkonzentration) L sei das Verhältnis zwischen einem bestimmten Volumen Sediment und dem Gesamtvolumen Wasser-Sand-Gemisch, in dem ersteres enthalten ist:

$$L = \frac{V_{\text{sed}}}{V_{\text{tot}}}; 0 \leq L \leq 1$$

L ist eine veränderliche Größe, die fortlaufend als ein Mittelwert über den Meßquerschnitt zu messen ist: $L = f(t)$.

Die Durchflußmenge an Wasser-Sinkstoff-Gemisch kann durch Messen der Strö-

mungsgeschwindigkeit im gegebenen Meßquerschnitt ermittelt werden: $Q_{\text{tot}} = v \cdot A$. v ist die zweite veränderliche Größe, die fortlaufend zu messen ist: $v = f(t)$.

Demnach ergibt sich der Sanddurchsatz als

$$Q_{\text{sed}} = L \cdot Q_{\text{tot}} = L \cdot v \cdot A,$$

d. h. durch fortlaufende Multiplikation der Strömungsgeschwindigkeit mit der Sandkonzentration. Der Meßquerschnitt A ist eine Konstante und liegt durch die Konstruktion des Sensors fest. Er muß für jede Richtung von v die gleiche Größe haben.

Da der Hauptanteil des Sediments nahe dem Grund bewegt wird, muß der Meßquerschnitt hierher gelegt werden, und zwar so, daß sich der Durchschnitt aus einer bestimmten Schicht ergibt (4).

Der Parameter L kann mit Hilfe von drei akustischen Erscheinungen gemessen werden: Schallreflexion, Schallabsorption und Veränderlichkeit der Schallgeschwindigkeit in sedimenthaltigem Wasser. Die Anwendung der Schallreflexion scheint in der Eichung schwieriger zu sein als die der Schallabsorption. Bezüglich der Schallabsorption verweise ich auf 3.2., wo empirisch gezeigt wurde, daß eine deutliche Beziehung zwischen Sandgehalt und Absorption besteht. Es ist anzumerken, daß der Effekt, der hier als Absorption erscheint, hauptsächlich auf eine Streuung durch feine Partikel zurückzuführen ist.

Die Schallgeschwindigkeit im Meerwasser ergibt sich aus der klassischen LAPLACEschen Formel

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot \kappa}},$$

die bedeutet, daß die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur, vom Salzgehalt und vom Druck abhängt:

$$c = f(T, S, P) \quad (1) (5)$$

Unter diesen Parametern hat die Temperatur den größten Einfluß.

Eine angenäherte Berechnung ist möglich z. B. (1) durch:

$$c = 1445,5 + 4,62T - 0,0452T^2 + (1,32 - 0,007T) \times (S - 35)$$

mit c [m/s]
 T = Temperatur [°C]
 S = Salzgehalt [‰]

Diese Formeln berücksichtigen nicht das Vorhandensein von Sediment im Wasser. Hierfür geben URICK/BERGMANN (1) folgende Formel an:

$$c_0^2 = \frac{1}{[\rho_2\alpha + \rho_1(1-\alpha)] \cdot [\beta_2\alpha + \beta_1(1-\alpha)]}$$

mit: c_0 = Schallgeschwindigkeit in der Suspension
 ρ_1 = Dichte der reinen Flüssigkeit
 ρ_2 = Dichte des suspendierten Stoffes
 β_1 = Kompressibilität der reinen Flüssigkeit
 β_2 = Kompressibilität des suspendierten Stoffes
 α = Volumenanteil der suspendierten Teilchen in der Suspension
 c_1 = Schallgeschwindigkeit der reinen Flüssigkeit

Es läßt sich zeigen, daß $\frac{c_1}{c_0} = f(\alpha)$ eine parabelförmige Kurve darstellt (1). Das

bedeutet, daß die Schallgeschwindigkeit wohl vom Sedimentgehalt abhängt, daß aber in einem bestimmten Bereich jeder Wert der gemessenen Schallgeschwindigkeit zu zwei Werten des Sedimentgehalts gehören kann. Die Funktion ist in diesem Bereich zweideutig. Eine

Verbindung von Messungen der Schallgeschwindigkeit mit solchen der Schallabsorption wird deshalb nützlich sein.

4.2. Meßvorrichtung

Eine Einrichtung zur Messung der beiden Parameter Strömungsgeschwindigkeit v und Sandkonzentration L wird zur Zeit entwickelt. Das physikalische Prinzip für beide ist die Anwendung des Ultraschalls (Abb. 7, 8).

Der Strömungsmesser mißt den Geschwindigkeitsvektor, projiziert auf zwei rechtwinklig zueinander liegende horizontale Achsen, durch Vergleich der relativen Schall-

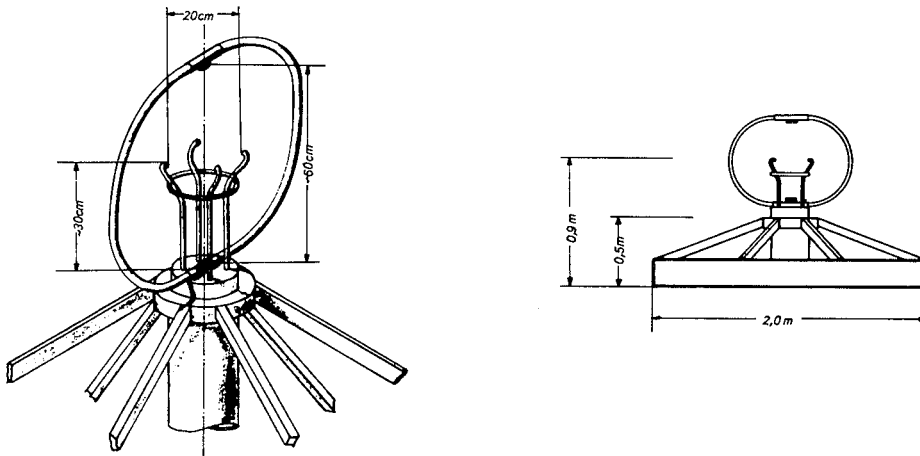


Abb. 7. Vorgesehene Konstruktion des Sanddurchsatz-Meßgerätes

geschwindigkeit mit der Strömung und gegen die Strömung. Eine Zusatzausrüstung zur Berechnung und Berücksichtigung der wahren Schallgeschwindigkeit gestattet es, die Genauigkeit der ermittelten Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Darüber hinaus wird die Ausgabe und Aufzeichnung der Schallgeschwindigkeit sehr nützlich sein, um Angaben über die Sandkonzentration zu erhalten. Eine geeignete Meßeinrichtung wird von einer französischen Firma hergestellt.

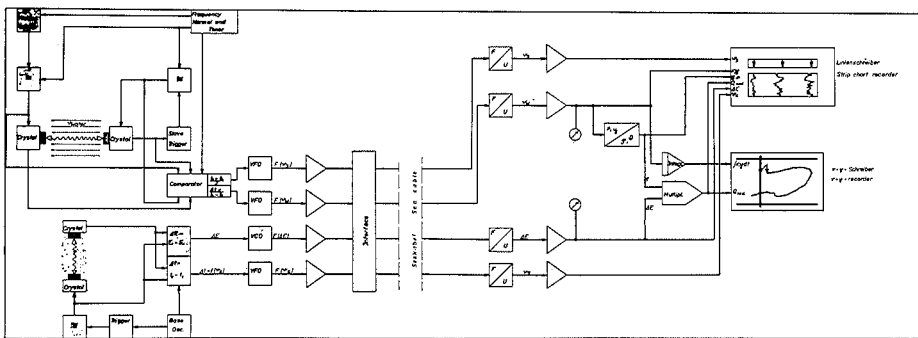


Abb. 8. Blockschaltbild des Sanddurchsatz-Meßgerätes

Der Strömungsmesser wird mit einem Sandkonzentrations-Meßgerät kombiniert werden. Die Sandkonzentration im Wasser wird durch Messung der Schallabsorption in einer senkrechten Achse ermittelt. Diese Anordnung bezweckt, Störungen der Strömungen in waagerechter Richtung möglichst gering zu halten und den Durchschnittswert aus einer bestimmten Schicht (Dicke 0,6 m) zu messen. Gleichzeitig soll auch dieses Gerät die Schallgeschwindigkeit berechnen und ausgeben.

Es kommt sehr darauf an, daß die Sandkonzentration genau am gleichen Punkt wie die Strömungsgeschwindigkeit gemessen wird. Die drei Meßachsen bilden deshalb ein rechtwinkliges, räumliches Achsenkreuz.

Die Landstation der Meßeinrichtung hat die Aufgabe, Größe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten, die Sandkonzentration, den Sanddurchsatz zu berechnen und die Daten aufzuzeichnen, einschließlich der laufenden Registrierung der Schallgeschwindigkeit, um die Redundanz zu erhöhen.

5. Noch zu lösende Probleme

Die genaue Eichung des Sandkonzentrationsmessers birgt gewisse Schwierigkeiten, da sie im Maßstab 1 : 1 durchzuführen sein wird. Der Einfluß der Korngrößen muß bei der Eichung ermittelt werden. Die jeweiligen Wirkungen des Vorhandenseins von Sandkörnern und eingeschlossenen Luftblasen müssen untersucht werden, um sie unterscheiden zu können. Dies kann mit Hilfe der bestehenden Ultraschall-Wellenmesser erfolgen.

Etwas Erfahrung muß noch gesammelt werden, um für die Unterwassereinheit die beste mechanische Konstruktion zu schaffen, was günstige hydraulische Formgebung, ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigung, geringstmögliche Beeinträchtigung durch Bewuchs usw. betrifft.

6. Zukünftige Untersuchungen

Das Sanddurchsatz-Meßgerät, das zur Zeit entwickelt wird, soll jederzeit und bei jeder Witterung (bezüglich Sturm und Seegang) laufende Daten liefern, besonders im Herbst und im Winter, den Jahreszeiten mit den schwersten Angriffen gegen die Küste. Das derzeitige Ziel ist es, eine betriebsbereite Meßeinrichtung zu erstellen, die Angaben über Richtung und Größe des Sedimenttransportes zu allen Tidephasen liefern kann.

Die Integration der x- und y-Komponenten der Strömungsvektoren über die Zeit (z. B. über ganze Tiden) und die Aufzeichnung mit einem x-y-Schreiber ergibt angenähert den Weg eines fiktiven Wasserteilchens (Abb. 9), unter der Annahme, daß ein gleichförmiges Geschwindigkeitsfeld den Meßpunkt umgibt. Der Vektor vom Anfang zum Ende einer solchen Registrierung über eine ganze Tide ist als der Reststrom anzusehen. Auf dieselbe Weise lassen sich die Sanddurchsatz-Vektoren aufzeichnen. Diese Registrierung wird dann eine Vorstellung über den angenäherten Sediment-Resttransport geben, eine für den Küstenschutz sehr wesentliche Information.

Eine andere nützliche Darstellung der Meßdaten wird darin bestehen, die Strömungsvektoren wie oben über die Zeit integriert aufzuzeichnen und ihnen direkt Punkt für Punkt die jeweilige Sandkonzentration zuzuordnen. Aus dieser Aufzeichnung wird es sich erkennen lassen, zu welchen Tidephasen der größte und der kleinste Sandgehalt auftritt. Sie wird voraussichtlich das Verständnis um den Mechanismus des Sedimenttransportes erleichtern können.

In der Vergangenheit sind Leitstoffmessungen mit radioaktiven und fluoreszenten Leitstoffen durchgeführt worden, um den Sedimenttransport zu untersuchen. Sie gestatten jedoch nur „statische“ Messungen des Sedimenttransports, da die Leitstoffverteilung zu festen Zeitpunkten mit ziemlich langen Zwischenräumen ermittelt wird. Die Vorgänge

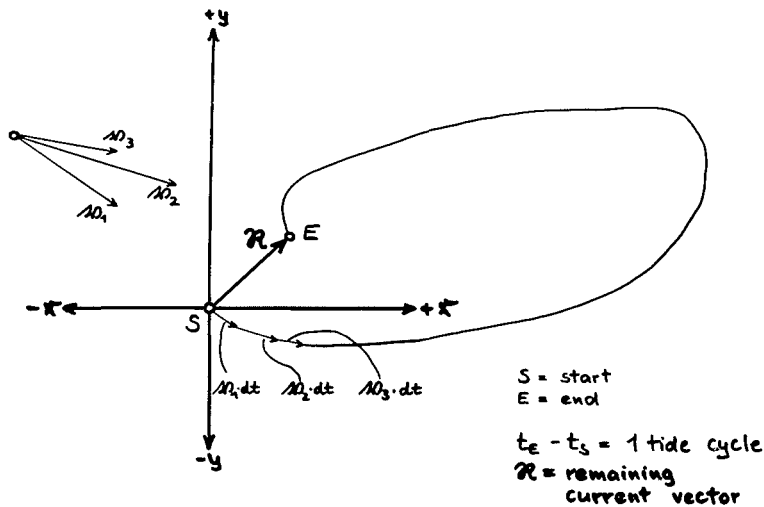


Abb. 9. Darstellung des Reststrom-Vektors $R - v_1, v_2, v_3 =$ Augenblickswerte der Strömungen

zwischen den Meßzeitpunkten werden nicht erfaßt. Um laufende Angaben über den Sedimenttransport zu bekommen, sind „dynamische“ Messungen, wie z. B. Sanddurchsatz-Messungen erforderlich. Zu diesem Zweck sollte es das Ziel sein, eine Reihe gleicher Stationen aufzubauen, die zuverlässige Aussagen über die Erosionsvorgänge machen, vor allem im Zusammenspiel mit Energiebilanz-Betrachtungen und Leitstoffmessungen.

7. Schlußbemerkungen

Erfolgreicher Küstenschutz an sandigen Küsten mit starker Brandung erfordert die Kenntnis des Erosionsvorganges. Ein Weg, über Untersuchungen diesem Problem beizukommen, ist die Messung des Sanddurchsatzes in situ, zu jeder Zeit, insbesondere bei schweren Sturmfluten. Eine Meßeinrichtung hierfür muß für schwierige Umweltbedingungen geeignet sein. Die Verwendung von Ultraschall-Geräten gestattet es, laufende Strömungsmessungen und laufende Messungen der Sandkonzentration im Wasser zu kombinieren. Das arithmetische Produkt aus beiden ergibt den Sanddurchsatz durch einen festen Meßquerschnitt, dargestellt als Vektor.

Der Einsatz von Ultraschall-Wellenmessern und ihr Betrieb zu Zeiten starken Seegangs haben gezeigt, daß diese Methode tatsächlich anwendbar ist. Der im Wasser enthaltene Sand verursacht eine veränderliche Schallabsorption. Ein erstes Sanddurchsatz-Meßgerät wird zur Zeit entwickelt. Das Hauptproblem besteht darin, den Sandkonzentrationsmesser genau zu eichen. Die Meßeinrichtung soll an der Westküste der Insel Sylt eingesetzt werden.

Die Untersuchungen, die zum Entwurf des Sanddurchsatz-Meßgerätes führten, gehören zum Untersuchungsprogramm zur Sandvorspülung Westerland/Sylt.

Dieses Programm sowie die Sandvorspülung selbst wurden vom Land Schleswig-Holstein, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum (früher Marschenbauamt Husum), durchgeführt und von den Herren Ministern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland und des Landes Schleswig-Holstein finanziert.

Schriftenverzeichnis

1. BERGMANN, L.: Der Ultraschall. 6. Aufl., Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1954.
2. DIETRICH, G. und KALLE, K.: Allgemeine Meereskunde. 2. Aufl., Berlin, Gebr. Borntraeger, 1965.
3. FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J. SCHWITTERS, J. und SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. Die Küste, Heide, 1972, Nr. 23, S. 1-62.
4. GLOVER, J. R., BHATTACHARYA, P. K. und KENNEDY, J. F.: An electrooptical system for measurement of mean and statistical properties of sediment suspensions. IIHR Report Nr. 120, Iowa City, 1969.
5. KROEBEL, W. und MAHRT, K.-H.: Direkte Präzisionsschallgeschwindigkeitsmessungen von Meteor-Fahrten und Diskussion der gefundenen Differenzen gegenüber den aus der Wilson-Formel aus Salzgehalt, Temperatur und Druck berechneten Werten. Berichtswerk Interocean '73, Düsseldorf, Band 2, Bericht IO 73-655, 1973.
6. WENZEL, D.: Ultraschall-Wellenschreibanlage vor Sylt. Die Wasserwirtschaft, 64, (1974), H. 12.
7. WOOD, A. B.: A Textbook of Sound. 3. Aufl., London, G. Bell and Sons Ltd., 1955.
8. YALIN, S.: Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebepbewegung. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 8, 1957.