

## Schiffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief

VON EBERHARD RENGER UND KLAUS BEDNARCZYK

### Zusammenfassung

Fahrende Motorschiffe wirbeln in Außentiefs i. allg. größere Mengen von Bodensedimenten auf als die Tideströmungen allein. Es wird vermutet, daß Schiffsverkehr maßgeblich an der morphologischen Entwicklung von Außentiefs beteiligt ist.

Die räumliche und zeitliche Verteilung solcher schiffahrtserzeugter Schwebstoffkonzentrationen wurde erstmalig unter In-situ-Bedingungen untersucht. Als „Naturmodell“ wurde dazu das Neßmersieler Außentief/Ostfriesland ausgewählt. In Zusammenarbeit mit dem Bauamt für Küstenschutz/Norden (BfK) und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD) wurden vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (LW) umfangreiche hydrographische, sedimentologische und morphologische Messungen durchgeführt. Wesentlichste Voraussetzung für die Untersuchung der Schwebstoffbewegungen war ein im LW neu entwickeltes Meßverfahren (SEDIWA = Sedimentwaage).

Nach Beschreibung von Meßkonzepten und Versuchsabläufen werden die Meßergebnisse analysiert. Es wird festgestellt, daß, ähnlich den Verhältnissen in einem Kanal, Verdrängungsströmungen wesentlich von Schiffsgeschwindigkeit und Querschnittsverhältnissen bestimmt werden. Durch Messung von strömungserzeugten Schwebstoffkonzentrationen und Vergleich der zugehörigen und unter verschiedenartigen Bedingungen erzeugten Ganglinien wird das Ereignis „Schiffs-passage“ erklärt. Die vermuteten Unterschiede zwischen schiffahrts- und tide-(spülungs-)bedingten Konzentrationsverteilungen konnten mit dem Meßverfahren SEDIWA für das Außentief Neßmersiel nachgewiesen werden. Allgemein übertragbare Aussagen bleiben weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Die finanzielle Förderung des Vorhabens erfolgte nach Befürwortung des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT).

### Summary

*Ship traffic in offshore channels moves considerably more bottom sediment than that associated with tidal currents. It is suspected that ship traffic is a primary factor in the sediment balance of offshore channels.*

*Temporal and spacial distributions of ship induced sediment transport have, for the first time, been investigated under in-situ conditions. The Neßmersiel offshore channel in East Friesland was chosen for this full scale "model study". Extensive hydrological, sedimentological and morphological measurements were taken. A significant prerequisite for the suspended sediment investigations was a newly developed measurement technique by the LW (SEDIWA = Sediment Scale). The measurement concept and procedure are described and the data analysed.*

*It was determined that, as in standard channels, erosion currents depend primarily of the ship speed and the channel cross section. The term "ship passage" is used to describe the measurements of flow induced fine sediment transport and the associated time dependent concentrations under different conditions. The suspected differences between navigation and tidally induced (flushing) sediment transport in Neßmersiel could be substantiated using the SEDIWA measurement procedure. General conclusions for other regions can only be attempted when additional investigations have been performed.*

*Financial support for this project was provided by the Federal Ministry for Research and Technology (BMFT) following a recommendation of the Coastal Engineering Research Board (KFKI).*

## Inhalt

1. Einführung . . . . .	90
1.1 Anlaß und Zielsetzung . . . . .	92
1.2 Stellung im Rahmen des Gesamtprojektes . . . . .	93
2. Konzipierung und Planung . . . . .	93
2.1 Vorbemerkungen . . . . .	93
2.2 Konzipierung der Untersuchungen im Neßmersieler Außentief . . . . .	93
2.2.1 Untersuchungsziele . . . . .	93
2.2.2 Auswahl der Meßstelle . . . . .	94
2.2.3 Untersuchungsverfahren und Meßsystem . . . . .	96
2.2.4 Auswahl der Versuchsschiffe . . . . .	97
2.2.5 Planung und Ablauforganisation . . . . .	97
3. Durchführung der Naturversuche . . . . .	98
3.1 Meßreihen . . . . .	98
3.1.1 Wasserstände . . . . .	98
3.1.2 Strömungsgeschwindigkeiten . . . . .	98
3.1.3 Schiffsgeschwindigkeiten . . . . .	98
3.1.4 Schwebstoffkonzentrationen . . . . .	99
3.1.5 Oberflächen-Bodenproben . . . . .	99
3.1.6 Vermessung der Durchflußquerschnitte . . . . .	100
3.2 Versuchsreihen . . . . .	100
3.2.1 Vorversuche August 1982 . . . . .	100
3.2.2 Zwischenversuche Juni 1983 . . . . .	100
3.2.3 Hauptversuche August/September 1983 . . . . .	102
3.2.4 Hauptversuche September 1984 . . . . .	102
4. Bewertung der Versuchsergebnisse . . . . .	102
4.1 Vorbemerkungen . . . . .	102
4.2 Vergleichende Analyse . . . . .	112
4.2.1 Tide- und spülungsbedingte Schwebstoffverteilung . . . . .	112
4.2.2 Schwebstoffanreicherungen nach Schiffspassagen . . . . .	115
4.2.2.1 Vorbemerkungen . . . . .	115
4.2.2.2 Schiffsahrts-hydrodynamische Parameter . . . . .	115
4.2.2.3 Das Untersuchungsereignis als Stöorzustand . . . . .	118
4.2.2.4 Wasserstandsbezogene Schwebstoffbewegung . . . . .	120
4.2.2.5 Querschnittsinterne Schwebstoffverteilung . . . . .	123
4.2.3 Sedimente im Bereich der Meßstelle . . . . .	125
5. Schlußfolgerungen und Ausblick . . . . .	130
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	131

## 1. Einführung

## 1.1 Anlaß und Zielsetzung

Im Rahmen eines zeitlich auf rund vier Jahre begrenzten KFKI-Forschungsvorhabens über Stabilitätsverhältnisse von Außentiefs der deutschen Nordseeküste sollte auch der Einfluß der Schifffahrt bewertet werden. Es ist bekannt, daß Schiffe bei Kanalfahrt Strömungen erzeugen, die die Sohle und die Unterwasserböschungen angreifen (z. B. KEIL u. PLATE, 1971; KREY, 1911). Dadurch werden Bodensedimente aufgewirbelt und in höhere Wasserschichten gebracht. Je nach effektiver Sinkgeschwindigkeit der Sedimentpartikel werden diese von der Strömung erfaßt und verfrachtet, bis sie sich wieder irgendwo ablagern.

Da solche Bewegungsabläufe von Feststoffen in offenen Gerinnen des Tidegebietes derzeit noch nicht hinreichend genau beschrieben werden können, wurde das Forschungsprogramm gezielt auf *Naturnuntersuchungen* zugeschnitten. Maßgebend dafür war vor

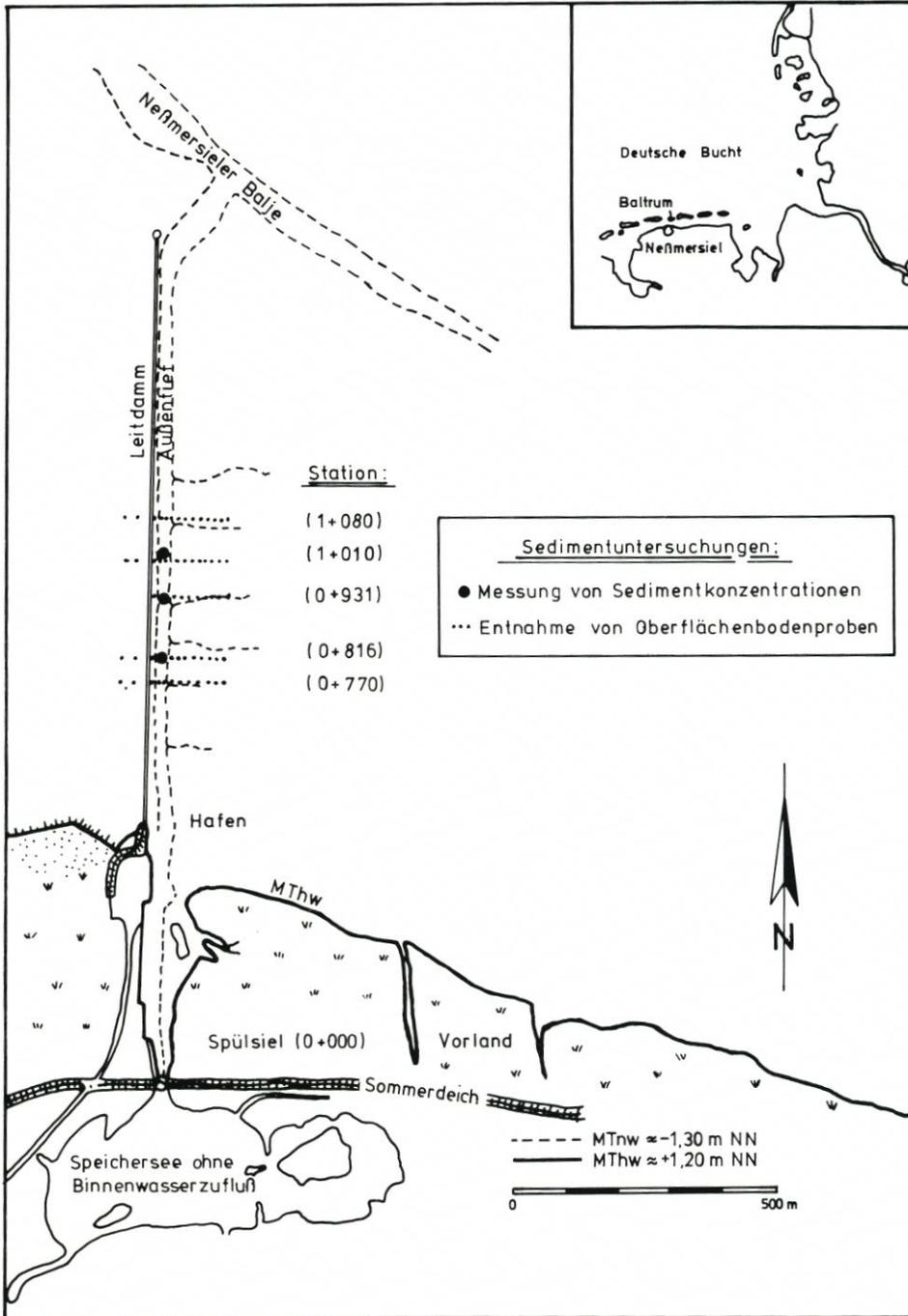


Abb. 1. Lageplan des Neßmersieler Außenriffs mit Meßpunkten für die Schiffsuntersuchungen

allem, daß durch Voruntersuchungen des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein ein neuartiges In-situ-Dauermeßverfahren zur kontinuierlichen Messung von Schwebstoffkonzentrationen in Aussicht gestellt werden konnte (RENGER, 1982). Es war das Hauptziel der Untersuchungen, die „Störwirkungen“ der schiffahrts-hydrodynamischen Einflüsse auf die natürliche Schwebstoffbewegung in Außentiefs zu erfassen. Anhand von Pilotversuchen im Neßmersieler Außentief/Ostfriesland (s. Abb. 1) sollten erste Eindrücke auf der Grundlage von Meßergebnissen gewonnen werden. Dazu mußten verschiedene Stufen der Konzipierung, Durchführung und Bewertung durchlaufen werden. Diese werden nachfolgend beschrieben.

## 1.2 Stellung im Rahmen des Gesamtprojektes

Wie in der Projektgliederung angedeutet, handelt es sich hier um einen Teilbeitrag im Rahmen des Forschungsprojektes „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“ (AT-N) (vgl. Abb. 2). Die Tatsache, daß in etlichen Außentiefs zusätzlich zur Räumwirkung des Oberwas-

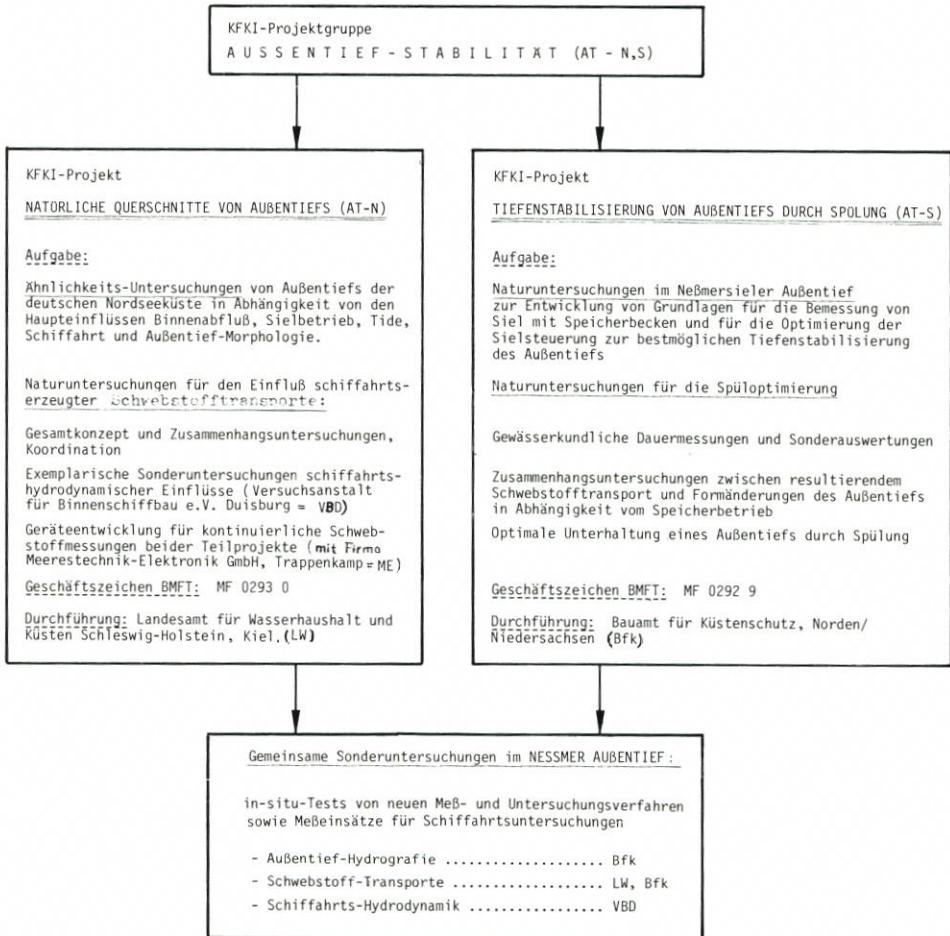


Abb. 2. Teilaufgaben der KFKI-Projektgruppe „Außentief-Stabilität (AT-N, S)“

sers künstliche Vertiefungen vorgenommen werden, führte zur gleichzeitigen Erforschung der „Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Spülung“ (AT-S) beim Bauamt für Küstenschutz Norden/Niedersachsen (ERCHINGER, 1984). Auch hier wurde das Schwergewicht auf Naturuntersuchungen im Rahmen eines „Natur-Modells“, des Neßmersieler Außentiefs, gelegt. Die umfangreiche Geräteausstattung und die hydrographischen Zuarbeiten gaben den Ausschlag dafür, die Pilotuntersuchungen für die Schifffahrtseinflüsse auf den Schwebstofftransport dort gemeinsam durchzuführen.

Auf Abb. 2 ist die Koordination der gemeinsamen Sonderuntersuchungen im Neßmersieler Außentief skizziert. Wegen der anspruchsvollen Untersuchungs- und Meßtechniken wurden Spezialaufgaben an Firmen und an die Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V. Duisburg im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vergeben.

## 2. Konzipierung und Planung

### 2.1 Vorbemerkungen

Wegen der erforderlichen Koordination von Untersuchungszielen, meßtechnischen Entwicklungsvorhaben und Naturversuchen für die gemeinsamen Teilschritte aller beteiligten Institutionen waren erhöhte Anforderungen bezüglich Konzipierung und Planung zu erfüllen. Allein dadurch wurde sichergestellt, daß bei der Durchführung der Naturversuche die erforderlichen morphologischen, hydrologischen und sedimentologischen Zustandsgrößen in hinreichender räumlicher und zeitlicher Verteilung gleichzeitig gewonnen werden konnten. Außerdem mußten Rahmendaten über Schiffsbewegungen, Sielsteuerung einschließlich Speicherbetrieb und Meteorologie erfaßt und wahlweise zur weiteren Bearbeitung bereitgestellt werden.

Besondere Überlegungen mußten bezüglich der Untersuchung der Schwebstofftransporte und der bodennahen Strömungskomponenten infolge der Schiffsbewegungen angestellt werden. Da keinerlei Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Verteilung der Zustandsgrößen vorlagen, schien ein iteratives Vorgehen angebracht. Konzipierung, Durchführung und Auswertung wurden in Form von Vor-, Zwischen- und Hauptversuchen systematisch rekursiv verbessert, um schließlich über ein hinreichend abgesichertes Untersuchungsverfahren für die problemorientierten Fragestellungen zu verfügen. Dabei wurden auch Erfahrungen aus anderen KFKI-Vorhaben mit einbezogen. Die besonderen Anforderungen bezüglich der Schwebstoffkonzentrationsmessung wurden im Rahmen einer Schwerpunktdiskussion am 16./17. 5. 1984 in Büsum und am Eidersperrwerk einer breiteren Fachöffentlichkeit vorgestellt (LW, 1984).

### 2.2 Konzipierung der Untersuchungen im Neßmersieler Außentief

#### 2.2.1 Untersuchungsziele

Wie bereits eingangs angedeutet, verursacht eine Schiffspassage bei „hinreichender hydrodynamischer Wirkung“ auf die natürliche bodennahe Außentiefströmung auch eine Anreicherung der Schwebstoffkonzentration. Für die Praxis ist dabei von Interesse, daß die Gesamtmenge der zusätzlich aufgewirbelten und resultierend verfrachteten Sedimente bei Flut

möglichst klein und bei Ebbe möglichst groß wird. Dadurch kann die Versandung/Verschlickung des Außentiefs verzögert und der Unterhaltungsaufwand reduziert werden.

Diese Gesamtenge wird im wesentlichen von folgenden Faktoren, die räumlich verteilt und zeitlich veränderlich sind, beeinflusst:

- a) Kornverteilungsband des liegenden und bewegten Sedimentes sowie Lagerungszustände einschließlich biogener Effekte,
- b) effektive Transportgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung von Wasserständen, Strömungsrichtungen, Triftströmungen und Seegangseinflüssen,
- c) schiffahrtsbedingte Änderungen von Strömungs- und Wasserstandsverlauf.

Aufgrund der vorgenannten vielschichtigen Einflüsse wird deutlich, daß der exakten Bestimmung von Transportbilanzen erhebliche Einschränkungen entgegenstehen. Aus diesem Grunde wurde das Augenmerk hauptsächlich darauf gerichtet, wie sich der zeitliche Konzentrationsverlauf an verschiedenen, gleichzeitig betriebenen stationären Meßpunkten im mittleren Bereich des Außentiefs verhält. Unter bestmöglichen Voraussetzungen, insbesondere bezüglich eines gradlinigen Strombahnenverlaufes durch denselben Meßpunkt, soll dadurch das vertikal-zweidimensionale Bewegungsverhalten der Schwebstoffe untersucht werden.

Natürliche Gegebenheiten wie Wasserstandsverlauf, Wetter und Bodenbeschaffenheit treten als Randbedingungen in häufig veränderten Kombinationen auf. Sie beeinflussen zugleich mit unterschiedlicher Wichtung das Fahrverhalten der Schiffe und daraus resultierende Meßergebnisse. Neben der zu erwartenden Variabilität der Ergebnisse ist durch begrenzten Versuchsaufwand mit einer weiteren Erschwerung bei vergleichenden Analysen zu rechnen.

### 2.2.2 Auswahl der Meßstelle

Unter den gegebenen Verhältnissen im Neßmersieler Außentief wurde die Meßstelle für die Untersuchungen schiffahrtserzeugter Schwebstofftransporte im mittleren Außentiefbereich gewählt (vgl. Abb. 1, 3 u. 4).

Folgende Bedingungen waren dadurch erfüllt:

- a) gradliniger Verlauf des Außentiefs mit außentiefparalleler Gerinneströmung vorwiegend im unteren Halbast der Tidekurve,
- b) stetige Verteilung der Durchflußquerschnitte bei zunehmender Größe mit zunehmender Entfernung vom Siel,
- c) weitgehend symmetrische Durchflußquerschnitte bei Wasserständen unterhalb der Höhe des seitlich gelegenen Watts mit dem Vorteil der Meßpunktreduktion innerhalb des Querschnitts,
- d) verhältnismäßig guter Zugang über den Leitdamm während der Hauptmeßzeit im unteren Halbast der Tidekurve (Versorgung, Sicherheit),
- e) Verfügbarkeit hydrologischer Begleitdaten am Meßpunkt (Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit),
- f) Verfügbarkeit von Vermessungsunterlagen ebbe- und flutwärts des Meßquerschnittes.

Als nachteilig erwies sich die Entfernung von rd. 1 km vom Hafengebiet. Die Energieversorgung (rd. 5 kW) erfolgte vor Ort mittels Generator (Lärm, Abgas). Die Messung vom schwimmenden Geräteträger aus wurde mit Überströmen des Leitdammes und bei Seegang teilweise beträchtlich gestört. Es liegen somit nur „Schönwettermessungen“ ohne erhöhte Grundlast von Schwebstofftransporten vor.

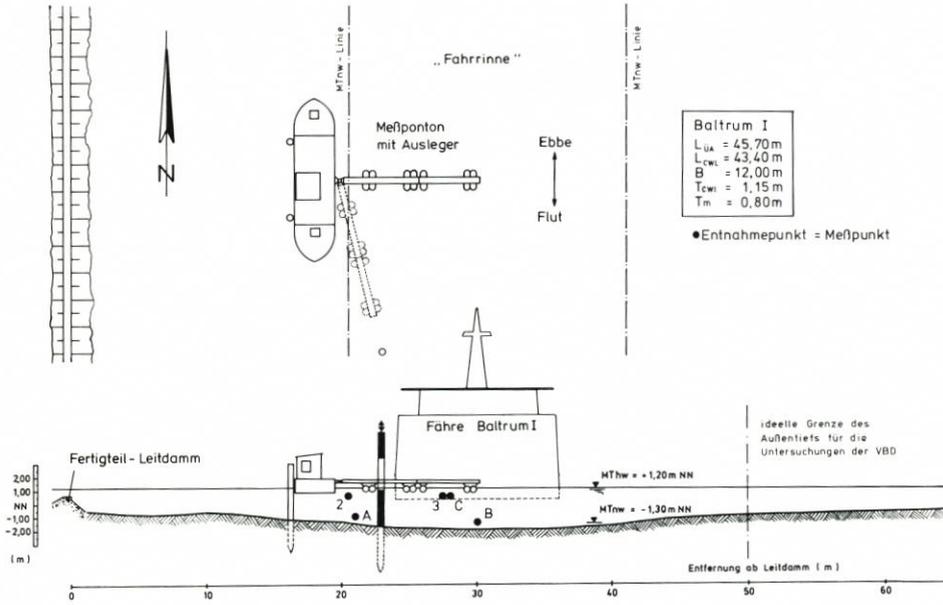


Abb. 3. Querschnitts-interne Zuordnung von Meßpunkten, Geräteträgern und Fährinne / Station 1 + 010

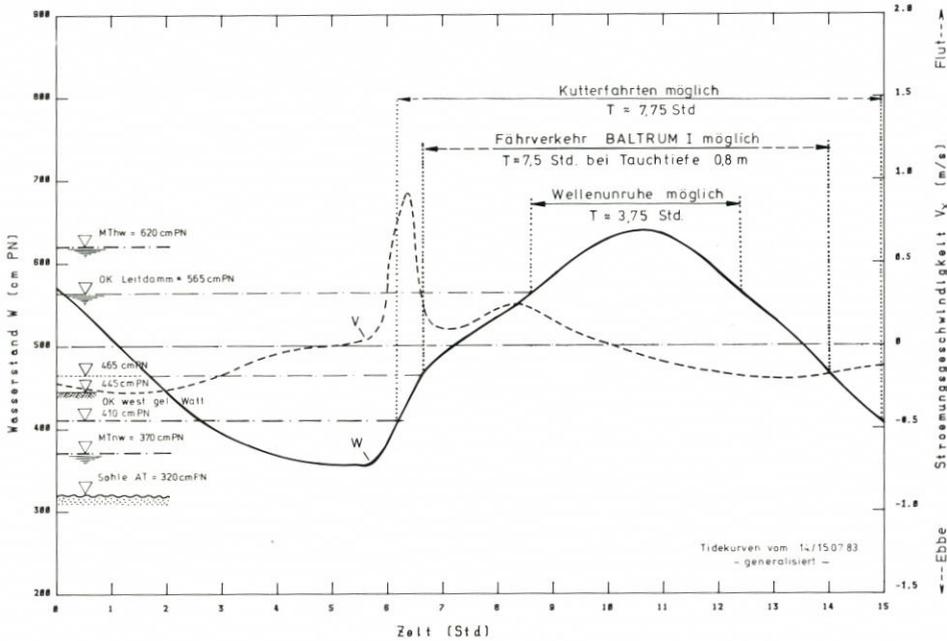


Abb. 4. Grenzwasserstände für Schiffsverkehr / Station 1 + 010

### 2.2.3 Untersuchungsverfahren und Meßsystem

Die Untersuchungen zum „schiffahrtserzeugten Schwebstofftransport“ im Neßmersieler Außentief erforderten die Koordination einiger Teiluntersuchungen, die von unterschiedlichen Institutionen durchgeführt wurden (vgl. Abb. 2):

- a) Außentief-Hydrologie (BfK) zur Kennzeichnung der natürlichen und durch Spülbetrieb beeinflussten Tidebewegung,
- b) Schifffahrts-Hydrodynamik (VBD) zur Kennzeichnung der schiffahrtserzeugten Wasserstands- und Strömungsänderungen im Bereich der Konzentrationsmessungen,
- c) Schwebstoffkonzentrationen (LW, BfK) zur Dokumentation der Auswirkungen der natürlichen und künstlichen Einflußgrößen auf den Schwebstofftransport.

Eine besondere Stellung nahm die Entwicklung und Installation der meßtechnischen Ausrüstung für die kontinuierlichen Dauermessungen der Schwebstoffkonzentrationen mit dem System SEDIWA ein (RENGER, 1982 u. 1984; LW, 1984; DVWK, 1986). Die verfahrens- und gerätetechnischen Entwicklungsschritte wurden im Bereich des Eidersperrwerkes durchgeführt. Die wesentlichsten Eigenschaften werden hier nur kurz erläutert, soweit sie für Versuchsdurchführung und Meßgenauigkeit von Bedeutung sind (vgl. Abb. 5).

Das Meßverfahren basiert auf der Vor-Ort-Analyse eines konstanten Untersuchungsteilstromes (Q). Dieser wurde für die beiden Gerätetypen „Halbautomat“ und „Vollautomat“ auf etwa 0,7 l/s (= 2,52 m<sup>3</sup>/h) bzw. 0,16 l/s (≈ 0,58 m<sup>3</sup>/h) festgelegt. Das schwebstoffhaltige Wasser wird mittels einer Pumpe über ein geeignetes Entnahmesystem am Meßpunkt aus dem Fließgewässer entnommen und durch einen Hydrozyklon (Durchlaufzentrifuge) gedrückt. Dort werden unter großer Fliehkraftwirkung (Spiralströmung) Feststoffpartikel mit Korngrößen  $d > d_T$  (= Trennkorndurchmesser) am Unterlauf kontinuierlich ausgeschieden. Unter den bei Feststofftransporten in offenen Gerinnen als „niedrig“ einzustufenden Konzentrationen beträgt die Trennkorngröße ( $d_T$ ) für Sand/Wasser 7 µm beim Halbautomaten bzw. 5 µm beim Vollautomaten. Anschließend werden sie in einem Wägebühler innerhalb eines wassergefüllten „Auftriebsbehälters“ laufend gesammelt und kontinuierlich mittels einer Waage gewogen. Die Meßgenauigkeit liegt bei 10 bis 20 mg. Halb- und Vollautomat unterscheiden sich hauptsächlich bezüglich Abmessungen, technischer Ausstattung und Betreuungsaufwand. Die Ergebnisse sind qualitativ und quantitativ gleichwertig.

Je nach Untersuchungsziel können die Gewichtszunahmen ( $\Delta G$ ) der Gewichtssummenlinien (G(t)) in frei wählbaren Zeitschritten ( $\Delta t$ ) zur Berechnung der Schwebstoffkonzentration (C), mit Beginn im Sekundenbereich, herangezogen werden.

$$\text{Berechnung: } C = \frac{\Delta G [\rho_F / (\rho_F - \rho_W)]}{\Delta t \cdot Q} \cdot 10^6 \text{ [mg/l]}$$

mit  $\Delta G$  in (g),  $\Delta t$  in (s), Q in (ml/s)

Organische Bestandteile und anorganische Partikel im Feinstkornbereich ( $d < d_T = 7$  (5) µm) verlassen den Hydrozyklon am Überlauf als „Resttrübe“. Diese wurde durch gelegentliche Probenahme mit späterer Laborauswertung gemessen (vgl. Abs. 4.2).

Es sei bereits hier darauf hingewiesen, daß der BMFT eine gegenwärtig laufende Sonderuntersuchung zur Kalibrierung von kontinuierlichen Attenuationsmessungen dieser Resttrübe zusätzlich fördert. Durch das stark homogenisierte Partikelspektrum am Hydrozyklon-Überlauf kann die bisher nicht gemessene Teilmasse verhältnismäßig genau bestimmt und somit kontinuierlich die Gesamtkonzentration durch Addition zur gravimetrisch gemessenen Unterlaufkonzentration berechnet werden.

Das Meßsystem gewährleistet eine gute Betriebsstabilität. Zeitlücken in der Meß-

wertaufzeichnung entstehen vor allem durch mechanische Fremdeinwirkungen auf das Wägesystem. Dazu zählen z. B. Erschütterungen infolge des schaukelnden Meßpontons bei Wasserständen über ca. 5,6 mPN und westlichen Winden (vgl. Abb. 4) sowie Entleerungen der Sammelbehälter (Dauer ca. 2 bis 5 Minuten). Die Behälterinhalte stehen für Laboranalysen zur Verfügung (Kornverteilungen, organische Bestandteile usw.).

Bezüglich der Handhabung des gesamten Meßsystems mußten folgende Teilaspekte berücksichtigt werden (vgl. LW, 1984):

- a) Meßpunktausrüstung (Geräteträger, Energieversorgung, Wartung/Reparatur, Funktionskontrolle, Sicherung gegen Schiffskollision, Strömungs- und Witterungseinflüsse), Einsatz mobiler Meßgeräte für temporäre Geräteinsätze im Fahrwasser, höhenvariable Gerätehalterung, ortsfeste Meßpunktpositionierung vom schwimmenden Geräteträger aus,
- b) Sicherheitsaspekte für Bedienungspersonal,
- c) Meßfehler infolge der Probenentnahmestromentnahme (Isokinetik = geschwindigkeitsgleiche Absaugung am Meßpunkt), Vor-Ort-Bewertung der Meßergebnisse für eventuelle Positionsverbesserungen, Probenkontrolle der sogenannten Resttrübe (Feststoffpartikel mit Durchmessern  $d < 5 \mu\text{m}$  und Organisches) an den Überläufen der Meßzyklone der Schwebstoffmeßgeräte SEDIWA.

Kontrollen der Resttrübe an den Überläufen der Meßzyklone müssen sich wegen des großen manuellen Aufwands auf einige Stichproben beschränken.

#### 2.2.4 Auswahl der Versuchsschiffe

Nach eingehenden Beratungen mit der VBD wurde es als notwendig angesehen, mindestens drei unterschiedlich große Schiffe zu untersuchen. Auf experimenteller Grundlage sollten die zu erwartenden nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den Übergeschwindigkeiten und dem Verdrängungsverhältnis ( $n$ ) von Außentiefquerschnitt/Schiffshauptspant bestätigt werden. Die im Neßmersieler Außentief verkehrenden Fährschiffe BALTRUM I und BALTRUM III wurden daher im Verlauf der beiden Hauptversuchsserien 1983 und 1984 um zwei unterschiedlich große Kutter ergänzt (s. Abs. 4.2.2.2). Zusätzlich wurden einige Fahrten mit einem Räumboot durchgeführt, als die geringe Wirkung der Kutter auf den Schwebstofftransport erkennbar war.

Der geplante Untersuchungsumfang ließ gezielte Fahrmanöver nur bei den beiden verwaltungseigenen Kuttern zu. Der bezüglich der Schwebstoffe transportwirksame Untersuchungszeitraum beschränkte sich auf einen engen Wasserstandsbereich und entsprechend wenige Versuchsfahrten (vgl. Abb. 4). Zufällig passierende Sportboote rundeten das Schiffspektrum nach unten ab.

#### 2.2.5 Planung und Ablauforganisation

Die Naturversuche wurden während der Projektgruppensitzung gemeinsam erörtert. Die Meßtechniken wurden von den Beteiligten eigenständig konzipiert und betrieben. Gerätehalterungen und Unterkünfte für das Personal stellte das BfK nach Abstimmung mit den Partnern eigenverantwortlich zur Verfügung.

Die BfK-eigenen Versuchsschiffe führten Meßfahrten nach Anforderung von LW und VBD durch. Maßgebend dafür waren tideabhängige Wasserstände und das „Abklingen“ der Schwebstoffkonzentrationen vom vorhergehenden Versuch. Unter Benutzung von Sprechfunkgeräten konnten die Versuchsfahrten optimal koordiniert und gelenkt werden.

### 3. Durchführung der Naturversuche

#### 3.1 Meßreihen

##### 3.1.1 Wasserstände

Der Wasserstandsverlauf wurde kontinuierlich vom Bauamt für Küstenschutz (BfK) gemessen (ERCHINGER et al. 1986). An der Meßstelle ist dazu ein Drucksensor am westlichen Außentieftrand unterhalb  $MT_{nw} = -1,30$  mNN angeordnet. Die im Sekundenbereich gewonnenen Meßwerte wurden für die Weiterbearbeitung normalerweise als Minutenmittel aufgezeichnet.

Für die In-situ-Information konnte der zugehörige Lattenpegel verwendet werden. Die Kontrolle der Drucksensoraufzeichnungen war nur nachträglich möglich, unter anderem auch durch Plausibilitätsvergleiche mit den Pegeln am Leitdammkopf und am Siel.

Während der Schiffsversuche wurden nur mittlere Tideverhältnisse beobachtet. Das  $MT_{nw}$  liegt bei  $-1,30$  mNN, das  $M_{Thw}$  bei  $+1,20$  mNN. Die Ergebnisse der Messungen wurden in die Diagramme für die Konzentrationsganglinien eingearbeitet. Ein Ganglinienverlauf ist der Abb. 4 zu entnehmen.

##### 3.1.2 Strömungsgeschwindigkeiten

Die Strömungsgeschwindigkeiten im mittleren Außentiefbereich wurden für die unterschiedlichen Anforderungen mit unterschiedlichen Verfahren gemessen, und, soweit erforderlich, hier ebenfalls übernommen.

- a) Die Dauermessungen des BfK zur Kennzeichnung der Tideverhältnisse erfolgten außerhalb des Fahrwassers am Meßpfahl 2 des BfK. Als Meßgerät diente eine NSW-Sonde mit Sensoren für die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten. Die Meßwerte wurden normalerweise im Minutenmittel ausgegeben.
- b) Querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeiten wurden wegen des erhöhten Aufwandes nur in besonderen Fällen bestimmt. Sie dienen dem BfK zur Korrelation mit den Punktmessungen am Außentieftrand. In vereinzelt Fällen dienen die Meßwerte den Untersuchungen der Schiffsahrtseinflüsse. Als Meßgeräte wurden Meßflügel vom Meßsteg aus nach bekannten Verfahren eingesetzt.
- c) Die Ermittlung der schiffsbedingten Strömungsänderungen erfolgte an Meßpunkten der VBD anhand von Druckmessungen mit anschließender Berechnung nach dem Ansatz von BERNOULLI (eindimensional). Die maximalen Geschwindigkeitsänderungen betragen:  $V_e \cong 0,6$  m/s,  $V_f \cong 1,2$  m/s. Die Ergebnisse liegen für jeweils zwei Tage der Hauptversuche vor.

##### 3.1.3 Schiffsgeschwindigkeiten

Die Fahrtgeschwindigkeiten der Versuchsschiffe wurden als Basisdaten von der VBD ermittelt. Nach manueller Zeitnahme für die Passage am Meßpunkt ließen sich Schiffsgeschwindigkeiten über Grund ( $V_G$ ) aus der Verrechnung mit den Schiffslängen bestimmen.

### 3.1.4 Schwebstoffkonzentrationen

Die kontinuierlichen Dauermessungen des LW wurden mit den im Absatz 2.2.3 beschriebenen „Halbautomaten“ und „Vollautomaten“ des Verfahrens SEDIWA durchgeführt. Die Meßwerterfassung wies zunehmend bessere Eigenschaften auf, weil Meßverfahren und Geräte ständig weiterentwickelt wurden. Dies bezieht sich sowohl auf Meß- und Ausgabefrequenz als auch auf Datenspeicherung und Vor-Ort-Protokoll.

Die Meßpunktanordnung wurde während der verschiedenen Versuchsreihen den jeweiligen Erfordernissen angepaßt (vgl. Abb. 1 u. 3). Bei einer Meßwerterfassung im 1-Sekunden-Takt wurde jeweils der arithmetische Mittelwert über 1 Minute gebildet und abgespeichert. Alle errechneten Schwebstoffkonzentrationen gelten für Feststoffe mit Durchmessern  $d > d_T = 5 \mu\text{m}$  bzw.  $7 \mu\text{m}$  (Vollautomat mit  $Q = 0,16 \text{ l/s}$  bzw. Halbautomat mit  $Q = 0,7 \text{ l/s}$ ).

Wegen des im Verfahren benutzten hohen Probendurchsatzes ist die Angabe von Gewichtssummen besonders zuverlässig. Darüber hinaus konnte die verfahrensbedingte Schichtung der im Wägebehälter laufend gesammelten Unterlauf-Sedimente beim SEDIWA-Halbautomat für zusätzliche Interpretationen der Meßergebnisse vorteilhaft verwendet werden (vgl. Abs. 4.1 u. 4.2.2).

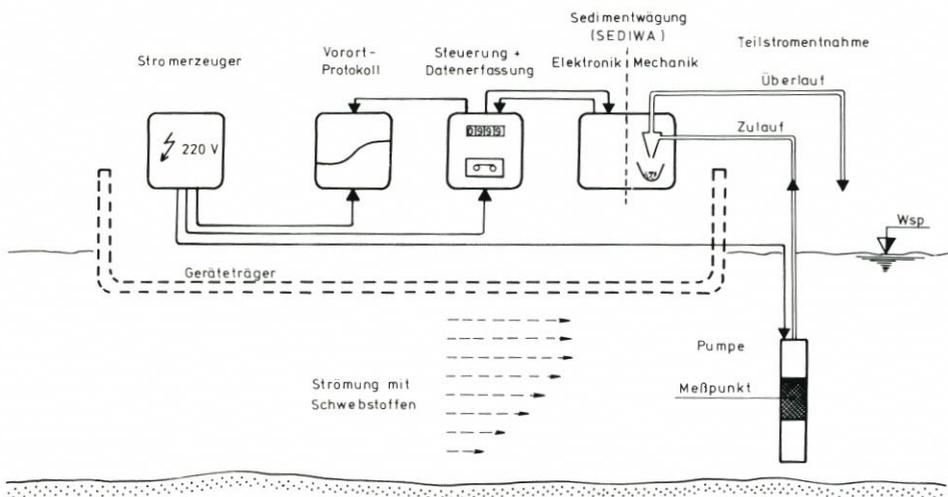


Abb. 5. Gerätekonfiguration für das vollautomatische Meßverfahren zur kontinuierlichen Dauermessung von Schwebstoffen (System SEDIWA = Sedimentwaage)

### 3.1.5 Oberflächen-Bodenproben

Die flächenhafte Verteilung der Bodenoberflächen-Sedimente auf einem Kontrollfeld von rd.  $200 \times 300 \text{ m}$  im Bereich der Meßstelle (vgl. Abb. 1) wurde in verschiedenen Untersuchungsschritten ermittelt. Die Meßpunkte waren in Querprofilen angeordnet, die zusätzlich vermessen wurden (vgl. Abs. 3.1.6).

Die Probenahme erfolgte mit einfachen Stechzylindern ( $\varnothing = 7 \text{ cm}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$ ) durch das Geologisch-Paläontologische Institut und Museum der Universität Kiel (GPI). Durch die Probentiefe wird der Einfluß kurzfristiger Oberflächenänderungen weitergehend eliminiert. Insgesamt wurden 68 Proben in den Profilen gem. Abb. 1 genommen.

Die Laborauswertung (GPI) beschränkte sich auf Siebung nach dem ASTM-Verfahren und Bestimmung des gesamten Schlämmenteils. Der mittlere Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) liegt im Feinsandbereich bei 0,1 mm.

Kornverteilungskurven wurden anhand der Laborergebnisse mittels Personalcomputer (Apple 2 plus) im LW gezeichnet. Die spezielle Komponentendarstellung der drei Hauptfraktionsbereiche wurden in Anlehnung an SINDOWSKI entwickelt. Die Bereichsabgrenzungen wurden von KÖSTER (in GAST et al., 1984) übernommen.

### 3.1.6 Vermessung der Durchflußquerschnitte

Seit längerem führt das BfK routinemäßige Vermessungen an festgelegten Kontrollquerschnitten mehrmals jährlich mit terrestrischen Vermessungsverfahren durch. Die Vermessungsergebnisse werden in Form von Querprofilen, gelegentlich auch als Tiefenlinienplan, aufgetragen. Für die Interpretation der Hauptversuche von LW und VBD im Herbst 1984 wurden Sonderprofile zusätzlich vermessen (vgl. Abb. 1 u. Abs. 3.1.4).

## 3.2 Versuchsreihen

### 3.2.1 Vorversuche August 1982

Anlässlich einer gemeinsamen Besprechung mit Ortsbesichtigung im Mai 1982 wurden die planerischen Voraussetzungen für die Vorversuche in der Zeit vom 23. bis 27. 8. 1982 geschaffen. Noch im ersten Antragsjahr wurden vor allem meßtechnische Erfahrungen und erste Meßergebnisse von Schwebstofftransporten gewonnen (vgl. LW, 1983a u. b; MÜLLER u. BINEK, 1986). Neben den meßtechnischen Einzelzielen der Beteiligten wurden wesentliche Erkenntnisse über das Gesamtmeßprogramm und den Forschungsverbund erzielt.

Als Geräteträger für die kontinuierlichen Schwebstoffmessungen wurde ein Räumboot des BfK/Norden verwendet. Die Messungen erfolgten mit den Halbautomaten (vgl. Abs. 2.2.3) ohne automatische Meßwertaufzeichnung. Einige Schwebstoffproben wurden gesichert, um die Kornverteilung im Labor zu untersuchen.

Hauptmeßtage waren der 25. und 26. August (vgl. Abb. 6 u. 7). Die Niedrigwasserphase am späten Vormittag ließ erste Experimente mit dem Spülbetrieb zu. Dadurch wurde das neue kontinuierliche Dauermeßverfahren mit hohen Schwebstoffkonzentrationen bis rd. 2700 mg/l belastet. Gleichzeitig erhielt das BfK wertvolle erste Eindrücke von der Spülleistung. Bei höheren Wasserständen konnten an beiden Meßtagen jeweils eine Ein- und Ausfahrt der Fähre BALTRUM I gemessen werden. Die Schwebstoffkonzentrationen betragen rd. 1800 mg/l bei einem Abstand von nur rd. 5 m zwischen Schiff und Meßpunkt (vgl. Abb. 7). Die anderen Passagen verliefen in größerer Entfernung. Die Konzentrationsmaxima waren wegen der andersartigen Breitenwirkung der Fähre entsprechend niedriger. Hydrographische Daten wurden nicht systematisch miterfaßt oder bewertet. Die Auswertung erfolgte noch weitgehend manuell.

### 3.2.2 Zwischenversuche Juni 1983

Die Zwischenversuche wurden zusätzlich durchgeführt, um vorwiegend meßtechnische Probleme zu untersuchen. Die Ergebnisse der Vorversuche ließen erkennen, daß vorwiegend

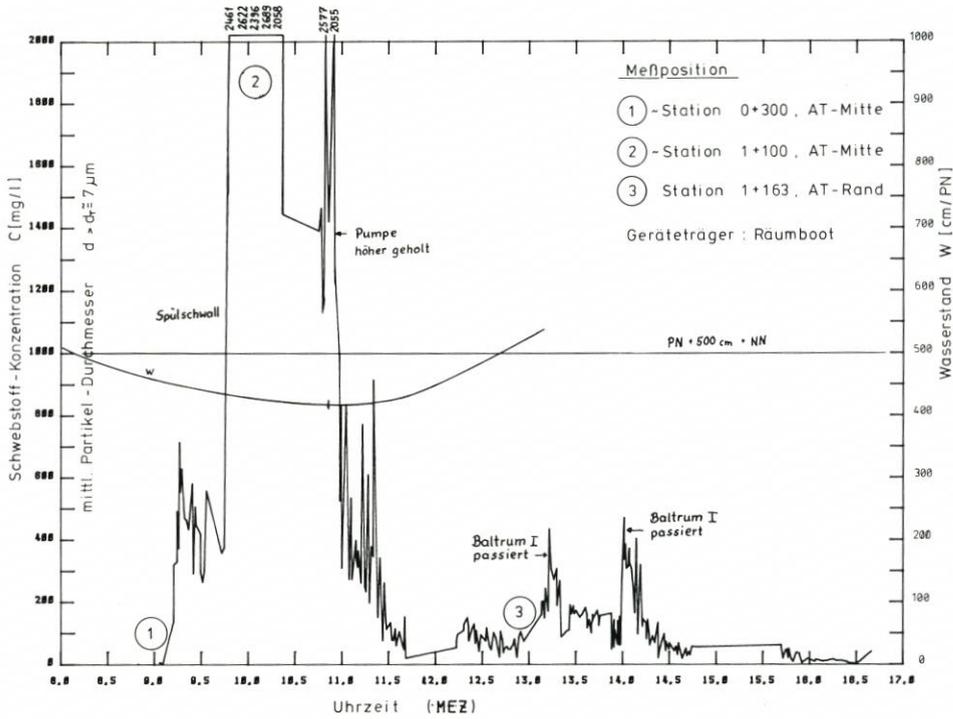


Abb. 6. Vorversuche: Schwwebstoff-Ganglinie 25. 8. 1982

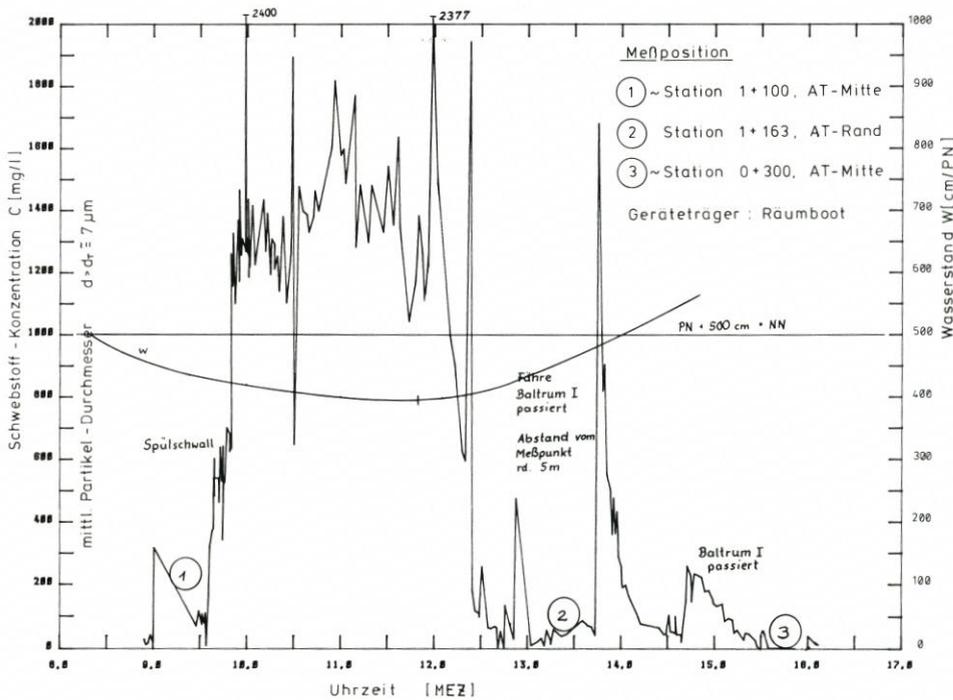


Abb. 7. Vorversuche: Schwwebstoff-Ganglinie 26. 8. 1982

die laterale Verteilung der Konzentration bedeutende Unterschiede aufweist. Zur bislang beabsichtigten Bilanzierung von Schwebstofftransporten mußten folgerichtig diese Querverteilungen untersucht werden.

Die dazu erforderliche Bestückung von Meßpunkten innerhalb des schiffbaren Durchflußquerschnittes (vgl. Abb. 3) stellte ein Sonderproblem dar. Die Meßgeräte mußten von einem schwenkbaren Schwimmsteg (Ausleger am Meßponton) flexibel im temporären Einsatz bedient werden. Die bei der Schiffspassage erforderlichen Verswenkungsmanöver führten zu Ausfallzeiten infolge von Meßpunktversatz und Betriebsinstabilität. Entsprechendes galt für die Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten des BfK.

Die bis zu dem Zeitpunkt fertiggestellten beiden „Versuchsmodelle“ des Vollautomaten SEDIWA (0,16 l/s) wurden im Parallelbetrieb mit den Halbautomaten (0,7 l/s) untersucht.

### 3.2.3 Hauptversuche August/September 1983

Mit den Kenntnissen der Vor- und Zwischenversuche wurden in einem ersten Großein-satz umfangreichere Schifffahrtsversuche durchgeführt. Nachdem bald zu erkennen war, daß künstlich aufgewirbelte Sedimente nur relativ geringe Verweildauer in der Wassersäule aufweisen, wurden die Versuchsabstände verkürzt (vgl. Abb. 8 bis 10).

Besonders hervorzuheben sind die vor Ort zusätzlich anberaumten Räumbootfahrten. Wegen der tiefenvariablen Schraubenwirkung konnten die Versuche auch noch bei höheren Wasserständen stattfinden. Dadurch vergrößerte sich die Anzahl der Untersuchungsergebnisse. Es erwies sich als vorteilhaft für die Versuchsdurchführung, daß das Räumboot unmittelbar vor den Meßpunkten starten konnte. Der Meßsteg brauchte nicht verholt zu werden, und die Schwebstoffe trieben gezielt auf die Meßpunkte zu.

### 3.2.4 Hauptversuche September 1984

Die zweite Serie von Hauptversuchen mußte wegen störender Witterungseinflüsse in zwei Etappen durchgeführt werden. Windstärken von über 6 Bft führten zum vorläufigen Abbruch der Versuchsreihe vom 4. bis 6. September 1984 am dritten Meßtag (vgl. Abb. 11 bis 13).

Die zweite Etappe der Hauptversuche fand unter tageszeitlich und witterungsmäßig günstigen Bedingungen in der Zeit vom 18. bis 20. September 1984 statt (s. Abb. 14 bis 16).

Die beiden Etappen unterscheiden sich durch die Meßpunktanordnung. Während zuerst Messungen zur vertikalen und lateralen Verteilung (vgl. Abb. 3) vorgenommen wurden, folgten in der zweiten Etappe Messungen in longitudinaler Richtung an vier Stationen im Randbereich des Außentiefs (vgl. Abb. 1).

## 4. Bewertung der Versuchsergebnisse

### 4.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Ausführungen sind in enger Anlehnung an die bisherigen Erläuterungen über die Naturuntersuchungen zu verstehen. Es ist hervorzuheben, daß wegen der schrittweisen Vorgehensweise (vgl. Abs. 2.1) nennenswerte Abweichungen zwischen Planung und Durchführung nicht vorkamen.

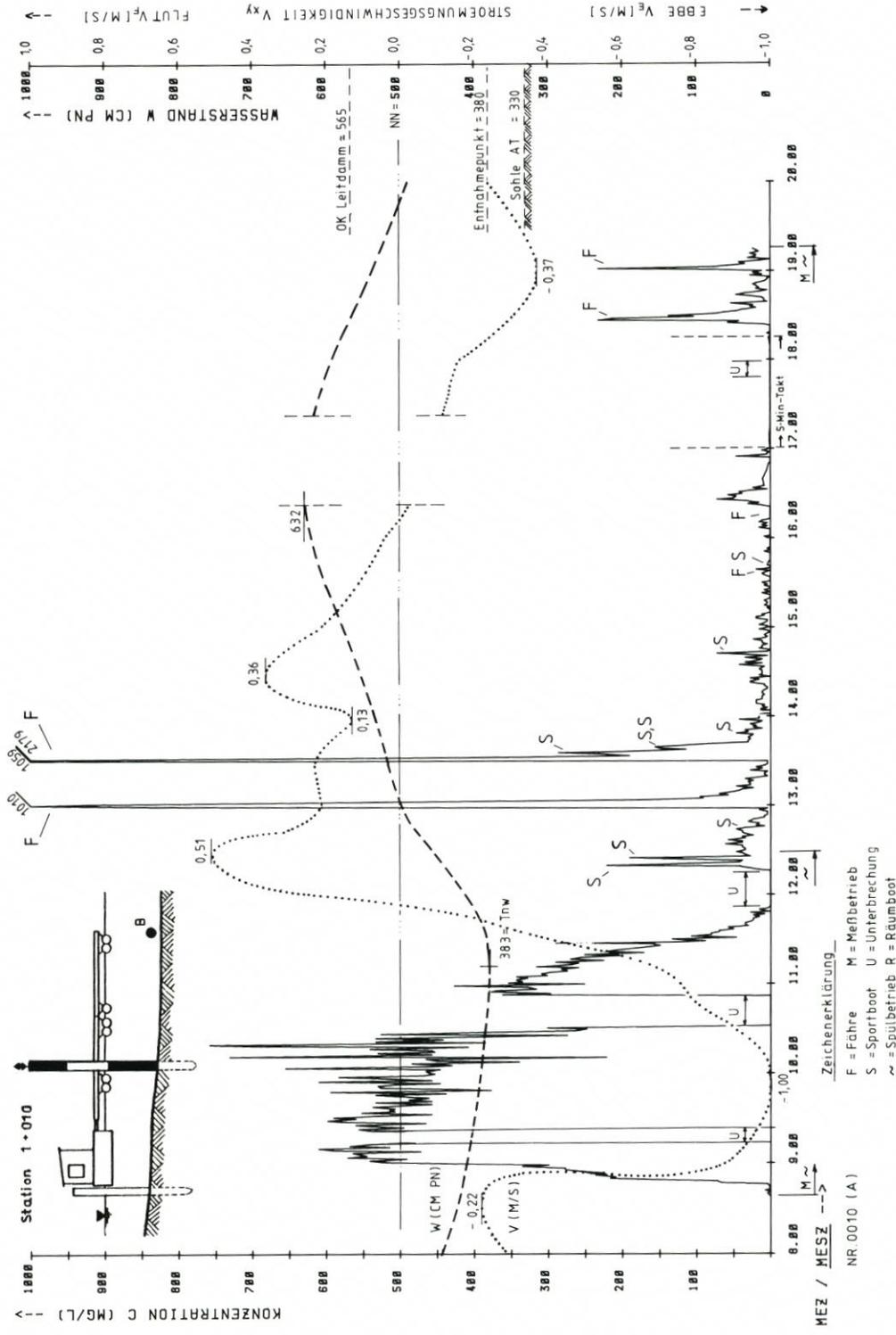


Abb. 8. Hauptversuche '83: Schwebstoff-Ganglinie 30. 8. 1983, Meßpunkt B, 0,5 m ü. Sohle



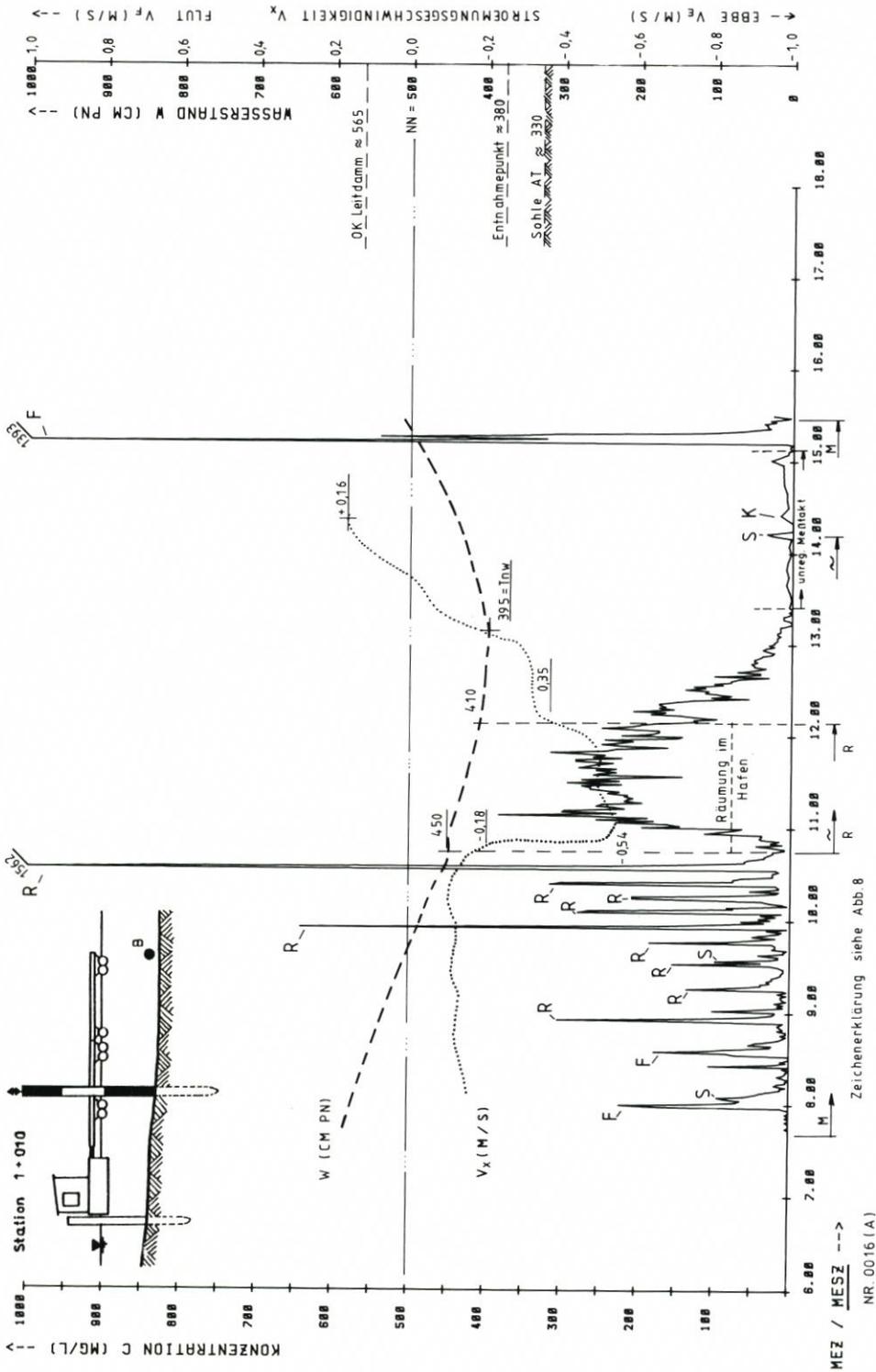


Abb. 10. Hauptversuche '83: Schwebstoff-Ganglinie 2. 9. 1983, Meßpunkt B, 0,5 m ü. Sohle

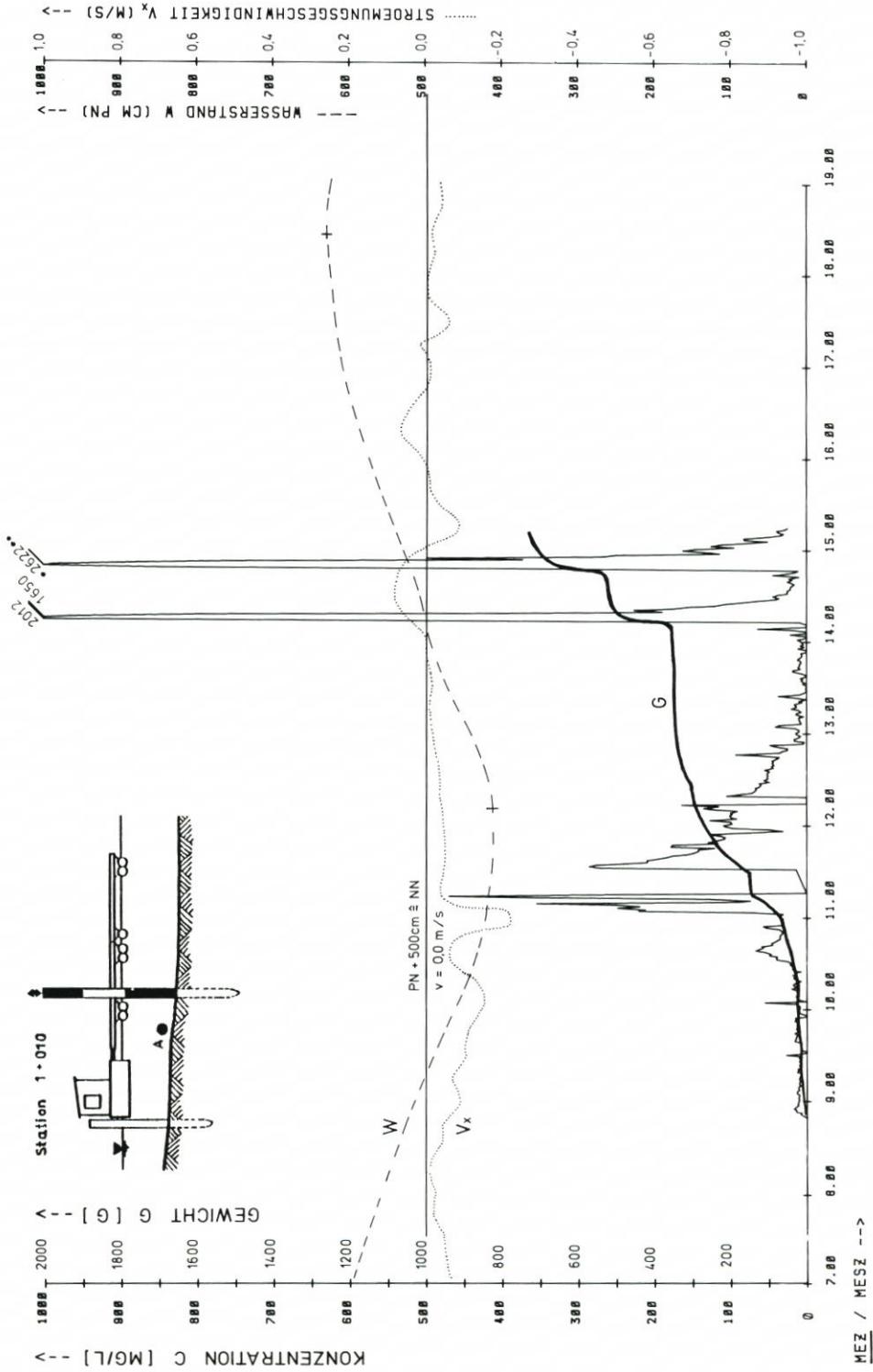


Abb. 11. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 4. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

MEZ / MESZ -->  
NR 0064 (A)

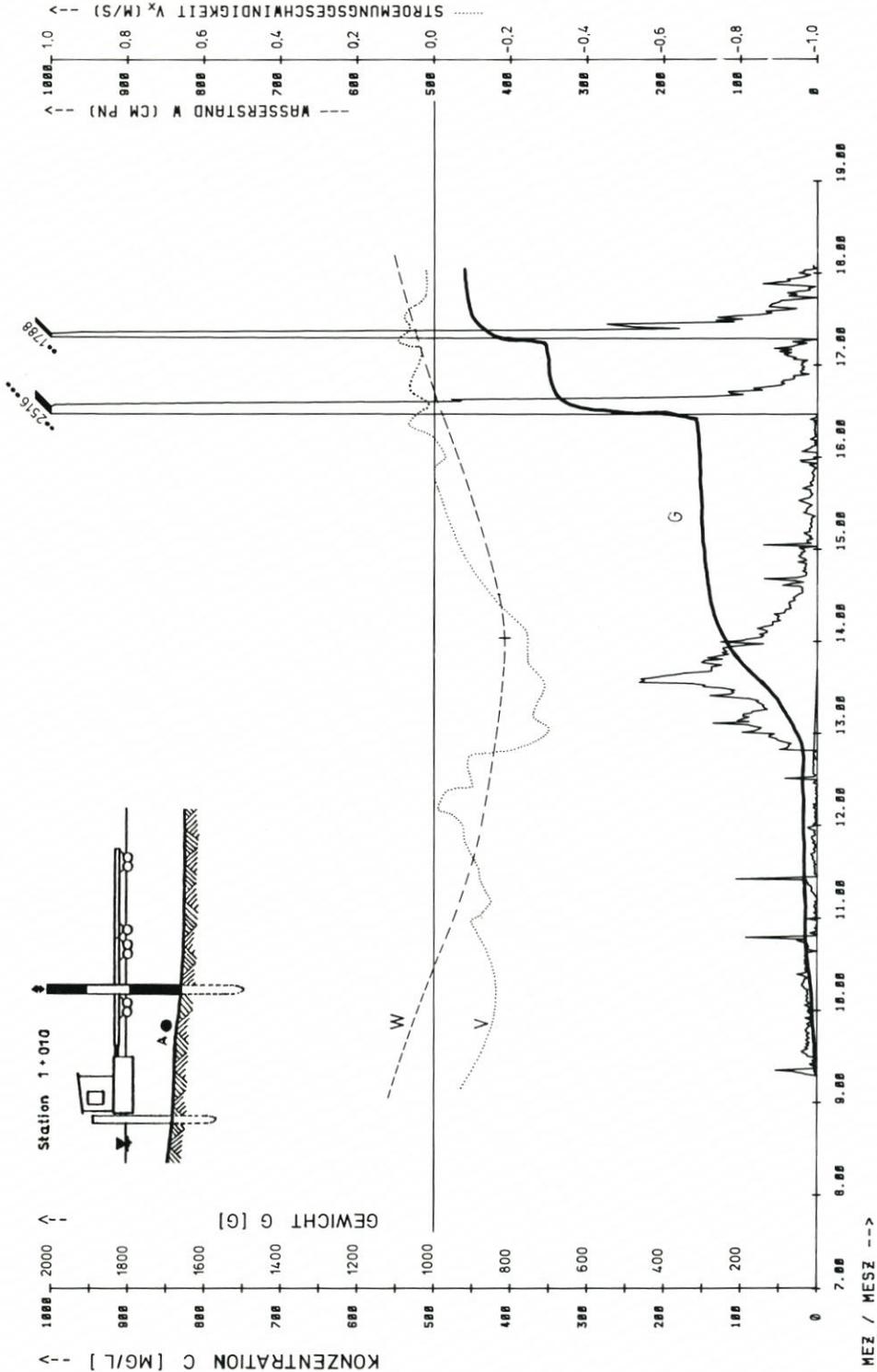


Abb. 12. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 5. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

MEZ / MESZ --->  
NR. 0087 (A)

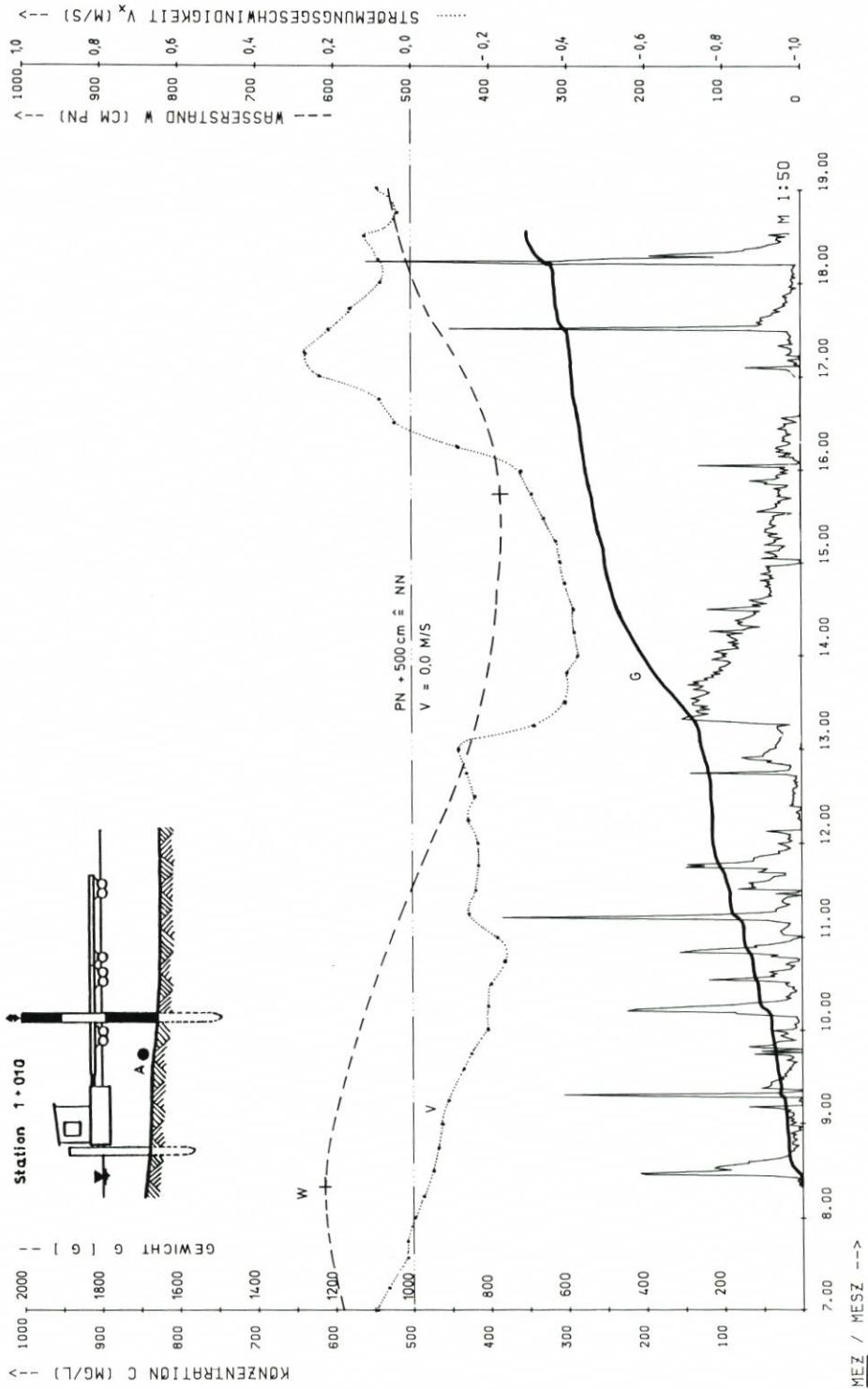


Abb. 13. Hauptversuche '84: Schwefelstoff-Ganglinie 6. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

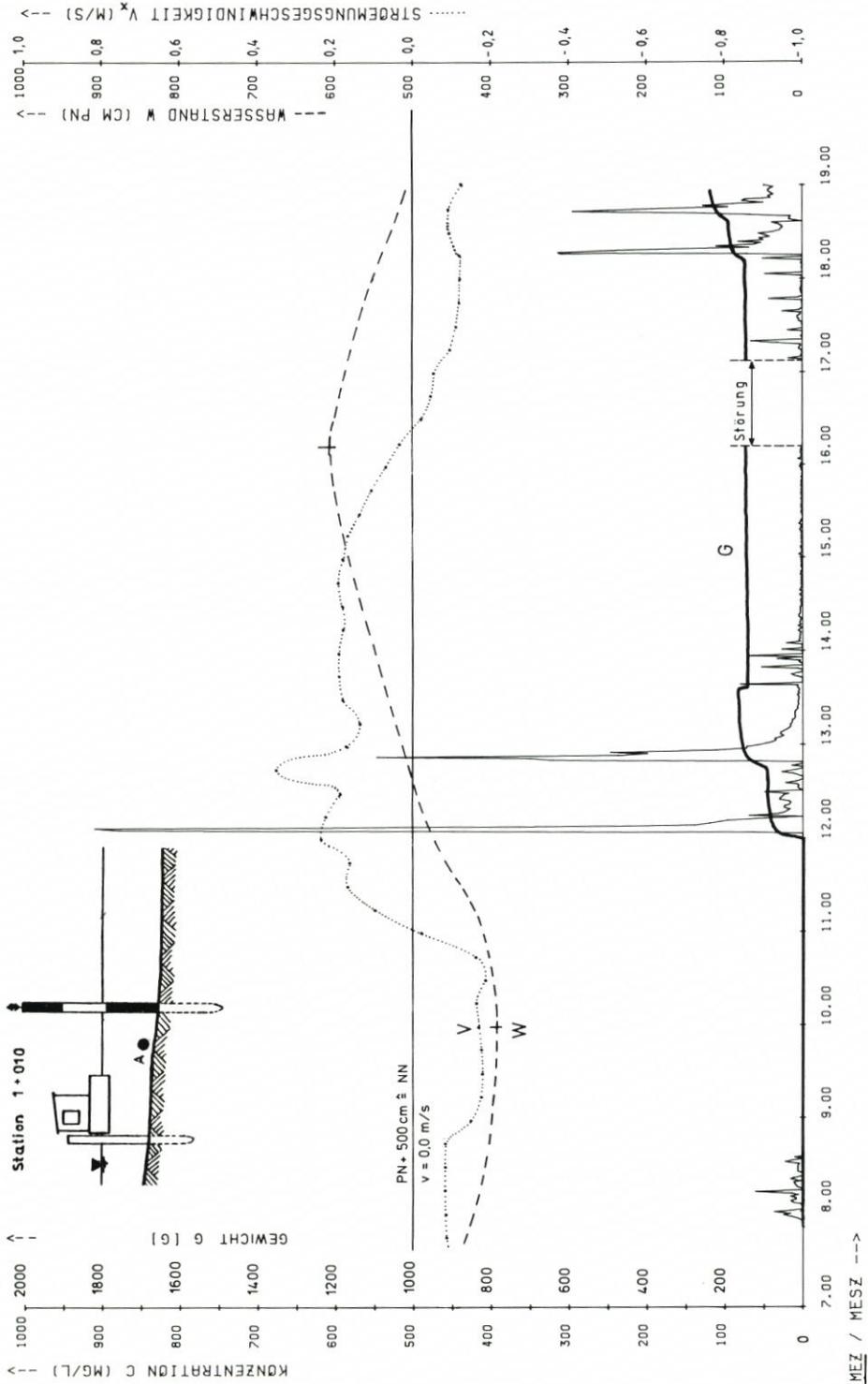


Abb. 14. Hauptversuche '84: Schwefelstoff-Ganglinie 18. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

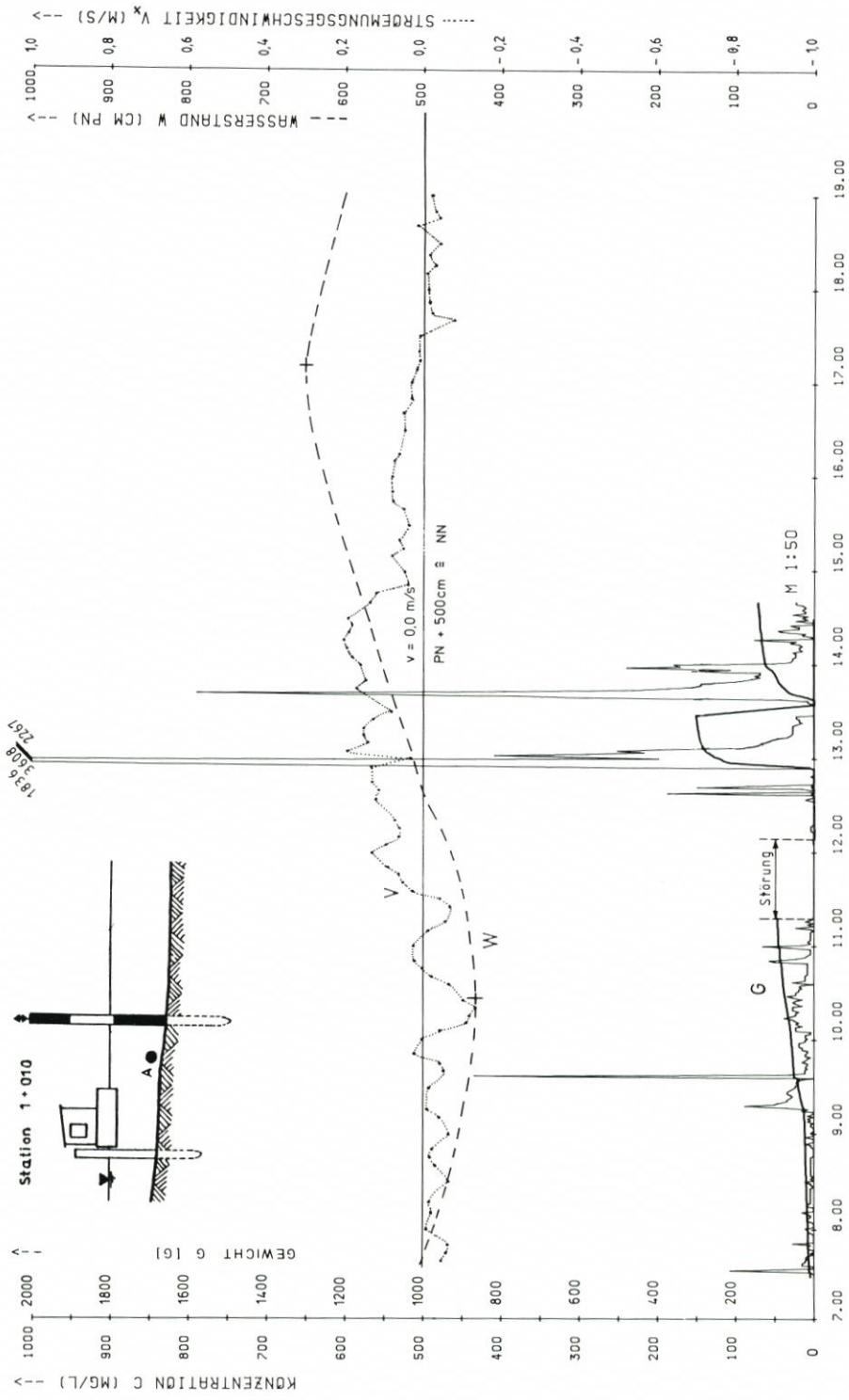


Abb. 15. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 19. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

MEZ / MESZ --->  
NR 0095 (A)

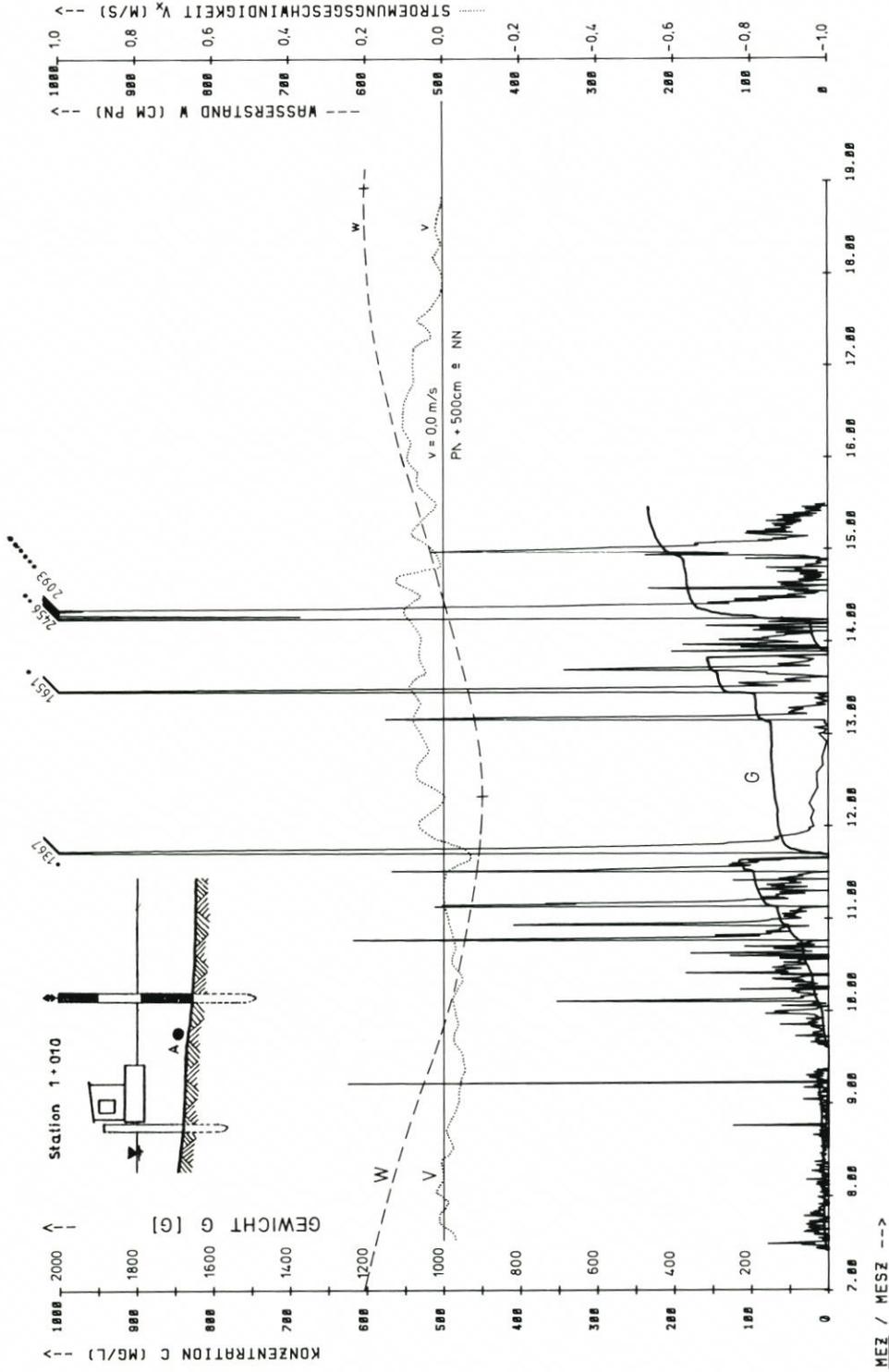


Abb. 16. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 20. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

NR 0097 (A)

Mit der Bewertung der Versuchsergebnisse wird vorwiegend das gewonnene eigene Datenmaterial einer vorläufigen Folgeauswertung zugeführt. Diese Einschränkung ist erforderlich, weil noch nicht alle Naturmessungen, insbesondere diejenigen der VBD, berücksichtigt werden konnten und zusätzliche Versuche mit erweitertem Meßbereich für das Partikelspektrum noch ausstehen („Resttrübungsmessung“ durch Attenuationssonde, vgl. Abs. 2.2.3). Außerdem besteht ein deutlicher Mangel an Theorien und geeigneten Modellen, um die wesentlichen Zustandsgrößen der Einflußgrößen dieser komplexen Materie in einer zusammenhängenden Form darstellen zu können. Erfahrungsgemäß können sich Ansätze dafür auf der Grundlage des zunächst empirisch ausgewerteten Untersuchungsmaterials gegebenenfalls später herleiten lassen.

Die Bewertungen sind vorwiegend auf die Interpretation der schiffahrtserzeugten Schwebstoffanreicherungen ausgerichtet. Diese sind immer deutlich als Spitzen in den kontinuierlich über den Versuchstag gemessenen Konzentrationsganglinien erkennbar. Sie bilden die in den nachfolgenden Betrachtungen als „Untersuchungsereignis“ bezeichneten kleinsten Zeiteinheiten der Untersuchungsserien. Wegen ihrer relativ geringen Dauer von im Mittel rd. 20 Minuten ändern sich die tidebedingten hydrographischen Zustandsgrößen nur wenig. Daher wird zur Kennzeichnung von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit vereinfachend von einem quasi-stationären Untersuchungsintervall ausgegangen.

Um ein hinreichendes Bild von den Auswirkungen der Schiffsbewegung zu erhalten, wurden darüber hinausgehende Analysen durchgeführt:

- a) Integrale Betrachtung mehrerer Ereignisse mittels Gewichtssummenkurven, um dominante Tendenzen beim Schwebstofftransport besser nachweisen zu können,
- b) Sicherung einer ungestörten Füllung des Wägebehälters vom Halbautomaten der SEDIWA (vgl. Abs. 3.1.3) als Grundlage für Rückschlüsse über Materialherkunft und transportrelevante hydraulische Verhältnisse,
- c) Vergleich von tide- und spülungsbedingten Schwebstoffverteilungen im Meßquerschnitt mit schiffahrtserzeugten Verteilungen, um spezifische Schiffsbewegungen verdeutlichen zu können,
- d) Vergleich von Meßergebnissen benachbarter Meßpunkte, um vertikale und laterale Schwebstoffverteilungen beschreiben zu können,
- e) Kornanalysen von Schwebstoff- und Bodenproben als Basis für qualitative Beurteilungen der Umgebungseinflüsse auf Schwebstoffmessungen,
- f) weiterführende Auswertungen der schiffahrts-hydrodynamischen Messungen der VBD, u. a. zur Verdeutlichung von Strömungsänderungen innerhalb eines „Untersuchungsereignisses“.

Es sei hier abschließend angemerkt, daß Zweckmäßigkeit, Tauglichkeit und Aussagekraft der Einzelkonzepte erst nach Vorliegen aller Naturmessungen einschließlich der empirischen Auswertungen abgeschätzt werden können. Bei der Bearbeitung spielt die fachliche Erfahrung und das „ingenieurmäßige Denken“ eine bevorzugte Rolle. Formale und schematisierte Anwendungsmethoden können derzeit nicht angegeben werden.

## 4.2 Vergleichende Analyse

### 4.2.1 Tide- und spülungsbedingte Schwebstoffverteilung

Obwohl die Einflüsse von Tide und Spülbetrieb auf den Schwebstofftransport umfassend vom BfK untersucht werden (vgl. entsprechenden Beitrag in diesem Heft), sollen ausgewählte

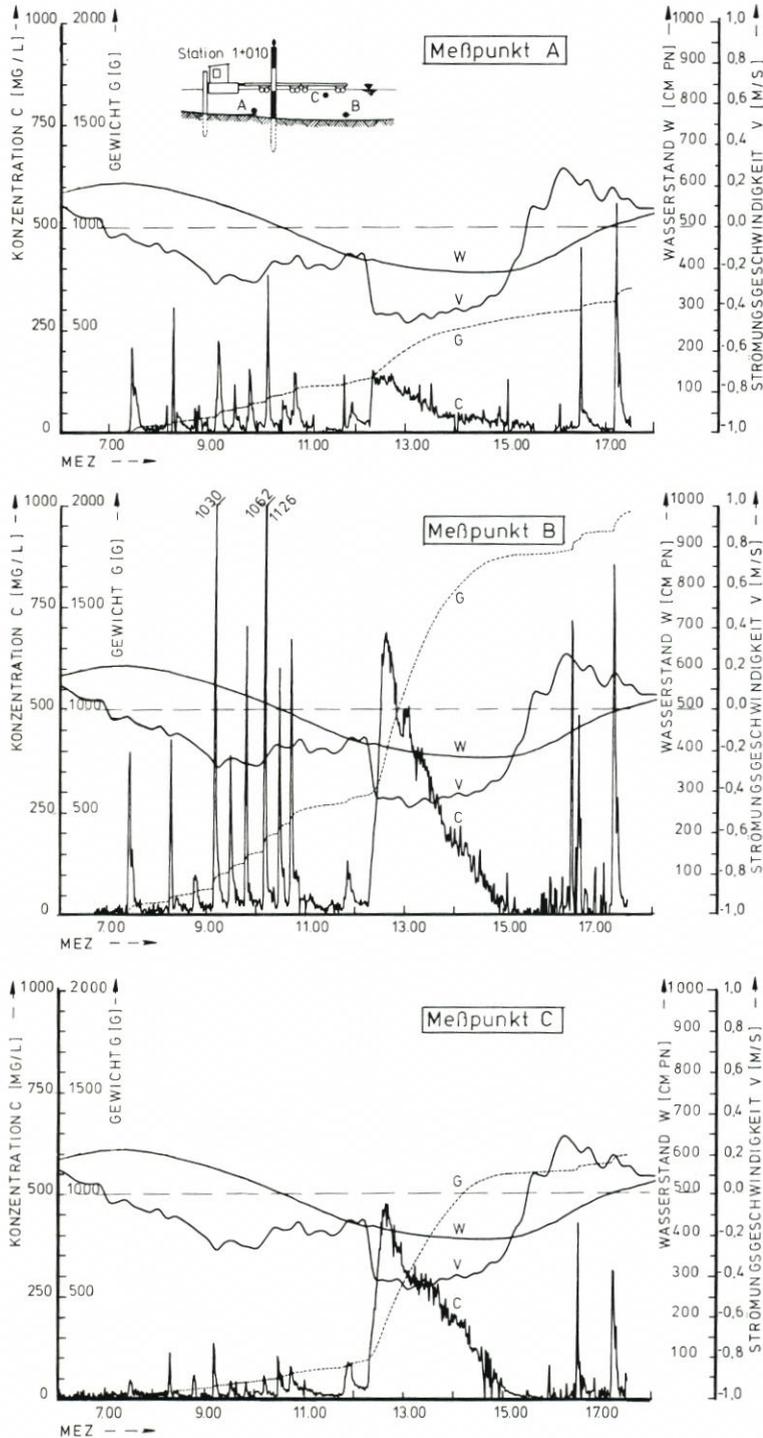


Abb. 17. Vergleich Meßpunkte A-B-C: Schwebstoff-Ganglinien und Gewichtssummenkurven vom 6. 9. 1984

Ergebnisse hier erläutert werden. Die Analyse beschränkt sich aber fast ausschließlich auf die Konzentrationsverteilung innerhalb des Meßquerschnittes. Grundlagen sind Dauermessungen der Schwebstoffkonzentrationen, die im Verlaufe der Schifffahrtsuntersuchungen an mehreren Meßpunkten gleichzeitig gewonnen wurden (vgl. auch Abb. 6 bis 16 sowie Abb. 3). Die Meßpunktanzahl war vorwiegend begrenzt durch die verfügbaren Geräte und deren Einsatzbedingungen (Personalstärke, technische Störungen).

Die so gemessenen tidebedingten Schwebstoffkonzentrationen sind in den betreffenden Abbildungen ablesbar. Sie bewegen sich im Bereich von mehreren 10 mg/l. Der sedimentologische Zustand des Außentiefs und die ruhige Wetterlage begründen die relativ geringen Werte im Vergleich zu den Daueruntersuchungen des BfK. Auch die vereinzelt gemessenen Resttrübewerte beeinflussen die vorgenannte Aussage nicht wesentlich. Die gemessenen Verteilungen im Meßquerschnitt eignen sich z. T. nicht für einen hinreichend genauen Vergleich. Sie dürften jedoch prinzipiell denjenigen der Spülzustände ähnlich sein.

Wesentlich deutlicher unterscheiden sich die querschnittsinternen Meßergebnisse beim Spülbetrieb. Schon die Ganglinien der Konzentrationen lassen ohne Verwendung von Vergleichspraktiken mit bloßem Auge betragsmäßig größere Differenzen bei ähnlichem zeitlichen Verlauf erkennen (vgl. Abb. 17). Während dieser Versuchsserie für Schifffahrtsuntersuchungen wurden gleichzeitig an drei Meßpunkten die Konzentrationsganglinien gemessen, und zwar vertikal an zwei Meßpunkten etwa in Außentiefmitte und lateral durch Bezug zu einem Meßpunkt einige Meter jenseits der Fahrwassergrenze. Für Vergleichszwecke mit den schiffahrtserzeugten Schwebstofftransporten wurden die Gewichtssummenlinien der drei Halbautomaten mit in die Ergebnisdiagramme eingezeichnet. Bei annähernd gleichem Untersuchungsteilstrom von 0,7 l/s stellen sie ein integrales, geeignetes Vergleichsmaß dar. Da bei dem verwendeten SEDIWA-Meßverfahren ausschließlich die Gewichts-differenzen eines zeitlichen Untersuchungsintervalls interessieren, lassen sich zeitgleiche Kurvenabschnitte unbedenklich durch Ordinatenverschiebung miteinander vergleichen. Auch die Addition von Teilkurven ist zulässig.

Nach diesem Verfahren wurden die entsprechenden Messungen während des Spülbetriebes, der Versuchsfahrten und einiger Fährpassagen vom 6. September 1984 umgearbeitet und auf Abb. 25 dargestellt. Für den Fall des Spülbetriebes, etwa zwischen 13.20 und 16.30 Uhr, überwogen deutlich die Konzentrationen in Außentiefmitte (Pos. B, ca. 0,5 m über Grund, Pos. C ca. 0,5 m unter Wasserspiegel) gegenüber denjenigen am Fahrwasserrand (Pos. A, ca. 0,5 m über Grund).

Die Untersuchungsergebnisse beim Spülbetrieb sind für die Interpretation der Schifffahrtsuntersuchungen aus folgenden Gründen von besonderer Bedeutung:

- a) Die betragsmäßigen Größen der Schwebstoffkonzentrationen ähneln – gegenüber den tidebedingten – sehr denjenigen der schiffahrtserzeugten.
- b) Die zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten liegen deutlich im überkritischen Bereich (d. h.  $v > 0,4$  m/s) und lassen sich deswegen leichter mit den schiffahrtserzeugten vergleichen.
- c) Die Strömungsverteilung im Meßquerschnitt ähnelt sicherlich sehr derjenigen unter reinen Tideverhältnissen (überwiegend in longitudinaler Richtung ungestört). Die schiffahrtserzeugten Geschwindigkeitsänderungen verlaufen demgegenüber nach Schiffsdurchgang als deutliche Querbewegungen und Strömungswalzen und stellen eine zeitlich und räumlich begrenzte Störung mit betragsmäßig vergleichbaren Konzentrationen und Strömungen dar (vgl. Abs. 4.2.2).

Weitere Details über die Spülwirkungen sind dem Beitrag des BfK in diesem Heft zu entnehmen.

## 4.2.2 Schwebstoffanreicherungen nach Schiffspassagen

### 4.2.2.1 Vorbemerkungen

Wie in der Überschrift bereits angedeutet, wird hier das Hauptaugenmerk zunächst nur auf die Änderungen der Schwebstoffkonzentrationen gerichtet. Der Durchgang eines Schiffes durch eine derartige Tiderinne führt zu recht komplizierten hydraulischen Verhältnissen, die verbindliche Transportberechnungen derzeit nicht ermöglichen. Folglich werden hydrodynamische Untersuchungskomponenten nur für die Interpretation ausgewählter Ereignisse herangezogen.

Die hydrodynamischen Untersuchungsergebnisse sind dem Beitrag von MÜLLER/BINEK (1986) in diesem Heft zu entnehmen. Recht anschauliche Verhältnisse zwischen Schiffsbewegung und Querschnittsmorphologie im Nord-Ostsee-Kanal schildern KEIL/PLATE (1971) sowie KREY (1911) für Kanäle schlechthin. Über erste Untersuchungsergebnisse aus dem Neßmersieler Außentief berichtete BEDNARCZYK (1984) anlässlich einer Vortragsveranstaltung der Hafenbautechnischen Gesellschaft. Vereinzelt Hinweise geben auch ERCHINGER et al. (1986) in diesem Heft.

### 4.2.2.2 Schiffahrts-hydrodynamische Parameter

Für das Verständnis der Meßergebnisse zum schiffahrtserzeugten Sedimenttransport sollen nachfolgend einige Bedingungen und Kenngrößen für Schiffsbewegungen im Außentief kurz erläutert werden.

Bei der Kanalfahrt eines Schiffes verformt sich die Wasseroberfläche im Schiffsbereich, und es entstehen Verdrängungsströmungen mit z. T. beträchtlichen Geschwindigkeitsänderungen. Sie bestimmen durch Größe und Dauer die Änderungen der Schwebstoffbewegung. Erfahrungsgemäß nehmen diese Störungen der Grundströmung mit zunehmender Entfernung vom Schiff ab. Daher ist die Beziehung zur Gerinnegeometrie maßgebend für die Änderung der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten.

Als bedeutendste Kenngröße für Beschreibungen zugehöriger hydrodynamischer Zustände hat sich das Querschnittsverhältnis ( $n$ ) erwiesen.

$$n = \frac{A_{AT}}{A_M} = \frac{\text{Nutzbarer Gewässerquerschnitt}}{\text{Schiffsquerschnitt (Hauptspant)}} [-]$$

Für Fahrrinnen im Wattenbereich ist diese Kenngröße wegen der mit wechselnden Wasserständen veränderlichen Begrenzungen nur bedingt herleitbar.

Abb. 3 zeigt das Querprofil im Bereich der Meßstelle. Auf der Ostseite ist der Außentiefquerschnitt eindeutig bis etwa der Höhenkote NN = Wattoberfläche begrenzt, auf der Westseite bis zur Oberkante des Leitdamms = NN + 0,6 m. Unter Annahme einer Achse in 30 m Entfernung vom Leitdamm weitet sich der Außentiefquerschnitt von der Sohle aus bis zum Leitdammfuß annähernd symmetrisch auf. Die zugehörigen Querschnittsflächen werden in Abb. 18 durch Kurve A wiedergegeben. Die Auswertungen von MÜLLER und BINEK basieren demgegenüber auf der modellhaften Annahme eines beidseitig begrenzten Querschnittes mit maximaler Breite von 50 Metern. Kurve B zeigt den zugehörigen Querschnittsverlauf. Nachfolgend wird in dieser Ausarbeitung angenommen, daß Ergebnisse von Punktmessungen auf symmetrisch gelegene Punkte übertragbar sind.

Zur Verdeutlichung der vertikalen Verteilung der Größe (n) wurde das Diagramm der Abb. 18 um eine Tabelle mit Querschnittsverhältnissen (n) markanter Wasserstände erweitert. Die zugrundegelegten Schiffsquerschnitte sind ergänzend proportionsecht skizziert worden. Wichtigste Abmessungen sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Nr.	Schiff	Länge m	Breite m	Tiefgang m
1	Baltrum I, Fähre	45,7	12,0	0,80*
2	Baltrum III, Fähre	35,0	7,0	0,80
3	Memmert, Kutter	16,0	4,22	0,90
4	Westerdiek, Kutter	10,5	3,25	0,70

\* voll beladen: 1,15

Die zuvor erwähnten Strömungsänderungen werden durch die Schiffsbewegung verursacht. Grundsätzliche Erklärungen zur Fahrtgeschwindigkeit sollen hier exemplarisch für die Fähre BALTRUM I als wirkungsvollstem Versuchsschiff gegeben werden. Dies ist nach Auffassung der Verfasser erforderlich, um die starken Unterschiede der Konzentrationsverläufe begründen zu können. Querschnittsaufweitung des Außentiefs mit steigendem Wasserstand bedeutet zugleich Verbreiterung der nutzbaren Sohlbreite für Fahrten ohne Grundberührungen. Für die Querschnitte (0 + 770) und (0 + 990) wurde eine derartige Breitenentwicklung in Abb. 19 dargestellt. Sie gilt für die Tiefgänge 80 cm und 115 cm gem. VBD-Vorgaben bei einer Flottwassertiefe von 20 cm. Die jeweils für ein Profil geltenden (parallelen) Kurven unterscheiden sich definitionsgemäß um den Differenzbetrag der Tauchtiefen von 35 cm. Mit höheren Wasserständen stehen größere nutzbare Sohlbreiten mit entsprechendem seitlichen Spielraum zur Verfügung (vgl. Beispiel in Abb. 19). Beobachtungen und Meßergebnisse (vgl. Abb. 20) bestätigen die Vermutung, daß diese Freiräume (unter und neben dem Schiff) auch

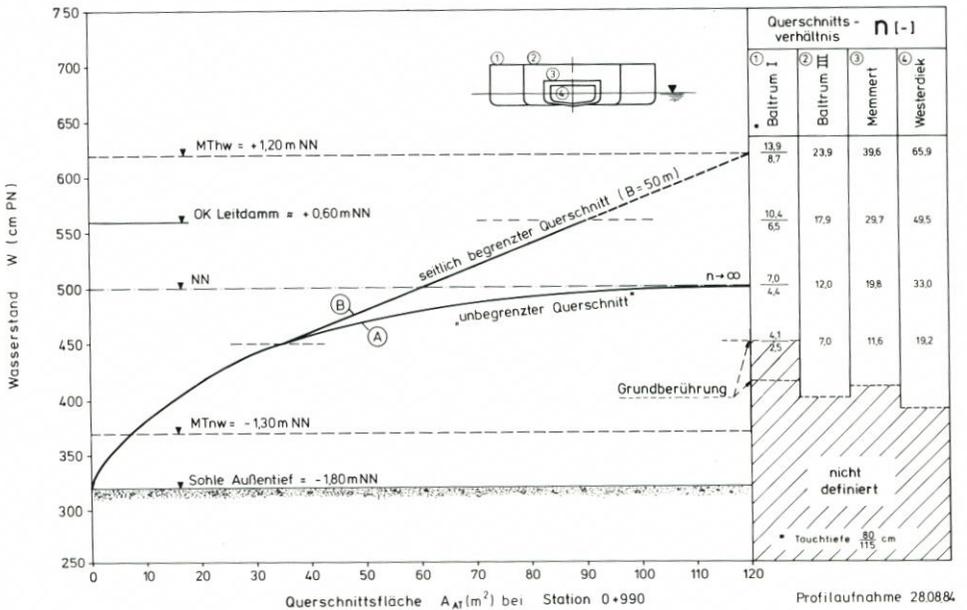


Abb. 18. Vertikale Aufweitung des Außentiefquerschnittes mit Querschnittsverhältnissen n [-]

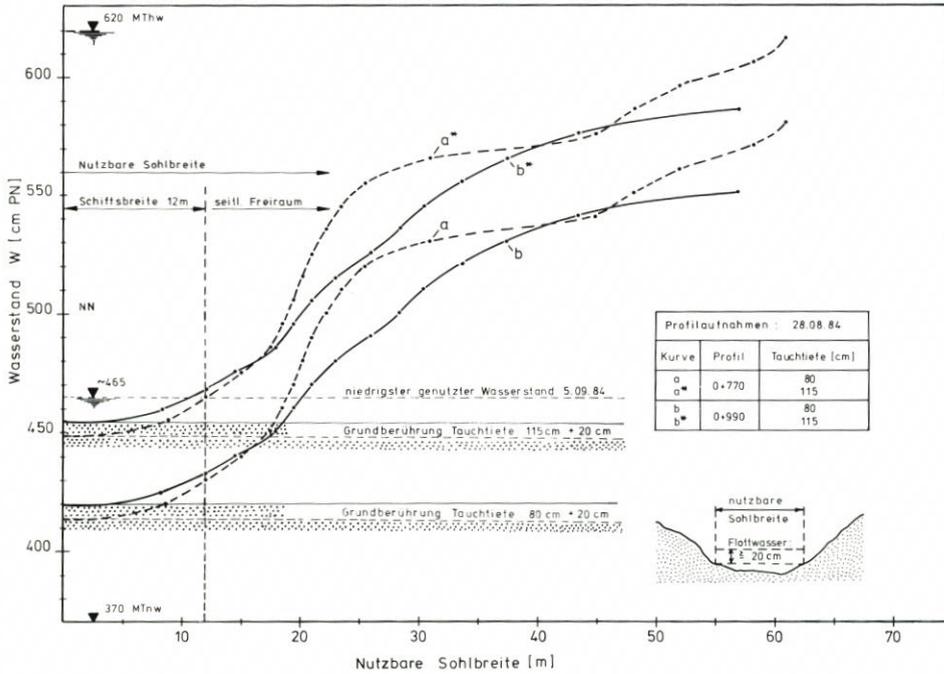


Abb. 19. Nutzbare Sohlbreiten für BALTRUM I unter Tideeinfluß in den Profilen 0 + 770 und 0 + 990

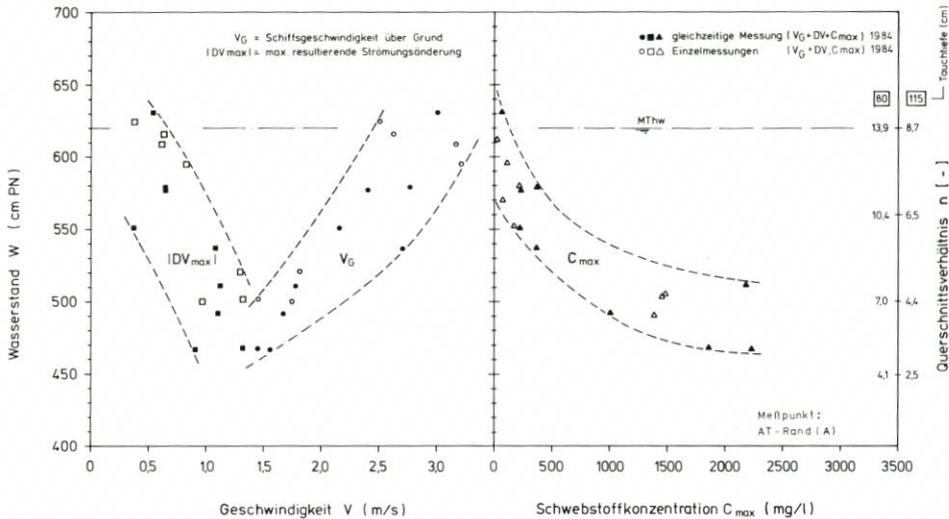


Abb. 20. Geschwindigkeit der BALTRUM I, resultierende Strömungsänderung und erzeugte Schwebstoffkonzentration

für schnelleres Fahren genutzt wurden. Wenn zugleich die resultierende Strömungsänderung ( $DV_{max}$ ) abzunehmen scheint, so kommt damit der Einfluß des zunehmenden Querschnittsverhältnisses ( $n$ ) zum Ausdruck. Nicht berücksichtigt wurden hier Einflüsse aus außermittiger Fahrt und Drift, die das Strömungsbild erheblich beeinflussen können.

Noch komplizierter sind die durch die vorgenannten Fahrtbedingungen verursachten Geschwindigkeiten der Außentiefströmung. Um dies anhand einiger Beispiele zu verdeutlichen, wurden vier ausgewählte Ereignisse für „Einfahrt BALTRUM I“ bei Flutstrom auf Abb. 21 dargestellt. Die zugehörigen Meßwerte der VBD wurden hier modifiziert als zeitlich variierende Strömungsänderung (DV) aufgetragen.

Bei Gegenüberstellung jeweils zweier fast identischer Ereignisse (H), ( $V_{ST}$ ) und ( $V_G$ ) werden Unterschiede bezüglich Betrag und zeitlichem Verlauf der Strömungsänderung (DV) deutlich. Daraus muß geschlossen werden, daß außer den bislang verwendeten schiffahrts-hydrodynamischen Parametern noch weitere Kennwerte für die bodennahen Vorgänge von Bedeutung sind.

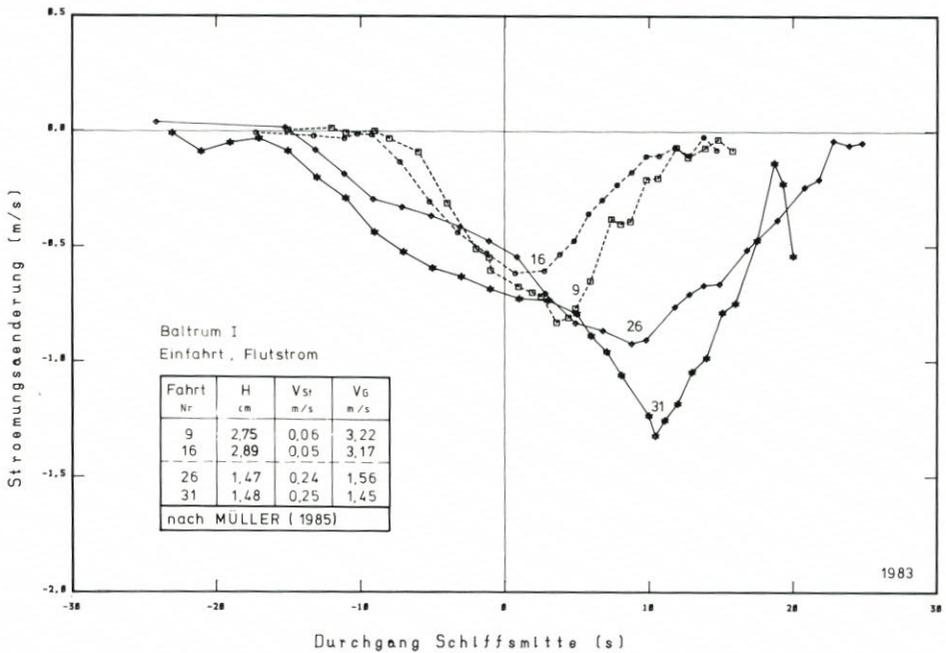


Abb. 21. Strömungsänderungen am Außentieftrand bei Passage der BALTRUM I

#### 4.2.2.3 Das Untersuchungsereignis als Störzustand

Wegen der räumlichen Unterschiede, der zeitlichen Variabilität und der unterschiedlichen Arten der zu berücksichtigenden Einflußgrößen sowie deren Wechselwirkungen ist eine systematische, vereinheitlichende und umfassende Darstellung der „Ereignisse“ z. Z. nicht möglich. Um jedoch eine anschauliche Beschreibung zu ermöglichen, wird nachfolgend versucht, eine generalisierende Modellvorstellung vom Ereignis zu entwerfen. Vor allem gilt dies für die zeitliche Gliederung des „Störzustandes“ und die Zuordnung zu den wesentlichsten hydrographischen Zustandsgrößen der Tidebewegung im Außentief.

Es wird von einer der natürlichen Transportfähigkeit der Außentiefströmung entsprechenden Schwebstoffkonzentration ausgegangen. Sie wird hier als Grundlast bezeichnet und entspricht einer Art von Gleichgewicht, wie sie bei den meisten Berechnungsformeln zum Sedimenttransport Eingang findet (vgl. z. B. ZANKE, 1978). Für Bilanzierungen

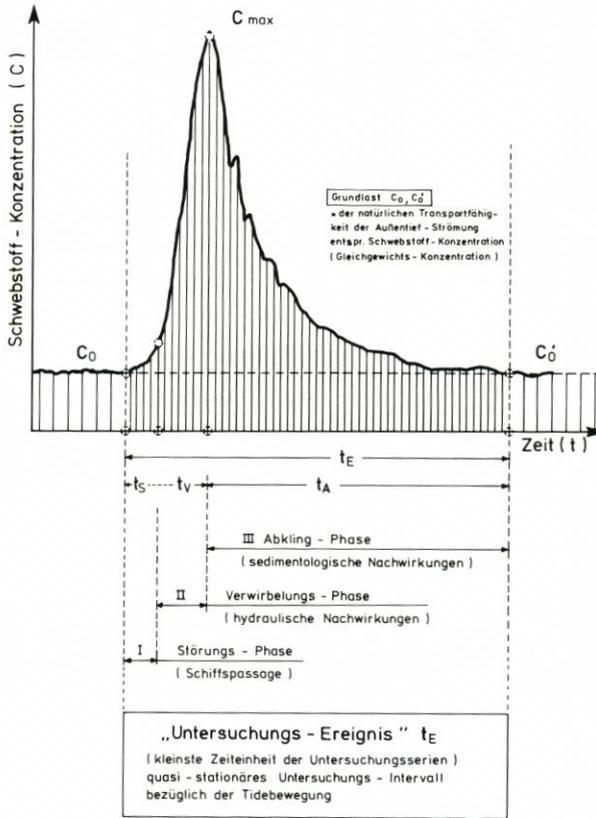


Abb. 22. Schematischer Verlauf der Schwebstoff-Ganglinie bei Schiffspassage

interessiert dabei die Kombination mit der effektiven Transportgeschwindigkeit, um nach räumlicher und zeitlicher Integration Aussagen über den resultierenden Materialversatz treffen zu können. (Mit diesem Problem beschäftigte sich vorwiegend das BfK.) Diesem Zustand überlagern sich anthropogene Störeinflüsse aus Schiffsbewegungen (und auch Spülungen des Außentiefs) mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Schwebstoffbewegung. Dabei interessiert für die Praxis die Frage, ob die effektive Grundlast der Außentiefströmung nach Beendigung des Störzustandes geändert wurde.

Der Störzustand wird hier in drei zeitlich aufeinanderfolgende Phasen gegliedert (vergl. Abb. 22):

Phase I – Störungsphase (Schiffspassage): Mit Änderungen von Wasserspiegel-lage und Strömungsgeschwindigkeiten beginnt in einem Meßprofil die Phase I. Damit kann nun in Sohlhöhe eine Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen über das Maß der vorhandenen Grundlast ( $C_0$ ) hinaus verursacht werden.

Die resultierende Strömungsgeschwindigkeit entsteht aus Überlagerungen von Tideströmungen, Verdrängungsströmung, antriebs- und steuerungsbedingten Turbulenzen. Phase I endet, sobald das Schiff den Meßquerschnitt passiert hat und der volle Durchflußquerschnitt wieder vorhanden ist.

Phase II – Verwirbelungs-Phase (hydraulische Nachwirkungen): Unmittelbar nach einer Schiffspassage bestimmen zunächst visuell festgestellte Wirbel und Walzen das

Strömungsbild. Das turbulente Strömungsverhalten entsteht beim Zusammentreffen von Propellerstrahl, rück- und nachströmendem Wasser. Diese Störungen klingen allmählich ab, und die tidebedingte Grundströmung stellt sich wieder im Außentief ein. Die entsprechenden Schwebstoffkonzentrationen erhöhen sich im allgemeinen bis in den meßbaren Maximalbereich. Möglicherweise führen erhebliche Dichteunterschiede infolge Suspension zu Ausgleichsströmungen und relativ schnellem Absinken größerer Sedimentmassen.

Die Phase II endet formal, sobald das meßbare Konzentrationsmaximum der Schwebstoffe erreicht ist.

Phase III - Abklingphase (sedimentologische Nachwirkungen): Nach der Störungs- und der Verwirbelungsphase nehmen Wasserspiegellage und Strömungsgeschwindigkeit weitgehend wieder ihre tidebedingten Größen an. Bei annähernd exponentieller Abnahme nähert sich die Schwebstoffkonzentration wieder einer der effektiven Transportfähigkeit des strömenden Wassers entsprechenden Grenze, nämlich der Gleichgewichtskonzentration ( $C_0'$ ).

Über die Dauer dieser Phasen läßt sich grundsätzlich nach vorliegenden Meßergebnissen folgende Aussage treffen:

Phase I :  $0 < (t_s) < 3 \text{ min}$

Phase II :  $0 < (t_v) < 3 \text{ min}$

Phase III:  $0 < (t_A) < 45 \text{ min}$

Die gesamte Ereignisdauer ( $t_E$ ) kann somit bis zu etwa 50 Minuten betragen. Die jeweilige Dauer der einzelnen Phasen hängt hauptsächlich von der Größe der Störung ab. Weitere Einzelheiten lassen sich aus den nachfolgenden Erläuterungen herleiten (vgl. auch Abb. 23).

Bei der Beurteilung von Schwebstoffkonzentrations-Ganglinien ist besonders zu berücksichtigen, daß nach den Untersuchungen des BfK vor allem jahreszeitliche und spülungsbedingte Variabilitäten des Gewässerbettes festgestellt wurden. Insbesondere handelt es sich dabei um die unterschiedliche Beschaffenheit und Zusammensetzung der Sedimente. Ein Vergleich von unter gleichartigen Bedingungen gewonnenen Ganglinien ist daher nur erschwert möglich.

#### 4.2.2.4 Wasserstandsbezogene Schwebstoffbewegung

Mit den Ausführungen über die Bedeutung des Querschnittsverhältnisses(n) für sohnnahe Strömungsänderungen wurde der Einfluß des Wasserstandes bzw. der Wassertiefe auf das hydraulische Geschehen erkennbar. Durch Schwebstoffkonzentrations-Messungen konnte die Wirkung von Schiffspassagen auf die Gewässermorphologie verdeutlicht werden. Aufschluß über Intensitäten solcher morphologischer Ereignisse soll hier die Versuchsreihe vom 20. 9. 84 geben.

Bei Ebbstrom begann eine Reihe von Testfahrten des Kutters WESTERDIEK. Sie unterschieden sich bei stets gleicher Maschinenleistung durch Fahrtrichtung und Kurs. Diesen Varianten lassen sich die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen ( $C_{max}$ ) nicht plausibel zuordnen, wohl aber deutet sich tendenziell an, daß die Spitzenwerte und der Wasserstand umgekehrt proportional zueinander sind (vergl. Abb. 16). Deutlicher läßt sich dies durch integrale Gewichtsmessungen belegen (Abb. 24). Der Tagesverlauf ist in sechs Abschnitte unterteilt. Hier bringt nun der Vergleich der Abschnitte (2) und (4) den Beleg für die umgekehrte Proportionalität. In beiden Fällen werden etwa 200 g Sedimente gewogen (Unterwassergewicht). In Abschnitt (2) wurden 16 Testfahrten bei höheren Wasserständen durchge-

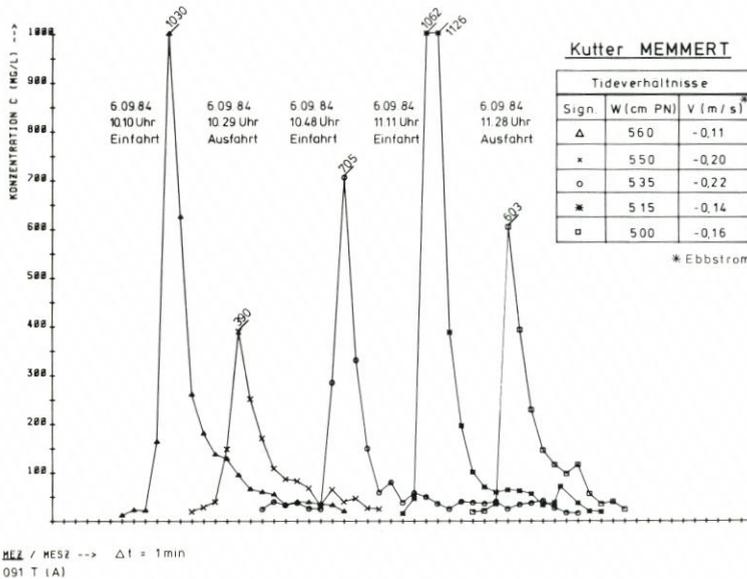
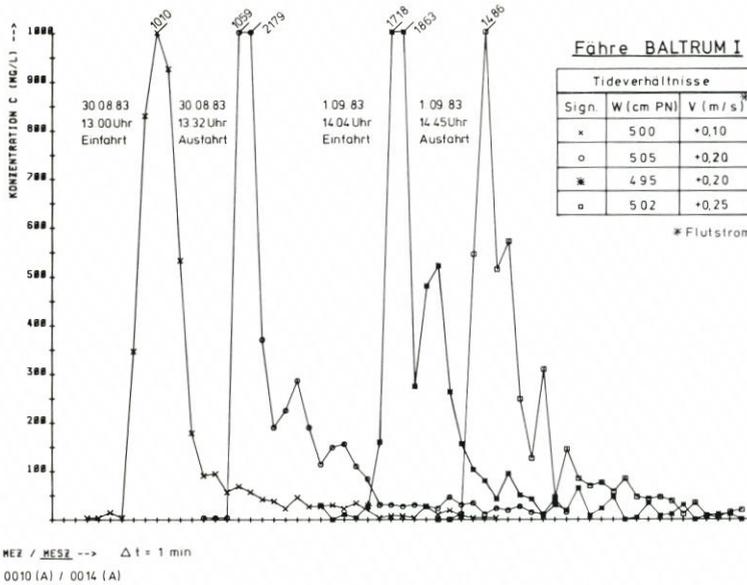


Abb. 23. Schifffahrtserzeugte Schwebstoff-Ganglinien / Beispiele für Meßpunkt B, Station 1 + 010

führt. Dem stehen nur sechs Ereignisse einschließlich eines Ablegemanövers bei niedrigen Wasserständen in Abschnitt (4) gegenüber. Grundlasten ( $C_0$ ) waren unbedeutend.

In entsprechender Weise läßt sich die umgekehrte Proportionalität auch durch Fahrten der BALTRUM I in den Abschnitten (1) und (5) aufzeigen. Die Ausfahrt des Schiffes gegen 8.30 Uhr kann keine erkennbare Veränderung im Verlauf der Gewichtsganglinie verursachen. Im Gegensatz dazu erzeugt die Einfahrt gegen 14.30 Uhr bei relativ niedrigem Wasserstand einen scharfen Knick und bewirkt eine Gewichtszunahme von etwa 340 g.

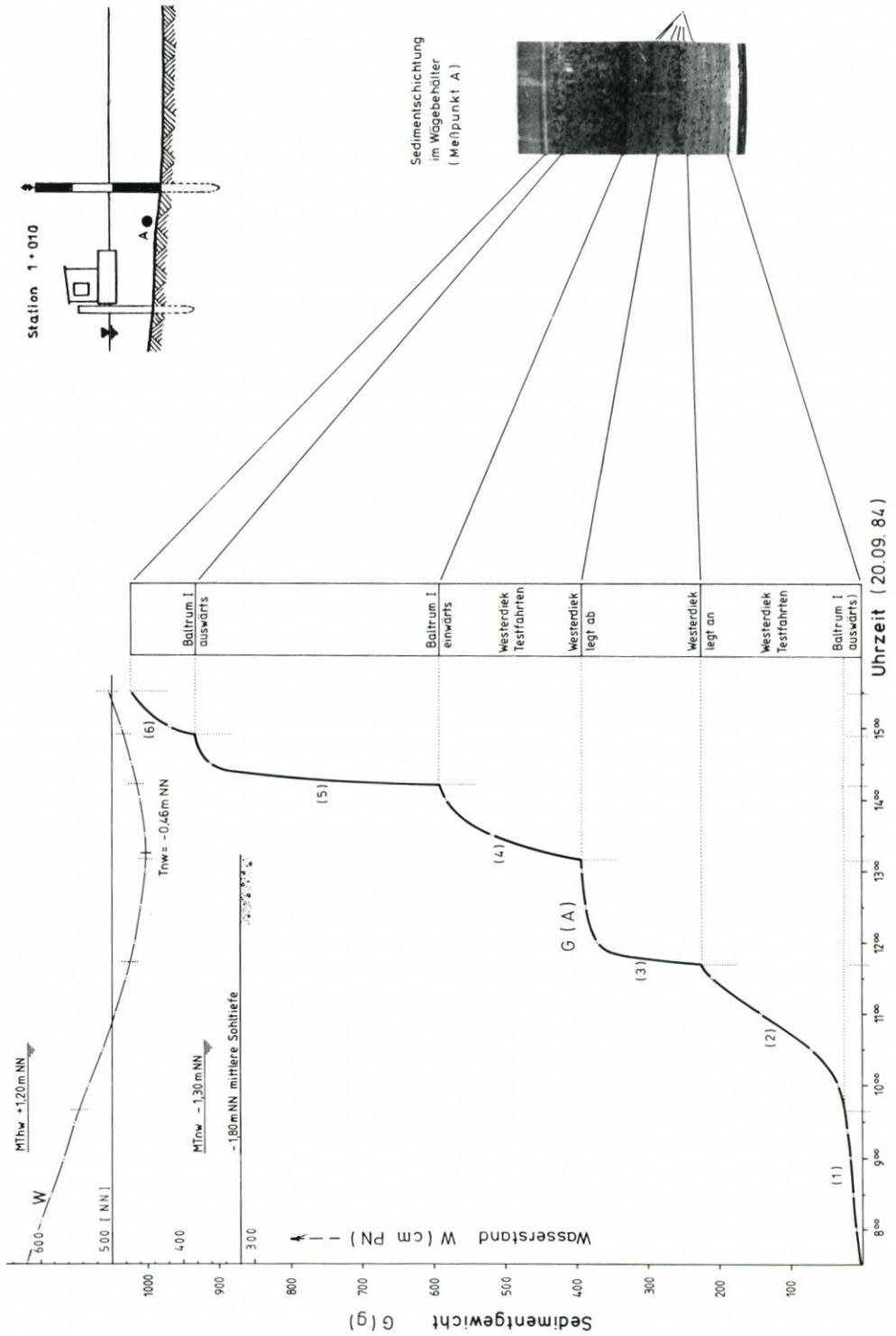


Abb. 24. Gewichtssummenkurven extrahierter Schwebstoffe unter besonderem Einfluß des Schiffsverkehrs / Meßpunkt A, 20. 9. 1984

Das besondere Augenmerk verdient die dem Gesamtzeitraum zugehörige Füllung des Wägebühlers im rechten Teil der Abb. 24. Die Sammelprobe blieb ohne Konservierung etwa eine Woche lang dem Tageslicht ausgesetzt. Dieser Umstand begünstigte das Wachstum von Organismen, die sowohl die Pumpenförderung als auch den nachfolgenden Hydrozyklondurchlauf offensichtlich unbeschadet überstanden hatten (im Hydrozyklon treten Beschleunigungen bis zum 2000fachen der Erdbeschleunigung auf!). Die Organismen markieren durch ihre schwarze Färbung drei Schichten, die zugleich mit extremen Anreicherungen der Schwebstoffkonzentrationen in Zusammenhang stehen ( $C_{\max} > 1000 \text{ mg/l}$ ). Als Ursachen sind zu nennen: ein längeres Anlegemanöver des Kutters stromaufwärts vom Meßpunkt A gegen 11.40 Uhr, eine Kuttereinfahrt stromaufwärts vom Meßpunkt A gegen 13.25 Uhr und eine Einfahrt der Fähre BALTRUM I gegen 14.10 Uhr. Alle anderen Kutterfahrten fanden weitgehend in Außentiefmitte statt und lassen sich mit leichteren Farbunterschieden der Sedimente (hellgelb – dunkelgrau) in Verbindung bringen.

Die Kutterversuche direkt stromaufwärts des Meßpunktes, also genau am oder über dem schllickigen Randbereich des Niedrigwasserbettes, sind mit ihrer Wirkung zum Beweis für dort verstärkt eintretende Erosionen bei Fährverkehr in Verbindung mit niedrigen Wasserständen geworden. Das Übermaß wird verständlich, wenn man bedenkt, daß in dieser Tidephase ein besonders großer Anteil verdrängten Wassers seitlich des Fährschiffes zurückströmen muß, denn im Verhältnis zu höheren Wasserständen ist nun nur noch ein kleiner Durchflußquerschnitt unter dem Kiel vorhanden. Für Kutter der hier verwendeten Größenordnung kann man nach diesem Versuch folgern, daß starke Sedimentaufwirbelungen nur in unmittelbarer Nähe des Schiffskörpers stattfinden und dabei nur einer geringen Verwirbelung unterliegen.

Verallgemeinernd ist festzustellen, daß mit sinkenden Wasserständen zunehmend überkritische Geschwindigkeiten bei sonst gleichen Bedingungen an der Sohle eines Außentiefs erzeugt werden können. Mit Sicherheit bedeutsam ist dabei die Entfernung zwischen Störquelle und Sohle. In erster Näherung darf von einer umgekehrten Proportionalität zwischen Wassertiefe und Ereignisintensität ausgegangen werden. Wellenwirkungen werden im nachfolgenden Abschnitt angesprochen.

#### 4.2.2.5 Querschnittsinterne Schwebstoffverteilung

In Anlehnung an die in Abschnitt 4.2.1 erläuterten Untersuchungsergebnisse über Konzentrationsverteilungen nach Spülbetrieb sollen nachfolgend die entsprechenden Verhältnisse infolge von *Schiffsbewegungen* dargestellt werden.

Grundlage sind die über eine volle Tide durchgeführten Untersuchungen vom 6. September 1984 für drei Meßpositionen (siehe Abb. 17). Deutlich ausgeprägte Konzentrationsspitzen unterschiedlicher Höhe markieren die Schiffspassagen. Bei meist unterschiedlicher Dauer zeigen die Abklingphasen häufig unruhige Verläufe. Mit späteren Tests wurde nachgewiesen, daß das Mittelungsintervall  $\Delta t = 1 \text{ min}$  den tatsächlichen Verlauf der Ganglinie nur sehr gedämpft wiedergibt, so daß Generalisierungsansätze kaum zum Erfolg führen können (s. 3.1.4). Hier konnte wegen hinreichender Anzahl von Versuchsfahrten wieder auf Gewichtssummenlinien zur Charakterisierung des Geschehens zurückgegriffen werden. Sie sind in Abb. 17 angedeutet und in Abb. 25 zusammengefaßt.

Grundsätzlich fällt auf, daß die Ganglinien für den in Sohlhöhe befindlichen Meßpunkt B wie schon beim Spülzustand größte Gewichtszunahmen und entsprechend auch höchste Konzentrationen belegen. Demgegenüber kehren sich die Verhältnisse für die beiden anderen

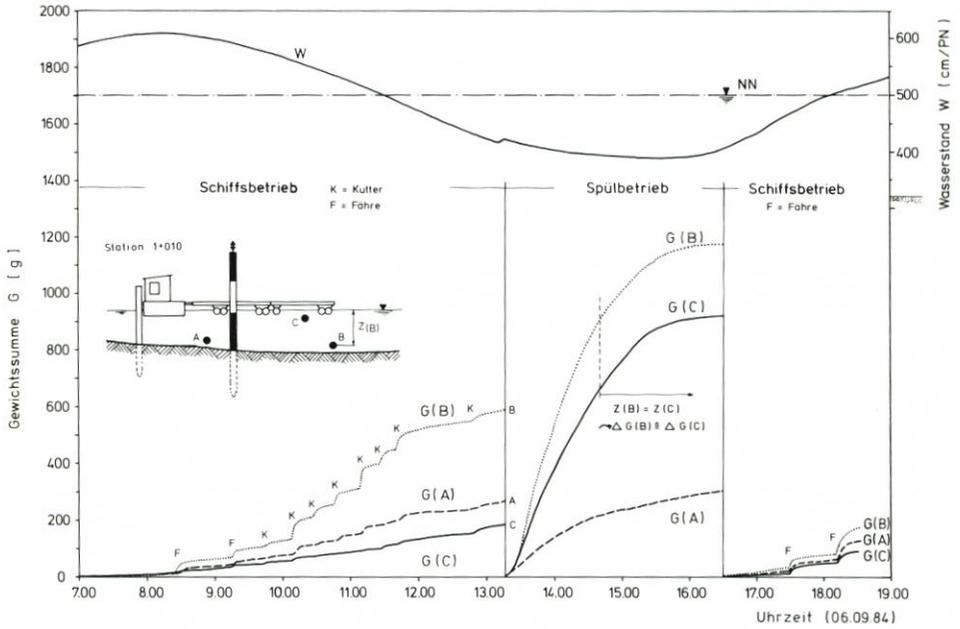


Abb. 25. Ereignisbezogener Vergleich der Gewichtssummenkurven / Meßpunkte A, B und C, 6. 9. 1984

Meßpunkte um. Nunmehr hat der ebenfalls in Sohlhöhe, jedoch in Randlage befindliche Meßpunkt A höhere Gewichtszunahmen als der in Fahrwassermitte fest unter Wasserspiegel befindliche Meßpunkt C zu verzeichnen.

Bei der Interpretation dieses eindeutigen Ergebnisses ist darauf zu achten, daß es im Verlaufe einer ganzen Tide ermittelt wurde. Während eines solchen Zeitraumes verlagern sich die *Relativpositionen* der Meßpunkte im benetzten Querschnitt ständig: Mit sinkendem Wasserspiegel bewegt sich nämlich der Punkt A in die Randlage, der Meßpunkt B nähert



Abb. 26. Fähre BALTRUM 1 bei der Ausfahrt vor Station 1 + 010

sich dem Mittelpunkt der Querschnittsachse, und der Meßpunkt C strebt ebenfalls dem Rand zu. Zugleich nähert sich dieser Meßpunkt aber auch absolut der Sohle. Infolge dieser Relativ- bzw. Absolutbewegungen befinden sich die Meßpunkte in Bereichen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten und Transportkapazitäten.

Obwohl sich die hydrodynamischen Verhältnisse im hier beschriebenen Außentief sehr von denjenigen in Binnenkanälen unterscheiden, ist nach Auffassung der Verfasser ein grober Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen von KREY (1911) sowie KEIL und PLATE (1971) angebracht. KREY berichtet von Formänderungen eines Trapezprofils im Dortmund-Ems-Kanal infolge von Schiffsbetrieb und weist den Trend zu Muldenprofilen infolge von Schiffsbewegungen durch umfangreiche Modellversuche nach. KEIL und PLATE kommen anhand von Untersuchungen für Querschnittsänderungen des Nord-Ostsee-Kanals zu der Schlußfolgerung, daß alle nicht muldenförmigen Profile als Erosionsprofile zu betrachten sind. In beiden Fällen stellt sich also ein profilinterner Gleichgewichtsstand zwischen den hydrodynamischen Einflüssen und der höhenabhängigen Neigung der Profilbereiche ein. Dabei wird nochmals hervorgehoben, daß die seitlich gelegenen Böschungsbereiche einer Schifffahrtsrinne verhältnismäßig starken Krafteinwirkungen ausgesetzt und damit erosionsgefährdet sind.

Ein ganz ähnlich gelagerter Gleichgewichtszustand scheint im Neßmersieler Außentief vorzuliegen. Die Ergebnisse eines recht kurzen Zeitabschnittes lassen die Schlußfolgerung zu, daß mit den verhältnismäßig hohen Schwebstoffkonzentrationen im Randbereich des Außentiefs (Meßpunkt A) eine entsprechend erodierende Wirkung auf den Hang einhergehen müßte.

Dem vor Ort weilenden Beobachter fällt auf, daß seitlich eines Schiffes mitlaufende Wellen mehr oder minder stark über der Böschungskante der Niedrigwasserrinne gebeugt werden (Abb. 26). Bei sehr geringen Wasserständen unter NN kann dort gelegentlich auch das Brechen ausgeprägter Bug- oder Heckwellen beobachtet werden. Diese Wellenverformungen lassen Erosionen erwarten.

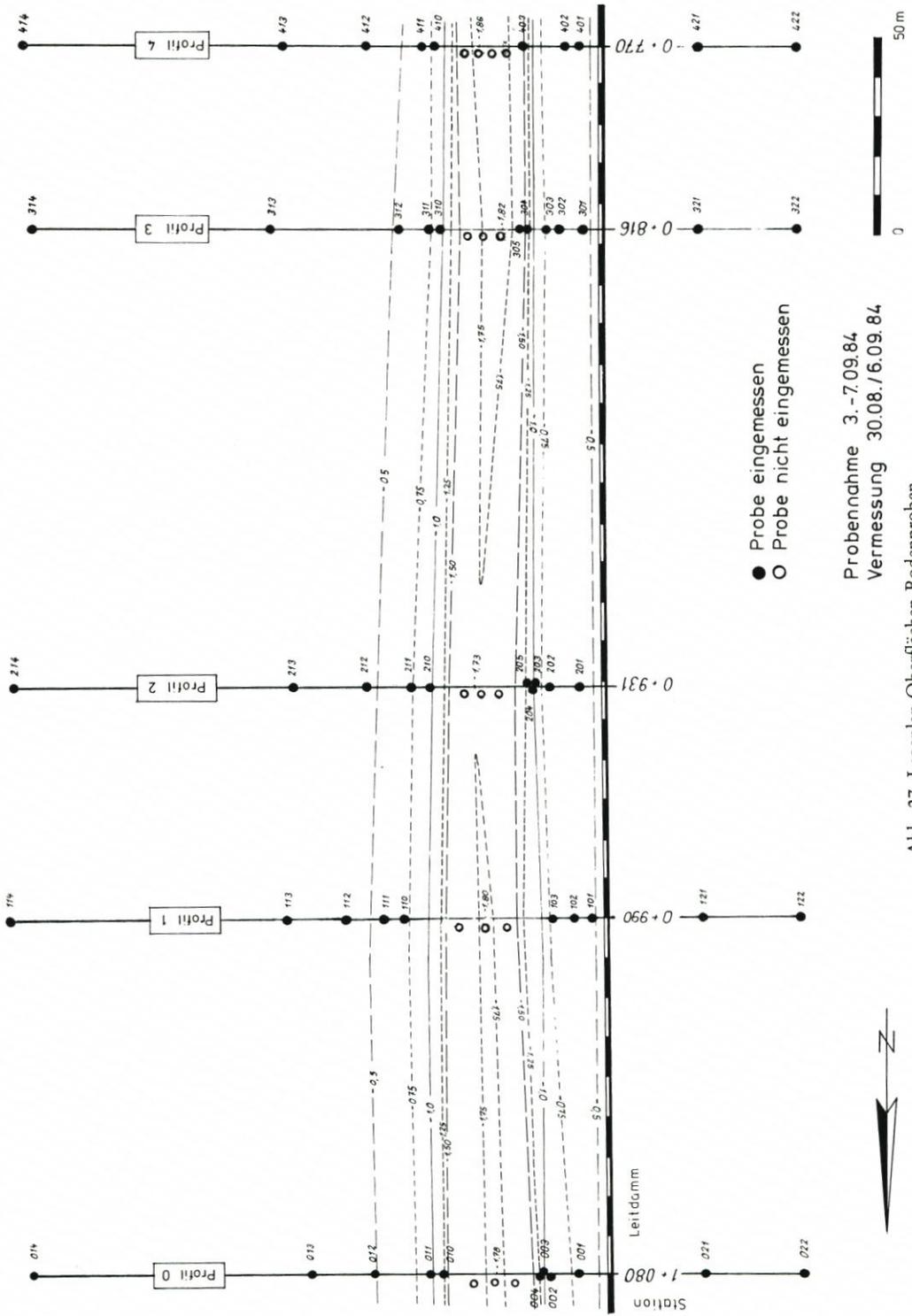
In der nachfolgenden Analyse von Sedimenten im Bereich der Meßstelle werden die hier getroffenen Annahmen und Feststellungen untermauert.

#### 4.2.3 Sedimente im Bereich der Meßstelle

Bisher liegen nur wenige Erkenntnisse über den schifffahrtserzeugten Sedimenttransport vor. Die Frage nach morphologischen Auswirkungen des Schiffsverkehrs ist gleichbedeutend mit der Frage nach der Herkunft in Schwebefähiger Teilchen. Schlickige Außentiefenränder an der Niedrigwasserlinie und eine nach Augenschein feste Außentiefsohle legten es nahe, zunächst die Bodenoberfläche auf Besonderheiten in den Kornzusammensetzungen zu überprüfen. Mit dem Meßsystem SEDIWA/Halbautomat war es möglich geworden, hinreichend große Probenmengen von Schwebstoffen zu gewinnen. Ein Vergleich der Proben sollte Aufschluß über die Herkunft von Sedimenten bringen.

In fünf Profilen wurden Oberflächenbodenproben entnommen (s. Abb. 1 und 27). Der Befund sollte für die hier angestellten Betrachtungen das aktuelle Sedimentations- bzw. Erosionsgeschehen repräsentieren.

Aus der häufigsten Ereignisdauer ( $t_E$ ) von etwa 20 Minuten und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,2 (m/s) während der schiffbaren Tidephasen wurde überschlägig die Lage des am weitesten von der Meßstation (1 + 020) entfernten Profils ermittelt. Die Bodenproben wurden nach dem unter Punkt 1.3.5 beschriebenen Verfahren gesichert und bearbeitet.



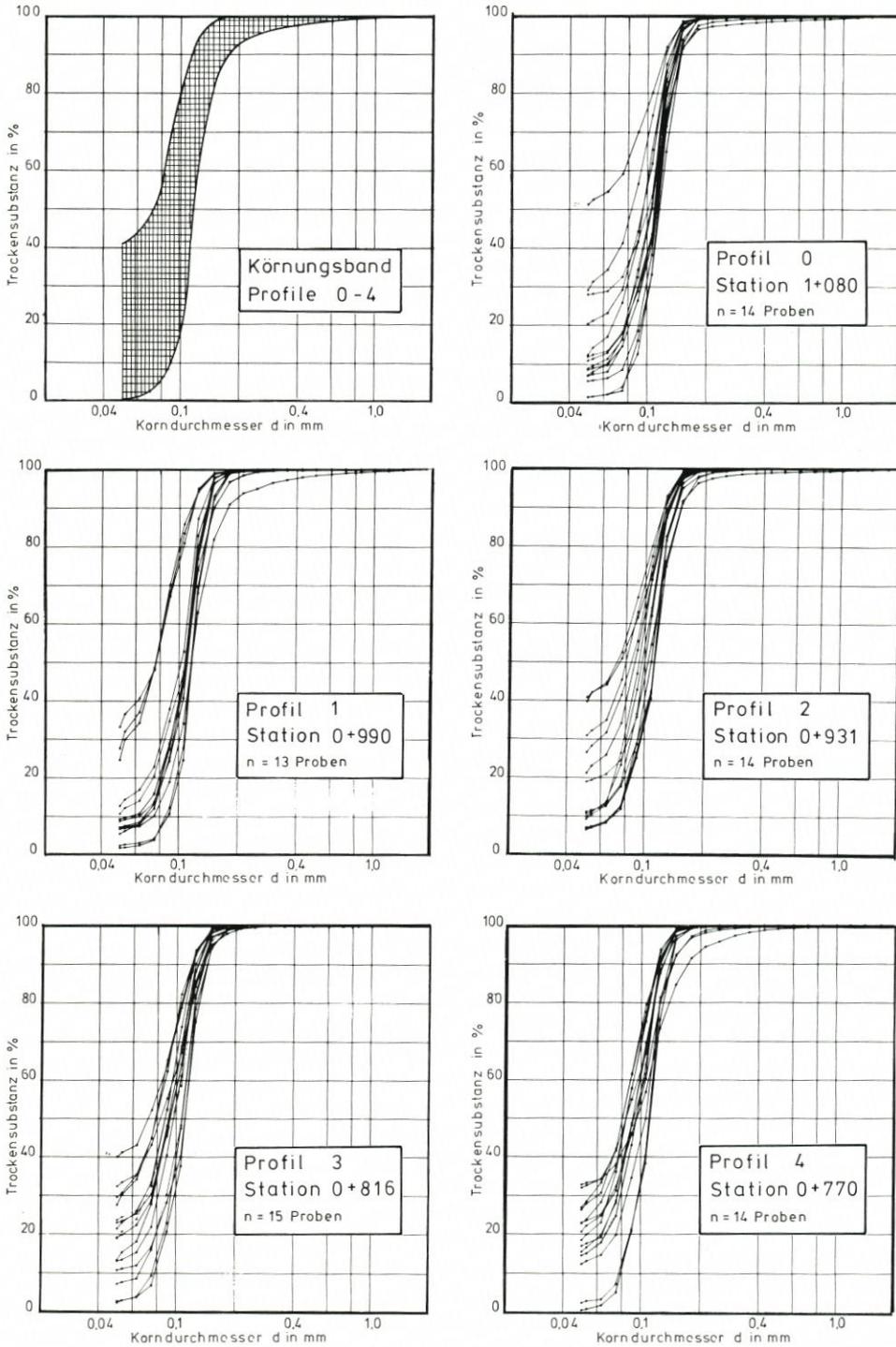


Abb. 28. Körnungsband und Korngrößenverteilung der Bodenproben als  $\Sigma$  Schlammkorn + Siebkorn (Def. Schlammkorn:  $d \leq 0,05$  mm, Siebdurchgang nach ASTM)

Die Körnungslinien wurden nach Profilen zusammengefaßt und in Abb. 28 dargestellt. Um jedoch lokale Besonderheiten besser erkennen zu können, wurden dieselben Proben in Anlehnung an GAST et al. (1984) in drei Fraktionen mit den Zwischengrenzen 0,063 mm und 0,125 mm eingeteilt und in Dreiecksdiagramme eingezeichnet (Abb. 29 u. 30). Hier läßt sich bei Zusammenfassung der Proben ähnlich gelegener Profilverpunkte erkennen, daß das Außentief mit Leitdamm eine Unstetigkeitsstelle im sonst großflächig gleichartigen Wattenboden bildet. Mit der Zusammenfassung wurden fünf Bereiche jeweils gleichartiger hydraulischer Bedingungen für Erosion und Sedimentation bestimmt. Es sind Fahrrinne, östlich und westlich gelegene Wattflächen sowie die Übergangsbereiche Ostufer/Böschung und Westufer/Leitdamm bis Fahrrinne.

Die zuvor getroffene Annahme einer „festen“ Außentiefsohle wird durch relative Grobkörnigkeit dieses Bereiches gegenüber den angrenzenden Böschungen bestätigt. Östlich des Außentiefs, und hier besonders im Böschungsbereich der Niedrigwasserrinne, ist der Boden von feineren Anteilen geprägt, während am Westufer geringfügig gröberes Material liegt. Es ähnelt zwischen Leitdamm und Fahrrinne dem der gegenüberliegenden Böschung. Ausgesprochen deutlich heben sich die westlich des Leitdamms entnommenen Proben von den übrigen ab. Sie enthalten kaum schlämbare Anteile und sind sehr gleichartig zusammengesetzt. Die Unterscheidungsmerkmale der fünf Bereiche dürften damit markant sein.

Das Watt liegt westlich des Leitdamms deutlich höher als auf der Fahrwasserseite. Das dort gefundene Bodenmaterial ist grobkörniger als in der Rinne und ähnelt in seiner Zusammensetzung einkörnigem Sand (Abb. 28). Sehr wahrscheinlich handelt es sich hier um eine Klassierung des normalerweise anzutreffenden Materials durch Wellenunruhe. NIEMEYER (1983) nennt die Strömungsfelder des Seegangs als die gestaltenden morphologischen Kräfte im Watt. Nach seinen Untersuchungen werden bei auflandigen Starkwind- und Sturmwehertagen die Wellenkämme auf der Westseite des Leitdamms zum Bauwerk hin gebeugt, während sie auf der Ostseite weniger beeinflusst durch das Außentief laufen. Abgesetztes Material muß demnach westlich des Leitdamms einer intensiveren Klassierung unterliegen.

RAGUTZKI (1982) stellt fest, daß Feinststoffe besonders im Schutz von Bauwerken wie Leitdämmen und Buhnen abgelagert werden können. Als derart geschützter Bereich käme hier die Wattfläche östlich des Leitdamms in Betracht, wobei die Außentiefrinne wegen der dort relativ großen Wassertiefe sogar eine besondere Schlickfalle darstellen muß. Da der gesamte östliche Bereich jedoch in vier markant unterschiedlichen Zonen mit auffällig groben Sedimenten im Rinnenbereich aufgegliedert ist, kann dieser Zustand nur durch ständige Sedimentklassierungen entstanden sein.

Es sei nochmals an den Ereignisverlauf bei Schiffspassagen erinnert. Gemessene Änderungen sohlener Strömungsgeschwindigkeiten betragen bis über 1 m/s (vergl. Abb. 21). Die kritischen Geschwindigkeiten für alle anstehenden Korngrößen werden damit deutlich überschritten. Nach derart verursachten Sedimentaufwirbelungen tritt unter dem Einfluß der Tideströmung die Klassierung ein, da aus den unterschiedlichen effektiven Sinkgeschwindigkeiten der Kornfraktionen ungleiche Absatzwege resultieren. Klassierung bedeutet auch, daß die Sedimente locker gelagert werden und daß damit die kritische Geschwindigkeit für den nächsten Erosionsbeginn dieses Materials vorerst herabgesetzt ist.

Der Klassiervorgang kann auch über das verwendete Meßverfahren durch Kornanalysen der im Wägebühler gesammelten Sedimente nachvollzogen werden. Bei der verfahrensbedingt kontinuierlichen Probenahme über den Ereigniszeitraum ( $t_E$ ) muß der Feinststoffanteil im Wägebühler größer als im anstehenden Sohlmaterial sein, weil feinere Partikel länger in Schwebe bleiben als größere. Die Gegenüberstellung entsprechender Kornanalysen in den Abbildungen 29 und 30 bestätigt diesen Sachverhalt. Über die Herkunft der Sedimente im

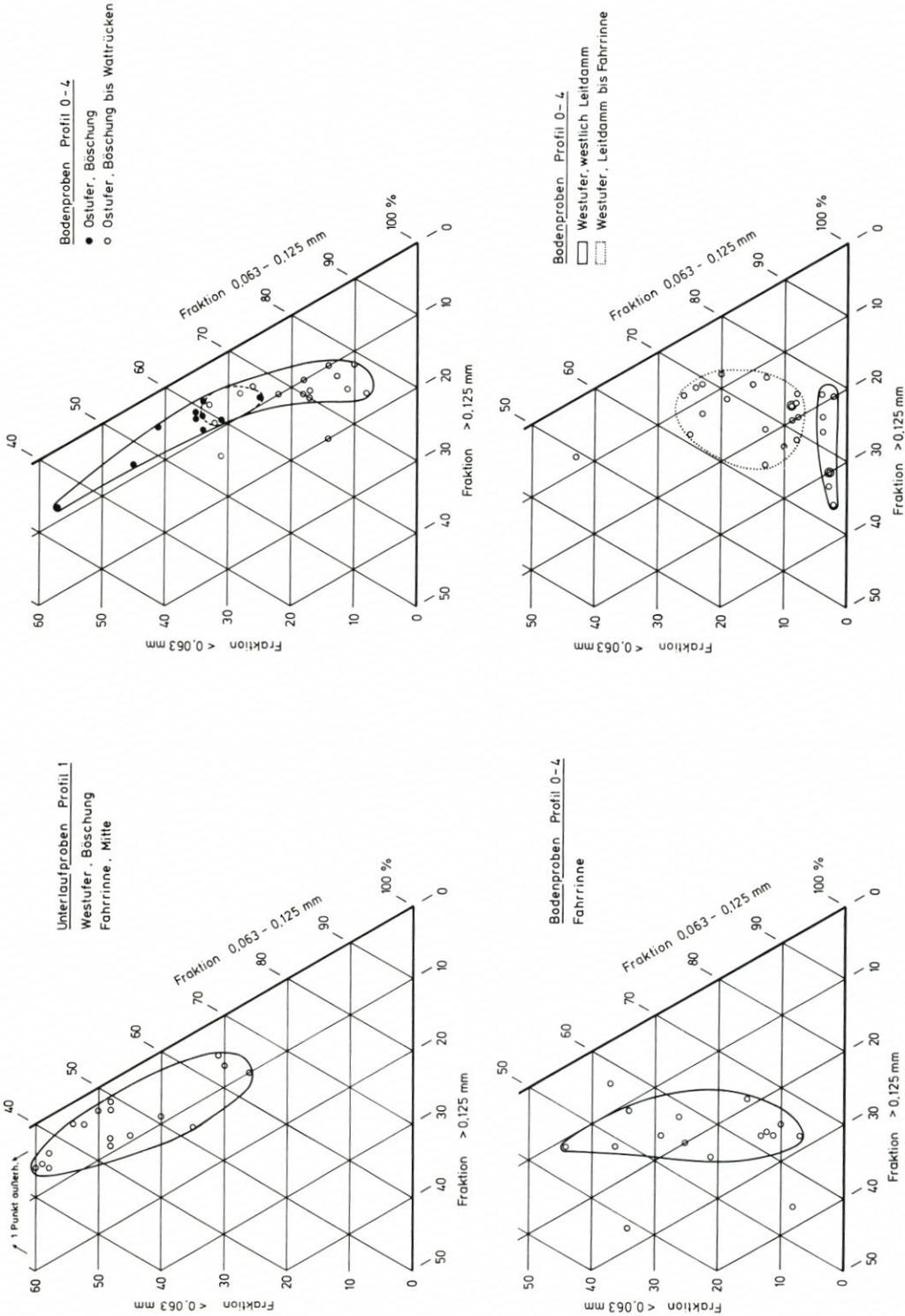


Abb. 29. Bodenproben in Dreikomponentendarstellung, gegliedert nach Entnahmereichen

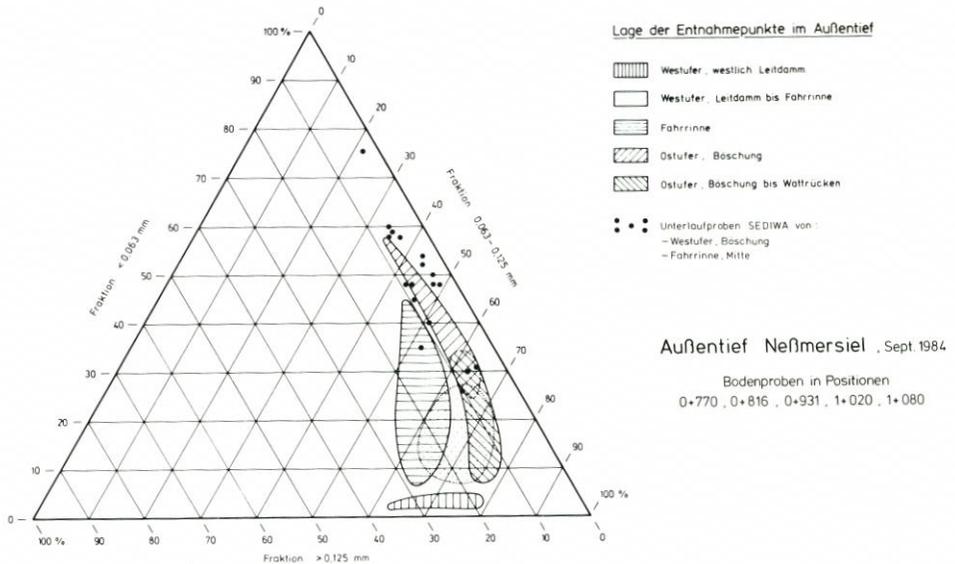


Abb. 30. Bodenzusammensetzungen im Außentiefbereich nach ausgewählten Profilen

Wägebehälter bzw. die Transportwege des Bodenmaterials liefern die vorliegenden Meßergebnisse und Analysen kaum Anhaltspunkte.

Schiffsverkehr leistet also gegebenenfalls durch Umlagerung und Auflockerung des Sohlmaterials einen bedeutsamen Beitrag zur morphologischen Gestaltung von Außentiefs.

### 5. Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Annahme, daß der Schiffsbetrieb in einem Außentief zu dessen Versandung und schließlich zur Unschiffbarkeit beiträgt, ist unter Beachtung der vorliegenden Ergebnisse generell nicht gerechtfertigt. Jedes Schiff hat in Abhängigkeit von den Querschnittsverhältnissen ( $n$ ) und seiner Fahrtgeschwindigkeit eine spezifische Wirkung auf das Gewässerbett. Sie kann unter günstigen Voraussetzungen völlig unbedeutend sein. Grundsätzlich können Sedimente durch Schiffswirkung aufgewirbelt werden. Ob dies aus der Überlagerung von Tide und Binnenwasserabfluß zu einer Räumung oder Verflachung der Rinne mit Barrenbildung führt, ist im Einzelfall gesondert zu überprüfen. Für das Neßmersieler Außentief bleibt die Beantwortung dieser Frage wegen des Grundlagencharakters der vorliegenden Arbeit weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Die hier vorgestellten Ergebnisse über Untersuchungen zum „schiffahrtserzeugten Schwebstofftransport“ berühren drei Themengruppen:

- Die kontinuierliche In-situ-Messung von Schwebstoffbewegungen mit quantitativ verbindlichen Massenangaben wurde erstmals durch das hier neu entwickelte Meßverfahren SEDIWA (Sedimentwaage) ermöglicht. Es wird derzeit im Bereich der Resttrübe (Korndurchmesser  $d < d_T = 5 \mu\text{m}$  und organisches Material) erweitert. Über Entwicklung und praktische Erfahrung wird an anderer Stelle berichtet werden.
- Die Durchführung von Versuchen im Naturmaßstab hat sich als realisierbar erwiesen. Nach vorliegenden Erkenntnissen gibt es derzeit keine Theorien oder Modellgesetze, mit deren Hilfe das Problem grundsätzlich anders lösbar wäre. Maßgebende

Gründe sind die hydraulischen Eigenschaften des schwebenden und des am Boden ruhenden Materials sowie die kurzzeitig vorliegenden, hochgradig instationären Strömungsverhältnisse mit ihren großen Kraftwirkungen auf das Material.

- Die Auswertung umfangreichen Datenmaterials der instationären Zustandsgrößen für Hydrodynamik und Schwebstoffkonzentration stellt hohe Anforderungen bezüglich Datenverwaltung und Folgebearbeitung. Die Bewertung von Naturmeßwerten anhand von Transportformeln ist richtungweisend, findet jedoch ihre Grenzen wegen der instationären Verhältnisse. Verallgemeinerungen der zusammengestellten Ergebnisse sind zur Zeit noch nicht möglich, da nach Ansicht der Verfasser bisher zu wenig vergleichbare Daten vorliegen.

Weiterführende Untersuchungen unter der Zielsetzung „Messung des schiffahrtserzeugten Schwebstofftransportes“ sollten wegen der geringen Dauer, mit der die Geschwindigkeitsänderungen und auch maximale Schwebstoffkonzentrationen auftreten, unter Verwendung einer zentralen Datenerfassung stattfinden. Daneben sollte die Anzahl erfassbarer Parameter erhöht werden (z. B. mehrdimensionale Strömungsmessung, Schiffsposition). Örtliche Gegebenheiten bestimmen jeweils die Anzahl einzurichtender Meßpunkte. Abschließend wird angeregt, für ähnliche Untersuchungen auch mit „mobilem Meßgerät“ zu arbeiten, weil in engen Fahrwassern nicht ungestört gemessen werden kann, in breiten Rinnen hingegen sehr hoher Aufwand für das Einrichten der Meßstellen entsteht. Optimale Versuchsverhältnisse sind gegeben, wenn zugleich stationäre Meßstationen in günstigen Positionen vorhanden sind.

Es ist denkbar, daß am Ende weiterer Untersuchungen zu diesem Themenkreis ein Katalog von Betriebsempfehlungen stehen wird. Sie könnten auf der Basis von Querschnittsverhältnissen (n) Vorgaben für die Abmessungen von Regelschiffen sowie für wasserstands- und strömungsorientierte Fahrtgeschwindigkeiten liefern und auf diese Weise zur Erhaltung oder Optimierung der Fahrwasserverhältnisse beitragen.

## 6. Schriftenverzeichnis

- BAUAMT FÜR KÜSTENSCHUTZ NORDEN: KFKI-Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Spülung“ (AT-S)“ (unveröff.). Jber. 1984 und 1985.
- BEDNARCZYK, K.: Auswirkungen von gesteuerten Spülströmen und von Schifffahrtseinflüssen auf die Außentiefquerschnitte – Teil 2: Auswirkungen von Schifffahrtseinflüssen (unveröff.). Vortrag der 3. Vortragsveranst. d. KFKI/HTG f. d. Fachber. Küstenforschung und Küsteningenieurwesen, 8. 11. 1984, Hamburg.
- BLANKENSTEIN, H., BRANDT, G. U. NIEMEYER, H. D.: Strommessungen im Bereich des Neßmer Außentiefs. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Jber. 1984, Bd. XXXVI, Norderney, 1985.
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien am Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk. Hamburger Küstenforschung, H. 28, 1974.
- CHRISTIANSEN, H.: Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe. Die Küste, H. 42, 1985.
- COLDEWEY, H.-G.: Sielzugberechnung unter Berücksichtigung von Außentiefverlusten. Wasser und Boden, H. 10, 1979.
- DVWK: Regeln zur Wasserwirtschaft 125/1986 (Schwebstoffmessungen: Schwebstoff/Meßrichtlinie), (insbes. Anlage 12).
- ERCHINGER, H.-F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neßmersiel – Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser und Boden, H. 8, 1984.
- ERCHINGER, H.-F., COLDEWEY, H.-G. U. PROBST, K.: Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“. Die Küste, H. 44, 1986.
- GAST, R., KÖSTER, R. U. RUNTE, K.-H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Melderfer Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.

- GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH: Das Bilanzierungsexperiment 1982 (BILEX '82) auf der Unterelbe – Experimentelle und theoretische Hilfsmittel, Ergebnisse und ihre Bewertung. GKSS-Bericht 85/E/3, März 1985.
- GÖHREN, H.: Ein automatisches Schwebstoff-Dauermeßgerät für den Einsatz im Wattenmeer und in Brandungszonen. Die Küste, H. 24, 1973.
- KEIL, G.-W. u. PLATE, U.: Sediment-Transport in einem Seeschiffahrtskanal. Die Küste, H. 21, 1971.
- KNISS, H. G.: Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen in Binnenschiffahrtskanälen. Mitt. Bl. Nr. 53 d. BAW, Karlsruhe, 1983.
- KREY, H.: Modellversuche über den Schiffahrtsbetrieb auf Kanälen und die dabei auftretende Wechselwirkung zwischen Kanalschiff und Kanalquerschnitt. Mitt. ü. Forschungsarb. auf d. Gebiet d. Ing.-wesens; insbes. aus d. Laboratorien d. techn. Hochschulen, H. 107, VDI, Verl. Julius Springer, Berlin, 1911.
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN: Gerätekonzept des KFKI-Forschungsvorhabens „Außentiefstabilität“ (AT-N, S) (unveröff.). 1983a.
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN: Versuchsmodell SEDIWA im Rahmen der Geräteentwicklung für Sedimentkonzentrationsmessungen (unveröff.). Versuchsbericht, 1983b.
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN: Sedimentkonzentrationsmessung – Schwerpunktdiskussion im Rahmen der 6. Sitzung der KFKI-Projektgruppe „Außentiefstabilität“ (AT-N, S) am 16./17. 5. 1984 in Büsum und am Eidersperrwerk (unveröff.).
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN: KFKI-Forschungsvorhaben „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“ (AT-N) (unveröff.). Jber. 1984 und 1985a.
- LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN: Untersuchungen zur Bedeutung der isokinetischen Entnahme (einschließlich Gerätevergleich) bei den Sedimentmessungen in der Eider (unveröff.) 1985b.
- MÜLLER, E.: Druck- und Strömungsverteilung infolge fahrender Schiffe im Außentief Neßmersiel (unveröff.). Versuchsanst. f. Binnenschiffbau e. V. Duisburg, Ber. 1141, 1985.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- NEUMANN, L.: AMO – die automatische Meßstation Oortkaten – Meßsystem zur Sammlung von Schwebstoffproben und Messung von Begleitparametern. Die Küste, H. 42, 1985.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an der inselgeschützten Wattenküste (unveröff.). Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, Forschungsbericht BMFT – MF 0203, 1983.
- RAGUTZKI, G.: Verteilung der Oberflächensedimente auf den niedersächsischen Watten. Forschungsstelle f. Insel- und Küstenschutz, Jber. 1980, Bd. XXXII, Norderney, 1982.
- RENGER, E.: Zweidimensionale Stabilitätsanalyse von Tidebecken und Watteinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, H. 34, 1980.
- RENGER, E.: Dauermessungen des suspendierten Feststoffgehaltes im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen. Int. Conf. on Marine Res., Ship Technol. and Ocean Engineering, IMT 82-418, Hamburg, 1982.
- RENGER, E.: Development of a Sediment Transport Measuring System. 19th Int. Conf. on Coast. Eng. (ICCE), Houston/Texas, 1984.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. des Franzius-Inst., TU Hannover, H. 34, 1970.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981 bis 1983. Die Küste, H. 40, 1984.
- STURTZEL, W., GRAFF, W. u. MÜLLER, E.: Untersuchung der Verformung der Wasseroberfläche durch die Verdrängungsströmung bei der Fahrt eines Schiffes auf seitlich beschränktem, flachem Fahrwasser. Mitt. d. Versuchsanst. f. Binnenschiffbau e. V. Duisburg, Nr. 83, 1963.
- TRAWINSKI, H.: Theory, applications and practical operation of hydrocyclones. Engineering and Mining Journal (E/M), 1976.
- ZANKE, U.: Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport – Teil 1: Berechnung des Sedimenttransportes – allgemeiner Fall –. Mitt. d. Franzius-Inst., TU Hannover, H. 47, 1978.