

Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms

Von Winfried Siefert, Helmut Fahse, Fritz Mießner, Hans-Henning Richter,
Achim Taubert und Peter Wieland

Zusammenfassung

Die Ergebnisse eines mehrjährigen Meßprogramms werden mitgeteilt. Auf Karten sind maximale und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten, Rest- und Triftstromvektoren flächenhaft dargestellt. Damit liegt erstmals eine umfassende Arbeit über die Strömungsverhältnisse vor der schleswig-holsteinischen Westküste auf der Basis von quasi-synoptischen Messungen vor.

Der Bericht wird ergänzt durch eine detaillierte Schilderung der Erfahrungen bezüglich des Meßsystems, der ADV-Verarbeitung und der Organisation der Meßkampagne.

Summary

The results of a programme lasting several years are presented. Maps show maximum and mean current velocities, residual and drift current vectors. This is the first ever evaluated survey of the tidal current conditions off the Schleswig-Holstein North Sea coast, based on quasi-synoptic measurements.

A detailed report about experiences with the measuring device, data handling and programming, and the organisation of the campagne is added.

Inhalt

1. Zweck, Ziel, Umfang des Gesamtprogramms	148
1.1 Das Phänomen und seine Erfassung	148
1.2 Das Meßprogramm	152
2. Durchführung der Messungen	154
3. Aufbereitung und ADV-Verarbeitung	157
3.1 Aufbereitung der Meßfilme	157
3.2 Elektronische Auswertung	160
4. Meßergebnisse	161
4.1 Vorbemerkungen	161
4.2 Nordfriesisches Wattenmeer	167
4.3 Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Marner Plate	170
4.4 Marner Plate bis Unterelbe	180
4.5 Zusammenfassung	181
5. Erfahrungen und Hinweise	181
5.1 Verfahren und Meßtechnik	181
5.2 Erfahrungen mit der Meßdurchführung	182
5.3 Erfahrungen mit der Datenaufbereitung	184
5.4 Hinweise für künftige Messungen	185
6. Schriftenverzeichnis	185

1. Zweck, Ziel, Umfang des Gesamtprogramms

1.1 Das Phänomen und seine Erfassung

In einer Denkschrift des damaligen Küstenausschusses Nord- und Ostsee ist 1968 zu lesen:

„Die Wassermassenverlagerungen im Küstenvorfeld weichen wesentlich von denjenigen in der freien See ab. Richtung und Stärke der Wasserbewegung einerseits und die Boden- und Küstenform andererseits stehen in ständiger gegenseitiger Wechselwirkung, ohne daß über längere Zeit eine eindeutige Beziehung zwischen Bewegung (Strömung) und Boden- bzw. Wattform erkennbar ist. Dies ist besonders der Fall beim Zusammentreffen der Wasserbewegung von See her mit derjenigen in den Flüssen und den großen Wattströmen. Weitere Ungleichmäßigkeiten verursacht der zeitlich unterschiedliche Eintritt der Gezeitenwellen vom Atlantik her in das Küstenvorfeld.

Die im ständigen Richtungswechsel vor sich gehende Wasserbewegung kann erhebliche Änderungen der Bett- und Bodenform mit gefährlichen Auswirkungen für den Bestand des Küstenvorfeldes selbst zur Folge haben. Ihre ständige, großräumige Beobachtung und Registrierung ist deshalb eine gleich wichtige Aufgabe wie die Beobachtung der Wasserstandsschwankungen.

Eine wichtige Rolle spielen die astronomisch bedingten Ungleichheiten der Gezeiten, der Wind sowie Dichteunterschiede infolge Salzgehalts- und Temperaturschwankungen. Einzelmessungen sind daher allgemein wertlos. Es müssen Dauermessungen über längere Zeiträume und unter verschiedenen astronomischen und meteorologischen Bedingungen ausgeführt werden.“

Schon damals wurden also eine Erweiterung des Untersuchungsbereichs und eine Verbesserung der Meßmethode und -auswertung gefordert. Über die Konzeption bestanden bereits konkrete Vorstellungen:

„Zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse im Vorfeld der deutschen Nordseeküste ist es notwendig, auf den Gebieten, in denen nur wenig Strömungsmessungen vorliegen, zahlreiche neue Messungen auszuführen. Diese Gebiete müssen mit einem Netz von Meßstationen überzogen werden, wobei die Meßpunkte profilartig angeordnet werden müssen. Überwiegend kommen dafür Dauerstrommeßgeräte in Betracht. Die Messungen sollten gleichzeitig in einem möglichst großen Gebiet ausgeführt werden, um ein synoptisches Bild der Strömungsverhältnisse zu erhalten. Da nicht so viele Meßgeräte zur Verfügung stehen, um den gesamten Küstensaum zwischen der niederländischen und dänischen Grenze gleichzeitig zu erfassen, muß das Gesamtgebiet in mehrere möglichst große Meßbereiche aufgeteilt werden, in denen nacheinander gemessen wird.“

In dem 1971 vom Ausschuß für Küstenforschung verfaßten und vom damaligen Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft herausgegebenen Untersuchungsprogramm zur Küstenforschung heißt es zum Thema Tideströmungen u. a., daß sich

„ein Meßprogramm im wesentlichen beschränkt auf die niederfrequenten Anteile im gesamten Bewegungsspektrum, also auf Gezeitenströmungen, Triftströmungen und Dichteströmungen. Orbital- und Brandungsströmungen gehören zum Themenkreis ‚Seegang und Brandung‘ und werden hier nicht erfaßt. Turbulenzuntersuchungen dürften generell in diesem regional orientierten Programm wenig erfolgversprechend sein. Im Zusammenhang sowohl mit der Seegangsforschung als auch mit der Untersuchung des Materialtransportes wird sich jedoch die Notwendigkeit und Möglichkeit ergeben, bei der Einrichtung von Meßstationen auch die hochfrequenten Orbital- und Turbulenzströmungen in integrierten Meßsystemen mit zu erfassen. Besonderes Augenmerk ist wegen der Ausbreitung von Abwässern auch den Diffusionserscheinungen zuzuwenden.“

In dem Untersuchungsprogramm wurden folgende allgemeine Ziele zur Erfassung des Phänomens genannt:

- a) Erarbeitung einer großräumigen und zusammenhängenden Gezeitenstromdarstellung auf der Basis eines ausreichend dichten Meßnetzes.
- b) Erweiterung der Kenntnisse über Schichtungseffekte durch Modellrechnungen und systematische Profilmessungen.

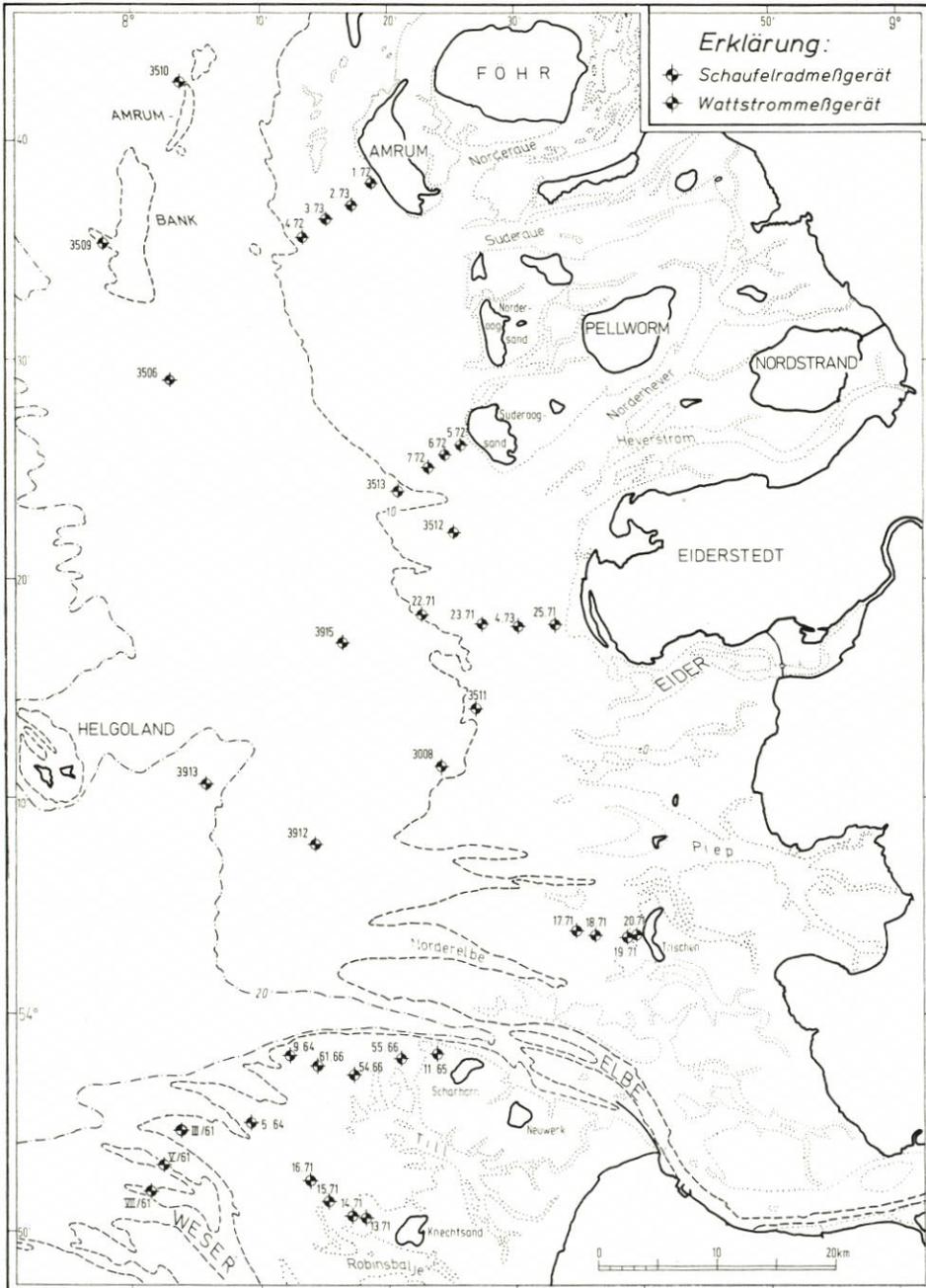


Abb. 1. Lageplan mit Meßpositionen vor Beginn des KFKI-Programms (aus GÖHREN, 1974)

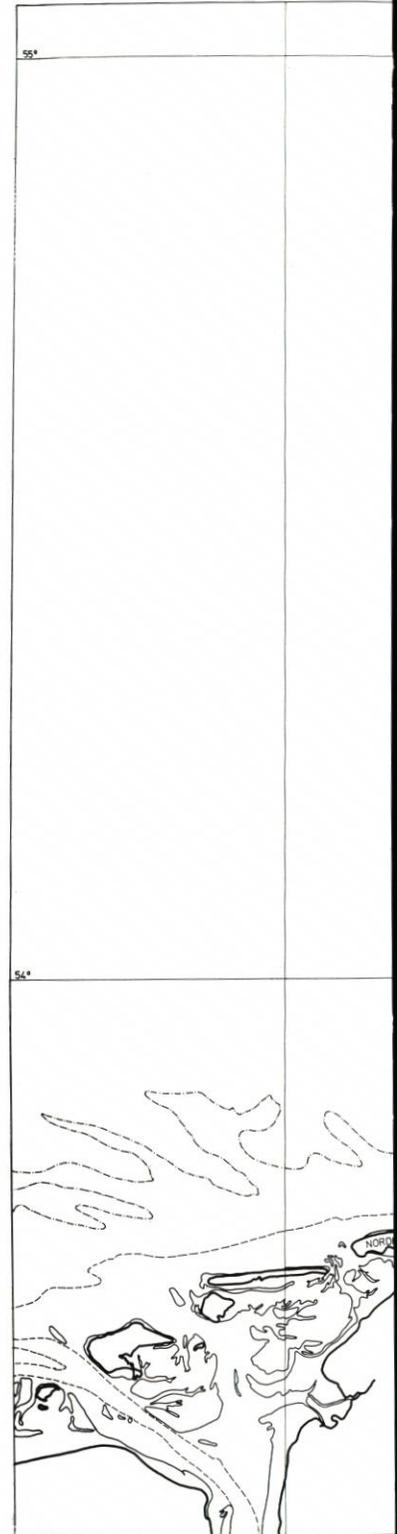
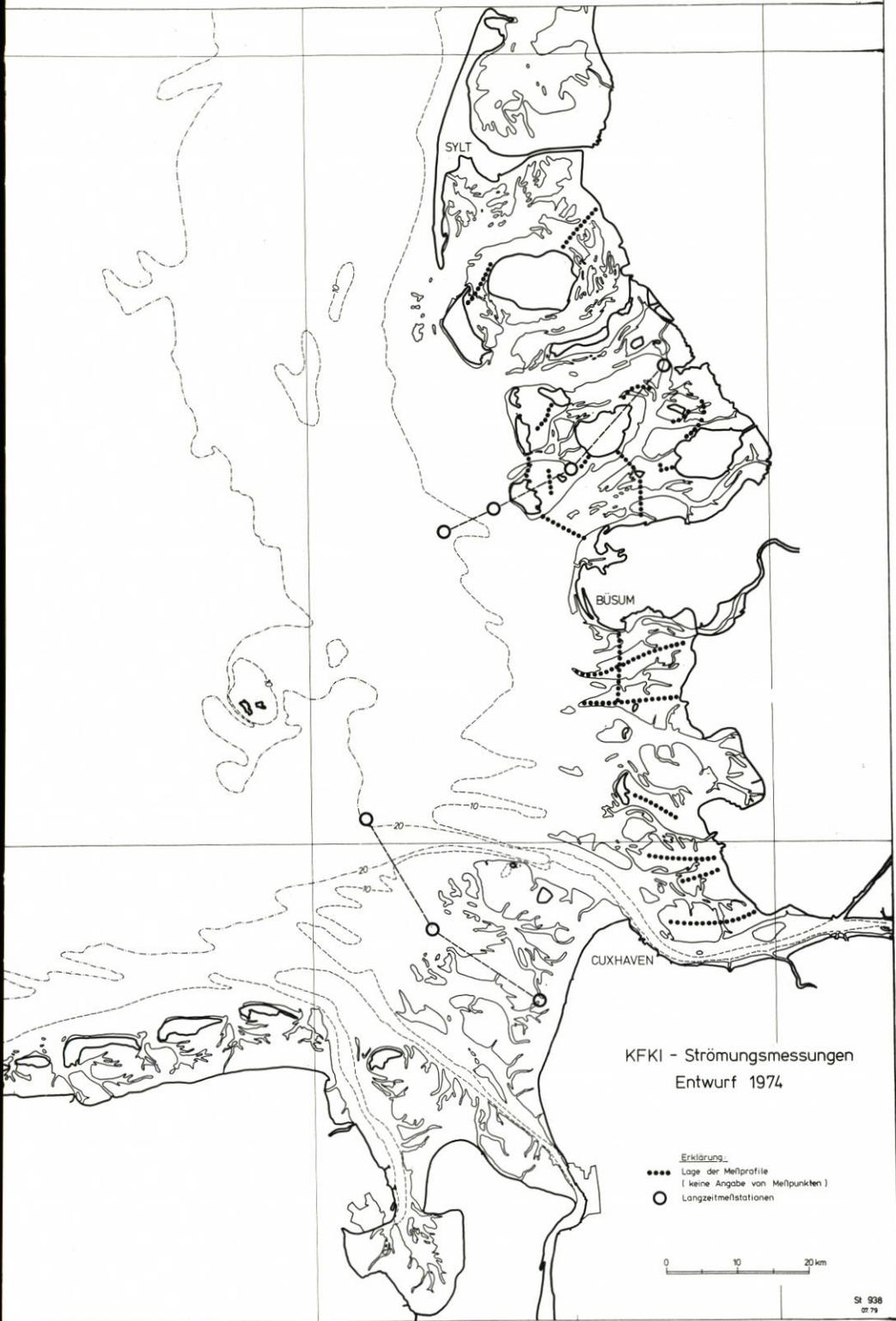


Abb. 2. Meßprofile und Langzeit-Meßstationen im Rahmen des KFKI-Programms (Planung 1974)



KFKI - Strömungsmessungen
Entwurf 1974

- Erklärung:
- Lage der Meßprofile
(keine Angabe von Meßpunkten)
 - Langzeitmeßstationen



- c) *Erweiterung der Kenntnisse über die bei Starkwind- und Sturmweatherlagen entstehenden und maßgebend durch die topographische Struktur der Küste beeinflussten Triftstromsysteme.*
- d) *Vollständige Erfassung der vorhandenen aperiodischen Zirkulationen und küstenparallelen Wasserversetzungen und Analyse der dynamischen Ursachen.*
- e) *Entwicklung von HN-Modellen zur speziellen Anwendung auf das Küstengebiet.*

1.2 Das Meßprogramm

Mit der Aufstellung eines detaillierten Strömungsmeßprogramms befaßte sich ab 1974 eine besondere KFKI-Projektgruppe. Ihr gehörten an:

Dipl.-Ing. FAHSE, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg
Dr. Ing. GÖHREN, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Cuxhaven (als Obmann)
Dr. Ing. LUCK, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney
Dipl.-Ing. RICHTER, Wasser- und Schiffsamt Tönning
Dipl.-Ing. TAUBERT, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum
Dipl.-Ing. WIELAND, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, Büsum

Dieses erste Teilprogramm mit Schwerpunkt vor der Westküste Schleswig-Holsteins wurde noch in 1974 vom KFKI verabschiedet und dann vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) ab 1975 finanziell gefördert. Die Zielsetzung wurde folgendermaßen definiert:

- a) *Erarbeitung einer großräumigen und zusammenhängenden Gezeitenstromdarstellung (Gezeitenstromatlas) auf der Basis eines ausreichend dichten Meßnetzes für den Küstenraum zwischen der Insel Sylt und der Außenelbe, seewärts begrenzt etwa durch die 15-m-Tiefenlinie. Sie soll u. a. Darstellungen des synoptischen Strömungsverlaufs bei mittlerer Tide (stündliche Stromkarten), der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und der zugehörigen Richtungen, der Geschwindigkeitsintegrale (Stromwege) sowie der Kenterpunktsverspätungen enthalten.*
- b) *Erweiterung der Kenntnisse über die unter Windeinfluß entstehenden und maßgebend durch die topographische Struktur der Küste beeinflussten Triftstromsysteme.*
- c) *Erfassung der vorhandenen aperiodischen Zirkulationen und küstenparallelen Wasserversetzungen (soweit sie nicht meteorologisch bedingt sind) und Analyse der dynamischen Ursachen. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Berechnung des Reststromes nach Elimination meteorologisch bedingter Strömungskomponenten.*
- d) *Parallel zu den hier vorgesehenen Strömungsmessungen sollen entsprechend einem gesondert vorgelegten Programm hydrodynamisch-numerische Rechenmodelle für das deutsche Nordseeküstengebiet entwickelt werden. Ein Ziel des Strömungsmeßprogramms ist in diesem Zusammenhang die Bereitstellung von Daten als Randwerte und zur Kalibrierung der HN-Modelle.*

Unter Berücksichtigung des bereits vorhandenen jüngeren Datenmaterials (Abb. 1) umfaßte diese ursprüngliche Konzeption Messungen an insgesamt 250 Stationen (jeweils über 2 bis 3 Wochen) sowie 10 Langzeitstationen (Abb.2). Die Messungen und Auswertungen wurden von den o.g. Mitgliedern der Projektgruppe und ihren Dienststellen betreut und durchgeführt. Aufgrund personeller Veränderungen und der Notwendigkeit, weitere Ämter zu beteiligen, setzte sich die Projektgruppe ab 1976 wie folgt zusammen:

Dipl.-Ing. FAHSE
Ing. grad. MIESSNER, Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven
Dipl.-Ing. NIEMEYER, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney
Dipl.-Ing. RICHTER
Priv.-Doz. Dr. Ing. SIEFERT, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Cuxhaven (als Obmann)

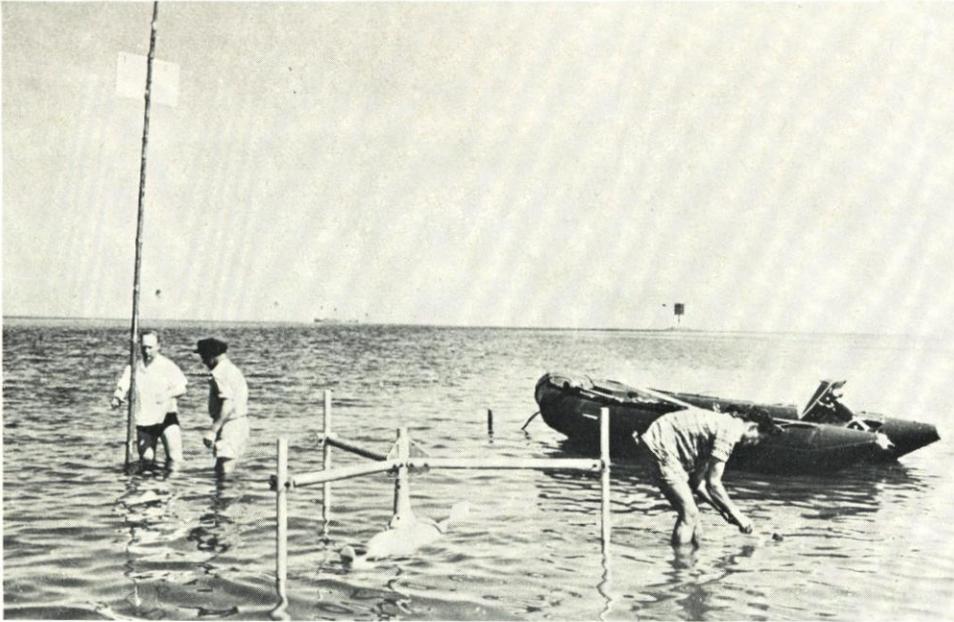


Abb. 3. Wattdauerstrommesser; Aufbau bei Tnw an demontierbarem, dreipfähligem Leichtmetallträger. Meßhöhe über Grund 0,3 bis 0,4m (aus GÖHREN, 1974)

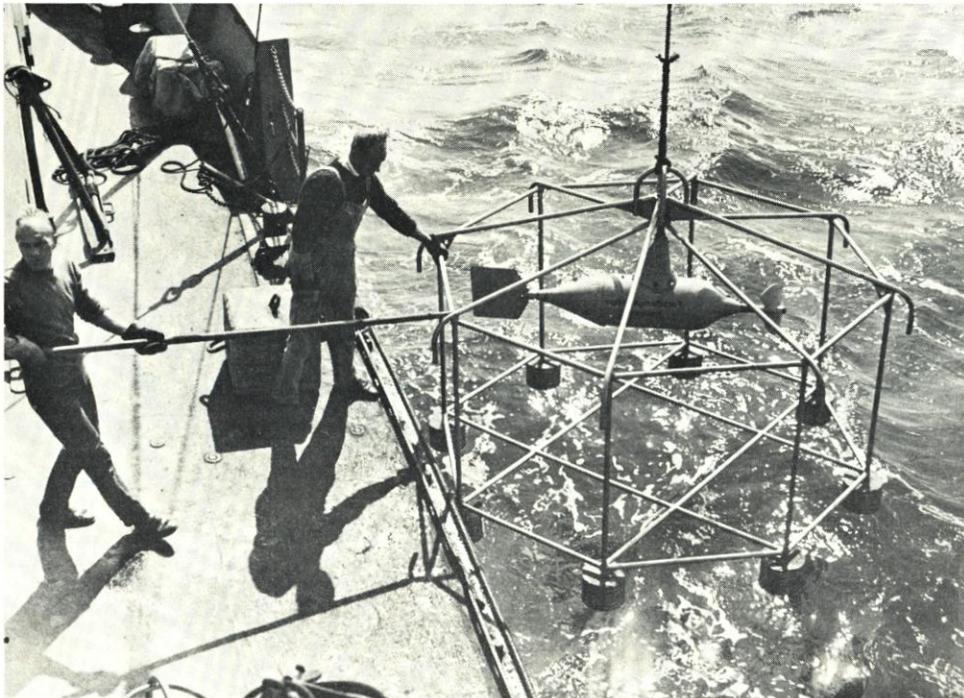


Abb. 4. Wattdauerstrommesser; Einsatz im Flachwassergebiet mit korb förmigem Geräteträger. Meßhöhe über Grund 1 m (aus GÖHREN, 1974)

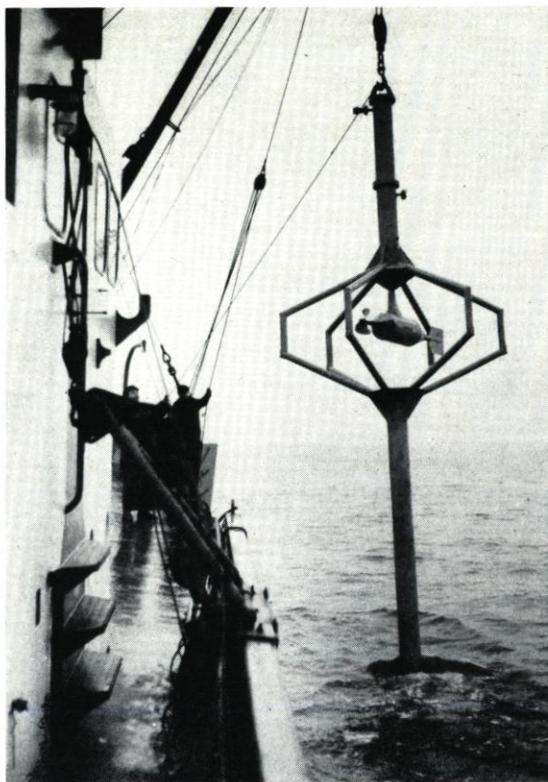


Abb. 5. Wattdauerstrommesser mit Trägergerüst zum Einspülen (aus GÖHREN, 1969)

Dipl.-Ing. TAUBERT

Dipl.-Ing. WIELAND

Nicht alle der oben gesteckten Ziele sind bisher erreicht. Dennoch ist das Untersuchungsmaterial so umfangreich geworden, daß eine Veröffentlichung der wichtigsten Daten möglich und sinnvoll ist.

2. Durchführung der Messungen

Man ging bei der Auslegung des Programms davon aus, die Messungen mit dem damals vorhandenen, aus dem Flachseestrommesser (DIETRICH und SIEDLER, 1963) entwickelten und von der Fa. Hydrowerkstätten gebauten „Wattdauerstrommeßgerät“ – kurz: Wattstrommesser – durchzuführen. Dieses Gerät hatte sich sehr gut bewährt und kann in verschiedenen Geräteträgern in flachem Watt und in Prielen eingesetzt werden (Abb. 3 bis 5). Neben etwa 10 von den beteiligten Dienststellen bereitgestellten Geräten wurden 16 über das KFKI beschaffte und vom BMFT finanzierte Geräte verwendet.

Das Meßgerät beschreibt GÖHREN (1968), der die Anregung zu seiner Entwicklung gegeben hatte:

„Es besteht aus einer zylindrischen Gerätekapselform, die um eine vertikale Achse drehbar gelagert und an einem dreibeinigen Meßgerüst aufgehängt ist. Durch eine Leitflosse wird die Längsachse

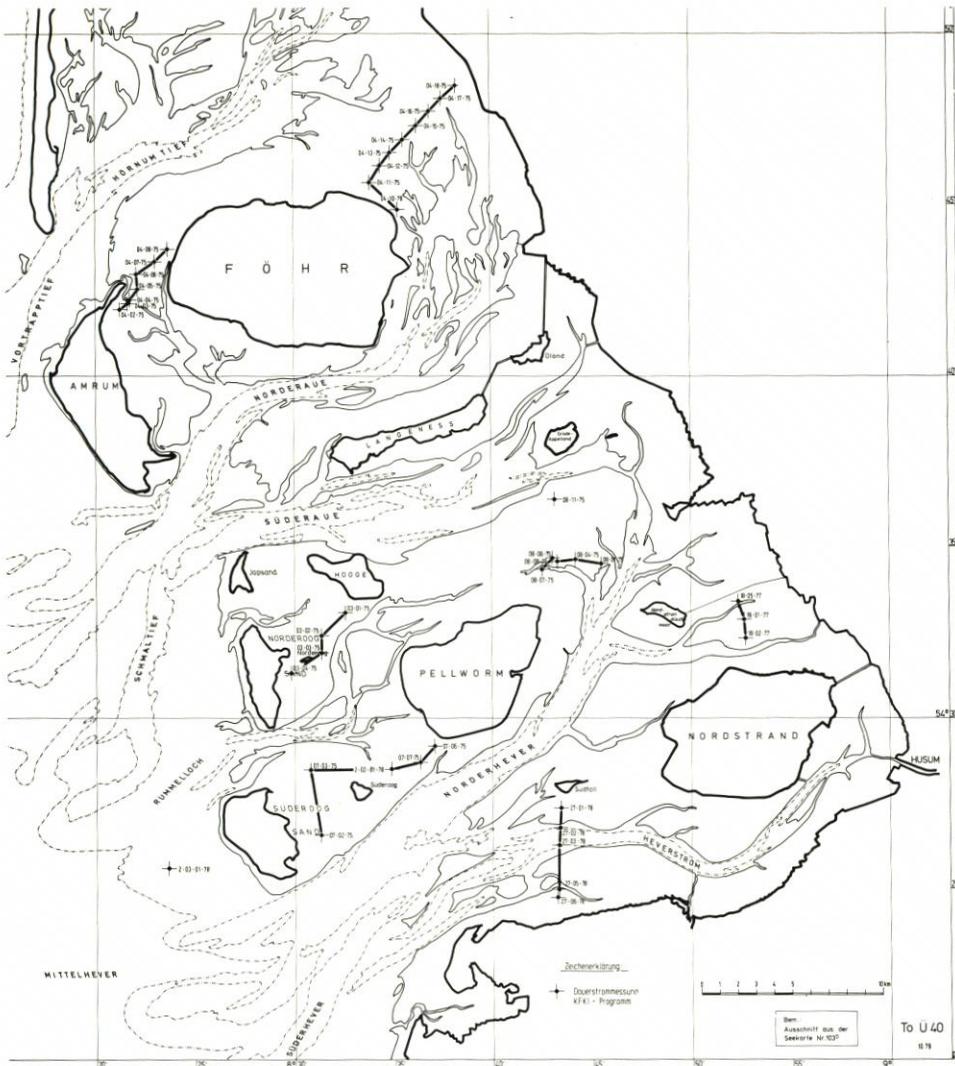


Abb. 6. Lageplan mit Meßpositionen, nördlicher Teil

parallel zur Stromrichtung gehalten. Eine leichtgängige Kunststoffschaufel, deren Umdrehungen über eine Magnetkupplung zur Registriereinheit in der Geräte kapsel übertragen werden, dient als Meßwertgeber für die Stromgeschwindigkeit. Die Anlaufgeschwindigkeit der Schaufel liegt bei 3 cm/s. Ihre Umdrehungen werden durch einen Schwimmerhebel gestoppt, wenn der Wasserspiegel bis zur Geräteoberkante absinkt.

Ein Kompaß für die Stromrichtungsanzeige und die Registriereinheit – Uhrwerk, Zählwerk und Registrierfilmgerät – befinden sich in der Kapsel. Registriert wird in konstanten Zeitabständen von 300 bzw. 600 Sekunden über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen.“

In Einzelfällen wurden auch noch Schaufelräder in größeren Wassertiefen eingesetzt. Die Funktionsweise dieser von RAUSCHELBACH entwickelten ozeanographischen Meßgeräte beschreiben JOSEPH (1948) und SCHULTZ (1952).

Es war vorgesehen, mit den genannten Geräten Messungen auf den in Abb. 2 dargestellten Profilen durchzuführen, wobei an jeder Station über mindestens 14 Tage Daten registriert

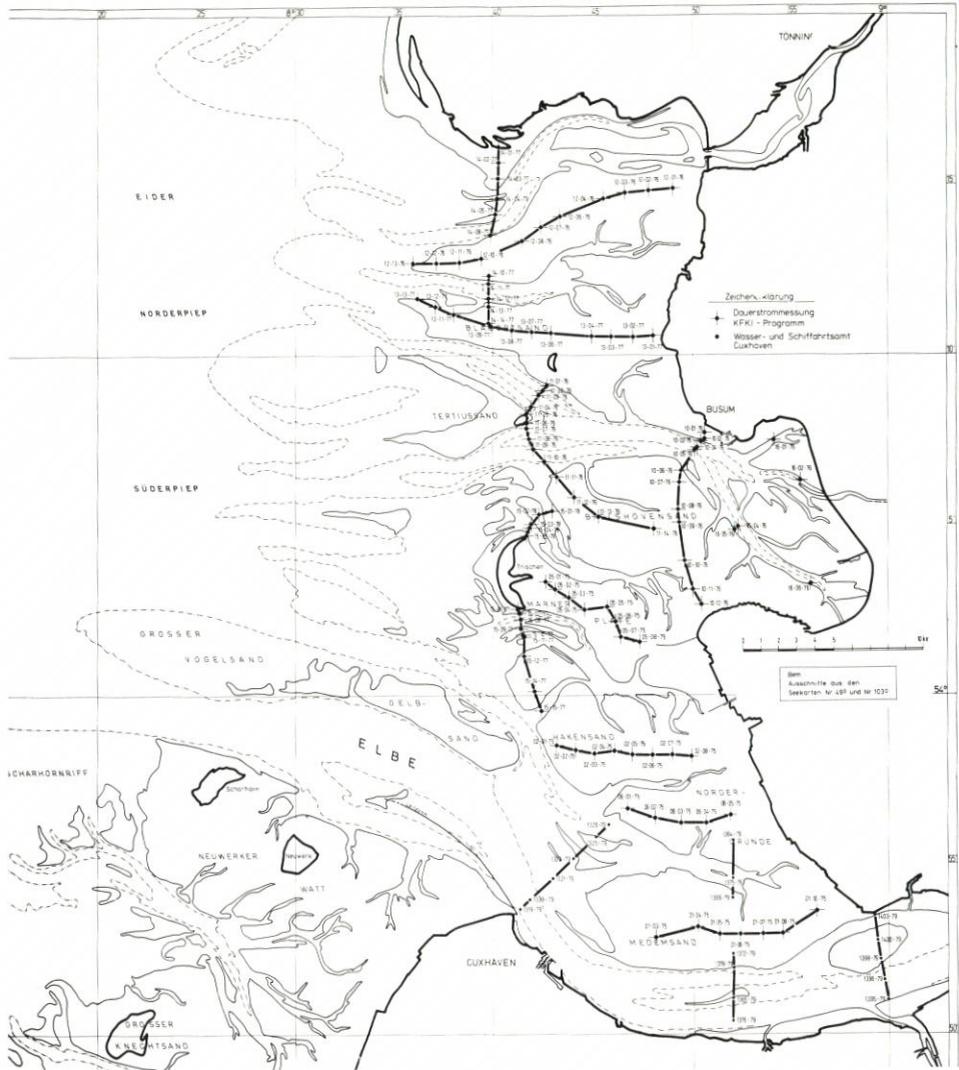


Abb. 7. Lageplan mit Meßpositionen, südlicher Teil

werden sollten. Das Programm sollte etwa drei Jahre dauern und hätte damit Ende 1977 abgeschlossen sein sollen. Wegen verschiedener Geräteausfälle und wegen lange anhaltender ungünstiger Wetterlagen mußte der Meßzeitraum dann aber bis 1979 ausgedehnt werden. Die Langzeitprofile werden sogar bis in das Jahr 1980 hinein betrieben, so daß deren Ergebnisse in der vorgelegten Arbeit noch nicht enthalten sind. Ebenso fehlt die Auswertung einiger Messungen, die mit konventionellen und daher zeitraubenden Registrärsätzen aufgezeichnet wurden. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die hier vorgesehene Übersicht.

Die Lage der Meßpositionen mit ihren Bezeichnungen geht aus Abb. 6 und 7 hervor.

Die Wattstrommesser wurden an den Flachwasserstationen und in den Prieln vom Schiff aus in korb förmigen Geräteträgern mit einer Meßhöhe von 1,0m über Grund abgesetzt (Abb. 4). An den Wattstationen wurden neben diesen hauptsächlich dreipfählige, leicht an Ort und Stelle zusammensetzbare Träger verwendet (Abb. 3). Um längere Fußwege in dem teils

sehr schlickigen Gelände zu vermeiden, wurden Geräte und -träger bei Thw mit Schlauchbooten an die Positionen transportiert und deponiert und dann später im trockenen Watt aufgebaut. Die Standortbestimmung erfolgte über Hi-Fix.

1971 bis 1973 hatte GÖHREN (1974) bereits im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft umfangreiche Messungen vor dem Wattgebiet zwischen Amrum und Trischen durchgeführt (Abb. 1). 1975 begannen die Untersuchungen des hier behandelten Programms, und zwar mit gemeinsamen Einsätzen des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide/Büsum, des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven und der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk im südlichen Teil, d. h. im Bereich Medemsand – Nordergründe – Marner Plate – Hakensand (Abb. 7). Im folgenden Jahr verlagerte sich der Schwerpunkt der Untersuchungen weiter nach Norden in das Gebiet Dithmarscher Bucht, Tertius, Blauort und, als auch das Wasser- und Schiffsamt Tönning verstärkt teilnahm, weiter bis in die Außeneider (Abb. 7). Etwa ab 1977 lag das Hauptmeßgebiet nördlich von Eiderstedt im Bereich des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum (Abb. 6), wo bis einschl. 1979 gemessen wurde.

Da die Messungen im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes nur zwei bis vier Jahre nach denen vor dem dortigen Watt stattfanden, ist noch eine gemeinsame Wertung all dieser Daten zulässig, denn sie können quasi-synoptisch gewertet werden.

3. Aufbereitung und ADV-Verarbeitung

3.1 Aufbereitung der Meßfilme

Die im Rahmen des KFKI-Strömungsmeßprogramms vor der schleswig-holsteinischen Westküste und im Mündungsgebiet der Elbe gewonnenen Meßwerte wurden bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) aufbereitet und verarbeitet.

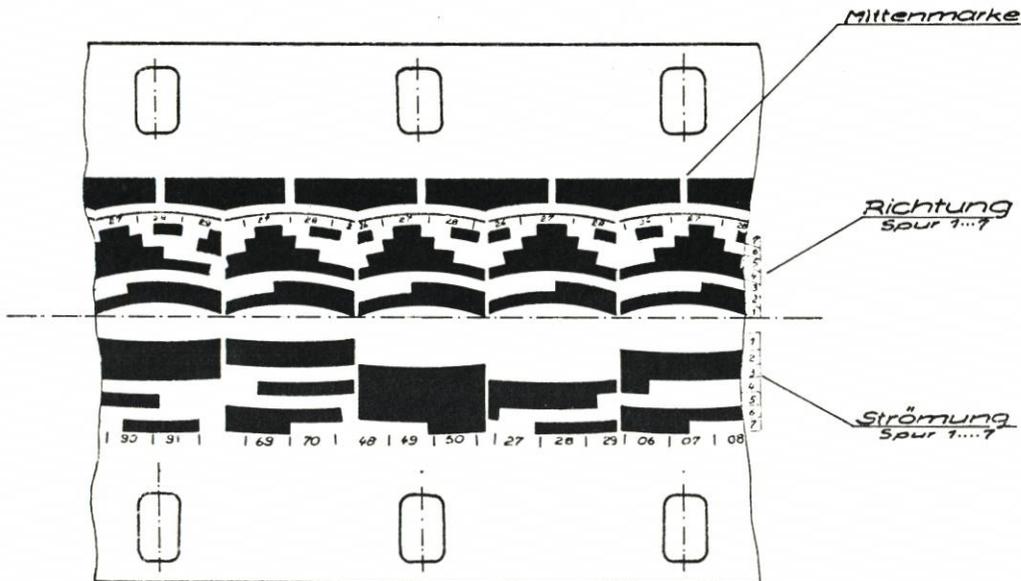


Abb. 8. 16-mm-Film mit codierter Aufzeichnung (Fa. Hydrowerkstätten, Kiel)

Für die automatische Ablesung werden die Meßwerte (Stromrichtung und Umdrehungen des Propellers) auf dem Film durch einen Hell-Dunkel-Code dargestellt. Sowohl für die Zählung der Umdrehungen als auch für die Richtungen stehen je sieben Spuren zur Verfügung, die eine Zählung von 000 bis 127 ermöglichen. Für die Richtung ergibt sich daraus eine Unterteilung der 360°-Teilung des Kompasses in 128 Teile zu jeweils 2,8°. Bei der Geschwindigkeit entspricht ein Teil der 128er-Teilung 3,18 cm/s.

Ein Filmausschnitt ist in Abb. 8 dargestellt. Die Steuerung der Bildablesung erfolgt durch die am oberen Bildrand angeordnete Mittenmarke.

Bei der BAW-Außenstelle Küste in Hamburg wurden die Meßwerte vom Film durch ein speziell von den Hydrowerkstätten für diese Zwecke entwickeltes Gerät abgelesen und mit Hilfe eines Facit-Lochers auf einen Lochstreifen übertragen. Dabei zeigte sich, daß die automatische Umsetzung der Meßwerte vom Film auf den Lochstreifen sehr von der Qualität der Filme abhängt und diese wiederum von der sorgfältigen Wartung der Meßgeräte und dem präzisen Einlegen der Filmkassetten. Einige Filme waren insgesamt so hell oder so dunkel, daß eine automatische Auswertung nicht möglich war. Andere hatten große Helligkeitsunterschiede in den einzelnen Spuren, die zu fehlerhaften Ablesungen bei einer mehr oder weniger großen Anzahl von Bildern führte. Hier zeigte sich auch eine Schwäche des Auswertegerätes, das sich nur auf einen hellen oder dunklen Film einstellen ließ, aber nicht die Justierung der Fotozellen für die einzelnen Spuren erlaubte.

Für die zeitliche Einordnung der Meßwerte wurden durch Überbelichtung einzelner Bilder Markierungen auf dem Film angebracht sowie Datum und Uhrzeit dieser Prüfkontakte auf einem Begleitblatt festgehalten. Aus dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Prüfkontakten und der Anzahl der Bilder konnte der Zeitabstand von Bild zu Bild ermittelt werden.

Zur Identifizierung der einzelnen Meßpunkte und zur weiteren Bearbeitung der Meßwerte war eine Anzahl von Kenndaten erforderlich, die in dem eigens dafür entwickelten Begleitblatt festgehalten und vor der Auswertung abgelocht und in den Rechner eingegeben wurden, und zwar über die Dienststelle, Hersteller-Nr. und die Eichkonstante bzw. Eichgleichung des Meßgerätes, die Meßstelle sowie den zugeordneten Pegel und die nächstgelegene Windmeßstation.

Für die Aufbereitung der Meßwerte mußte zunächst ein Erstdruck zur Erkennung der Fehler angefertigt und dieser dann von Hand korrigiert werden. Dazu wurden die Zählerstands-differenzen zwischen den einzelnen Bildern errechnet. Der Differenz zwischen zwei Bildern wurden die Strömungsrichtung und die Nummer des zweiten Bildes zugeordnet und diese Werte dann in der in Abb. 9 dargestellten Form ausgedruckt sowie als Plattendatei im Rechner gespeichert. Danach war es möglich, die im Ausdruck erkennbaren fehlerhaften Werte über ein Datensichtgerät in der Plattendatei von Hand zu korrigieren. Ferner konnten anhand des Ausdruckes für jede einzelne Tide Beginn und Ende von Flut und Ebbe festgelegt werden. Die jeweiligen Nummern der Meßwerte wurden abgelocht und für die weitere Auswertung im Elektronenrechner gespeichert. Damit war die Gesamtheit der Meßwerte in einzelne Berechnungsabschnitte einteilbar.

Um Zusammenhänge zwischen den Strömungswerten und den Wasserstands- sowie Windwerten bei der späteren Auswertung erkennen zu können, wurden Thw- und Tnw-Höhen und -Zeiten sowie Windangaben, soweit sie über 4 Bft lagen, ebenfalls abgelocht und im Rechner gespeichert.

3.2 Elektronische Auswertung

Bei der Auswertung der hier angesprochenen Strömungsmessungen ist im wesentlichen auf die von GÖHREN (1965) beschriebenen Grundsätze und Computerprogramme zurückgegriffen worden. So wurde auch hier die graphische Darstellung der Meßergebnisse in Form von Ganglinien für Stromrichtungen und Stromgeschwindigkeiten gewählt, um einen Einblick in die Charakteristik der Strömungsvorgänge zu erhalten.

Auf die elektronische Berechnung der mittleren Stromgeschwindigkeiten für die einzelnen Stromintervalle wurde verzichtet, weil sie für Drehströmungen keine repräsentativen Kennwerte liefern. Der Reststromvektor für jedes einzelne Stromintervall wurde dagegen berechnet und die Aneinanderreihung der einzelnen Reststromvektoren als Vektorenzug graphisch dargestellt.

Für die ADV-Auswertung der Messungen wurden

- die auf den Lochstreifen vom Film übertragenen Meßwerte eingelesen und in die Datei SRD.LS. (Kartei-Nr.) abgelegt,
- die zur Beschreibung der Meßperiode erforderlichen Angaben des Datenblattes BAW 086.01 (Tab.2) und die Grenzen der Berechnungsabschnitte über ein Sichtgerät in der Datei SRD.HD. (Kartei-Nr.) abgelegt,
- die aus den Wasserstandslisten des zugeordneten Pegels entnommenen Thw- und Tnw-Höhen und -Zeiten in der Datei SRD.TIDE. (Pegelname) abgelegt,
- die Windwerte der zugeordneten Windmeßstation, soweit die Richtungsangaben in Grad der 360°-Teilung erfolgen, in der Datei SRD.WDGD 82. (Name der Windmeßstation) abgelegt. Die Ablage geht dagegen in die Datei SRD.WDCD 83. (Name der Windmeßstation) bei Richtungsangaben in Code-Zahlen.

Aus den Werten der Datei SRD.LS. werden, wie oben beschrieben, die Zählerstandsänderungen des Umdrehungszählers errechnet und diese mit den Meßwertnummern und den Richtungsangaben in der Datei SRD.PL. (Kartei-Nr.) abgelegt sowie gleichzeitig ein Erstdruck für die Korrektur gefertigt.

Nach der Fehlerkorrektur erfolgt unter Zuhilfenahme der Werte aus der Datei SRD.HD. die Umrechnung der Code-Werte aus der Datei SRD.PL. in Grad der 360°-Teilung für die Strömungsrichtung und in cm/s für die Strömungsgeschwindigkeit. Gleichzeitig werden die Meßwertnummern ersetzt durch die Angabe des zeitlichen Abstandes der Einzelmessung von 00⁰⁰ Uhr des ersten Meßtages in Minuten.

Alle Meßwerte außerhalb der vorgegebenen Berechnungsabschnitte werden überlesen. Im gleichen Rechengang werden für jeden Berechnungsabschnitt die Anzahl der in ihm enthaltenen Meßwerte und die Maximalgeschwindigkeit ermittelt.

Die gewonnenen Werte werden in der Datei SRD.FT. (Kartei-Nr.) abgelegt.

Es werden als Liste ausgegeben:

- Angaben über Meßort und Meßzeit,
- Wasserstandshöhen und -zeiten aus SRD.TIDE,
- Windangaben aus SRD.WDGD 82. oder SRD.WDCD 83.,
- für jeden Meßwert innerhalb der Berechnungsabschnitte der zeitliche Abstand in Minuten von 00⁰⁰ Uhr des ersten Meßtages, die Strömungsrichtung in Grad der 360°-Teilung und die Geschwindigkeit in cm/s sowie
- für jeden Berechnungsabschnitt die Anzahl der in ihm enthaltenen Meßwerte und die Größe der Maximalgeschwindigkeit.

Über ein Zeichenprogramm werden folgende Darstellungen gegeben:

- Datum,

FS Neuwerk Kartei Nr. 420
 Pos: 06-05-75 Lage: GK 34 91220 59 78820
 Pegel: Klotzenloch Wind: Scharhoern Bemerkungen: keine

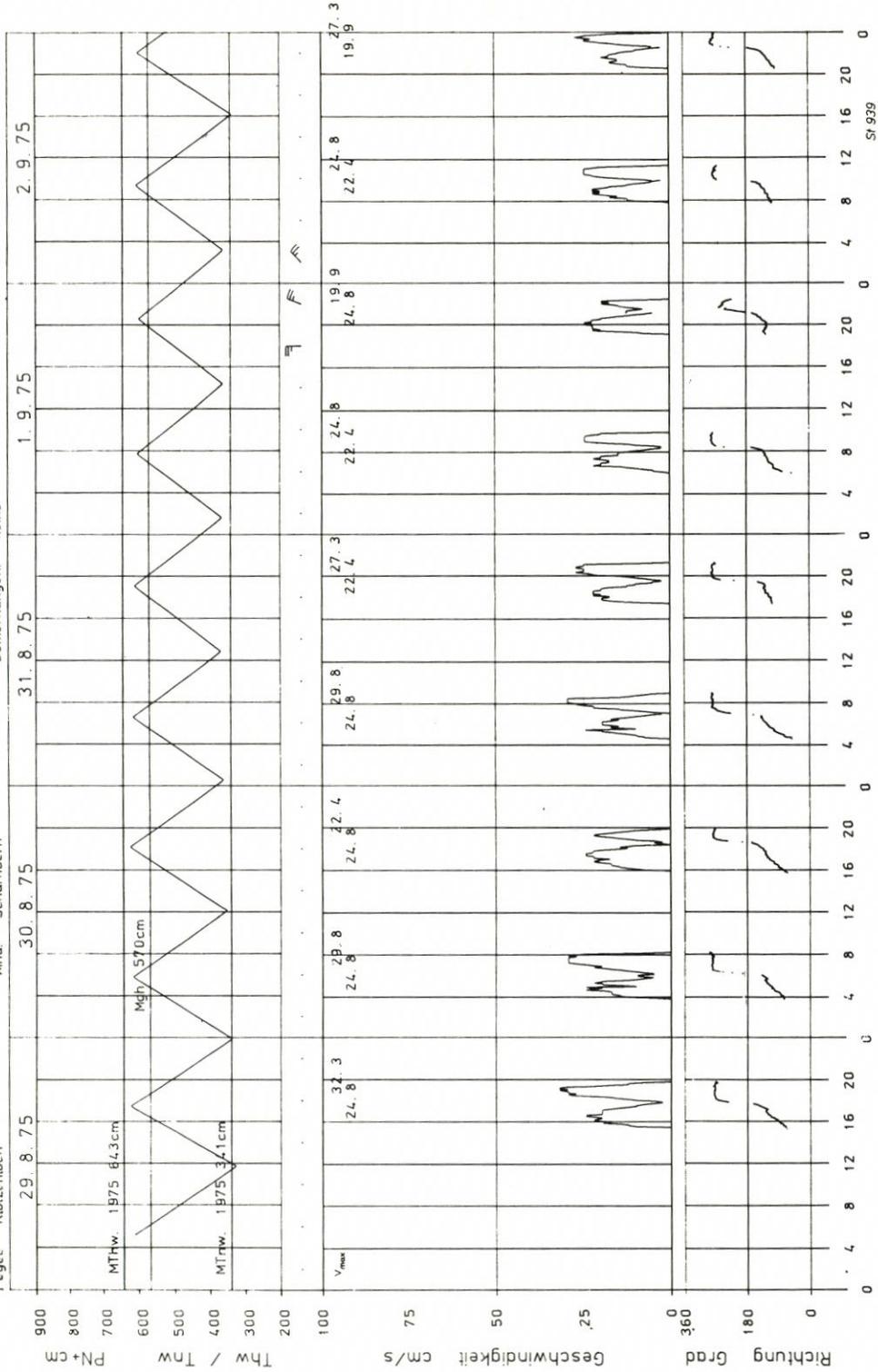


Abb. 10. Beispiel für eine Strömung mit ausgeprägter Flut- und Ebberichtung

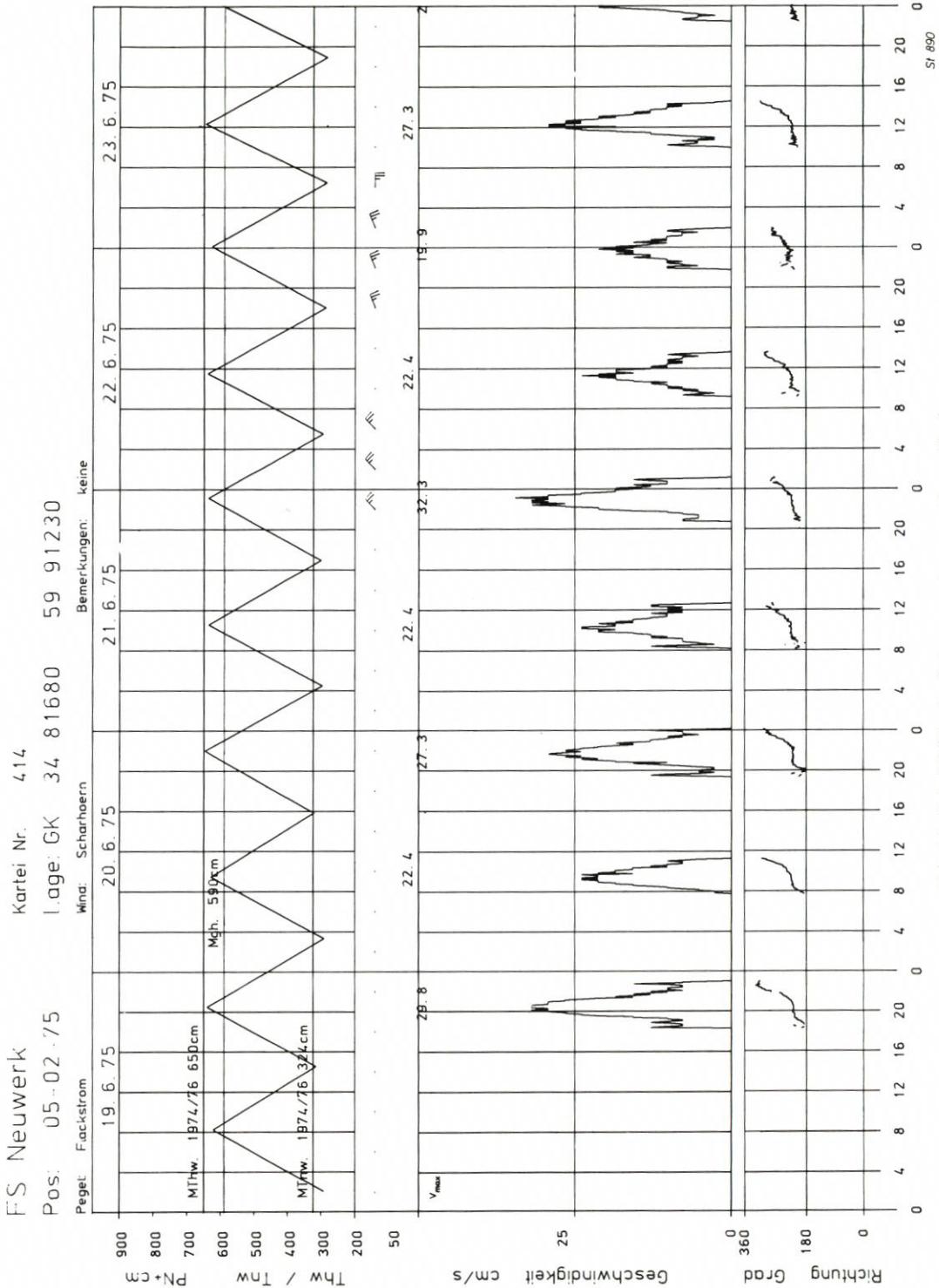


Abb. 11. Beispiel für eine Strömung mit ausgeprägtem Drehstrom

FS Neuwerk Kartei Nr. 405
 Pos: 05-02-75 Lage: GK 34 81680 59 91230

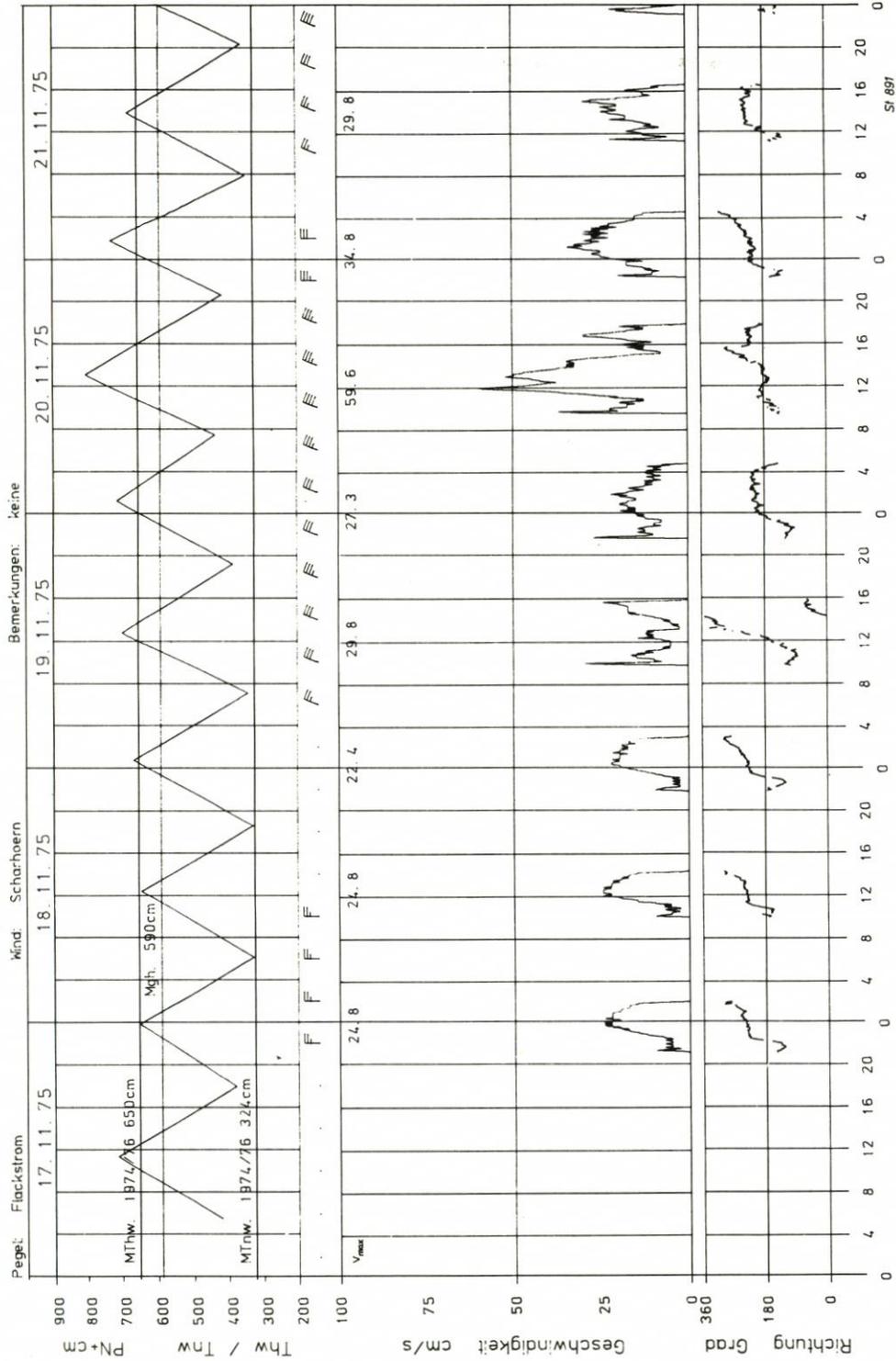


Abb. 12. Beispiel für eine Strömung mit Windeinfluß (Triftstrom)

- Verlauf von Thw und Tnw des Bezugspegels,
 - MThw und MTnw des Bezugspegels,
 - Verlauf der Windverhältnisse über 4 Bft,
 - Ganglinien der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten und
 - Darstellung des Reststromvektorenzuges mit Nordrichtung und Maßstab.
- Die bei den Messungen gewonnenen Meßdaten sind mehrfach gesichert:
- Die Meßfilme verbleiben bei den messenden Dienststellen.
 - Die bei der Umsetzung der Meßwerte von den Filmen auf Lochstreifen gewonnenen Lochstreifen werden bei der BAW aufbewahrt.
 - Die Lochstreifen mit dem Inhalt der Datei SRD.FT. werden ebenfalls bei der BAW aufbewahrt.
 - Die Inhalte der Dateien SRD.LS., SRD.PL. und SRD.FT. werden auf den Sicherungsmagnetbändern des Rechenzentrums der BAW aufbewahrt.
 - Die graphischen Darstellungen der Messungen werden von der BAW auf Mikrofilm bzw. Mikro-fiches gesichert.

4. Meßergebnisse

4.1 Vorbemerkungen

Die Registrierungen der Dauerstrommessungen aus dem Meßprogramm wurden nach dem von GÖHREN (1969) beschriebenen Verfahren aufbereitet. Die Stromgeschwindigkeits- und Stromrichtungsganglinien sind zusammen mit den Tidewasserständen und Windangaben in Abb. 10 bis 12 als Beispiele in Form von Ganglinien dargestellt. Sie bilden die wichtigste Grundlage für die Beurteilung der lokalen Strömungsverhältnisse.

Nach den Vorschlägen von GÖHREN (1969) wurden weiterhin folgende charakteristische Stromkennwerte errechnet:

1. Maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten ($V_{f \max}$ und $V_{e \max}$) und zugehörige Richtungen.
2. Reststromvektoren. Der Reststrom wird definiert als vektoriellcs Integral über die Strömung einer vollen Tidephase.

$$\bar{V} = \int_{K_e}^{K_f} \bar{v} dt$$

\bar{V} ergibt sich auch aus der vektoriellen Addition des Flut- und Ebbestromvektors:

$$\bar{V} = \bar{V}_f + \bar{V}_e$$

Die Dimension ist km/Tide.

3. Der Triftstrom wird nach GÖHREN (1968) als vektorielle Differenz zwischen dem Reststrom der mittleren Tide und dem Reststrom der windbeeinflussten Tide ermittelt. Nach

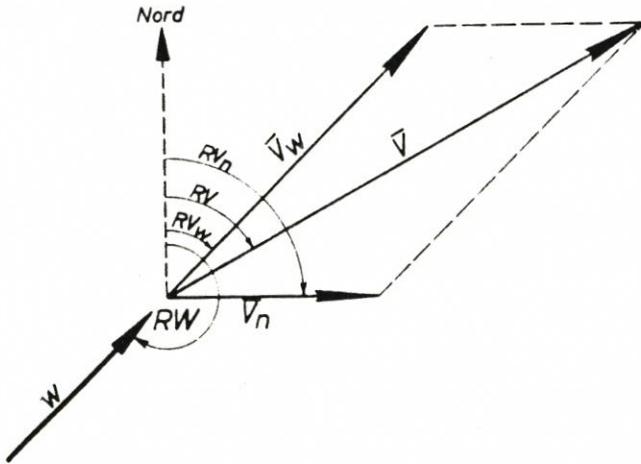
der folgenden Definitionsskizze gilt:

$$\bar{V}_w = \bar{V} - \bar{V}_n$$

\bar{V}_w = Triftstromvektor

\bar{V} = Resultierender Stromvektor der windbeeinflussten Meßstide

\bar{V}_n = Resultierender Stromvektor der mittleren Tide



Die für jede Messung errechneten Stromvektoren sind in gesonderten graphischen Darstellungen aufgetragen, von denen Abb. 13 und 14 Beispiele zeigen.

Pos. 05 - 02 - 75

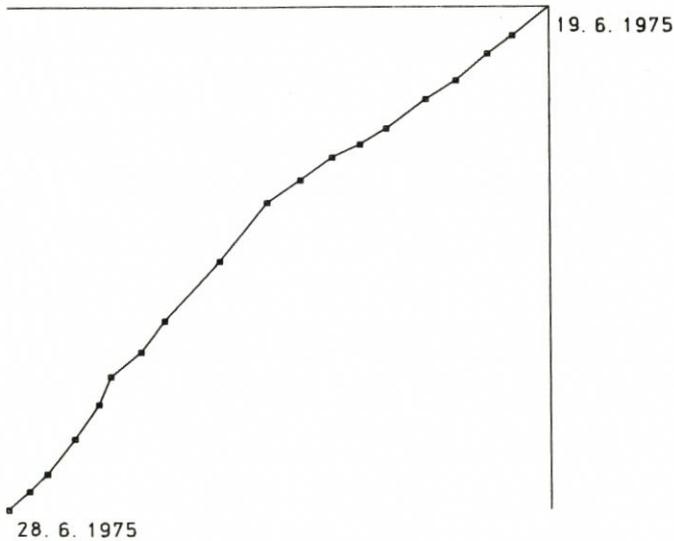
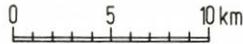


Abb. 13. Beispiel für einen Vektorzug

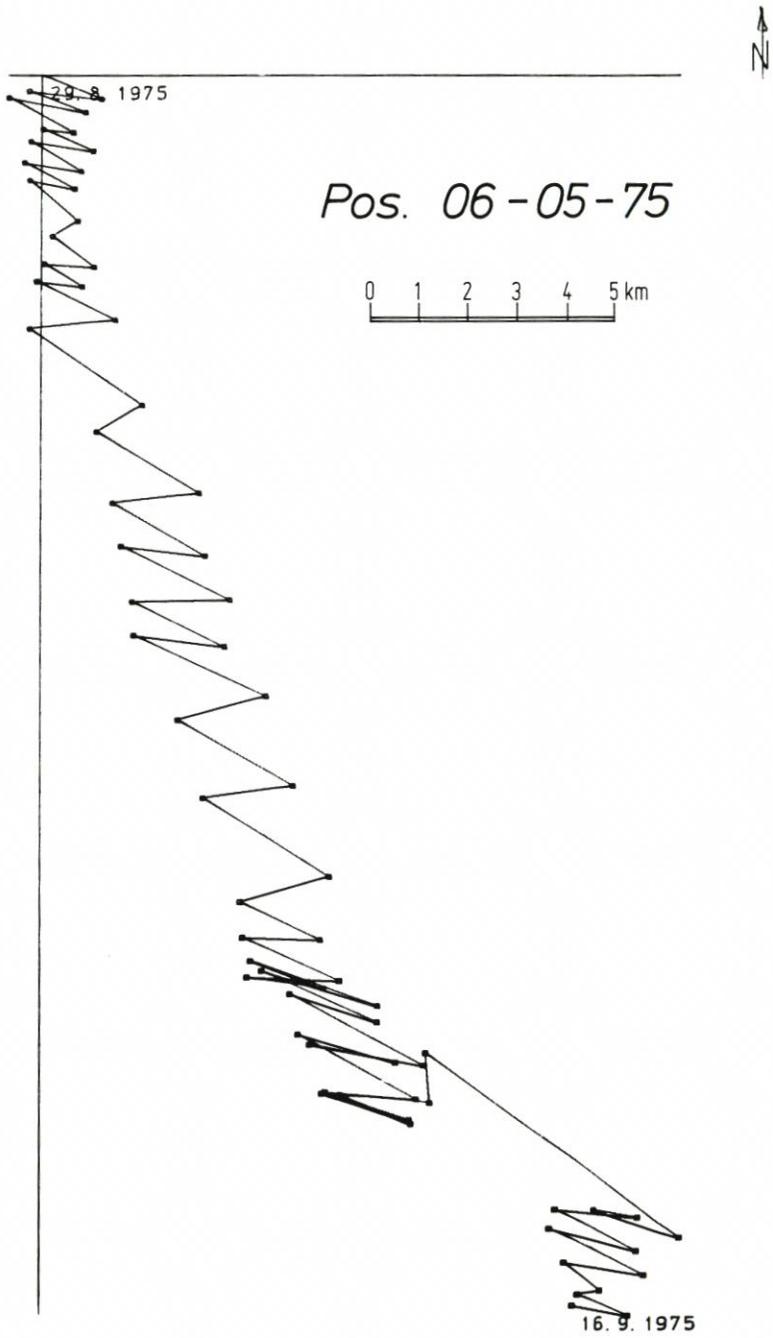


Abb. 14. Beispiel für einen Vektorzug mit Windeinfluß

4.2 Nordfriesisches Wattenmeer

Das Wattgebiet zwischen den beiden Inseln Amrum und Föhr ist durch mehrere Priele stark zergliedert. Das uneinheitliche Bild der Strömungsrichtungen sowohl bei Flut als auch bei Ebbe spiegelt die komplizierten topographischen Gegebenheiten wieder (Abb. 15 bis 18), wie sie auch schon KNOP (1961) für die 1950er Jahre darstellt. Die Größe der Strömungsgeschwindigkeiten erreicht im Mittel 30 cm/s nicht, einzelne Maximalwerte dagegen 65 cm/s bei Flut und bei Ebbe. An vier Meßpositionen zwischen Amrum und Föhr überwiegt der Flut-, an vier anderen der Ebbestrom. Aus dem Ergebnis der Reststromberechnung (Abb. 19) geht jedoch hervor, daß bei allen Meßpositionen ein kräftiger Wasserdurchsatz von Süden nach Norden stattfindet, allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zwischen rd. 0,4 und 5,5 km/Tide.

Der Teil des Meßprofils von der Insel Föhr bis zum Festland ist topographisch klarer als der vorgenannte erste Abschnitt. Die gemessenen Strömungen entsprechen diesem optischen Eindruck durch gleichgerichtete Flut- und Ebberichtungen (Abb. 15 bis 19). Die mittleren Geschwindigkeiten bei Flut sind etwa doppelt so groß wie die bei Ebbe. Dieses Übergewicht der Flut in nordwestliche Richtung führt zu einem Reststrom, der bei allen Stationen nach Richtung und Größe ziemlich einheitlich 3 km/Tide beträgt (Abb. 19). Er schwankt zwischen 280° und 325° in der Richtung und bestätigt damit das qualitative Ergebnis von KNOP (1961). Bei westlichen Winden setzt der Triftstrom zwischen Amrum und Föhr in südöstliche Richtung, also gegen die Reststromrichtung. Zwischen Föhr und dem Festland sind dagegen der Triftstrom bei westlichen Winden wie der Reststrom von der Norderaue nach Nordwesten in das Hörnumtief gerichtet.

Südlich der Süderau und nördlich des Rummellochs, zwischen Hooge und Norderoog Sand, liegen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls unter 30 cm/s (Abb. 15 und 16). Die max. Ebbeströmungen sind deutlich stärker (bis 70 cm/s) als die max. Flutströmungen (Abb. 17 und 18). Östlich von Norderoog Sand wird das Watt bei Flut und Ebbe in entgegengesetzter Richtung zu dem Watt südlich von Hooge überströmt. Der schwache Reststrom (mit rd. 1 km/Tide) zeigt dennoch einheitlich nach Westen (Abb. 19), vom Rummelloch in das Hoogerloch.

Bei West- bis Südwestwinden wird diese Richtung umgekehrt, so daß ein Triftstrom vom Hoogerloch über das Rummelloch in die Norderhever entsteht, was durch Messungen im Profil Süderoog Sand - Pellworm bestätigt wird.

Die Messungen in letzterem Profil, einschl. an einer (Langzeit-)Station seawärts von Süderoog Sand, brachten etwas höhere mittlere Ebbe- als Flutstromgeschwindigkeiten (Abb. 15 und 16). Auch die Maximalwerte liegen bei Ebbe höher als bei Flut (bis 72 cm/s; Abb. 17 und 18). Aus meßtechnischen Gründen konnten hier die Strömungsverhältnisse nur in den auf die Wattwasserscheide zuführenden Watrinnen erfaßt werden. Vom Rummelloch-West gespeist wird das Engelsley, von der Norderhever gespeist werden Blaubargley, Hundje und Steinloch.

Zwischen Süderoog und Pellworm herrscht ein Reststrom von 1 bis 2 km/Tide von der Norderhever nach NW in das Rummelloch. Dagegen überwiegt östlich von Süderoog Sand ein deutlicher Reststrom nach SO (Abb. 19). Das Ergebnis der Messung westlich dieses Sandes bestätigt den von GÖHREN (1974) festgestellten gegenläufigen Reststrom.

Im Wattgebiet nordöstlich von Pellworm werden während des Tideablaufs Wassermassen zwischen den drei Tidebecken Norderhever, Süderau und Rummelloch ausgetauscht: Bei Flut strömt aus Norderhever und Rummelloch einheitlich mit rd. 20 cm/s Wasser in die Süderau. Der Rückstrom bei Ebbe erfolgt mit rd. 30 cm/s über das Beensley, eine sich über

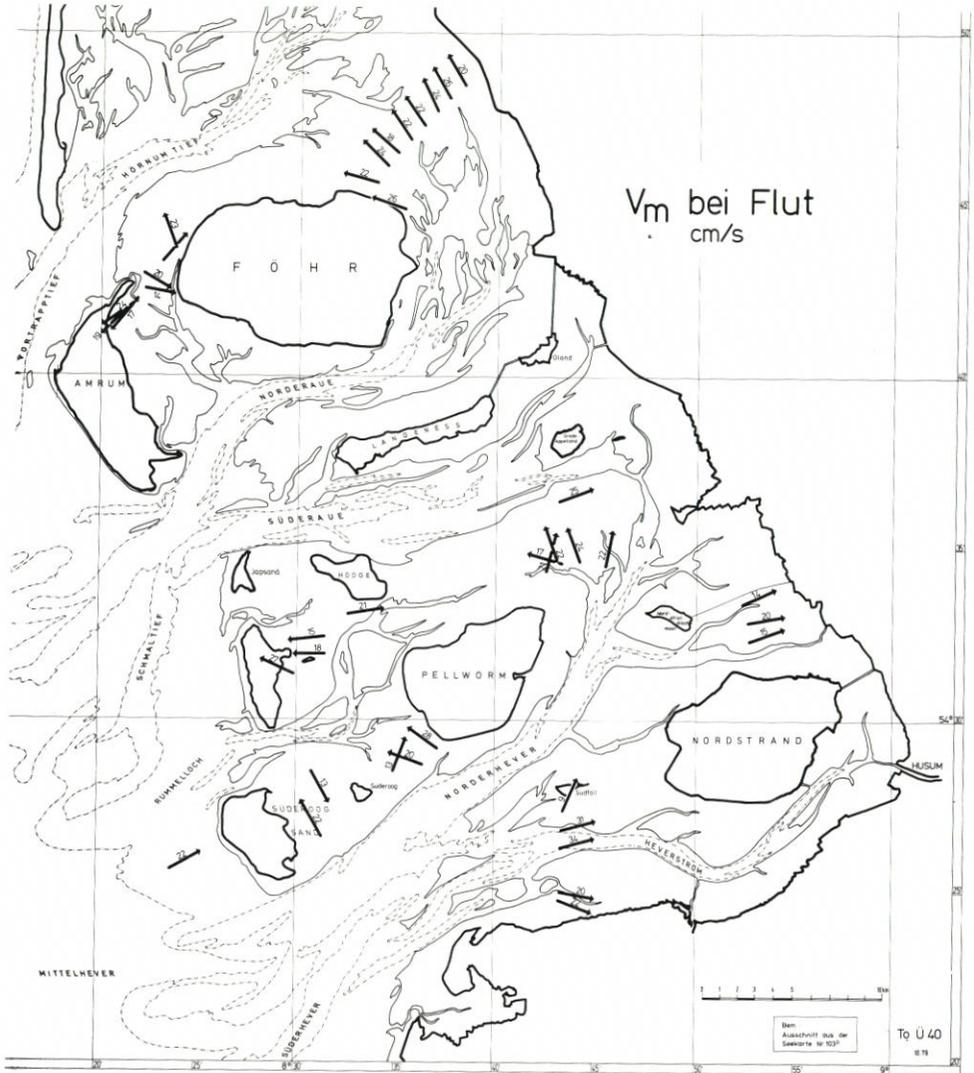


Abb. 15. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Flut, nördl. Teil

die Wattwasserscheide hinweg bildende Watttrinne, in die Norderhever und z. T. weiter in das Rummelloch (Abb. 15 bis 18). Hierbei scheint sich eine Ringströmung einzustellen, weil auch bei Ebbe Wasser vom Rummelloch in Richtung Süderaua fließt.

Wie bei den mittleren überwiegt auch bei den maximalen Geschwindigkeiten der Ebbstrom. Er erreicht Werte über 90 cm/s, während es bei Flut nur rd. 60 cm/s sind.

Die Dominanz des Ebbstroms bestimmt die Reststromverhältnisse: Von der Norderhever setzt ein Strom mit rd. 6 km/Tide über das Watt nach Norden in die Süderaua, gleichzeitig bildet sich ein Reststrom von rd. 3 km/Tide vom Beensley nach Westen in das Rummelloch. Die Norderhever ist in diesem Bereich also eine ausgesprochene Flutstromrinne (Abb. 19). Diese ausgeprägten Verhältnisse haben sich in den letzten 20 Jahren nicht geändert, wie ein Vergleich mit den Ergebnissen bei KNOP (1961) zeigt.

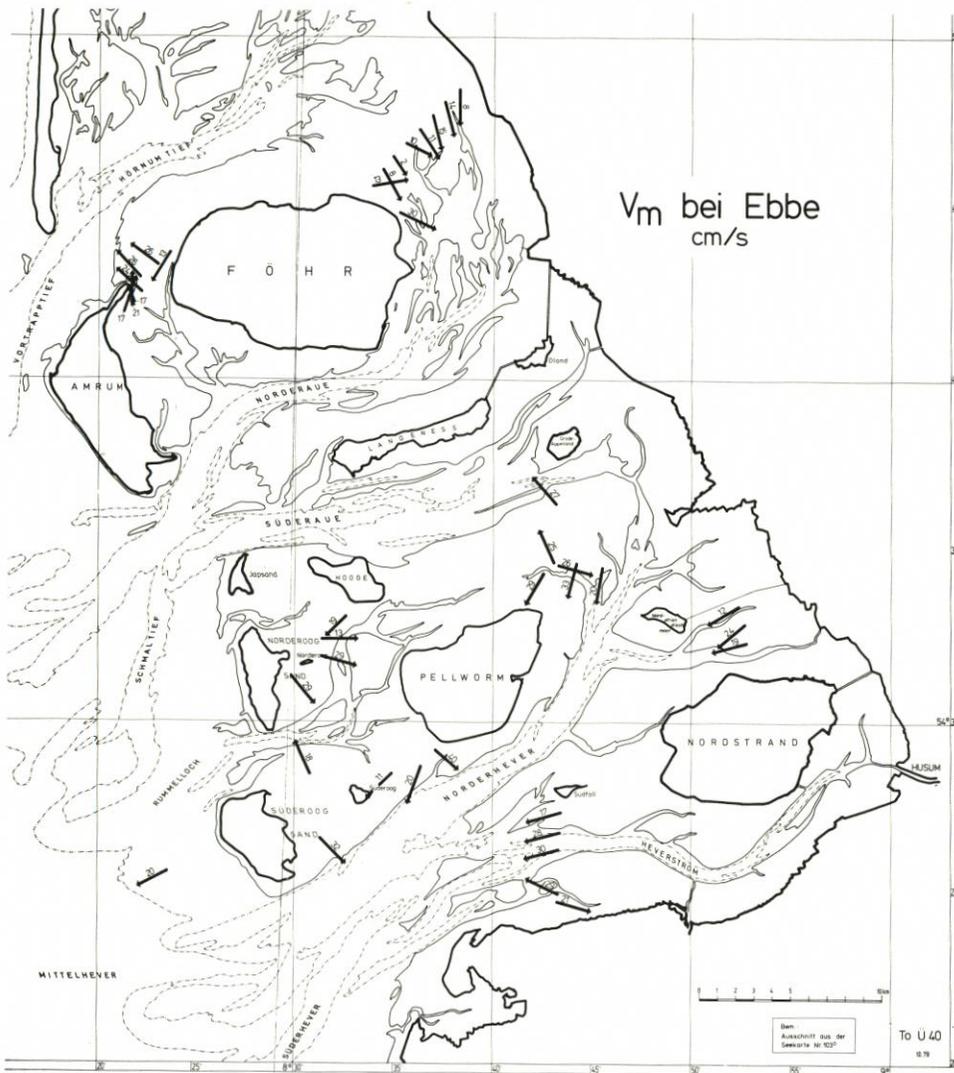


Abb. 16. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Ebbe, nördl. Teil

Bei Winden zwischen West bis Südost wird ein Versatz von der Norderhever in die Süderauhe deutlich, also ebenfalls nach Norden, dagegen aus dem Rummelloch in die Süderauhe nach Nordosten.

Strömungen und Reststrom im Watt zwischen Nordstrandischmoor und der nahen Küste sind nur schwach ausgeprägt (Maximalwerte um 30 cm/s, Reststrom bei 1 km/Tide, Abb. 15 bis 19).

Das Heverstrom-Profil südlich von Südfall zeigt mittlere Strömungsgeschwindigkeiten bei 30 cm/s in der Rinne und um 20 cm/s auf dem Watt (Abb. 15 und 16), bei einer Richtungsdivergenz unmittelbar unter der Küste Eiderstedts. Die Höchstwerte erreichen über 90 cm/s im tieferen Wasser und etwa 40 cm/s im Watt (Abb. 17 und 18). Die Werte sind sämtlich erheblich niedriger als die von KNOP (1961) in diesem Gebiet gemessenen.

Der Reststrom ist in der Rinne mit etwa 2 km/Tide nach Osten (also stromauf) und in den nördlich bzw. südlich angrenzenden Watten mit 2 bzw. rd. 4 km/Tide nach NW (also stromab) gerichtet (Abb. 19).

4.3 Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Marnener Plate

Das Wattgebiet zwischen den Mündungen der Elbe und Eider wird gegliedert durch den dominanten Wattstrom Piep mit seinen landnahen Prielzweigen Wöhrdener Loch, Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch, die bis in die Dithmarscher Bucht hineinreichen. Das nördlich anschließende Wesselburener Watt wird geteilt durch das Wesselburener Loch.

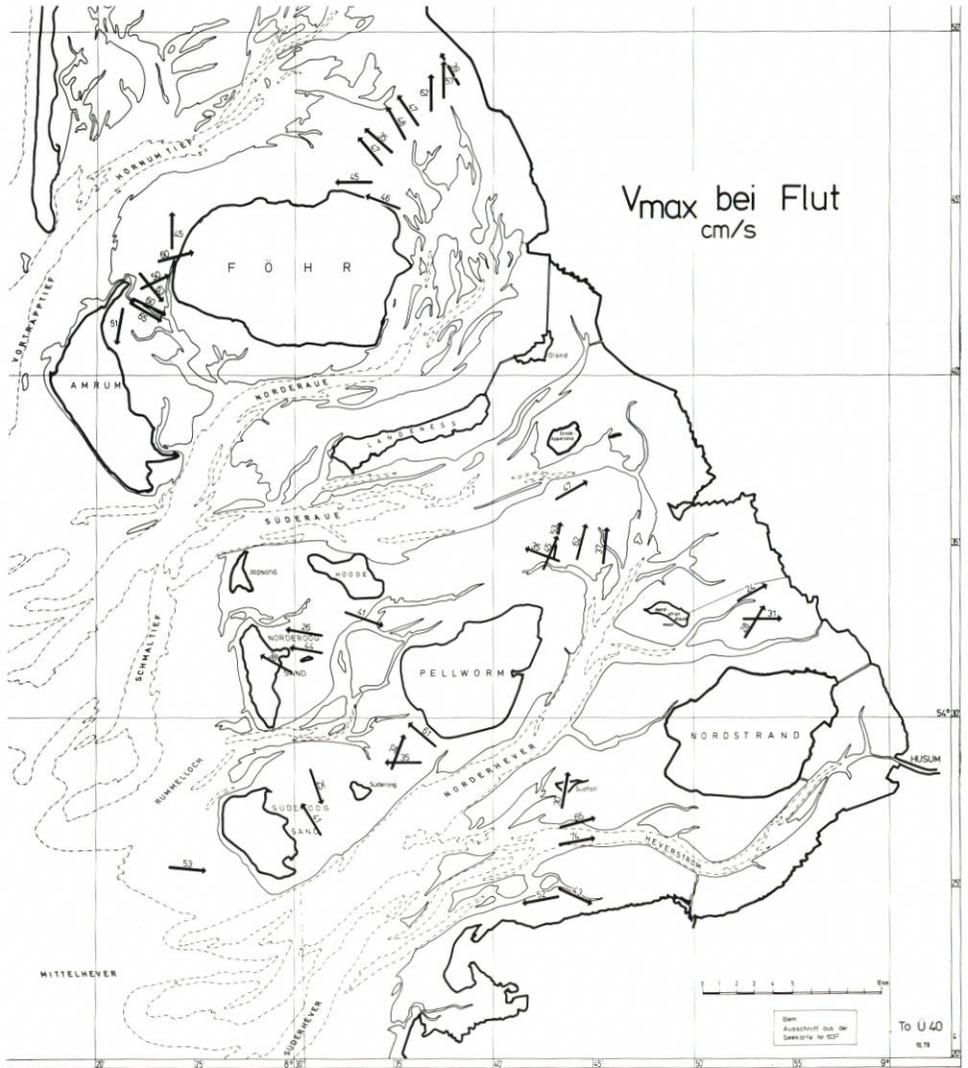


Abb. 17. Maximale Strömungswerte bei Flut, nördl. Teil

Südlich der Piep folgen nach dem Bielshövensand der Flakstrom, die Insel Trischen mit der Marner Plate, das Neufahrwasser, dann Mittelplate und Hakensand.

Die Meßstandorte wurden so gewählt, daß möglichst die Wattrücken erfaßt und von diesen Verbindungen durch die Wattströme zwischen den Außensänden hergestellt wurden. Darüber hinaus wurde ein Profil zur seawärtigen Begrenzung der Dithmarscher Bucht zwischen Büsum und Friedrichskoog-Spitze gelegt, und es wurden die Prielenden im Innern der Dithmarscher Bucht erfaßt (Abb. 7).

Südlich von Eiderstedt sollten die Strömungsverhältnisse in einem gemeinsamen Querprofil durch Außeneider und Wesselburener Loch mit anschließenden Wattten gemessen werden. Die Außeneider ist als stark veränderlich bekannt; das Wesselburener Loch gilt dagegen als ziemlich stabil.

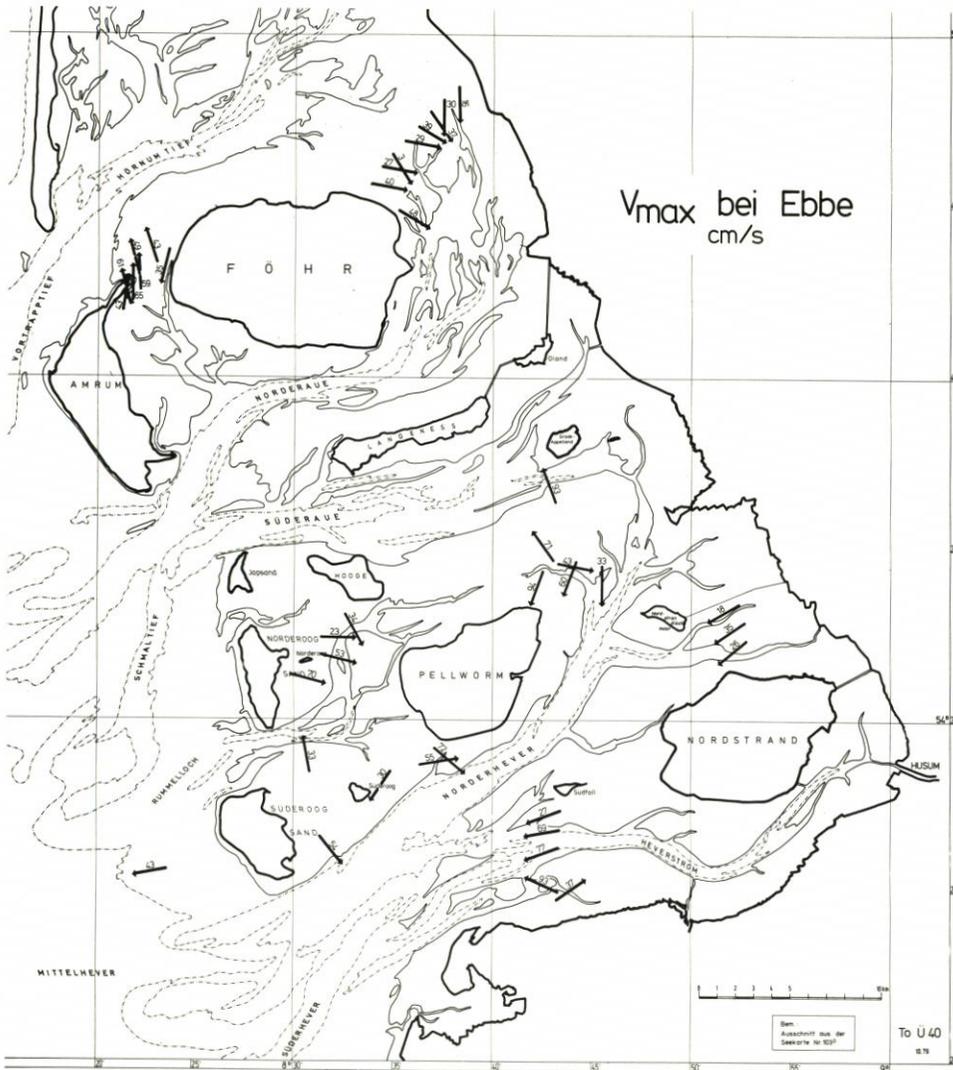


Abb. 18. Maximale Strömungswerte bei Ebbe, nördl. Teil

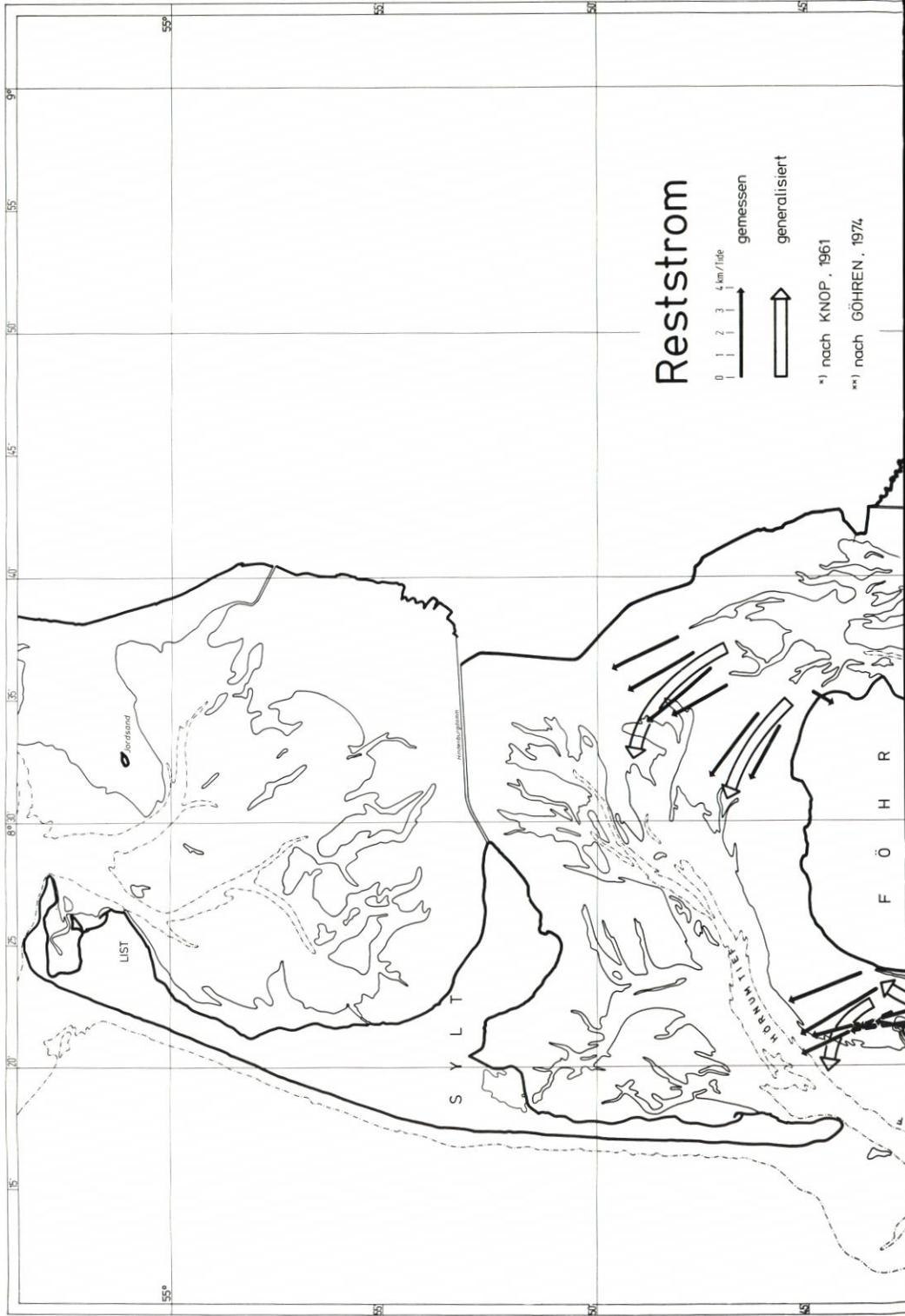




Abb. 19. Reststromkarte, nördl. Teil, ergänzt

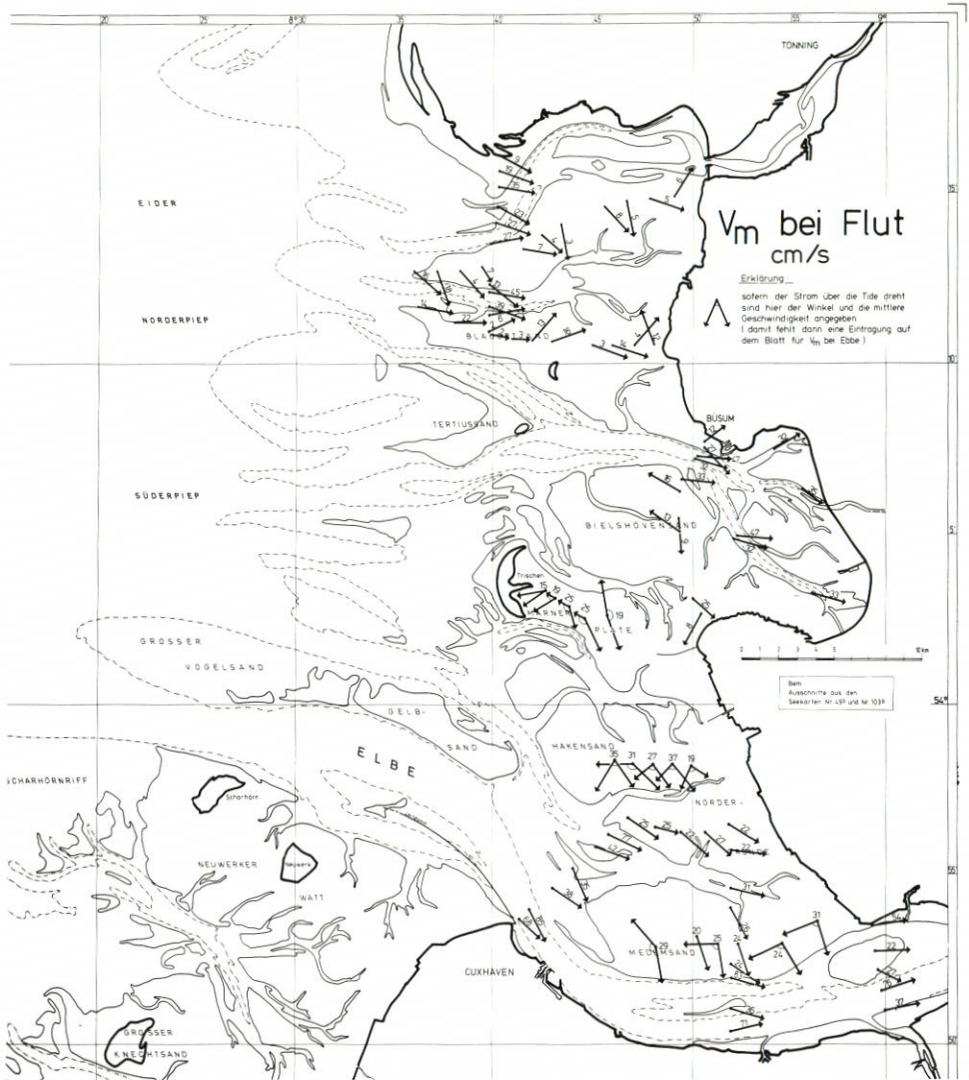


Abb. 20. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Flut, südl. Teil

Die Strömungen sind, wie zu erwarten, bei Flut ostwärts und bei Ebbe westwärts gerichtet, mit topographisch bedingten Ablenkungen (Abb. 20 bis 23). Nördlich der Eiderrinne treten allgemein größere Ebbe- als Flutstromgeschwindigkeiten auf. Südlich davon, einschließlich Wesselburener Loch, überwiegt der Flutstrom, und auf dem Blauortsand ist der Ebbestrom wieder stärker als der Flutstrom. Auf den Wattflächen liegen die mittleren Geschwindigkeiten bei Werten nur bis 20 cm/s, während die Maxima bis 30 cm/s erreichen. In Außeneider und Wesselburener Loch dagegen erreichen die mittleren Geschwindigkeiten zwischen 20 und 40 cm/s und die maximalen knapp unter 60 cm/s (Eider) bzw. um 80 cm/s (Wesselburener Loch).

Aus den Restströmen erkennt man die unterschiedliche Topographie von Eidermündung und Wesselburener Loch: Nördlich der Eiderrinne prägen einige flache Nebenrinnen das Strömungsbild, und die Restströme sind hier ausgeprägt und weisen zur Hauptrinne hin. Im

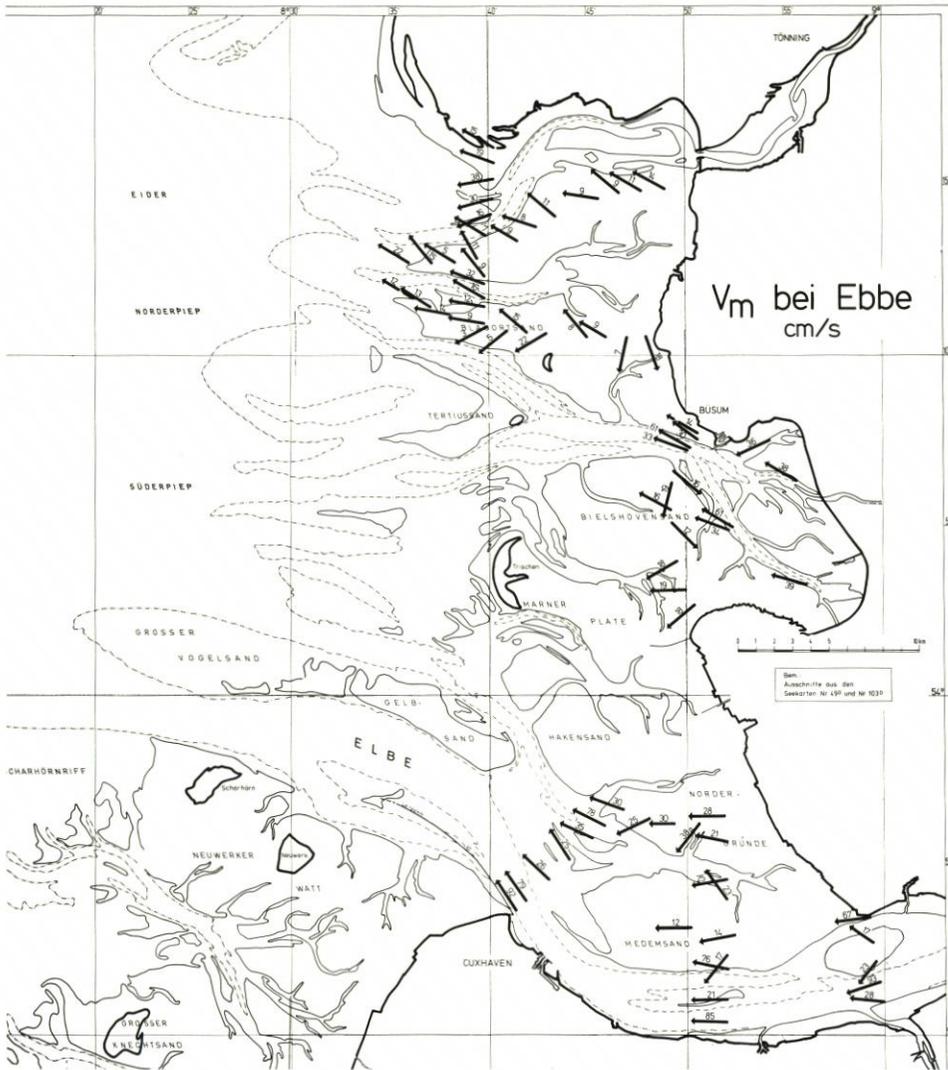


Abb. 21. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Ebbe, südl. Teil

Wesselburener Loch sind die Restströme mit 2 km/Tide stromauf, auf den angrenzenden Watten mit 1 bis 2 km/Tide seewärts gerichtet; sie verlaufen parallel zur Rinne (Abb. 24).

Das Meßprofil auf dem Wesselburener Watt, dem Watrück zwischen Außeneider und dem Wattenstrom Wesselburener Loch, zeigt, daß das Watt von der Eider her beflutet wird und daß bei Ebbe das Wasser wieder in die Eider abfließt (Abb. 20 bis 23). Die einzige Ausnahme bildet die östlichste Station in Landnähe südwestlich des Eider-Sperwerks. Hier sind beide Strömungsvektoren zur Eider hin gerichtet. Die Flutrichtung entspricht dort dem Verlauf eines kleinen Wattenfahrwassers zwischen Außeneider und Wesselburener Loch. Mit einer Ausnahme sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe größer als bei Flut, beide erreichen jedoch nur Werte um 10 cm/s, während die Maxima nicht über 20 cm/s steigen.

Daraus folgt auf Abb. 24, daß die Reststromvektoren auf einen sehr geringen Wasserver-

satz in die Außeneider hinein hindeuten, der praktisch vernachlässigt werden kann.

Südlich des Wesselburener Lochs liegt das Meßprofil 13 auf dem Wattrücken des Blauortsandes. Hier ist das Strömungsbild sehr uneinheitlich. Bei Flut herrscht die Strömung in östliche Richtung vor (Abb. 20 und 22), bei Ebbe streut die Strömung zwischen 190° und 320° stark, das Wasser fließt teils in das Wesselburener Loch, teils in die Norderpiep ab (Abb. 21 und 23). An den meisten Meßstationen ist die Ebbestromgeschwindigkeit größer als die Flutstromgeschwindigkeit, sowohl bei den mittleren als auch bei den Maximalgeschwindigkeiten. Erstere erreichen Werte bis 15 cm/s, letztere bis 30 cm/s, also nur unwesentlich mehr als auf dem nördlich benachbarten Wattrücken (s.o.).

Entsprechend schwach ist der Reststrom ausgebildet (Abb. 24). Er erreicht nur im Blauort-Priel (nordwestlich von Blauort) mit 2,5 km/Tide nach Norden einen nennenswerten Betrag und ist sonst vernachlässigbar klein.

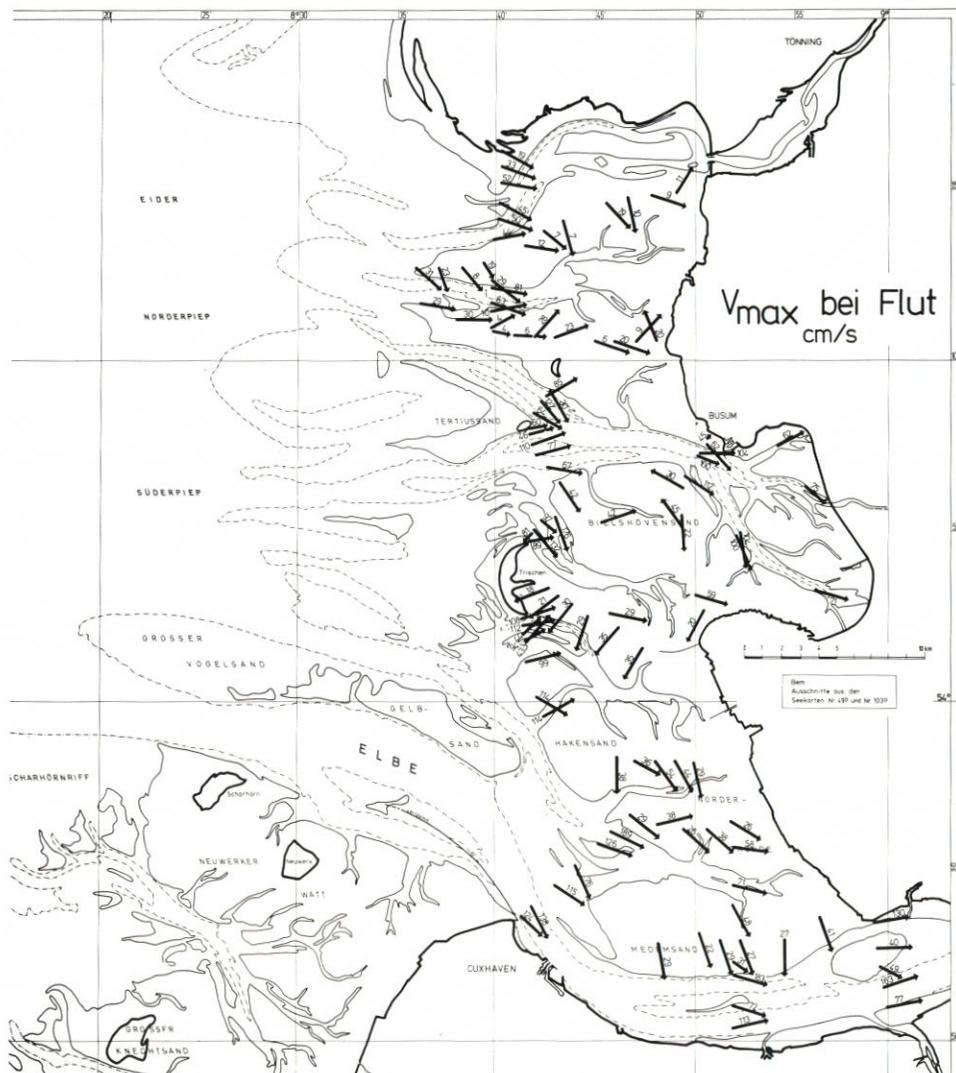


Abb. 22. Maximale Strömungswerte bei Flut, südl. Teil

In der Piep östlich des Tertiusandes liegen – ebenso wie aus dem Flakstrom nordöstlich und dem Neufahrwasser südlich von Trischen – nur die maximalen Tidestromgeschwindigkeiten ausgewertet vor (zwischen 46 und 124 cm/s, Abb. 22 und 23).

Der Reststrom ist hier im südlichen Querschnittsteil mit rd. 2 km/Tide landwärts gerichtet. Der seewärtige Reststrom im nördlichen Querschnittsteil wird durch den Tertiusand geteilt in die Norderpiep hinein und in den nördlichen Teil der Süderpiep (Abb. 24). Dies entspricht genau den Verhältnissen, wie sie GÖHREN (1971) für die Kleinen Knechtsände und die Robbenplatten als V-förmige Sandbänke nachwies. Analog dazu ist auf Abb. 24 auch ein landwärts, auf Tertius hin gerichteter Reststrompfeil angedeutet.

In der Piep südlich von Büsum liegen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei 30 bis 60 cm/s, die maximalen bei 100 bis 150 cm/s (Abb. 20 bis 23).

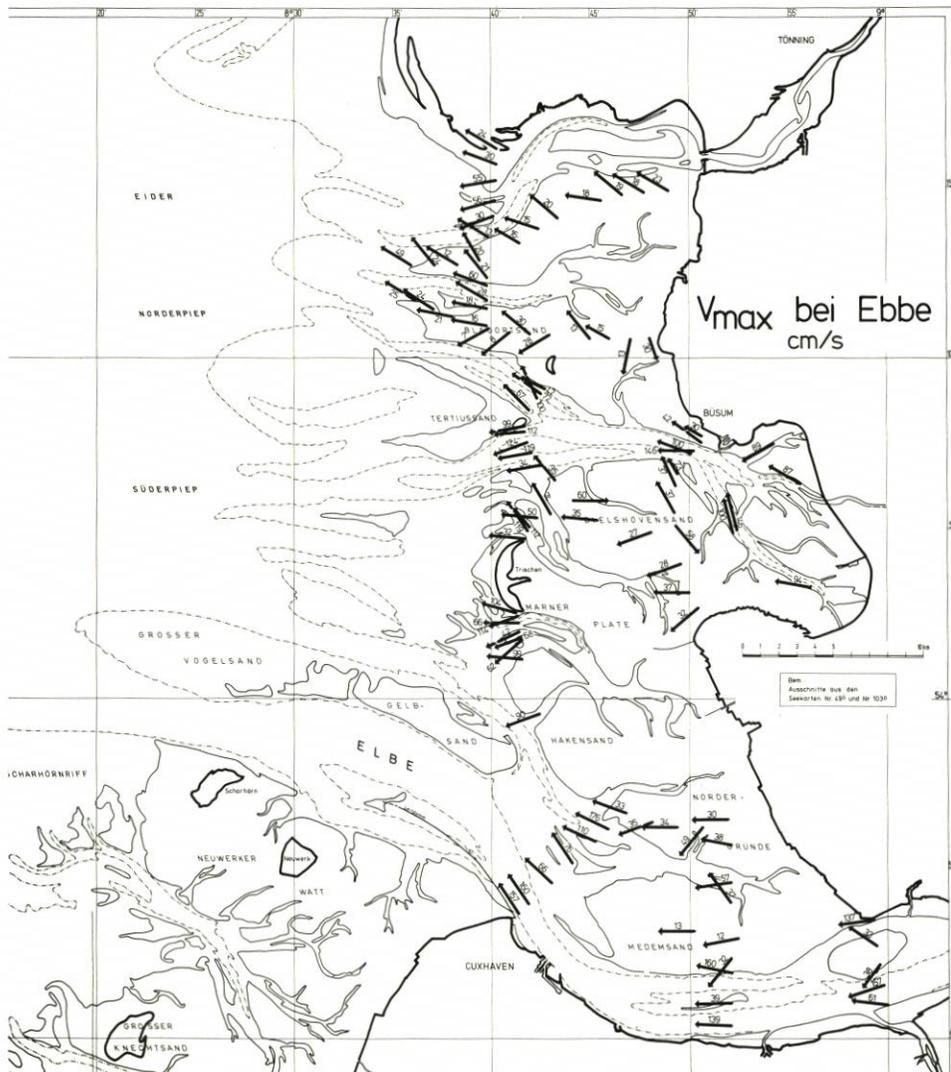


Abb. 23. Maximale Strömungswerte bei Ebbe, südl. Teil

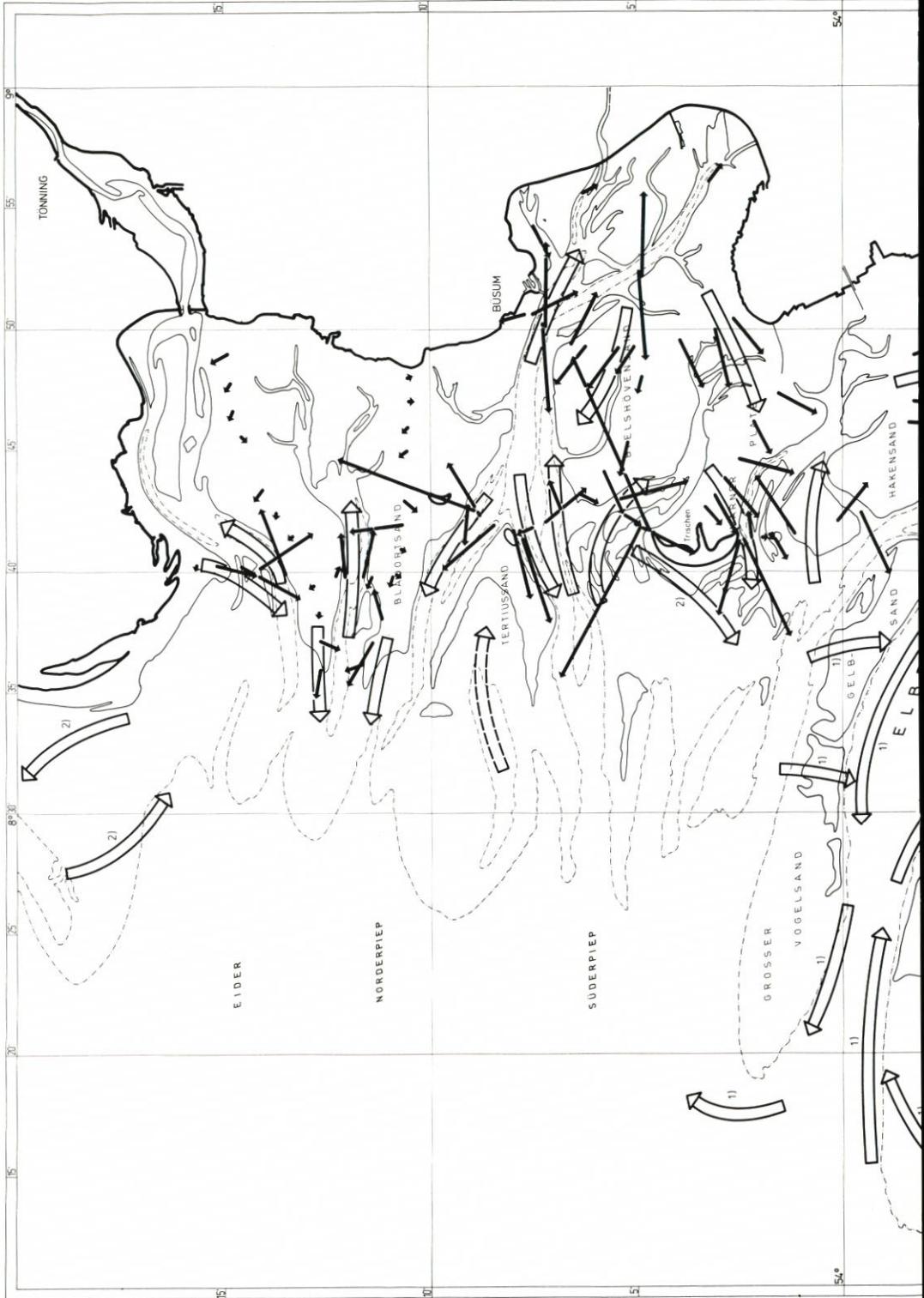




Abb. 24. Reststromkarte, südl. Teil, ergänzt

Der Reststrom ist im nördlichen Querschnittsteil in die Dithmarscher Bucht hinein gerichtet, im südlichen Querschnittsteil uneinheitlich (Abb. 24).

In den Prielen der Dithmarscher Bucht wurden mittlere Geschwindigkeiten zwischen 30 und 60 cm/s gemessen; die Maxima erreichten Werte zwischen 60 und 150 cm/s (Abb. 20 bis 23).

Die Strömungen im Flakstrom erreichen bei starker Umlenkung am Westhang des Bielshövensandes zwischen 70 und 180 cm/s (Abb. 22 und 23). Im nördlichen Querschnittsteil ist der Reststrom stromauf, im südlichen stromab gerichtet (Abb. 24).

Auf dem Bielshövensand sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (unter 20 cm/s) ebenso niedrig wie auf den nördlich anschließenden Wattrücken (Abb. 20 und 21). Die maximalen Geschwindigkeiten dagegen erreichen Werte bis 60 cm/s und sind damit erheblich stärker (Abb. 22 und 23).

Der Reststrom weist im nördlichen Wattgebiet aus dem Sommerkoog-Steertloch über den Sand mit rd. 2 km/Tide in die Piep, vor Friedrichskoog dagegen mit rd. 2,5 km/Tide nach Südwesten über den Oberlauf des Flakstromes und über die Marner Plate hinweg in das Neufahrwasser.

4.4 Marner Plate bis Unterelbe

Auf der Marner Plate, dem Hakensand, den Nordergründen und dem Medemsand wurden die Strömungsverhältnisse jeweils auf den Wattwasserscheiden gemessen (Abb. 7). Ergänzend dazu sind Ergebnisse aus drei Profilen in der Unterelbe aufgenommen worden, die freundlicherweise vom Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven zur Verfügung gestellt wurden.

In den Watten des weiteren Elbmündungsgebietes sind Drehströmungen ohne ausgeprägte Flut- und Ebephase sehr häufig (Abb. 20). Die Geschwindigkeiten liegen dabei im Mittel zwischen 15 und 40 cm/s, im Maximum zwischen 20 und 60 cm/s (Abb. 20 bis 23). Die vorherrschende Strömungsrichtung ist Südwest bis Südost.

Entsprechend ist der Reststrom in diesen Wattgebieten ausgebildet (Abb. 24): Er setzt mit rd. 2 km/Tide vom Flakstrom über die Marner Plate nach Südwest in das Neufahrwasser und aus dem Oberlauf dieses Wattstromes etwa gleich stark über Hakensand und Nordergründe nach Süden in das Klotzenloch. Auf dem Medemsand weist der Reststrom mit 2 bis 3 km/Tide nach Südost in die Unterelbe.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Neufahrwasser südlich von Trischen liegen zwischen 40 und 120 cm/s (Abb. 22 und 23). Der Reststrom ist unmittelbar unter Trischen mit rd. 4 km/Tide seewärts gerichtet, in den weiter südlich anschließenden Nebenarmen dagegen landwärts (Abb. 24).

In der tiefen Rinne der Unterelbe liegen die mittleren Geschwindigkeiten bei Werten um 80 bis 90 cm/s, reichen aber im Maximum bis an 160 cm/s (Abb. 20 bis 23).

Der Reststrom weist im nördlichen Querschnittsteil – trotz des hier zu erwartenden verstärkten Oberwasserabflusses – als Folge der Überströmung des Medemsandes stromauf. Im südlichen Querschnittsteil ist ein sehr starker seewärts gerichteter Reststrom vorhanden (Abb. 24). Zur Beurteilung der weiträumigen Verhältnisse sind im übrigen auch die aus früheren Messungen gewonnenen Reststromsysteme des Außenelbegebietes einschließlich der Watten bis zum Knechtsand nach GÖHREN (1969, 1974) sowie KOCH und LUCK (1973) aufgenommen.

4.5 Zusammenfassung

Die beste großräumige Übersicht über die mittleren Tideverhältnisse geben die Reststromkarten auf Abb. 19 und 24.

Da aus dem nordfriesischen Wattenmeer nur erst ein Teil der Messungen analysiert werden konnte, kann nur für einzelne Gebiete etwas ausgesagt werden, so etwa über den gegenläufigen Reststrom vor Amrum (GÖHREN, 1974) sowie den zwischen Amrum und der Küste stark nordwärts versetzenden Strom. Ähnliche Verhältnisse finden sich vor Süderoog Sand bzw. zwischen diesem, Pellworm und der Küste mit ausgeprägtem Reststrom nach Nordost. Über die Strömungen in Norder- und Süderauw ebenso wie in Norder- und Süderhever wird zu einem späteren Zeitpunkt ausführlich zu berichten sein.

Wesselburener Watt und Blauortsand trennen die Eider, das Wesselburener Loch und die Piep fast vollständig voneinander. Dagegen tritt aus der Piep – teilweise auch über den Flakstrom – Wasser über die Marner Plate nach Südosten über. Aus dem Neufahrwasser bildet sich ein durchgehender Reststrom über die südlich angrenzenden Watten bis in die Unterelbe, so daß deutlich wird, daß von hier ein gewisser Teil der Flutwassermenge die Elbe erreicht. Die Nordwest-Südost-Lage der beiden großen Priele zwischen diesen Watten unterstreicht diese Tatsache. Man kann somit den gesamten Watt- und Prielkomplex südöstlich von Trischen als zur Unterelbe gehörig ansprechen, wie man ja geographisch den Mündungstrichter der Elbe mit der Verbindung Kugelbakedamm-Trischendamm begrenzen kann.

Der südlich setzende Reststrom ist auch auf dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand vorhanden. Selbst im Neuwerker Watt herrscht er vor, während im Knechtsand-Watt der Reststrom nach Norden weist. Vor diesen Wattkomplexen wurden rechtsdrehende, vor Eiderstedt dagegen linksdrehende Reststromsysteme festgestellt (GÖHREN, 1974); vor Trischen deuten die Messungen ebenfalls auf ein rechtsdrehendes System (Abb. 24).

5. Erfahrungen und Hinweise

5.1 Verfahren und Meßtechnik

Bei diesem Meßprogramm konnte der Personalaufwand bei der Auswertung gegenüber früheren Messungen erheblich reduziert werden: Die bisherige manuelle Übertragung der Meßdaten von den Registrierfilmen auf maschinenlesbare Datenträger wurde durch ein inzwischen entwickeltes Code-Auswertegerät für die direkte automatische Umsetzung der Daten ersetzt (KOCH u. NIEMEYER, 1977), was auch zu einer Beschleunigung der Auswertung beitrug.

Für die Analyse der Messungen sollte ein bewährtes, von GÖHREN (1965) entwickeltes Programm zur ADV-Auswertung benutzt werden, das allerdings nicht in einer maschinenkompatiblen Programmiersprache vorlag. Daher wurde nach den gleichen Grundsätzen in der BAW ein Auswerteprogramm in der Programmiersprache ALGOL 60 erstellt.

Messung und Auswertung liefen folgendermaßen ab:

- Meßdurchführung durch die betreuende Dienststelle,
- Filmentwicklung bei der FSIK Norderney,
- Filmlesung bei der BAW-AK, Hamburg, und Übertragung auf Lochstreifen,
- Erstdrucke der Daten durch die BAW, Karlsruhe,
- Eingabe zusätzlicher hydrologischer und meteorologischer Randbedingungen,
- Kontrollen durch die betreuende Dienststelle,



Abb. 25. Stark verkrautetes Meßgerät

- Fehlerkorrektur durch die BAW-AK,
- Endausdrucke durch die BAW.

Üblicherweise standen die Geräte zwei bis drei Wochen auf einer Position. Die zur Ergänzung angelegten Langzeitprofile über ein bis zwei Jahre sind auf Abb.2 besonders gekennzeichnet.

5.2 Erfahrungen mit der Meßdurchführung

Zu Beginn des KFKI-Meßprogramms lagen bereits 10jährige gute Erfahrungen mit dem Wattstrommesser vor, und auf dem Gerätemarkt war keine Verbesserung erkennbar. Vor- und Nachteile des Geräts schildert wiederum GÖHREN (1969):

„Wattstrommesser erfordern keine personalmäßig aufwendigen Meßeinsätze, ermöglichen synoptische Messungen an mehreren Stationen und liefern lange Meßreihen, aus denen die periodischen (astronomischen) und aperiodischen (meteorologischen) Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse abgeleitet werden können. Besonders wertvoll sind in diesem Zusammenhang Registrierungen bei Sturmwetterlagen, da jede unmittelbare Beobachtung in solchen Situationen ausfällt. Mit Recht wird der Aussagewert sogenannter ‚Schönwettermessungen‘ von vielen Forschern angezweifelt.

Ein Nachteil der Dauerstrommeßgeräte besteht darin, daß man sie nur auf eine bestimmte Meßhöhe über Grund einstellen kann und somit nicht in der Lage ist, die Stromverteilung in der Vertikalen zu erfassen (wie zum Beispiel bei Profilmessungen mit Meßflügeln).“

Generell wurden diese Erfahrungen bestätigt. Im einzelnen läßt sich noch folgendes ergänzen:



Abb. 26. Muschelbewuchs und Verkrautung

Die Dauerstrommeßgeräte können nicht völlig wartungsfrei über mehr als zwei bis drei Wochen auf der Meßposition belassen werden. Seegrass und Algen können sich festsetzen und die beweglichen Teile blockieren (Abb. 25 und 26), so daß die Meßergebnisse verfälscht oder gar keine Ergebnisse mehr erzielt werden. Auch die Reinigung von Seepockenbewuchs ist bei längerem Einsatz erforderlich. Gelegentlich sind die Geräte mechanischen Belastungen ausgesetzt, denen sie nicht gewachsen sind. Bei Windwetterlagen lösten sich bei einigen Geräten die Leitbleche vom Gehäuse, oder die Arretierung für den Propeller brach. Bei den 16 neu beschafften Geräten waren die Drehachsen, mit denen sie am Meßgerüst befestigt waren, zunächst zu schwach und mußten von der Herstellerfirma gegen neue ausgewechselt werden. Die Kunststoffpropeller sind durch feine Risse gefährdet, die gelegentlich auftreten.

Die Registriereinheiten im Gehäuse wurden bei einigen Geräten wahrscheinlich durch Erschütterungen bei Wellenbelastungen gestört. So lösten sich Befestigungsschrauben für die Optik oder den Kompaß, so daß der Registrierfilm nicht gleichmäßig ausgeleuchtet wurde oder die registrierten Werte unvollständig und nur zum Teil verwertbar waren. Außerdem traten gelegentlich Fehlbelichtungen (Doppelbelichtungen oder Mehrfachbelichtungen) auf. Der Filmtransport in den Kassetten war nicht immer störungsfrei. Das erfordert für die Betreuung der Geräte sachverständiges und erfahrenes Personal, da die Einstellung der optischen Registrierung sehr schwierig ist.

Neben gerätetechnischen Erfahrungen wurden solche organisatorischen Charakters in starkem Maße gesammelt, da

- mehrere Profile von mehreren Dienststellen gleichzeitig betreut wurden,
- man sich gegenseitig mit Schiffen, Geräteträgern und Bojen aushelfen mußte und
- die KFKI-eigenen Geräte von verschiedenen Dienststellen eingesetzt wurden.

Die Erfahrungen zeigen, daß schon auf dem „kurzen Dienstwege“ und insbesondere unter den Mitgliedern der Projektgruppe stets zufriedenstellend kurzfristige Absprachen möglich waren.

Die Zusammenarbeit der messenden Dienststellen und die Durchführung gemeinsamer Meßprogramme wird in den letzten Jahren allerdings dadurch erschwert, daß die Dienststellen aus personellen und finanziellen Gründen gezwungen sind, sich weitgehend auf die notwendigsten hydrologischen Arbeiten ihres Aufgabengebietes zu beschränken. Dies betrifft insbesondere auch die Aufbereitung und Auswertung der gewonnenen Daten sowie deren ingenieurwissenschaftliche Bearbeitung. Es bleibt ihnen somit wenig Spielraum für Koordinierung und Ergänzungen.

5.3 Erfahrungen mit der Datenaufbereitung

Das Ziel der Aufbereitung, nämlich Ganglinien- und Reststromdarstellung (Abb. 11), ist längst als sinnvoll und aussagekräftig erprobt. Der Weg dahin ist jedoch immer noch schwierig und lang (siehe unter Pkt. 2). Er kann nach dem heutigen Stand der Technik dadurch verkürzt werden, daß die Daten unmittelbar im Meßgerät auf Kassette gespeichert werden (s. u.). Da sich außerdem in der Anlaufphase fehlende Kapazitäten im Rechenzentrum der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe negativ auswirkten, sind erst recht spät die notwendigen Voraussetzungen für eine zügige Bearbeitung vorhanden gewesen. Inzwischen wurde bei der BAW ein schnellerer Rechner mit größerer Speicherkapazität installiert, wodurch diese Schwierigkeiten behoben sind. Zu lang war auch in den ersten Jahren der Zeitraum von der Messung bis zum Endausdruck. Dieser wird ab 1980 dadurch erheblich abgekürzt, daß die entwickelten Registrierfilme an einem Ort (in Hamburg) geprüft und auf Lochstreifen abgelesen werden. Der Erstausdruck erfolgt ebenfalls am gleichen Ort, nämlich am Terminal in Hamburg-Rissen. Dieses aus KFKI-Mitteln für ein anderes Projekt beschaffte Terminal kann die zusätzliche Arbeit durchaus bewältigen.

Die Kontrolle der Erstausdrucke müßte von der BAW-AK ausgeführt und die messenden Dienststellen nur bei solchen Messungen eingeschaltet werden, für deren Kontrolle und Einordnung spezielle örtliche Erfahrungen notwendig sind. Diese Verfahrensweise hätte den Vorteil, daß der Transport der Erstausdrucke von der BAW-AK zu den messenden Dienststellen und zurück entfällt und die Fehlerkorrektur für alle Messungen nach den gleichen Prinzipien erfolgt. Außerdem hat die Erfahrung gezeigt, daß auch die messenden Dienststellen aus Personalmangel in den seltensten Fällen in der Lage sind, die Korrekturen sofort auszuführen, so daß dadurch weitere erhebliche Zeitverzögerungen auftreten.

Die Fehlerkorrekturen in den Dateien werden weiter wie bisher von der BAW-AK ausgeführt.

Ob das Plotten der endgültigen Darstellung besser auch am Terminal in Rissen oder wie bisher in Karlsruhe erfolgen sollte, bleibt noch zu prüfen. Beide Möglichkeiten sind jedoch nach der Beschaffung eines Plotters für das Terminal in Rissen gegeben.

Die je nach der Fehleranzahl mehr oder weniger zeit- und personalaufwendige Fehlerkorrektur zu automatisieren, ist nicht empfehlenswert und teilweise auch nicht möglich. Wenn sich auch nicht alle Datenfehler vermeiden lassen, so ist doch die Auswahl möglichst fehlerfrei arbeitender Meß- und Aufzeichnungsgeräte ein wesentlicher Faktor für die Länge der Bearbeitungszeit.

In Zukunft wird die Datenaufbereitung an der Tatsache zu messen sein, daß bereits heute eine Dauermessung von etwa 30 Tiden mit Hilfe eines Tischrechners innerhalb von wenigen

Stunden auswertbar ist, wenn die fehlerfreien Daten auf Magnetband (Kassette) gespeichert sind (MIESSNER, 1979). Diese Bearbeitungszeit ist an einem Großrechner nicht länger, wenn der Datentransfer vom Meßgerät zum Rechner und zurück direkt über ein Terminal betrieben und von diesem Terminal aus auch die Bearbeitung der Meßwerte gesteuert wird. Die Bearbeitung größerer Datenmengen wird wegen der Speicherkapazität auch zukünftig Großrechenanlagen allein vorbehalten bleiben, wie auch eine solche Anlage mehr Speicherplatz für umfangreiche Programme bietet. In dieser Hinsicht werden in nächster Zeit weitere Überlegungen angestellt, um durch mehr Informationen leichter eine umfassende Analyse der Meßergebnisse zu gestatten.

5.4 Hinweise für künftige Messungen

Die WSÄ Cuxhaven, Bremerhaven und Wilhelmshaven verwenden seit einigen Jahren in großer Stückzahl Meßgeräte einer norwegischen Firma in Wassertiefen ab 20 cm mit gutem Erfolg. Die Daten werden auf 6-mm-Magnetband auf 8-cm-Rollen gespeichert. Es ist möglich, Ganglinien und statistische Analysen mit einem Tischrechner einschl. Peripherie innerhalb kurzer Zeit auszuwerten (MIESSNER, 1979).

Inzwischen hat eine deutsche Firma ein neues Gerät auf der Grundlage des induktiven Strommessers entwickelt (LAMMERS u. RÖBEN, 1978), der sich besonders beim Einsatz in Brandungszonen bewährt hat (NIEMEYER, 1979).

Allerdings können damit aufgrund des relativ hohen Strombedarfs bei normaler Batteriekapazität keine integrierenden Messungen vorgenommen werden, sondern nur Augenblicksmessungen in fünfminütigen Abständen. Inwieweit hierdurch eine verfälschte Wiedergabe des Strömungsgeschehens bewirkt wird, muß überprüft werden.

Die Konstruktion des Gerätes erlaubt die unmittelbare Strommessung über dem Wattboden, wodurch eingehendere Informationen über die Strömungsvorgänge aufgenommen werden können als bei solchen Geräten, die von ihrer Bauart her nur die Strömung bei Wassertiefen von etwa 30 cm und mehr registrieren können. Ebenso ist eine genaue Erfassung der Vorgänge um Stromkenterung zu erwarten, da dieses Meßgerät nicht durch mechanische Trägheit beeinträchtigt ist. Die Registrierung erfolgt in einer Magnetbandkassette, von der die Werte direkt in den Rechner eingelesen werden können.

Für die Forschungsvorhaben des KFKI können Geräte dieser Art in der Tat nur dann interessant sein, wenn die Möglichkeit besteht, die registrierten Daten nach dem seinerzeit entwickelten, umfassenden und inzwischen vom KFKI weitgehend übernommenen ADV-Programm zu analysieren. Das scheint auf folgendem Weg möglich zu sein:

Magnetband im Spezialcode → Lesegerät →
 (Lochstreifen →) Rechner, Einleseprogramm →
 16-mm-Band, IBM-kompatibel.

Inzwischen existiert ein DIN-Vorschlag, sich auf zwei der etwa 50 Kassettencodes zu beschränken. Falls vom KFKI die Beschaffung neuer Geräte empfohlen wird, sollte darauf geachtet werden, daß es inzwischen Programme gibt, mit deren Hilfe diese beiden Kassettencodes unmittelbar auf rechnerkompatible Datenträger umsetzbar sind.

6. Schriftenverzeichnis

- DIETRICH, G. u. SIEDLER, G.: Ein neuer Dauerstrommesser. Kieler Meeresforschung, H. 1, 1963.
 GÖHREN, H.: Meßwertaufbereitung von Dauerstrommessungen mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung. DGM, H. 2, 1965.

- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamb. Küstenf., H. 29, 1974.
- JOSEPH, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforsch. und Medizin in Deutschland, Bd. 18, 1948.
- Knop, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TH Braunschweig, H. 61/1, 1961.
- KOCH, M. u. LUCK, G.: Untersuchungen zur Erfassung der Strömungsverhältnisse auf den östlichen Weserwatten. Jber. 1972 der Forschungsst. Norderney, Bd. 24, 1973.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zu den Strömungsverhältnissen zwischen Borkum und der Leybucht. Jber. 1977 der Forschungsst. Norderney, Bd. 29, 1978.
- LAMMERS, B. u. RÖBEN, D.: Sichere Strömungsmessung ohne bewegte Teile. Hansa, 115. Jg., Nr. 15/16, 1978.
- MIESSNER, F.: Fortschritte beim Messen und Auswerten gewässerkundlicher Daten (Kurzbericht). DGM, H. 1, 1979.
- NIEMEYER, H. D.: Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchungen von Insel-schutzwerken und Inselstränden. Jber. 1978 der Forschungsst. Norderney, Bd. 30, 1979.
- SCHULTZ, H.: Probleme der gewässerkundlichen Meßtechnik. Mitt. Franzius-Inst. der TH Hannover, H. 7 1952.