

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST



3950-A-2012-0000052

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

HERAUSGEBER:
KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

Heft 44 – 1986

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

ISSN 0452-7739
ISBN 3-8042-0400-7

BEDNARCZYK, Klaus, Dipl.-Ing., Dorfstr. 84, 2301 Felde; BINEK, Helmut, Ing., Oderstr. 108a, 4100 Duisburg 11; COLDEWEY, Hans-Gerd, Dipl.-Ing., Gartenweg 12, 2984 Hage; ERCHINGER, Heie Focken, Dipl.-Ing., Heinrich-Heine-Str. 23, 2980 Norden; LANG, Günther, Dipl.-Geophys., Geibelstr. 34, 3000 Hannover 1; LASSEN, Horst, Dipl.-Ing., Alte Rabenstr. 30, 2000 Hamburg 13; MARKOFKY, Mark, Prof. Dr.-Ing., Dienemannhof 19, 3000 Hannover 91; MÜLLER, Ernst, Dr.-Ing., Landfermannstr. 26, 4100 Duisburg 1; PROBST, Klaus, Dipl.-Ing., Wichter Sandweg 14, 2984 Hage; RENGER, Eberhard, Dr.-Ing., Wolfskamp 8, 2300 Kiel-Molfsee; ROHDE, Hans, Dr.-Ing., Wedeler Landstr. 157, 2000 Hamburg 56; SCHUBERT, Reiner, Dipl.-Ing., Badenstedter Str. 68, 3000 Hannover 91; SIEFERT, Winfried, Prof. Dr.-Ing., Haydnstr. 25, 2190 Cuxhaven.

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.
Vorsitzender: Ministerialrat Dr. F. WILCKENS, Bundesministerium für Forschung und Technologie,
Heinemannstraße 2, 5300 Bonn 2.

Geschäftsführer: Dr.-Ing. Heinz WISMER, Hindenburgufer 247, 2300 Kiel.
Schriftleiter: Dr.-Ing. Harald GÖHREN, Dalmannstraße 1-3, 2000 Hamburg 11.

Inhaltsverzeichnis

ROHDE, Hans, Dr.-Ing. Die Forschungsarbeiten des KFKI 1984-1986	1
ERCHINGER, Heie F., Dipl.-Ing. COLDEWEY, Hans-Gerd, Dipl.-Ing. PROBST, Klaus, Dipl.-Ing. Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“	17
MÜLLER, Ernst, Dr.-Ing. BINEK, Helmut, Ing. Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief	65
RENGER, Eberhard, Dr.-Ing. BEDNARCZYK, Klaus, Dipl.-Ing. Schiffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief	89
SIEFERT, Winfried, Prof. Dr.-Ing. LASSEN, Horst, Dipl.-Ing. Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe	133
MARKOFSKY, Mark, Prof. Dr.-Ing. LANG, Günther, Dipl.-Geophys. SCHUBERT, REINER, Dipl.-Ing. Numerische Simulation des Schwebstofftransportes auf der Basis der Meßkam- pagne MASEX '83	171

Die Forschungsarbeiten des KFKI 1984–1986

Von HANS ROHDE

Zusammenfassung

Anknüpfend an die früheren Berichte über die Forschungsarbeiten des „Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (KFKI) (veröffentlicht in „Die Küste“, H. 34, 1979; H. 37, 1982 und H. 40, 1984) wird ein kurzer Überblick über den Stand der gegenwärtig bearbeiteten Forschungsprojekte gegeben, und es werden die für die nahe Zukunft geplanten Projekte genannt.

Summary

Referring to the former reports about the research projects of the „Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (KFKI) (published in „Die Küste“, H. 34, 1979; H. 37, 1982 and H. 40, 1984) a brief general view is given of the recent research projects and those, which are planned for the near future.

Inhalt

1. Allgemeines	1
2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsvorhaben	3
2.1 Küstenkartenwerk und Wiederholungsvermessungen	3
2.2 Morphologische Analysen Nordseeküste (MORAN)	5
2.3 Schlick/Schwebstoffe in Ästuaren	6
2.4 Tide- und Windstauentwicklung vor der Küste der südöstlichen Nordsee	7
2.5 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren	8
2.6 Untersuchungen über die Stabilität von Außentiefs	9
2.7 Wasserstandsuntersuchungen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste	10
2.8 Restarbeiten aus früheren Vorhaben	12
3. Ausblick	13
3.1 Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt	13
3.2 Stabilität topographischer Einheiten	14
3.3 Seegangsuntersuchungen	14
4. Schriftenverzeichnis	15

1. Allgemeines

Nachdem in den Heften 34, 37 und 40 der Schriftenreihe „Die Küste“ über die Arbeiten des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) vom Zeitpunkt seiner Gründung bis Ende 1983 berichtet worden ist (ROHDE, 1979, 1982, 1984a), soll mit der vorliegenden Veröffentlichung die Berichterstattung des Forschungsleiters Küste des KFKI bis zum Herbst 1986 fortgesetzt werden.

Änderungen in Organisation und Arbeitsweise des KFKI sind im Berichtszeitraum nicht eingetreten. Die finanzielle Förderung der einzelnen Forschungsvorhaben durch den Bundesminister für Forschung und Technologie wurde in dem vorgesehenen Umfang fortgesetzt. Der Vorsitz ist turnusgemäß am 1. 1. 1985 von MR KRAUSE vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten an MR Dr. WILCKENS vom Bundesministerium

für Forschung und Technologie übergegangen. Zweimal im Jahr fanden jeweils Sitzungen des KFKI und der „Beratungsgruppe“ statt; je nach Notwendigkeit sind die einzelnen Projektgruppen mehrmals im Berichtszeitraum zusammengekommen. Die Kontakte zu anderen Institutionen der Küstenforschung wurden weiterhin gepflegt.

Alle in Bearbeitung befindlichen Forschungsvorhaben wurden im Berichtszeitraum weitergeführt, einige von ihnen konnten abgeschlossen werden. Darüber wird in den Abschnitten 2.1 bis 2.7, die an entsprechende Abschnitte früherer Berichte anknüpfen, berichtet. Über die meisten dieser Vorhaben, aber auch über andere, die bereits früher abgeschlossen worden waren (Abschn. 2.8), sind im Berichtszeitraum Veröffentlichungen erschienen. Einige neue Vorhaben wurden begonnen, weitere wurden geplant und vorbereitet.

Das KFKI hat folgende Vortragsveranstaltungen ausgerichtet oder war an deren Ausrichtung beteiligt:

Am 8. November 1984 fand in Hamburg ein gemeinsam von der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG) und vom KFKI veranstalteter öffentlicher „Sprechtage“ statt, der sich vorwiegend mit Themen aus dem Bereich Feststofftransport/Baggerwesen befaßte. Während die organisatorische Vorbereitung und Ausführung bei der HTG lag, hatte das KFKI die fachliche Planung und Durchführung übernommen. Es wurden insgesamt 13 Vorträge gehalten, davon neun von Angehörigen der im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen. Vier Vorträge befaßten sich unmittelbar mit Themen aus KFKI-Vorhaben; sie werden bei den betreffenden Projekten im einzelnen noch genannt. Der Sprechtage war von etwa 350 Zuhörern besucht (WETZEL, 1985).

Am 16. April 1985 veranstaltete das KFKI in Hamburg einen Workshop „Schlick- und Schwebstoffe in Ästuaren“. In dieser nichtöffentlichen Veranstaltung sollte über das gleichnamige Forschungsvorhaben und dessen bisherige Ergebnisse berichtet und diskutiert werden. Die Vorträge wurden ausschließlich von Mitgliedern der Projektgruppe „Schlick- und Schwebstoffe in Ästuaren“ bestritten; sie waren wesentliche Grundlage der in Heft 42 „Die Küste“ veröffentlichten Arbeiten aus dem Projekt (CHRISTIANSEN, 1985a). Die Veranstaltung, zu der überwiegend einzelne Wissenschaftler persönlich eingeladen worden waren, wurde von etwa 70 Teilnehmern besucht. Ein ähnlicher Workshop fand am 8. September 1986 in Bremen statt, bei dem Mitglieder der Projektgruppe „Stabilität von Außentiefs“ über ihre Arbeiten berichteten.

Vom 12. bis 14. September 1985 veranstalteten das KFKI und der Studienkreis für Geschichte des Wasserbaus, der Wasserwirtschaft und der Hydrologie gemeinsam in Stade eine Tagung „Küsteningenieurwesen im Wandel der Zeit“, die von etwa 100 Teilnehmern besucht wurde (LIETZ, 1985). Da der Studienkreis über keine eigene Geschäftsstelle verfügt, ist er darauf angewiesen, daß Organisation und Durchführung der von ihm getragenen Fachtagungen von einer anderen Institution übernommen werden. Weil sich die Tagung in Stade mit der Geschichte des Küstenwasserbaus und der Küstenhydrologie befaßte, lag es nahe, daß das KFKI, in dem alle Wasserbau- und Wasserwirtschaftsverwaltungen des Bundes und der Küstenländer zusammenarbeiten, sich an der Trägerschaft dieser Veranstaltung beteiligte. Wenn die Erforschung der Geschichte des Küsteningenieurwesens auch nicht zu den unmittelbaren Aufgaben des KFKI gehört, so liegt die Behandlung historischer Themen doch im Interesse aller dem KFKI angehörenden Verwaltungen. Ergibt sich doch aus der Erforschung der Vergangenheit ein besseres Verständnis der Probleme der Gegenwart, durch das die Weiterentwicklung gefördert wird. Von den 10 Vorträgen der Tagung wurden sechs von Angehörigen von Dienststellen der im KFKI vertretenen Verwaltungen gehalten, die zugleich Mitglieder des Studienkreises sind. Kurzfassungen aller Vorträge sind in Band 5/1986 der Veröffentlichungen aus dem Stadtarchiv Stade enthalten.

Mit der vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Heide am 24. August 1984 in Büsum ausgerichteten Veranstaltung „50 Jahre Küstenforschung 1934 – 1984“ sollte der ersten vor 50 Jahren speziell für Fragen der Küstenforschung eingerichteten Dienststelle in Deutschland gedacht werden, der „Staatlichen Forschungsstelle Westküste“ in Büsum. Aus ihr ist das heutige Dezernat Gewässerkunde des ALW Heide hervorgegangen. Bei dieser Veranstaltung schilderte der Forschungsleiter Küste in einem Vortrag „Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (ROHDE, 1985b) die Entwicklung vom Küstenausschuß zum KFKI. In zwei vorausgegangenen Vorträgen (WOHLENBERG, E.: „Die staatliche Forschungsstelle Westküste“ und PETERSEN, M.: „Küstenforschung 1950 – 1970“) war die historische Entwicklung der Küstenforschung in Deutschland von 1934 – 1970 dargestellt worden. Der Wortlaut aller bei der Veranstaltung in Büsum gehaltenen Vorträge ist in Heft 50 (1985) der Büsumer Gewässerkundlichen Berichte veröffentlicht.

Auch die Förderung der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Küsteningenieurwesens wurde fortgesetzt. Angehörige von Dienststellen der dem KFKI angehörenden Verwaltungen nahmen an den Zusammenkünften der Estuary Study Group im Juli 1984 in Oxford (England) und im Juni 1985 in Paris sowie der North Sea Coastal Engineering Group (NSCEG) im Oktober 1985 in Norwich (England) teil. Das KFKI förderte auch die Teilnahme von Vertretern der ihm angehörenden Verwaltungen an der 19th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) im September 1984 in Houston, Texas (ROHDE, 1984b) und an der 20th ICCE in Taipei, Taiwan im November 1986. Mehrere Vorträge aus KFKI-Vorhaben wurden gehalten, auf die in den folgenden Abschnitten noch hingewiesen wird.

2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsvorhaben

2.1 Küstenkartenwerk und Wiederholungsvermessungen

Bis Ende 1985 konnten die Digitalisierung der aus den Luftbildvermessungen der ersten Wiederholungsvermessung gewonnenen Wasserlinien sowie deren rechnerische Umsetzung in Tiefenlinien und die Digitalisierung der Arbeitskarten der ersten Wiederholungsvermessung abgeschlossen werden. Damit steht aus den beiden Vermessungen ein umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung, das auch für künftige Vergleichsuntersuchungen verwandt werden kann.

Mit der Kartenherstellung aus der ersten Wiederholungsvermessung wurde begonnen. Es ist vorgesehen, insgesamt 52 der 66 Blätter des Küstenkartenwerkes (BETTAC u. a., 1984) aufgrund der ersten Wiederholungsvermessung neu zu bearbeiten. Weggelassen werden insbesondere Karten des küstenferneren Gebietes, in dem keine größeren topographischen Veränderungen zu erwarten sind. Grundsätzlich sollen Kartenrahmen und Topographie des anschließenden Festlandes unverändert bleiben. Zusätzlich wird das Blatt 2514, Jadebusen, herausgegeben, das bei der Erstvermessung nicht aufgenommen wurde. Da alle Tiefendaten mit den zugehörigen Koordinatenwerten digital vorliegen, können die Küstenkarten aus der Wiederholungsvermessung vorwiegend automatisch hergestellt werden. Dazu waren noch zeitaufwendige Entwicklungsarbeiten erforderlich, die aber erfolgreich abgeschlossen werden konnten, so daß künftig die Karten aus weiteren Wiederholungsmessungen in hoffentlich kürzerer Zeit nach der Vermessung herausgegeben werden können, als es diesmal möglich war.

Von den einzelnen Kartenblättern wird jeweils nur eine schwarz-weiße Originalfolie

hergestellt. Jede der dem KFKI angehörenden Verwaltungen erhält eine Kopie der Originalfolien der sie interessierenden Gebiete und kann für ihre Dienststellen davon Lichtpausen herstellen lassen. Die Originalfolien werden bei der Geschäftsstelle des KFKI aufbewahrt. Von dort können auch andere Interessenten Pausen und Kopien gegen Kostenerstattung erwerben. Bis Ende 1985 standen die neun Blätter 1818, 2114, 2116, 2216, 2316, 2416, 2514, 2606 und 2608 zur Verfügung. (Die Kartennummern gehen aus der von BETTAC u. a. (1984) veröffentlichten Übersichtskarte hervor.) 1986 sollen zunächst die 15 Blätter 1716, 1718, 1816, 1916, 1918, 2012, 2014, 2016, 2018, 2112, 2118, 2212, 2214, 2314 und 2414 folgen und dann anschließend die übrigen, wobei die letzten nicht vor Ende 1987 vorliegen werden.

Inzwischen sind auch Überlegungen für künftige Wiederholungsvermessungen angestellt worden. Der Abstand zwischen der umfassenden Erstvermessung der deutschen Küstengewässer der Nordsee und der ersten Wiederholungsvermessung war mit etwa fünf Jahren zunächst ziemlich willkürlich angenommen worden. Aus dem Vergleich der beiden Vermessungen sollten Hinweise über den zweckmäßigen zeitlichen Abstand künftiger Wiederholungsvermessungen gewonnen werden. Dabei war von vornherein klar, daß der zeitliche Abstand von Wiederholungsvermessungen des Gesamtgebietes größer als fünf Jahre sein würde, daß aber andererseits für einzelne Teilgebiete auch kürzere Abstände zweckmäßig sein könnten. Es ist eine Aufgabe der Projektgruppe MORAN, aufgrund der Ergebnisse der morphologischen Analysen Vorschläge für den zweckmäßigen Abstand künftiger Wiederholungsvermessungen zu machen. Mit Abschluß des Vorhabens MORAN (s. Abschn. 2.2) werden die Vorschläge vorliegen.

Für ein Teilgebiet im Raum Emsmündung/Borkum/Norderney (Kartenblätter 2206, 2208, 2306, 2308, 2406, 2408) wurde 1985 bereits als Gemeinschaftsarbeit der zuständigen Dienststellen des Landes Niedersachsen und des Bundes unter Mitwirkung der Niederlande eine zweite Wiederholungsvermessung vorgenommen. Es wird damit gerechnet, daß schon 1986 die Kartenblätter aus dieser Vermessung fertiggestellt werden können. 1986 ist eine zweite Wiederholungsvermessung des östlich anschließenden Bereichs bis etwa Trischen vorgenommen worden, der insbesondere die Mündung von Weser und Elbe sowie die Jade im Blattschnitt der Küstenkarten umfaßt. Dabei wurden im wesentlichen nur die unter NN liegenden Flächen durch Tiefenlotung vermessen. Auf eine Vermessung der höhergelegenen Wattflächen mittels Flächennivellement und Luftbildvermessung nach dem Wasserlinienverfahren wurde verzichtet, jedoch soll eine Niedrigwasser-Luftbildbefliegung vorgenommen werden. Dieser Planung liegt die im MORAN-Projekt erhärtete Erkenntnis zugrunde, daß die hochliegenden Wattflächen in ihrer Höhenlage sehr stabil sind.

Bei allen künftigen Wiederholungsvermessungen in einzelnen Teilgebieten ist anzustreben, daß jeweils ganze Blätter des KFKI-Kartenwerkes in möglichst gleichmäßigen zeitlichen Folgen neu vermessen werden. Dazu ist in der Regel eine Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen den Dienststellen mehrerer Verwaltungen erforderlich. Die zeitlichen Folgen der Wiederholungsvermessungen von Teilgebieten sollten so gewählt werden, daß diese Vermessungen in gewissen Abständen mit der Wiederholungsvermessung des übergeordneten größeren Gebietes zusammenfallen. Es ist anzustreben, daß jede Wiederholungsvermessung möglichst innerhalb eines Sommers vollständig ausgeführt werden kann. Das erfordert in jedem Fall exakte Planung, straffe Organisation und großen Aufwand bei der Vermessungsarbeit selbst, der um so größer ist, je größer das zu vermessende Gebiet ist. Mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden technischen Mitteln dürfte die Vermessung des Gesamtgebietes innerhalb eines Sommers noch nicht möglich sein. Wie die bisher vorliegenden Ergebnisse des MORAN-Projektes zeigen, sind morphologische Vergleiche und Bilanzierungen auch möglich, wenn die Vermessungen aller Teilgebiete innerhalb größerer Gebiete nicht vollständig

synchron vorgenommen werden. Mit Hilfe der im MORAN-Projekt gefundenen funktionalen Zusammenhänge ist eine Umrechnung gewisser Parameter auf einheitliche Bezugszeitpunkte möglich. Das gilt jedoch nicht für die genaue topographische Darstellung der Flächen. Da auch diese von erheblicher Bedeutung ist, sollte eine weitgehend synchrone Vermessung größerer Gebiete wie auch des Gesamtgebietes das anzustrebende Ziel künftiger Wiederholungsvermessungen sein.

Unberührt von den vorstehenden Überlegungen bleiben selbstverständlich die z. B. aus Gründen der Verkehrssicherheit notwendigen Wiederholungsvermessungen einzelner Gebiete und insbesondere der Fahrwasser, die als ständige Aufgaben der zuständigen Dienststellen von diesen zum Teil mehrmals im Jahr ausgeführt werden.

2.2 Morphologische Analysen Nordseeküste (MORAN)

Die Arbeiten (SIEFERT, 1983) wurden im Berichtszeitraum fortgesetzt und werden voraussichtlich 1987 zum Abschluß kommen. Weitere wissenschaftliche Arbeiten – etwa in Form von Dissertationen – können darauf aufbauen. Die Förderung des Vorhabens durch den BMFT endete schon planmäßig mit Ablauf des Jahres 1985. Über die bis dahin ausgeführten Arbeiten hat die Projektgruppe dem BMFT einen vorläufigen Abschlußbericht vorgelegt. In einem Kolloquium der TU Berlin am 26. 11. 84 hat SIEFERT über die bis dahin vorliegenden Ergebnisse des KFKI-Projekts ‚MORAN‘ vorgetragen. Nach Beendigung des Vorhabens soll in einem der nächsten Hefte der „Küste“ ein Abschlußbericht veröffentlicht werden.

Da die Digitalisierung der Ergebnisse aus der Wiederholungsvermessung nicht für alle Teilgebiete rechtzeitig zur Verfügung stand (vergl. Abschn. 2.1), konnten bisher noch nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet des MORAN-Projekts Umsatz und Bilanz ermittelt werden. Insgesamt wurden folgende Auswertungen ausgeführt:

- 350 km² morphologischer Vergleich aus jeweils mehreren Vermessungen (insbesondere in den Gebieten Außenelbe bis Außenjade und Dithmarscher Watt)
- 1540 km² exakter morphologischer Vergleich aus der Erstvermessung und der ersten Wiederholungsvermessung des KFKI (in Ostfriesland, Jade-Weser-Elbemündung und vor Dithmarschen)
- 940 km² Bilanzierung aus DHI-Karten 1:20 000 (vorwiegend in Nordfriesland)
- 4650 km² überschlägliche Bilanzierung über digitalisierte DHI-Karten für das küstenferne Gebiet

Um den in dem Projekt geleisteten Arbeitsaufwand zu verdeutlichen, sei mitgeteilt, daß bisher insgesamt rd. 9800 halbautomatische und 6900 vollautomatische Kartenvergleiche ausgeführt wurden. Das Gesamtgebiet konnte aufgrund der morphologischen Analysen in mehrere definierte Gruppen morphologischer Charakteristik eingeteilt werden. Für diese unterschiedlichen Typen der einzelnen Teile des Vorfeldes der deutschen Nordseeküste wurden dimensionslose Parameter ermittelt, die eine quantitative Abschätzung der morphologischen Gesamtentwicklung der Teilgebiete ermöglichen. Auf dieser Grundlage können auch Empfehlungen gegeben werden, in welchen zeitlichen Abständen aus morphologischen Gründen Wiederholungsvermessungen künftig vorgenommen werden sollten (vergl. Abschn. 2.1). Es liegt auf der Hand, daß der zeitliche Abstand von Wiederholungsvermessungen in Gebieten mit größerer morphologischer Stabilität (d. h. geringerer Umsatzhöhe) größer sein kann als in sehr instabilen Gebieten. Nach dem derzeitigen Stand der Arbeiten ergibt sich für die untersuchten rd. 3000 km² des küstennahen Gebietes für den Vergleich zwischen der Erstvermessung und der ersten Wiederholungsvermessung, also für einen Zeitraum von im

Mittel fünf Jahren, eine mittlere Umsatzhöhe von 70 bis 80 cm. Die mittlere Bilanzhöhe beträgt dagegen nur +1 cm, so daß dieses Gebiet in der Summe für den Untersuchungszeitraum als stabil bezeichnet werden kann.

Die im Projekt MORAN entwickelten Verfahren lassen sich auch außerhalb des Küstenvorfeldes für morphologische Untersuchungen im Tidegebiet anwenden. Entsprechende Untersuchungen werden von SIEFERT (1984) für die Unterelbe dicht unterhalb von Hamburg (Mühlenberger Loch/Neßsand) beschrieben.

2.3 Schlick/Schwebstoffe in Ästuaren

Nachdem in den Jahren 1981 bis 1983 Meßgeräte und Meßsysteme beschafft und getestet worden waren, wurde 1984 mit den eigentlichen Messungen des wissenschaftlichen Programms begonnen; sie sollen bis Ende 1986 fortgesetzt werden. Bei dem „Sprechtage“ der HTG wurde von CHRISTIANSEN und NEUMANN über „Aufbau und erste Ergebnisse einer Dauermeßstation für Schwebstoffe und Begleitparameter bei Oortkaten/Elbe“ vorgetragen (WETZEL, 1985).

Über die Ziele und den Ablauf des Forschungsprogramms im einzelnen berichtete CHRISTIANSEN (1985a). Bisher sind im wesentlichen Dauermessungen an den Meßstationen Oortkaten in der oberen Tideelbe, Messungen an dem Meßpfahl bei Nordenham in der Unterweser und weiträumige Messungen in der Unterweser (Sonderprogramme MASEX '83 und '85) ausgeführt worden. Die Projektgruppe hat am 16. April 1985 in einem Workshop (vergl. Abschn. 1) das Vorhaben einem größeren Kreis von Fachleuten vorgestellt und über die bis dahin gewonnenen Ergebnisse berichtet. Folgende Fachvorträge wurden gehalten:

- Allgemeine Einführung in das Forschungsvorhaben (Dr.-Ing. CHRISTIANSEN)
- Meßprinzip und technischer Aufbau der Meßstation Oortkaten (NEUMANN)
- Optische Messungen zur Bestimmung des Schwebstofftransportes (OHM)
- Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe (Dr.-Ing. CHRISTIANSEN)*
- Entwicklung einer Gammasonde und Ergebnisse aus bisherigen Einsätzen bei Untersuchungen der Gewässersohle von Elbe und Weser (Dr. FANGER)
- Vergleichende Messungen der Sohllage in einem Unterweserquerschnitt bei Nordenham (H. MÜLLER)
- Erste Ergebnisse des MASEX '83-Experiments in der Unterweser (Dr. RIETHMÜLLER)
- Numerische Simulation des Schwebstofftransports in der Weser: Wechselwirkung Modell - Naturmeßdaten (Prof. Dr. MARKOFKY)
- Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung - Untersuchungsmethode und erste Ergebnisse (GREISER)
- Bilanzierung abiotischer und hydrographischer Parameter über einem Flußquerschnitt bei Oortkaten/Elbe (NEUMANN)

Diese Vorträge sind Grundlage einiger in der „Küste“ veröffentlichter Arbeiten. Über Meßgeräte, Meßsysteme und Verfahren, die im Projekt „Schlick/Schwebstoffe in Ästuaren“ zur Anwendung kommen und über die dabei gewonnenen ersten Ergebnisse berichten CHRISTIANSEN (1985b), FANGER u. a. (1985b), MÜLLER, H. (1985), NEUMANN (1985a und 1985b) und OHM (1985). Die biologischen Untersuchungen, die in der Elbe seit 1984 zur

*) Über den CUX-Sampler siehe auch in Anlage 12 zur DVWK-Regel „Schwebstoffmessungen“. Heft 125, Bonn, 1986.

Frage der Entstehung und Umbildung von Schwebstoffpartikeln ausgeführt worden sind, erläutert GREISER (1985). Das Meßprogramm MASEX '83 in der Unterweser wird von FANGER u. a. (1985a), MARKOFKY u. a. (1986) und NEUMANN u. a. (1986) eingehend beschrieben.

Die bei MASEX '83 gewonnenen Daten wurden für Modellrechnungen verwandt, die im Rahmen einer Zusammenarbeit der KFKI-Projektgruppe mit dem Teilprojekt B7 des SFB 205 an der Universität Hannover (Simulation der Entstehung und Ausbreitung von Schlick in Brackwasserzonen) von MARKOFKY u. a. (1986) ausgeführt wurden. Auf der Tagung „Euro-mech 192“ wurden im Juni 1985 in München Vorträge aus dem Projekt von CHRISTIANSEN (1986) und RIETHMÜLLER (1986) gehalten. FANGER berichtete über die Gammasonde beim Symposium der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft am 6. Juli 1985 in Hamburg und GREISER über „Die biologischen Einflüsse auf den Schwebstofftransport“ beim Umweltseminar der Technischen Universität Harburg im August 1985. In einem Vortrag an der Universität von Westaustralien am 24. Juli 1985 ging MARKOFKY auf die im Rahmen des Programms MASEX '83 ausgeführten Modellrechnungen ein. CHRISTIANSEN äußerte sich in einem Vortrag bei der Hauptversammlung der HTG am 3. Oktober 1986 in Bremen auch über das Schlickprogramm des KFKI. Bei der 20th ICCE in Taipei berichtete NEUMANN (1986) über die Meßstation Oortkaten.

Aufgrund der guten Ergebnisse von MASEX '83 und der anschließenden Modellrechnungen wurde 1985 ein weiteres Meßprogramm MASEX '85 abgewickelt. Dabei wurde ein etwa 30 km langer Abschnitt der Unterweser erfaßt, während bei MASEX '83 nur ein 5 km langer Flußabschnitt untersucht wurde. An 12 festen Stationen wurden Messungen ausgeführt. Drei Meßschiffe waren im Einsatz, und es wurden mehrere Befliegungen vorgenommen. MASEX '85 wurde wieder in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B7 des SFB 205 und unter Berücksichtigung der bei MASEX '83 gewonnenen Erfahrungen ausgeführt (NEUMANN u. a., 1986). Die gewonnenen Meßdaten sollen wieder für Modellrechnungen über die Ausbreitung der Schwebstoffe in der Brackwasserzone der Weser vom Teilprojekt B7 des SFB 205 verwandt werden. Andererseits liefert das Modell aber auch wertvolle Hilfe bei der Interpretation der Meßdaten. Beim Internationalen Symposium „Physical Processes in Estuaries“ vom 9.–12. September 1986 in Delft wurde in einem Vortrag von RIETHMÜLLER u. a. „Hydrographic Measurements in the Turbidity Zone of the Weser Estuary“ insbesondere über MASEX '85 berichtet. Der Beitrag wird in den Proceedings des Symposiums veröffentlicht werden.

Das Projekt soll Ende 1986 zum Abschluß kommen; anschließend ist die Veröffentlichung der Schlußberichte vorgesehen. Es ist damit zu rechnen, daß das Projekt wesentliche Erkenntnisse zu den Problemen der Schlickbildung, Schwebstoffbewegung und Schlicks sedimentation in Ästuaren liefern wird, die auch einen erheblichen praktischen Nutzen für die Unterhaltung von Seeschiffahrtsstraßen und Häfen haben werden. Aus den in dem Projekt bisher gewonnenen Ergebnissen zeichnen sich neue Fragestellungen ab, die in einem möglichst bald anschließenden Nachfolgeprojekt untersucht werden sollten. Die Projektgruppe hat die Arbeiten eines jeden Jahres seit 1982 jeweils in Jahresberichten dargestellt.

2.4 Tide- und Windstauentwicklung vor der Küste der südöstlichen Nordsee

Wie schon im letzten Bericht über die Arbeiten des KFKI erwähnt, ist das Vorhaben mit der Bezeichnung „Tide- und Sturmflutentwicklungen im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee“ abgeschlossen worden. Ein Schlußbericht ist in Heft 42 der „Küste“ veröffentlicht

(SIEFERT u. LASSEN, 1985), Teilergebnisse sind von SIEFERT und LASSEN auch (1986a) dargestellt. In mehreren Vorträgen hat SIEFERT über dieses Vorhaben berichtet und Ergebnisse mitgeteilt:

1. Der Tideverlauf im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht – Ergebnisse eines KFKI-Projekts. 27. 2. 84, Arbeitsgemeinschaft Westküstenforschung in Kiel.
2. Tides and Storm Surges in the North Sea. 31. 8. 84, Waterways Experiment Station in Vicksburg, USA.
3. Detailed Tide and Storm Surge Investigations in Coastal Waters. 7. 9. 84, Int. Conf. on Coastal Eng. in Houston, USA, (Siefert, 1985).
4. Neue Erkenntnisse über das Tidegeschehen in der Deutschen Bucht. 30. 10. 84, Kolloquium der Fachhochschule Südniedersachsen in Buxtehude.
5. Neue Erkenntnisse und Gedanken über den Ablauf der Gezeiten in der Deutschen Bucht. 8. 11. 84, Sprechtag von HTG und KFKI in Hamburg (WETZEL, 1985).

Inzwischen ist im Juli 1985 unter der in der Überschrift dieses Abschnitts angegebenen Bezeichnung mit einem Fortsetzungsvorhaben begonnen worden. Dieses Vorhaben gliedert sich in mehrere Teilaufgaben. Einmal soll die Bearbeitung des in dem früheren Vorhaben behandelten Gebiets durch die Auswertung weiterer Messungen ergänzt werden, indem für die dort betrachtete Zeitspanne 1975/79 zusätzliche Daten aus dem Dollart, dem Jadebusen, der Elbemündung bis nach Brunsbüttel und nördlich des Hindenburgdamms herangezogen werden. Das Untersuchungsgebiet soll außerdem für die genannte Zeitspanne auf dänisches Küstengebiet bis Esbjerg und auf niederländisches Küstengebiet bis Den Helder erweitert werden. Schließlich sollen für das gesamte Küstengebiet von Den Helder bis Esbjerg alle vorhandenen Wasserstandsdaten der Zeitspanne 1982/86 in gleicher Weise ausgewertet werden, wie das für die Zeitspanne 1975/79 geschehen ist (SIEFERT u. LASSEN, 1985). Dabei sollen gezielt zusätzliche Wasserstandsmessungen für relativ kurze Zeiten in solchen Gebieten ausgeführt werden, in denen derartige Messungen bisher fehlen.

Es wird erwartet, daß sich aus dem Vergleich der Ergebnisse der beiden Zeitspannen 1975/79 und 1982/86 Hinweise auf mögliche allmähliche Veränderungen der Tideverhältnisse in der südöstlichen Nordsee ergeben. Die Untersuchungen werden ganz allgemein die Kenntnisse über das Tidegeschehen vor der deutschen Nordseeküste verbessern, insbesondere auch über das Sturmflutgeschehen und die Vorhersage von Sturmfluten. Es lassen sich aus den Ergebnissen auch Kriterien zur Erfassung der seewärtigen Grenzen von künftigen mathematischen Modellen gewinnen. Das Vorhaben soll Ende 1987 abgeschlossen sein.

2.5 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren

Das Mitte 1983 begonnene Vorhaben konnte im Berichtszeitraum planmäßig 1985 abgeschlossen werden. Der Schlußbericht ist in dem vorliegenden Heft 44 der „Küste“ veröffentlicht (SIEFERT u. LASSEN, 1986b). Über einzelne Ergebnisse hat SIEFERT in zwei Vorträgen berichtet: „Tide- und Sturmfluten in der Unterelbe“ (Jahrestagung des Bundes der Wasser- und Kulturbauingenieure am 26. 10. 1984 in Schulau) und „Energy and Power of Tides and Storm Surges in Estuaries“ (Meeting der North Sea Coastal Engineering Group (NSCEG) am 22. 10. 1985 in Norwich, UK).

In dem Projekt sind vergleichende Untersuchungen über Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe vorgenommen worden. Es wurden die Scheitelwasserstände bei mittleren Tiden und die Sturmfluten in ihrer Entwicklung seit 1940 untersucht und der Ablauf einzelner ausgewählter

Sturmfluten analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben große Bedeutung für die Beurteilung des Sturmflutgeschehens in den deutschen Tideästuaren.

2.6 Untersuchungen über die Stabilität von Außentiefs

Die Untersuchungen gliedern sich in zwei Teilprojekte, die thematisch eng zusammengehören und auch von einer Projektgruppe betreut werden. Diese beiden Teilprojekte sind:

- a) Tiefenstabilisierung von Außentiefs durch Gezeitensteuerung (AT-S) und
- b) Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N).

Die Arbeiten an beiden Vorhaben sind im Berichtszeitraum intensiv fortgesetzt worden.

Im Teilprojekt AT-S sind die 1983 begonnenen Dauermessungen im Neßmersieler Außentief fortgesetzt worden. Die dabei eingesetzten Sedimentmeßgeräte „Sediwa“ (RENGER, 1985)** wurden im laufenden Betrieb weiterentwickelt und haben sich bewährt. Parallel dazu wurde auch ein Trübungsmessgerät eingesetzt. Über den Einsatz des vollautomatischen Spülsiels im Neßmersiel berichtet ERCHINGER (1984). Bei der 19th ICCE in Houston hat RENGGER über die Entwicklung eines Meßsystems zur Erfassung des Schwebstofftransports innerhalb einer „Poster Session“ am 5. 9. 84 vorgetragen (RENGER, 1985). Dieses Meßsystem wird auch für entsprechende Messungen beim Eidersperrwerk eingesetzt, worüber RENGGER beim Sprechtag HTG/KFKI am 8. 11. 85 berichtete (Dauermessungen instationärer Sedimentbewegungen in der Eider zur Optimierung der Betriebsordnung des Eidersperrwerks (WETZEL, 1985). Auf diesem Sprechtag trugen auch COLDEWEY und BEDNARCZYK über die „Auswirkung von gesteuerten Spülströmen und von Schifffahrtseinflüssen auf die Außentiefsquerschnitte“ vor und teilten dabei Ergebnisse der Teilprojekte AT-S und AT-N mit (WETZEL, 1985). Ein Zwischenbericht über das Vorhaben mit der Darstellung der wichtigsten bisher gewonnenen Ergebnisse des Teilprojektes AT-S ist im vorliegenden Heft 44 der „Küste“ von ERCHINGER u. a. (1986) veröffentlicht. 1986 wurden Untersuchungen darüber ausgeführt, wie durch die Kombination des Einsatzes von Räumbooten mit der Zugabe von Spülwasser aus Speicherbecken die Räumung des Außentiefs optimiert werden kann. 1987 soll das Vorhaben beendet werden.

Im Teilprojekt AT-N wurde das im letzten Bericht schon erwähnte Meßprogramm über den Schifffahrtseinfluß ausgeführt; ein ausführlicher Schlußbericht liegt vor (MÜLLER, E., 1985). Eine zusammenfassende Darstellung ist im vorliegenden Heft der „Küste“ veröffentlicht (BINEK u. MÜLLER, E., 1986). Für insgesamt 18 Siele an der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Nordseeküste, für die auch Aufzeichnungen von Binnenpegeln vorliegen, sollen mit Hilfe von Regressionsuntersuchungen die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Querschnittsentwicklung der Außentiefs untersucht werden. Ein Zwischenbericht über die bisherigen Arbeiten ist in dem vorliegenden Heft 44 der „Küste“ veröffentlicht (RENGER u. BEDNARCZYK, 1986). Das Vorhaben soll 1986 beendet werden.

In einem Workshop am 8. September 1986 in Bremen ist das Gesamtvorhaben „Außentiefs-Stabilität“ mit den in seinen beiden Teilprojekten bisher gewonnenen Ergebnissen einem größeren Kreis von Fachleuten vorgestellt worden. Es war ein ähnlicher Rahmen wie beim Workshop „Schlick in Ästuaren“ (vergl. Abschn. 2.3).

**) Über „Sediwa“ siehe auch in Anlage 12 zur DVWK-Regel „Schwebstoffmessungen“. Heft 125, Bonn, 1986.

Folgende Vorträge wurden gehalten:

- Probleme der Außentiefunterhaltung – Räumung durch vollautomatisches Spülsiel und durch Räumbooteinsatz (ERCHINGER)
- Stabilitätsuntersuchungen von Außentiefs (Dr.-Ing. RENGER, BEDNARCZYK)
- Im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ in Neßmersiel ermittelte Einflußfaktoren auf den Schwebstoffgehalt (PROBST)
- Einfluß gesteuerter Spülströme auf die Querschnitte des Neßmersieler Außentiefs (COL-DEWEY)
- Verfahren zur Schwebstoffuntersuchung (Dr.-Ing. RENGER)
- Wirkung der Schifffahrt im Neßmersieler Außentief (Dr.-Ing. MÜLLER, BINEK)
- Schifffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief (BEDNARCZYK)

Das Gesamtvorhaben hat viele interessante Ergebnisse gebracht und manche neue Probleme aufgezeigt, denen in eigenen neuen Teilprojekten nachzugehen zweckmäßig sein dürfte.

2.7 Wasserstandsuntersuchungen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste

Die im vorigen Bericht erwähnte Arbeitsgruppe hatte Anfang 1984 ihre Arbeit abgeschlossen und dem KFKI den Vorschlag unterbreitet, möglichst bald drei Wasserstandsmeßstationen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste zu errichten und langfristig zu betreiben, um Wasserstandsdaten zu gewinnen, die von Küsteneinflüssen weitgehend unabhängig sind.

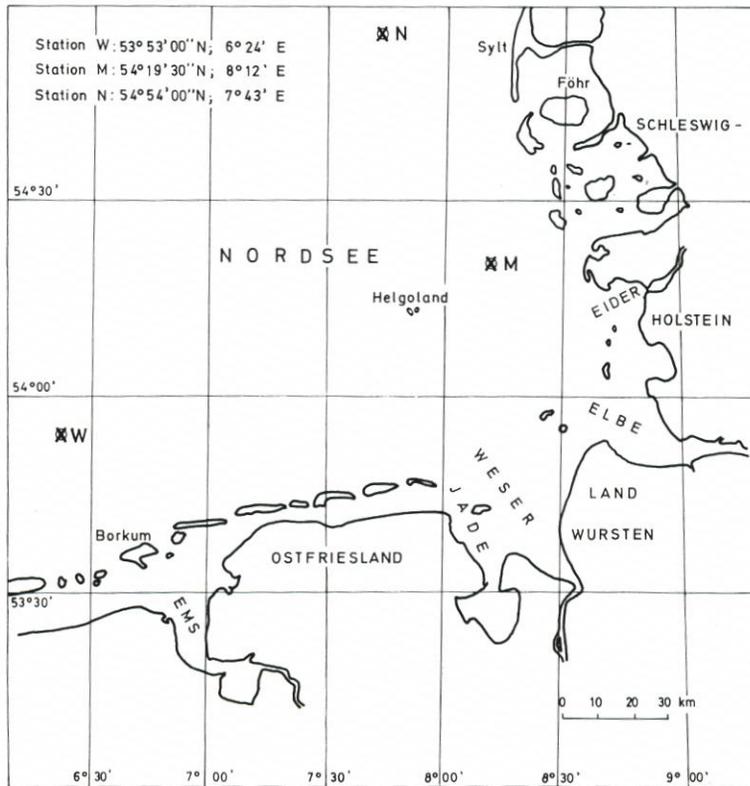


Abb. 1. Lage von drei vorgeschlagenen Wasserstandsmeßstationen in der Nordsee.

Die Lage der drei Meßstationen ist in Abb. 1 eingetragen. Die drei Punkte sind so ausgewählt worden, daß die an ihnen gewonnenen Wasserstandsdaten zur Beurteilung des Tidegeschehens von möglichst großer Bedeutung sind und allen übrigen Erfordernissen weitestgehend entsprechen. Bei ihrer Auswahl spielten die von SIEFERT und LASSEN (1985) gewonnenen Erkenntnisse eine wesentliche Rolle. Bei der Wahl der Orte wurden auch die geologischen und morphologischen Verhältnisse des Umfeldes berücksichtigt sowie Belange der Schifffahrt und der Fischerei. Es war vorgesehen, die Meßstationen auf dem Meeresboden fest zu gründen und die Wasserstandsdaten auf Datenträgern zu speichern, die nur im Abstand von mehreren Monaten ausgewechselt werden müssen, oder die Daten jeweils auf Meßbojen zur Zwischenspeicherung zu übertragen.

Über dieses Vorhaben wurde bei der ICCE 1984 in Houston (ROHDE, 1985a) vorgetragen. Entgegen der dabei ausgedrückten Erwartung, daß das Projekt bald verwirklicht werden könnte, hat das KFKI die Ausführung zunächst zurückgestellt. Es hat sich gezeigt, daß die vorgesehenen Meßgeräte noch nicht genügend ausgereift sind, um monatelang wartungsfrei zu arbeiten. Wie Erfahrungen aus den Niederlanden ergaben, hat sich die Verwendung von Meßbojen zur Zwischenspeicherung von Daten nicht bewährt. Während der Bau der Meßstationen kostenmäßig tragbar ist, stellen Betrieb und Wartung der drei Stationen auf die Dauer bei dem derzeitigen Entwicklungsstand noch untragbare finanzielle Risiken dar. Auch der exakte Höhenanschluß der Meßstationen an das Landeshöhennetz, der unbedingt für nötig gehalten wird, kann z. Zt. noch nicht befriedigend ausgeführt werden. Daher sollen zunächst die Entwicklung geeigneter Meßgeräte und wirtschaftlicher Methoden zur exakten Höheneinmessung küstenferner Punkte (Satellitenmessung?) abgewartet werden, bis der Errichtung von Wasserstandsmeßstationen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste nähergetreten wird.

Wenn leider in absehbarer Zeit auch noch keine längeren Datenreihen von Wasserständen aus dem Küstenvorfeld zur Verfügung stehen werden, die weitgehend von Küsteneinflüssen unabhängig sind, so ist es um so wichtiger, die vorhandenen Wasserstandsdaten von Pegeln unmittelbar an der Küste weitergehend als bisher aufzuarbeiten und zu analysieren. Es muß versucht werden, die Wirkungen der verschiedenen Einflüsse (z. B. meteorologische und anthropogene Einflüsse) auf die Wasserstandsentwicklung zu eliminieren, um zu erkennen, wieweit die langfristigen Wasserstandsänderungen eustatisch bedingt sind und evtl. bereits Reaktionen auf einsetzende Klimaänderungen aufzeigen. Während bisher in diesem Zusammenhang mit Jahreswerten gearbeitet wurde (z. B. JENSEN, 1984; ROHDE, 1985a; SELIGER, 1983), sollen die geplanten Untersuchungen auch auf der Grundlage der Auswertung einzelner Tiden vorgenommen werden. Schon der Vergleich, der aus Jahresmitteln entwickelten Kurven des langfristigen Anstiegs des Wasserspiegels mit denjenigen, die aus Monatsmitteln hergeleitet wurden, zeigt, daß das Anstiegsgeschehen erheblich verwickelter ist, als bisher angenommen wurde. Wahrscheinlich werden in kleineren Zeiteinheiten meteorologische Einflüsse und Seegangseinflüsse stärker wirksam als in größeren.

Die Bearbeitung des Datenmaterials von folgenden Pegeln ist vorgesehen: Emden, Borkum-Südstrand, Norderney, Wilhelmshaven, Alte Weser, Roter Sand, Cuxhaven, Büsum, Husum, Wittdün, Dagebüll, List und Helgoland. Außerdem sollen die Ostseepegel Kiel und Travemünde in die Untersuchungen einbezogen werden. Ein großer Teil der überprüften Daten dieser Pegel liegt, zum Teil bis 1936 zurück, auf ADV-auswertbaren Datenträgern vor. Es ist vorgesehen, Kollektive aufbereiteter Einzelwerte – verknüpft mit den zugehörigen meteorologischen Daten – spektral zu analysieren, um hieraus verlässliche Angaben über Streuung, Variation und Trend in der Wasserstandsentwicklung zu erhalten. Dabei sollen astronomische wie auch meteorologische Einflüsse aus den Kurven herausgerechnet werden, um so eine zusätzliche Glättung und damit engere Vertrauensbereiche zu erhalten. Es ist zu

erwarten, daß sich aus den Untersuchungen heraus noch weitere Anregungen ergeben werden, die gegenwärtig noch nicht abzusehen sind und dann weiter verfolgt werden sollen.

Das KFKI hat der Durchführung der genannten Untersuchungen in dem von der Projektgruppe vorgeschlagenen Umfang zugestimmt. Da der BMFT die finanzielle Förderung übernommen hat, konnte mit den Arbeiten im Juli 1986 begonnen werden. Das Vorhaben mit der Bezeichnung „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ ist zunächst auf 2½ Jahre veranschlagt.

Die Analyse der bisherigen Wasserstandsdaten und die künftige Dauermessung von Wasserständen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste sind aber nur ein Aspekt bei der Erforschung des Problems der langfristigen Wasserstandsänderungen. Es wurde noch bis vor kurzem angenommen, daß der seit mehreren Jahrhunderten an der deutschen Nordseeküste zu beobachtende Wasserstandsanstieg von im Mittel 20 bis 30 cm/Jahrhundert sich allmählich abschwächt. Seit einigen Jahren ist aber ein stärkerer Anstieg des MThw zu beobachten (FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985), wobei noch unklar ist, ob es sich hier um eine vorübergehende Erscheinung handelt oder um den Beginn einer Entwicklung, die aufgrund allgemeiner Klimaänderungen innerhalb des nächsten Jahrhunderts zu einem sehr viel stärkeren, weltweiten Anstieg des Meeresspiegels und damit auch der Wasserstände an der deutschen Küste führen kann (ROHDE, 1985a).

Die Ergebnisse der weltweit laufenden Forschungen über die künftige Klimaentwicklung und ihre Auswirkungen auf den Meeresspiegel müssen sorgfältig verfolgt werden. Es sind die Konsequenzen zu überlegen, die sich daraus für das deutsche Küstengebiet ergeben. Entsprechende Untersuchungen sind in den USA bereits aufgenommen worden. Aufgrund von Daten über die mögliche Klimaentwicklung wurden Modellrechnungen über den daraus resultierenden Anstieg des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100 ausgeführt und die daraus sich ergebenden Konsequenzen für zwei beispielhaft ausgewählte Gebiete an der Ostküste der USA untersucht (BARTH u. TITUS, 1984). Aufgabe der o. a. Projektgruppe „Wasserstandsuntersuchungen im Vorfeld der deutschen Nordseeküste“ soll es daher auch sein, die weltweit gewonnenen Forschungsergebnisse über die künftige Meeresspiegelentwicklung zu verfolgen und wegen der daraus für das Nordseeküstengebiet zu ziehenden Folgerungen Verbindungen mit den übrigen Anrainerstaaten, speziell den Nachbarstaaten Dänemark und den Niederlanden, aufzunehmen. Wie inzwischen bekannt wurde, werden derartige Untersuchungen in den Niederlanden bereits vorgenommen.

2.8 Restarbeiten aus früheren Vorhaben

Aus einigen Vorhaben, die schon in früheren Berichtszeiträumen abgeschlossen waren, haben sich zum Teil weiterführende Arbeiten ergeben, oder es sind noch Veröffentlichungen erschienen, die nachfolgend erwähnt werden sollen.

Die im Rahmen eines KFKI-Projekts entwickelten HN-Modelle (LUCK u. a., 1983) sind von mehreren Dienststellen an der Küste für deren praktische Arbeit angewandt worden, so für die Leybucht (LIEBIG, 1984), die Außenjade und die Elbe. Über spezielle Auswertungen der im Seegangmeßprogramm in der Außenweser gewonnenen Daten hat BARTHEL bei der 19th ICCE in Houston vorgetragen (BARTHEL u. FUNKE, 1985), eine ausführliche Arbeit ist in der „Küste“ (BARTHEL, 1985) erschienen. Ein Vortrag über Ergebnisse des Seegangmeßprogramms im Gebiet der ostfriesischen Watten konnte bei der 19th ICCE nicht gehalten werden; in den Abstracts der Konferenz ist lediglich ein Kurzbericht darüber veröffentlicht (NIEMEYER, 1984a). Ein entsprechender Vortrag wurde bei der 20th ICCE gehalten (NIE-

MEYER, 1986). Die vorhandenen Meßgeräte wurden für weitere Seegangsmessungen im Bereich der ostfriesischen Inseln und Watten eingesetzt. Über die Untersuchungen in der Leybucht berichtete NIEMEYER (1984b). Die Ergebnisse der im Rahmen des schon 1980 abgeschlossenen Strömungsmessprogramms ausgeführten Langzeitmessungen werden von SIEFERT u. a. (1986) mitgeteilt.

3. Ausblick

Die meisten der in den Abschnitten 2.1 bis 2.7 erwähnten Projekte sind noch nicht vollständig abgeschlossen. Sie werden in den nächsten Jahren weitergeführt, zum Teil nur noch mit Restarbeiten. Im Abschnitt 3 des Berichts über die Forschungsarbeiten des KFKI 1981–1983 (ROHDE, 1984a) wurde ein Projekt über „Sedimentumlagerungen infolge seegangs-induzierter Strömungen an der Ostseeküste“ angekündigt, mit dem 1984 begonnen werden sollte. Es konnte aber leider nicht zur Ausführung gelangen, weil in dem für die Untersuchungen vorgesehenen Strandabschnitt dringend Buhnen gebaut werden mußten und daher der zu Vergleichszwecken vorgesehene Strandabschnitt ohne Buhnen nicht mehr zur Verfügung stand.

Inzwischen wurde ein neues Vorhaben vorbereitet und begonnen; weitere sind noch in der Vorplanung.

3.1 Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt

Die Probleme der Wechselwirkung zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt sind an der deutschen Nordseeküste von zunehmender Bedeutung. Der Deutsche Bundestag hat daher für diese Fragestellung dem Bundesminister für Forschung und Technologie 1986 zusätzliche Mittel bewilligt, um insbesondere Beiträge zur Optimierung des Küstenschutzes der Insel Sylt zu fördern. Das KFKI hat auf Vorschlag des BMFT beschlossen, sich in Zukunft mit diesen für die Praxis des Küsteningenieurwesens wichtigen Fragen zu befassen. Das KFKI billigte den Vorschlag einer Sachverständigengruppe, als erstes Thema „Sandvorspülungen“ zu untersuchen mit dem Ziel, die Wirksamkeit ausgeführter Sandvorspülungen zu analysieren, die physikalischen Prozesse zu verstehen und das Verfahren der Sandvorspülung zu optimieren. Erstmals in einem KFKI-Projekt wurde hierbei auch von vornherein eine enge Zusammenarbeit mit den Universitäten Braunschweig und Hannover vorgesehen, deren Forschungen wesentliche ingenieurwissenschaftliche Grundlagen zu dieser Problemstellung beitragen können.

In der Bundesrepublik Deutschland ist die erste Strandaufspülung als Küstenschutzmaßnahme 1951 auf Norderney ausgeführt worden. Eine Projektgruppe hat daher für die beabsichtigten Forschungsarbeiten ein Rahmenprogramm aufgestellt, in dem Norderney als exemplarisches Untersuchungsgebiet dienen soll. Zuvor sollen alle in der Bundesrepublik Deutschland und im benachbarten Ausland ausgeführten Strandaufspülungen erfaßt und dabei die unterschiedlichen geographischen und hydrologischen Voraussetzungen sowie alle Kriterien der Ausführung der betreffenden Aufspülungen analysiert werden. Wirksamkeit und Lebensdauer sind unter Würdigung der jeweiligen hydrologischen und geographischen Verhältnisse kritisch zu beurteilen. Für das Gebiet um den Westkopf von Norderney soll ein intensives mehrjähriges Meßprogramm ausgeführt werden, dessen Ergebnisse durch Erkenntnisse ergänzt werden sollen, die aus Untersuchungen im Großen Wellenkanal in Hannover

gewonnen wurden. Die Messungen sollen außerdem die Rahmenbedingungen für mathematisch-theoretische Ansätze liefern, deren Aufgabe es ist, formelmäßige Zusammenhänge zu ermitteln und ein mathematisches Modell des Gebiets um Norderney zu entwickeln, das Tide, brandungsbedingte Strömungen und den daraus resultierenden Sedimenttransport und die Morphodynamik erfaßt. Auch bautechnische Belange sollen in die Untersuchungen einbezogen werden. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, zunächst für das Untersuchungsgebiet um Norderney eine den Umweltbedingungen angepaßte Konzeption für die optimale Ausführung von Strandaufspülungen zu erarbeiten, die dann anschließend dort in einer ohnehin notwendigen Wiederholungsaufspülung erprobt werden soll. Diese für 1988 vorgesehene Aufspülung ist durch Naturuntersuchungen und mathematische Modellrechnungen zu begleiten. Es wird erwartet, daß daraus allgemeingültige Kriterien für die Anwendung der Ergebnisse auf andere Küstenabschnitte der Nordsee abgeleitet werden können.

Nachdem das KFKI den Vorschlägen der Projektgruppe zugestimmt und der BMFT die finanzielle Förderung übernommen hat, ist mit dem Projekt Mitte 1986 begonnen worden. In ihm arbeiten die Dienststellen der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung Forschungsstelle Küste, Norderney, und Bauamt für Küstenschutz, Norden, sowie das Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig und das Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover zusammen, und es fließen die Erkenntnisse mehrerer Teilprojekte des SFB 205 der Universität Hannover ein.

3.2 Stabilität topographischer Einheiten

Um die Kenntnisse über das komplexe Zusammenspiel der Kräfte zu vertiefen, die die Verlegung der Gezeitenrinnen in Watten, der Außentiefs von Sielen sowie der Sände und Bänke bewirken, wurde eine Projektgruppe gebildet, die ein Forschungsvorhaben unter der in der Überschrift genannten Themenstellung konzipieren soll. Dieses Vorhaben stellt in mancher Hinsicht eine Fortsetzung und Ausweitung der Arbeiten der Projekte MORAN und „Außentiefs-Stabilität“ dar und wird auf Ergebnisse der Sonderforschungsbereiche 79 und 205 zurückgreifen. Das Vorhaben soll auf der Grundlage bisher vorliegender morphologischer und hydrologischer Untersuchungen hauptsächlich das Lageverhalten topographischer Einheiten von Rinnen und Sänden in Abhängigkeit von den verursachenden Einflüssen erfassen. Dabei sollen kennzeichnende Parameter gewonnen werden, mit deren Hilfe Stabilitätskriterien entwickelt werden können. Die Vorüberlegungen sind noch nicht abgeschlossen; mit den Arbeiten kann nicht vor 1988 begonnen werden.

3.3 Seegangsuntersuchungen

Schon früher war angeregt worden, Seegangsmessungen weiter stromaufwärts in den Ästuaren auszuführen. Das Vorhaben wurde aber zurückgestellt (ROHDE, 1982 u. 1984a). Die Beratungsgruppe hat nun erneut vorgeschlagen, in absehbarer Zeit ein neues Seegangprojekt in Angriff zu nehmen mit dem Ziel, Bemessungsgrundlagen für Küsten- und Uferschutzbauwerke zu erhalten. Dabei ergibt sich die aktuelle Veranlassung aus der in den letzten 10 Jahren zu beobachtenden Beschleunigung des Anstiegs des MThw und der Veränderung der Tideverhältnisse insbesondere in den Ästuaren. Nachdem das KFKI den Vorschlägen der Beratungsgruppe grundsätzlich zugestimmt hat, wurde eine Projektgruppe gebildet, die damit begonnen hat, Vorschläge für das neue Seegangprojekt auszuarbeiten.

4. Schriftenverzeichnis

- BARTH, M. C. u. TITUS, J. G. (Hrsg.): Greenhouse Effect and Sea Level Rise – A Challenge for this Generation. Florence (Kentucky, U.S.A.), 1984.
- BARTHEL, V. u. FUNKE, E. R.: Estimates of Long Waves in the Weser Estuary. Proc. 19th ICCE 1984 (Houston), New York, 1985.
- BARTHEL, V.: Flachwasserseegang im Weserästuar. Die Küste H. 42, 1985.
- BETTAC, W., SCHLEIDER, W. u. SINDERN, J.: Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht – Vermessung und Kartographie. Die Küste, H. 40, 1984.
- BINEK, H. u. MÜLLER, E.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- CHRISTIANSEN, H.: Das Forschungsvorhaben Schlick/Schwebstoffe in Ästuaren. Die Küste, H. 42, 1985 (a).
- CHRISTIANSEN, H.: Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe. Die Küste, H. 42, 1985 (b).
- CHRISTIANSEN, H.: Suspended Sediment Measurements in the Elbe Estuary of Hamburg using a CUX-SAMPLER. Proc. Euromech 192, A. A. Balkema, Rotterdam, 1986.
- ERCHINGER, H. F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neßmersiel. 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.
- FANGER, H.-U., NEUMANN, L., OHM, K. u. RIETHMÜLLER, R.: MASEX 83, eine Untersuchung über die Trübungszone der Unterweser. Die Küste, H. 42, 1985 (a).
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- GREISER, N.: Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung in der Elbe – Untersuchungsmethoden und erste Ergebnisse. Die Küste, H. 42, 1985.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- LIEBIG, W.: Ein zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell für die Leybucht. Jber. 1983 der Fst. f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 35, Norderney, 1984.
- LIETZ, U.: Tagung „Küsteningenieurwesen im Wandel der Zeit“ in Stade. DGM, H. 5/6, 1985.
- LUCK, G. u. a.: Die numerischen Küstenmodelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Deutsche Bucht. Abschlußbericht. Die Küste, H. 38, 1983.
- MARKOFSKY, M., SCHUBERT, R. u. LANG, G.: Numerische Simulation des Schwebstofftransports auf der Basis der Meßkampagne MASEX '83.
- MÜLLER, E.: Druck- und Strömungsverteilung infolge fahrender Schiffe im Außentief des Neßmersiels. VBD-Bericht 1141, Duisburg, Oktober 1985 (unveröffentlicht).
- MÜLLER, H.: Vergleichende Vermessung der Sohlage in einem Unterweserquerschnitt innerhalb der Schlickstrecke bei Nordenham. Die Küste, H. 42, 1985.
- NEUMANN, L.: AMO – die Automatische Meßstation Oortkaten – Meßsystem zur Sammlung von Schwebstoffproben und Messung von Begleitparametern. Die Küste, H. 42, 1985 (a).
- NEUMANN, L.: MOSTRA – ein neues Verfahren zur strömungs- und morphologieadäquaten Bilanzierung von suspendierten Feststoffen und Begleitparametern in geschichteten Ästuaren. Die Küste, H. 42, 1985 (b).
- NEUMANN, L.: The Automated Measured Station Oortkaten/Elbe (AMO) – Measurement System for Registration and Balance of Suspended Sediment and Associated Parameter in Tidal Regions. Abstracts 20th ICCE 1986 (Taipei).
- NEUMANN, L., FANGER, H.-U., MARKOFSKY, M., OHM, K. u. RIETHMÜLLER, R.: Das Schlick- und Schwebstoffuntersuchungsprojekt MASEX. Gewässerkundliche Studie Nr. 6, Strom- und Hafenaufbau, Hamburg, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Wave Deformation and Energy Dissipation Due to Breaking on a Tidal Inlet Bar. Abstracts 19th ICCE 1984 (Houston), New York, 1984 (a).
- NIEMEYER, H. D.: Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn, Jber. 1983 der Fst. f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 35, Norderney, 1984 (b).

- NIEMEYER H. D.: Changing of Wave Climate Due to Breaking on a Tidal Inlet Bar. Abstracts 20 th ICCE 1986 (Taipei).
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, H. 42, 1985.
- RENGER, E.: Development of a Sediment Transport Measuring System. Proc. 19th ICCE 1984 (Houston), New York, 1985.
- RENGER, E. u. BEDNARCZYK, K.: Schifffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- RIETHMÜLLER, J.: Measurements of Suspended Matter Profiles in the Weser and Elbe Estuaries. Proc. Euromech 192. A. A. Balkema, Rotterdam, 1986.
- ROHDE, H.: Die Forschungsvorhaben des KFKI . . . Die Küste, H. 34, 1979; H. 37, 1982; H. 40, 1984 (a).
- ROHDE, H.: 19. Internationale Konferenz über Küsteningenieurwesen in Houston/Texas. DGM, H. 5/6, 1984 (b).
- ROHDE, H.: New Aspects Concerning the Increase of Sea Level on the German North Sea Coast. Proc. 19th ICCE 1984 (Houston), New York, 1985 (a).
- ROHDE, H.: Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. Büsumer Gewässerkundliche Berichte, H. 50, ALW Heide, 1985 (b).
- SELIGER, J.: Das Sturmflutgeschehen an der deutschen Nordseeküste. Diss. Univ. Kiel, 1983.
- SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsandgebiet (Pilotstudie des KFKI-Projekts MORAN). Die Küste, H. 38, 1983.
- SIEFERT, W.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste und den Neßsand. Hamb. Küstenforschung, H. 43, 1984.
- SIEFERT, W.: North Sea Tide and Storm Surge Investigation. Proc. 19th ICCE 1984 (Houston), New York, 1985.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., GÄRTNER, J. u. NIEMEYER, H. D.: Die Strömungsverhältnisse in drei Langzeit-Meßprofilen im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 43, 1986.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Zur Windstauentwicklung im Küstengebiet der Deutschen Bucht. Wasser und Boden, H. 1, 1986 (a).
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe. Die Küste, H. 44, 1986 (b).
- WETZEL, V.: Küstenforschung und Küsteningenieurwesen, 3. Vortragsveranstaltung. Handb. f. Hafenanbau und Umschlagstechnik, Bd. XXX, 1985.

Außentiefräumung durch Spülung und ihre Erforschung im Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“

Heie F. ERCHINGER, Hans-Gerd COLDEWEY und Klaus PROBST

Zusammenfassung

Behandelt wird das verbreitete Problem der Unterhaltung von Außentiefs. Im Abschnitt A wird zunächst der Begriff „Außentief“ als der im Deichvorland und Watt liegende Abschnitt eines Sieltiefs, also eines Hauptvorfluters in der Marsch, beschrieben. Am Beispiel des Neßmersieler Außentiefs wird die Außentiefräumung mit einer tidegesteuerten Spülanlage erläutert. Durch dieses 1977 gebaute und 1982 auf vollautomatische Steuerung umgestellte Spülsiel konnte die Außentiefunterhaltung wesentlich billiger und wirksamer gestaltet werden. Darüber hinaus kommt dem Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet besondere Bedeutung für den Seevogelschutz zu.

Für die Durchführung der vom BMFT geförderten Forschungsvorhaben des KFKI an Außentiefs mit den beiden Projekten „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ und „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“ einschl. der besonderen Untersuchung von Schiffeinflüssen bot sich das Neßmersieler Außentief mit seiner Spülanlage als günstiges Naturmodell an. Im Abschnitt B sind nach der einleitenden Beschreibung dieser Forschungsprojekte die Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ und die erzielten Ergebnisse der Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoffmessungen als erster Zwischenbericht zusammengefaßt worden.

Aus zahlreichen Abfluß- und Schwebstoffmessungen kann die kritische Geschwindigkeit des Erosionsbeginns sowohl für frisch abgelagerten Schlick als auch für die festgelagerte Außentiefsohle ermittelt werden. Die Möglichkeiten der Optimierung der Räumwirkung zur wirkungsvollen Schlickräumung werden verglichen mit der Effektivität des Gegenstaus zur Verhinderung von Sedimenteintrag durch hohe Flutstromgeschwindigkeiten. Auch die Seegangs- und die Schiffseinflüsse auf den Sedimentgehalt können nachgewiesen werden. Des weiteren werden die enge Abhängigkeit der Entwicklung des Außentiefquerschnittes von der Intensität des Spülens und auch der Verlandungstrend des Spülbeckens nachgewiesen. Der 1986 untersuchte Räumbooteinsatz kann in diesem Zwischenbericht noch nicht behandelt werden.

Summary

The Dredging of Offshore Channels by Flushing: Results of the Research Project „Depth Stabilization of Offshore Channels“. The frequently occurring problem involving the maintenance of offshore channels is treated in this paper. The term „offshore channel“ is defined as a junction channel located in dike vorlands and inter-tidal zone, or in other words, the section of a main channel in marsh regions from the tidal gates to the sea. The dredging of offshore channels using a tidally driven flushing technique is demonstrated using the Neßmersiel offshore channel as an example. The offshore channel maintenance has been made significantly more efficient and cheaper due to this flushing system which was constructed in 1977 and fully automated in 1982. The flushing basin has also been found to be an effective rest and nesting place for sea birds and as such is environmentally important.

The Neßmersiel outer channel and its associated flushing system was chosen for prototype studies in the context of the two BMFT sponsored KFKI research projects „Depth Stabilization of Outer Channels and „Natural Cross Sections of Outer Channels“. These studies also included investigations of navigation related effects.

Following a general introduction, the field procedures in the first mentioned research project are discussed and the results of the water level, current, and suspended sediment transport measurements summarized. The critical erosion velocities for both newly deposited mud as well as for the compacted outer channel bed could be determined from the numerous discharge and

suspended sediment measurements. A comparison was made between the possibilities of optimizing techniques for mud flushing and the effectiveness of preventing sediment inflow through high flood tide currents generated by artificial backwaters. It was found that both the wave action and shipping play important roles in the overall sediment balance. The strong dependence between the flushing intensity, deposition in the flushing basin and the development of the outer channel profile could also be shown. The ongoing investigations of navigation induced dredging cannot be treated in this progress report.

Inhalt

A	Außentiefs und deren Unterhaltung	19
1.	Einleitung und Problemstellung	19
2.	Außentiefräumung mit tidegesteuerter Spülanlage	20
2.1	Bemessung und Einrichtung einer Spülanlage für das Neßmersieler Außentief	20
2.2	Betrieb und Steuerung des Spülsiels	24
2.3	Unterstützender Räumbooteinsatz	25
2.4	Erzielte Räumwirkung durch den Spülbetrieb	27
2.5	Eisräumung durch Spülung	27
2.6	Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet	28
B	Das Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs – (AT-S)“ mit Natur- untersuchungen am Neßmersieler Außentief	30
1.	Vorbemerkung zu den Forschungsprojekten über Außentiefs	30
1.1	Veranlassung	30
1.2	Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“	30
1.3	Forschungsprojekt „Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)“	31
1.4	Der Einfluß des Schiffsverkehrs	31
1.5	Durchführung der Forschungsprojekte über Außentiefs	31
2.	Morphologische und hydrologische Gegebenheiten am Neßmersieler Außentief	32
2.1	Das Außentief und seine Seitenräume	32
2.2	Speicherinhalt des Spülbeckens	35
2.3	Haupttidewasserstände in Neßmersiel	35
3.	Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung“	36
3.1	Einrichtung der Meßstellen	36
3.2	Zentrale Datenerfassung	37
3.3	Hydrometrische Untersuchungen	38
3.3.1	Wasserstände	38
3.3.2	Strömungen	39
3.4	Schwebstoffmessung	40
3.4.1	Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa)	40
3.4.2	Vergleichende optische Schwebstoffmessungen	41
4.	Einflußfaktoren auf den Schwebstoffgehalt	43
4.1	Schwebstoffgehalt bei unbeeinflussten Tideströmungen	43
4.1.1	Unbeeinflusste Tideströmungen	43
4.1.2	Schwebstoffeintrag durch Tideströmung	44
4.1.3	Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung	44
4.2	Wirkung der Spülströmung	44
4.2.1	Spülbeeinflusste Strömungen	44
4.2.2	Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit	46
4.2.3	Optimierung der Räumwirkung	48
4.2.4	Wirkung des Gegenstaus	50
4.3	Windabhängige Seegangseinflüsse	51
4.4	Schiffseinflüsse	52
5.	Veränderungen der Außentiefquerschnitte	52
5.1	Vermessungen	52
5.2	Veränderungen von Außentiefsohle und -querschnitten	54
5.3	Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung	57
6.	Sedimentation im Spülbecken	58

6.1 Schwebstoffmessung im Spülsiel	58
6.2 Schlickpegelmessungen	60
6.3 Ergebnisse aus Nivellements und Peilungen	61
7. Ausblick	62
8. Schriftenverzeichnis	62

A Außentiefs und deren Unterhaltung

1. Einleitung und Problemstellung

Als Außentief wird der im Deichvorland und Watt liegende Abschnitt eines Sieltiefs bezeichnet. Das Außentief beginnt am Siel im Hauptdeich und endet an der Einmündung in den naturgegebenen Vorfluter (Priel, Balje) im Watt bzw. nach DIN 4049 an einem größeren Wattstrom. Es bildet damit die Fortsetzung eines Sieltiefs als Hauptvorfluter in der Marsch, der die Binnenabflüsse durch ein Deichsiel in das Meer leitet. Daher dient ein Außentief in erster Linie der Binnenentwässerung.

Während das Bett der Wattrinnen und -ströme durch die Flut- und Ebbeströmung geformt wird, reicht die natürliche Bettbildung im Außentief nicht aus, um in dieser Rinne die notwendige Tiefe und Breite für die Entwässerung des Binnenlandes und ggf. für die Schifffahrt zu erhalten. Das Außentief ist daher in der Regel ein künstlich zu erhaltendes Gewässer zwischen dem Siel und dem naturgegebenen Wattstrom. Die meisten Außentiefs unterliegen einer ständigen Auflandung. Die Ablagerungen aus Schlick, Sand und Muschel-schalen müssen regelmäßig beseitigt werden. Des öfteren werden Leitdämme angeordnet, die das Außentief seitlich begrenzen, die Strömung im Tief zusammenhalten und leiten sowie das Eintreiben von Sand und Schlick vermindern (LÜDERS u. LUCK, 1976).

Für die Räumung der Ablagerungen bieten sich in Abhängigkeit von den Binnen- und Tidewasserständen, der Länge und dem Querschnitt des Außentiefs, dem Sediment und der Auflandungsrate folgende Möglichkeiten (nach Aufwand geordnet):

- ein regelmäßiger Sielzug mit einer für das Lösen und Transportieren der Ablagerungen ausreichenden Strömungsgeschwindigkeit, ggf. unterstützt durch regelmäßigen Schiffsverkehr,
- eine schwache Strömung aus Sielzug oder Spülung mit Lösen des Materials durch ein Stromräumboot (früher Mudderflug bzw. Mudderprahm),
- eine für das Lösen und Transportieren der Ablagerungen ausreichende Spülströmung aus Spülbecken mit Spülsiel, zeitweise mit Räumbootunterstützung,
- regelmäßige Baggerung des Außentiefs mit Cutterbagger; eine Baggerung führt geräte- und verfahrensbedingt häufig zu Übertiefen und somit zu besonders großer Materialbewegung, deren Ablagerung auf dem Deichvorland oder Watt unerwünschte ökologische Eingriffe verursacht.

Zur Unterhaltung eines Außentiefs ist in Niedersachsen in der Regel der zuständige Gewässer-Unterhaltungsverband oder das Land verpflichtet (Niedersächsisches Wassergesetz, § 105). Die Unterhaltung dient zur Erhaltung eines ordnungsgemäßen Zustandes für den Wasserabfluß und, wenn das Außentief schiffbar ist, auch zur Erhaltung der Schiffbarkeit.

Das Außentief unterliegt ständigen Veränderungen und Auflandungen durch die gestaltenden Kräfte von Tidesströmung und Brandung und durch die mitgeführte Sedimentfracht. Die Möglichkeiten der Erleichterung und Vereinfachung der Außentiefunterhaltung durch Spülanlagen und Räumbootinsatz werden in diesem Abschnitt behandelt.

2. Außentiefräumung mit tidegesteuerter Spülanlage

2.1 Bemessung und Einrichtung einer Spülanlage für das Neßmersieler Außentief

Das Neßmersieler Außentief verbindet seit je den alten Sielort Neßmersiel samt Siel und Hafen mit den tieferen Baljen im Watt. Es hat auch stets dem Schiffsverkehr zur vorgelagerten Insel Baltrum gedient. Die ständig weitergehende Verlandung und Verschlickung dieses Außentiefs führte dazu, daß der Schiffsverkehr nach Baltrum seit der Mitte dieses Jahrhun-

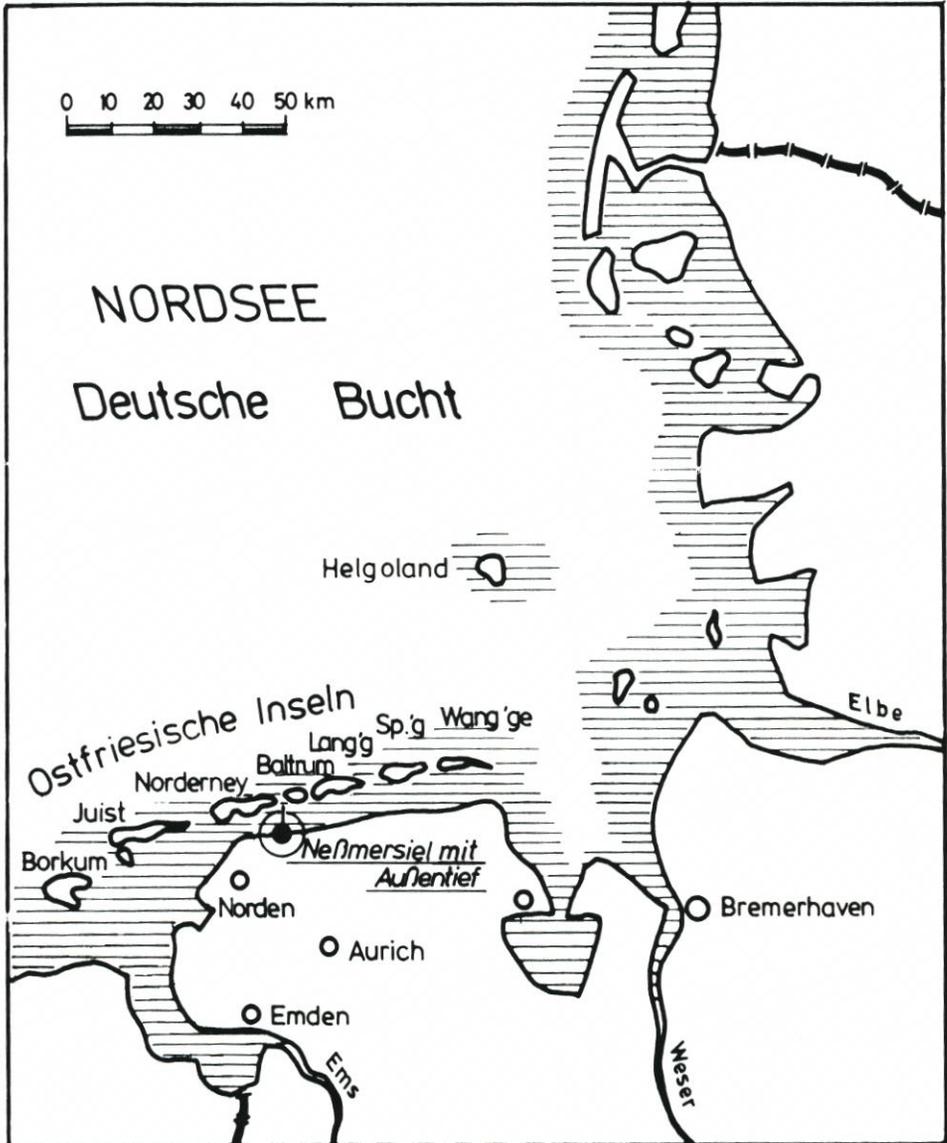


Abb. 2.1. Übersichtsskizze

derts nur noch mit einem kleinen Motorschiff aufrechterhalten werden konnte. Für den Haupt-Gästeverkehr wurde der Fährverkehr mit der etwa zwei Stunden beanspruchenden Fahrt nach dem 15 km westlich gelegenen Norddeich eingerichtet. Um von dieser zeitraubenden, nur um Tidehochwasser möglichen Fahrt freizukommen, wurde 1970/71 rd. 1500 m vor dem alten Hafen an der Deichvorlandkante ein neuer Hafen gebaut, von dem Baltrum nach 20minütiger Fahrt zu erreichen ist. Die Räumung des verbliebenen, an der Westseite mit einem Leitdamm ausgestatteten, 1,5 km langen Außentiefs bereitete trotzdem noch Probleme. Zur Verbesserung der Wasserverhältnisse wurde daher 1977 der Bau eines Spülsiels mit Spülbecken in Angriff genommen.

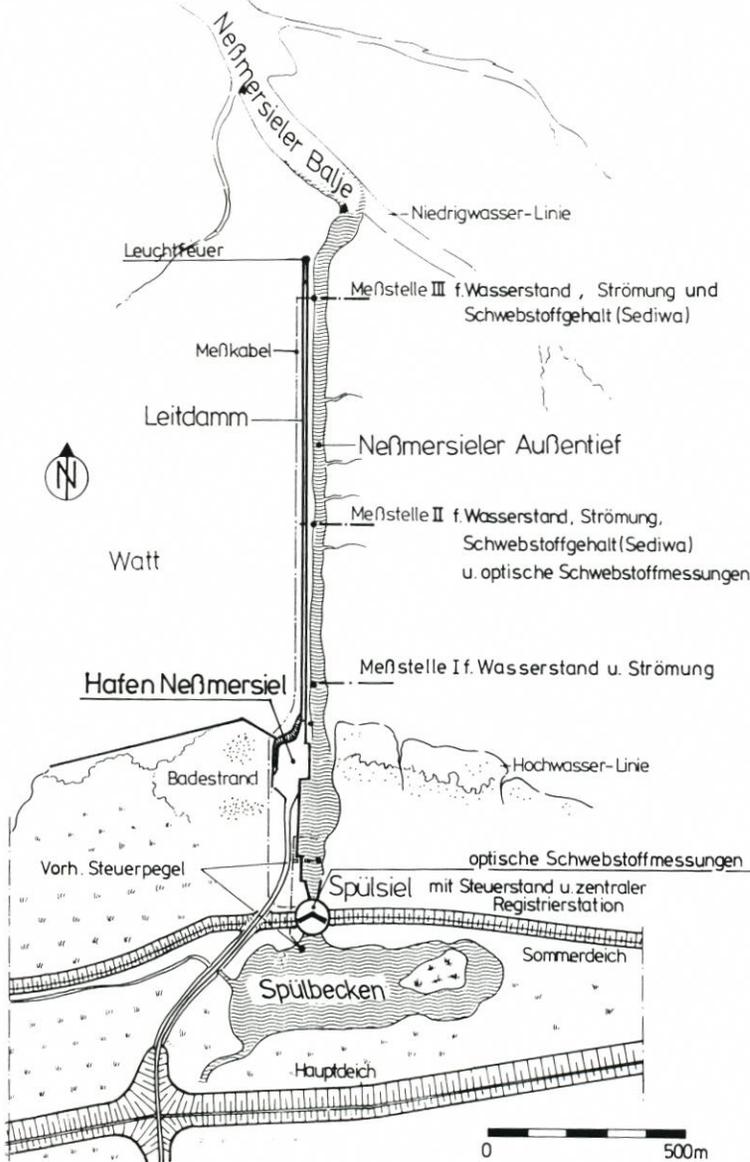


Abb. 2.2. Neßmersieler Außentief mit Spülbecken und Spülsiel

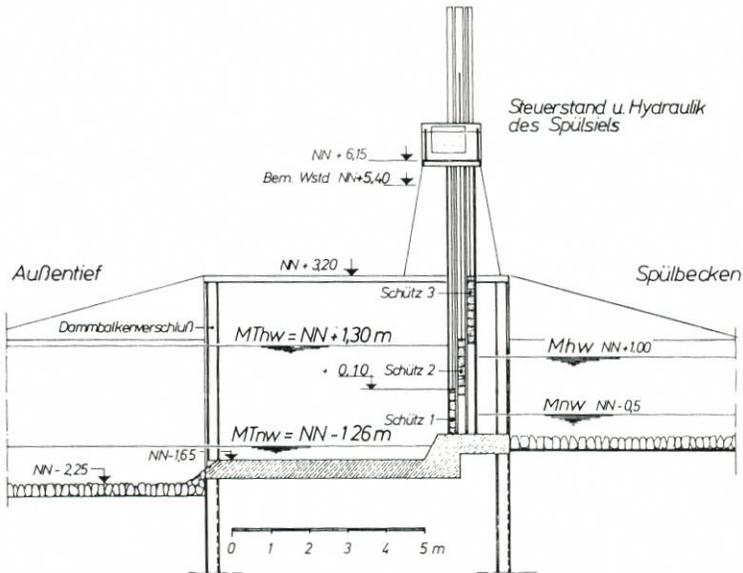
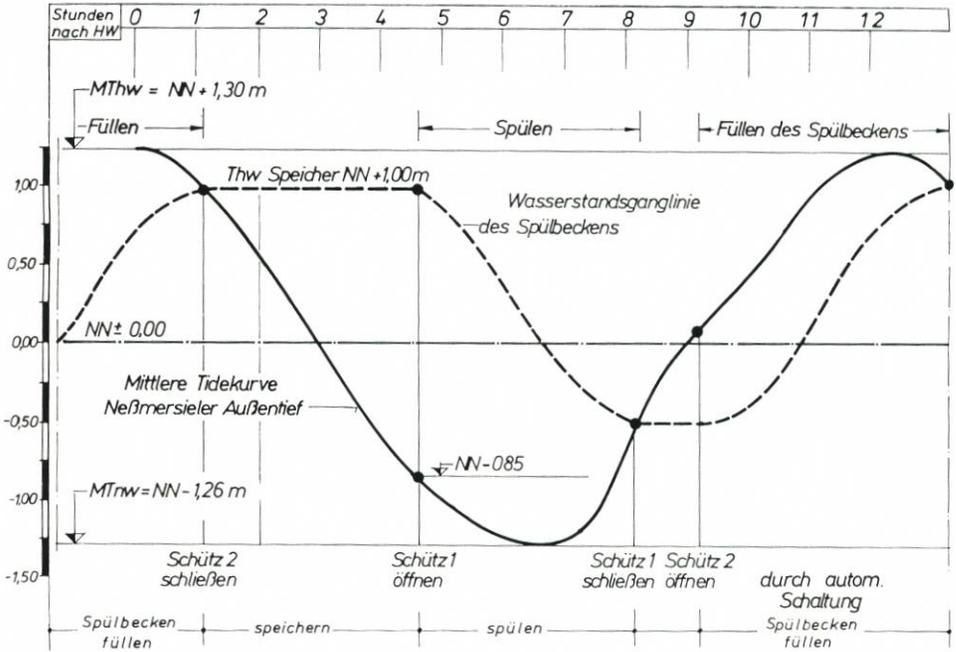


Abb. 2.3 O b e n : Wasserstandsganglinie der Tide und des Spülbeckens in Neßmersiel mit Schaltmarken der automatischen Steuerung
 U n t e n : Längsschnitt durch das Spülziel



Abb. 2.4. Spülsiel mit Zentralstation (oben links) und Hydraulikanlage (oben mitte)

Die Anlage von Spülbecken ist an der Wattenküste nicht neu. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts haben eine Reihe von Küstenhäfen – u. a. Norddeich und Norderney – Spülbecken erhalten, die der Verschlickung des Hafens entgegenwirken sollten. Diese Spülbecken dienten jedoch lediglich als hinter dem Hafen angeordnete Retentionsbecken ohne jegliche Stauanlage. Die Tideströmung in Hafen und Hafenzufahrt wurde dadurch während der gesamten Tide lediglich geringfügig erhöht, bis das Spülbecken nahezu völlig aufgeschlickt und damit wirkungslos war. Für Den Helder, Niederlande, konnte durch den Ende des 18. Jahrhunderts gebauten Fangedamm ein Spülstrom erzeugt werden, der zur Erhaltung des Fahrwassers ausreichte (RODLOFF, 1970). Vereinzelt wurden auch kleine Spülbecken mit Stauanlagen eingerichtet, um damit den Sielzug für den Einsatz eines Mudderpfluges oder Mudderpahms zur Schlickräumung zu unterstützen. Für das Greetsieler Außentief wurde 1957 ein Spülsiel in den Hauener Hooge Sommerdeich eingebaut, dessen Spülbecken die Vorfluter im Sommerpolder bilden. Die Abmessungen von Spülbecken und -siel reichen zur Räumbootunterstützung, nicht aber zum völligen Freihalten des Außentiefs (Nds. Wasserwirtschaftsverwaltung, 1958, WASSER UND BODEN). Auch in Neßmersiel gab es eine Stauanlage hinter dem alten Hafen, durch die das zur Tidehochwasserzeit gestaute Wasser um Tideniedrigwasser zur Räumung ausgelassen wurde.

Da für die Dimensionierung der aus Spülbecken und -siel bestehenden Spülanlage keine Bemessungsregeln, ja nicht einmal Erfahrungswerte vorlagen, mußte die neue Anlage in Neßmersiel auf der Grundlage allgemeinen Wissens über Sedimentation und Erosion entwickelt werden. Aufgrund der möglichen, von FÜHRBÖTER und MANZENRIEDER (1983) für die Wattoberfläche nachgewiesenen biologischen Stabilisierung und einer denkbaren Kohäsion mußte für die Sedimente im Außentief, deren Kornfraktionen vom schlickigen Schluff bis zum schluffigen Feinsand reichen, mit einer höheren Erosions-Grenzgeschwindigkeit gerechnet

werden als für vergleichbare sterile Kornfraktionen. Die Anlage wurde daher ausgelegt auf eine zwei- bis dreifache Grenzgeschwindigkeit – bezogen auf das sterile Korn – und sollte daher in der Lage sein, etwa zwei Stunden lang um Tideniedrigwasser eine Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 0,5 m/s im 1,5 km langen Außentief aufrechtzuerhalten (ERCHINGER, 1984).

Ziel der im weiteren beschriebenen Forschungsvorhaben ist, die Dimensionierung solcher Anlagen und die Besonderheiten ihres Betriebes zu verfeinern und weiter zu erforschen.

2.2 Betrieb und Steuerung des Spülziels

Im Zuge von Deichbaumaßnahmen konnte ein etwa 13 ha großes Spülbecken angelegt werden (Abb. 2.2). Zum Außentief wird es durch das 4,5 m weite Spülziel abgeschlossen. Drei Bongossi-Schütztafeln oberhalb der auf NN -1,0 m liegenden Sielschwelle werden mit je zwei Nirosta-Hubstangen ölhdraulisch betrieben (Abb. 2.3, 2.4). Das Spülbecken faßt rd. 100 000 m³ Seewasser. Der Füllvorgang des Spülbeckens beginnt etwa bei Tidehalbwasser, wenn der ansteigende Tidewasserstand die Oberkante der untersten Schütztafel mit NN +0,1 m übersteigt. Dadurch wird erreicht, daß der in der ersten Fluthälfte stärker mit Sedimenten beladene Flutstrom nicht in das Spülbecken einfließt und auch nicht durch den noch kleinflächigen benetzten Außentiefquerschnitt mit hoher Geschwindigkeit einströmt (ERCHINGER, 1982). Damit wird sowohl der Verlandung des Spülbeckens als auch einem starken Schlickeintrieb ins Außentief während der ersten Fluthälfte entgegengewirkt.

Um eine günstige Räumwirkung zu erzielen, strömt das gestaute Wasser in den letzten zwei Stunden der Ebbe nach Ziehen der untersten Schütztafel durch das Außentief mit Strömungsgeschwindigkeiten von 50 bis 80 cm/s. Dabei kann die Räumwirkung noch durch

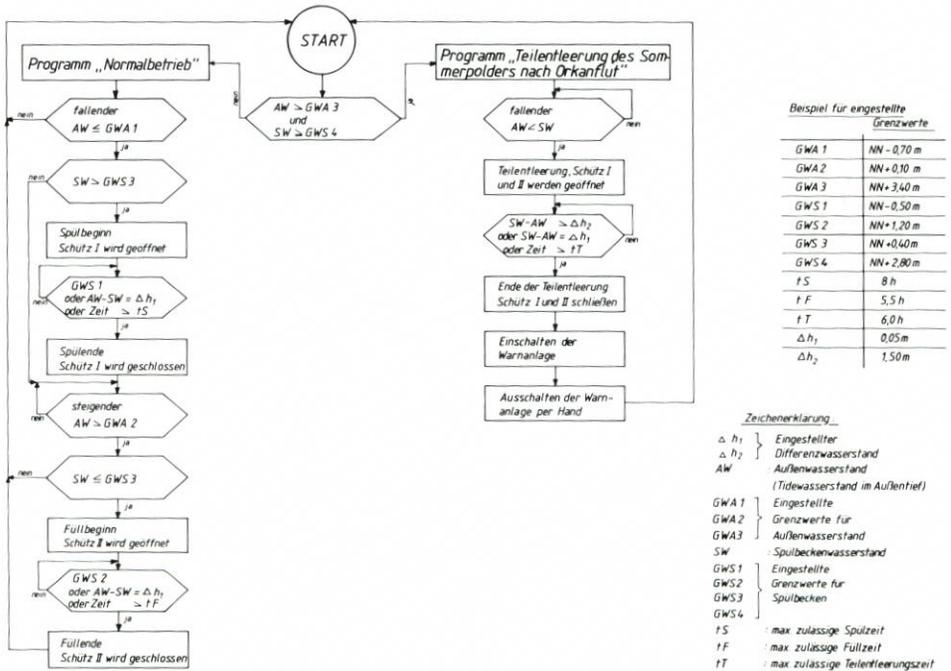


Abb. 2.5. Ablaufdiagramm für die automatische Spülzielsteuerung durch Mikroprozessor



Abb. 2.6. Stromräumboot

ein Stromräumboot und seine schlicklösende und aufwirbelnde Wirkung der absenkbaaren Schrauben unterstützt werden. Ob zur Tiefenstabilisierung des Außentiefs die größere Räumwirkung durch den auf den letzten Ebbstrom gesetzten Räumstrom oder das Prinzip des Gegenstaus durch ein späteres, bis in die beginnende Flutphase reichendes Auslassen des Wassers günstiger sein würde, müssen die Praxis und die Erforschung erst ergeben.

Nach dem anfänglichen Handbetrieb, der die Bedienung lediglich während der Tagestiden an den fünf Arbeitstagen der Woche zuließ, wurde 1982 die vollautomatische Steuerung eingerichtet (Abb. 2.3). Mit Hilfe eines Mikroprozessors werden die Schütztafeln über die Wasserstände im Spülbecken bzw. im Außentief vollautomatisch gesteuert. Die in den beiden Tiden eines Tages notwendigen acht Schützbewegungen können somit ohne menschliches Zutun ausgelöst werden. Bei ungewöhnlich verlaufenden Tiden sorgt die Automatik für die Unterbrechung der üblichen Schützbewegungen (Abb. 2.5).

2.3 Unterstützender Räumbooteinsatz

Das Köster'sche Stromräumboot, ein flaches Boot mit zwei absenkbaaren Schrauben, wird seit Jahrzehnten in vielen Außentiefs Norddeutschlands für die Unterhaltung und Schlickräumung eingesetzt (Abb. 2.6). Die überdimensionalen Schiffsschrauben und der starke Antriebsmotor ermöglichen es, vor allem durch den Schraubenstrahl, aber auch durch die mechanische Propellereinwirkung Schlick und Schluff an der Außentiefsohle zu lösen und aufzuwirbeln. Der starke Rühreffekt führt dabei insbesondere bei den Schlickteilchen zu einer weitgehenden Auflösung und somit zu besonders feinem Sediment, das sich als Schwebstoff nur langsam wieder absetzt. Durch eine seewärts gerichtete Strömung im Außentief werden diese Schwebstoffe dann aus dem Außentief herausgetragen.

Dem strömenden Wasser kommt folglich die Funktion des Sedimenttransportes zu. Das

kann durch Szielug während der Niedrigwasserzeit, durch Betrieb der Schöpfwerke zur Unterstützung der Räumwirkung oder durch Spülanlagen erreicht werden. Für die Bemessungen von Spülanlagen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die lediglich den vom Räumboot aufgewirbelten Schlick heraustransportieren sollen, und jenen, die durch stärkere Strömung auch ohne Räumbooteinsatz die Sedimente lösen können und auch in der Lage sind, die sich schneller absetzenden schluffigen Feinsande noch mit seewärts zu transportieren. Die Spülanlage in Neßmersiel gehört der zweiten Gruppe an, aber auch dabei ist ein unterstützender Räumbooteinsatz denkbar und – vor allem für den „Frühjahrsputz“ – zweckmäßig.

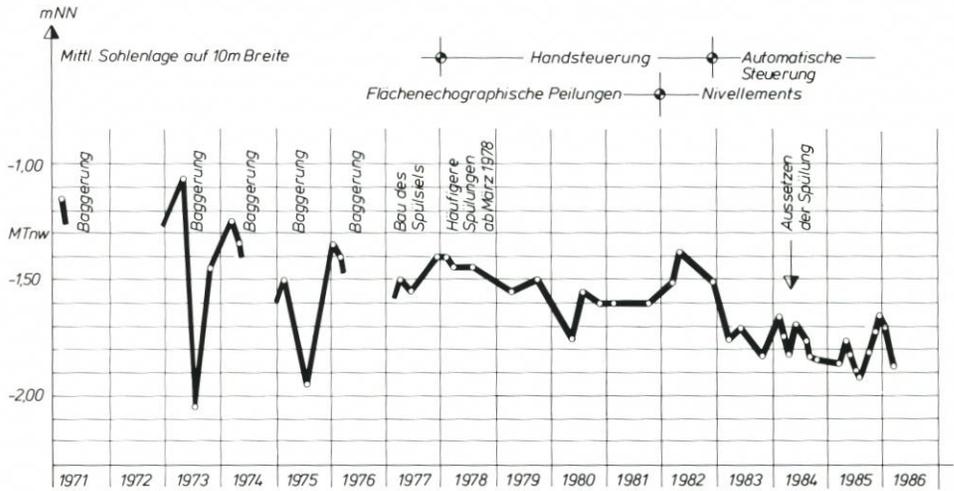


Abb. 2.7. Entwicklung der Sohlenlage des Neßmersieler Außentiefs – hafennaher Bereich (Stat. 0450 bis 0800)

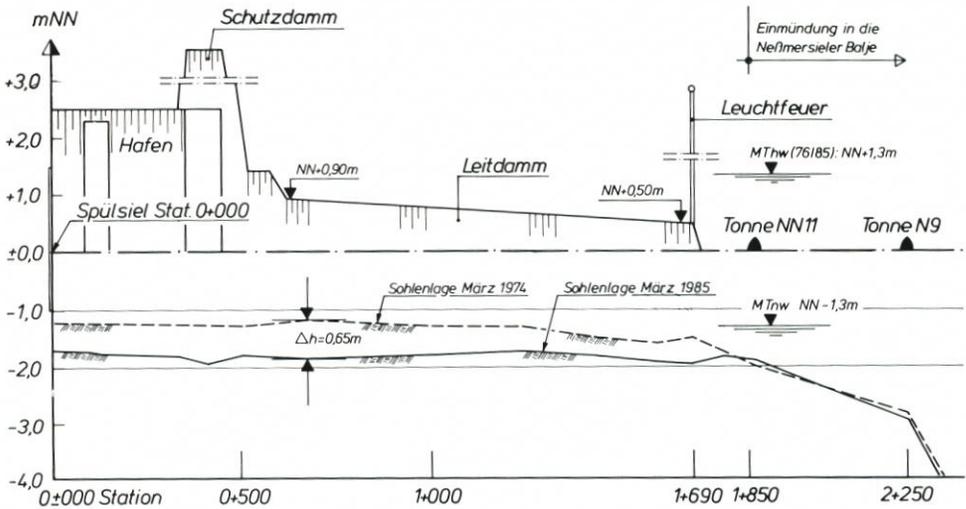


Abb. 2.8. Längsschnitt durch das Neßmersieler Außentief mit Sohlenvertiefung von 1974 bis 1985 durch den automatischen Spülbetrieb

2.4 Erzielte Räumwirkung durch den Spülbetrieb

Bis zum Bau des Spülsiels im Jahre 1977 mußte das Neßmersieler Außentief im Abstand von ein bis zwei Jahren auf ganzer Länge von einem Cutterbagger wieder auf ausreichende Tiefe gebracht werden. Das verursachte erhebliche Kosten. Seit der Einrichtung des Spülsiels im Jahre 1977 ist eine Baggerung nicht mehr durchgeführt worden. Die Sohle konnte im gesamten Außentief durch den Spülbetrieb deutlich vertieft werden. Gemäß Abb. 2.7 konnte die Sohle im hafennahen Bereich von NN $-1,40$ m Anfang 1978 während der Spülperiode mit Handsteuerung bis 1981 auf NN $-1,60$ m gebracht werden. Nach Einbau der automatischen Steuerung wurde dann nach 1982 sogar eine weitere Vertiefung auf Sohlagen um NN $-1,80$ m erreicht. Ein Aussetzen der Spülung, die gelegentlich für Unterhaltungsarbeiten – beispielsweise am Tosbecken – unterbrochen werden muß, wirkt sich jeweils umgehend auf eine Erhöhung der Sohle aus.

Der Spülbetrieb hat folglich bewirkt, daß

- die ein- bis zweijährigen Baggerungen des Außentiefs völlig eingestellt werden konnten,
- die Sohlenlage im hafennahen Bereich um etwa 40 cm vertieft werden konnte und
- auch der Querschnitt des Außentiefs unter NN $-0,50$ m auf das etwa 1,8fache vergrößert wurde (Abb. 2.8, 2.9).

Damit hat der Spülbetrieb nicht nur zu erheblichen Einsparungen geführt, sondern auch bewirkt, daß die Entwässerung und die Schifffahrt in diesem kleinen Außentief wesentlich bessere Bedingungen vorfinden.

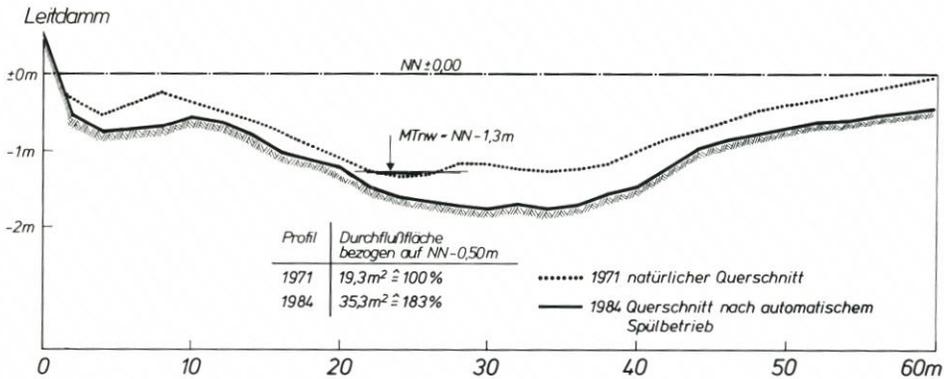


Abb. 2.9. Querschnittsentwicklung nach automatischem Spülbetrieb

2.5 Eisräumung durch Spülung

Als besonders nützlich hat sich die Spülanlage auch während winterlicher Vereisungen des Watts erwiesen. In unterschiedlich starkem Maße wird der Fährverkehr zu den einzelnen ostfriesischen Inseln bei winterlicher Vereisung im Watt beeinträchtigt oder für längerer Zeit unterbrochen. Der Fährverkehr von Baltrum nach Neßmersiel ist seit Aufnahme des Spülbetriebes in mehreren Wintern mit starker Vereisung des Watts bis auf kurze Ausnahmen nie zum Erliegen gekommen. Während der täglichen Fahrt der Fähre wird das Eis im Außentief gebrochen. Durch den Spülstrom werden die Schollen dann seewärts getrieben, so daß sie nicht zu erneuten Vereisungen der Rinne beitragen können (Abb. 2.10 u. 2.11). Für die Insel



Abb. 2.10. Eisräumung während der Spülung im Hafengebiet – Lattenpegel für Spülsiel-Steuerpegel, Sensor unter der Wasseroberfläche –

Baltrum bedeutet dies einen wesentlichen Fortschritt in der winterlichen Inselversorgung gegenüber der früher starken Eisabhängigkeit bei der Fährverbindung von Norddeich über das Norderneyer Watt nach Baltrum.

2.6 Spülbecken als Vogelrast- und -brutgebiet

Das 13 ha große Spülbecken ist nach einem Landschaftspflegeplan als Vogelrast- und -brutgebiet angelegt. Dieser See mit tiefem und flachem, schlickigem Bereich und einer von außerhalb nicht zugänglichen Insel ist längst von gefährdeten Vogelarten wie Säbelschnäbler, Uferschnepfe, Flußseeschwalbe und Rotschenkel entdeckt worden und hat sich als Rast- und Brutgebiet positiv entwickelt. Die Wasserfläche unterliegt ja den – wenn auch gedämpften – Gezeiten und ist somit dem Ökosystem des Watts angepaßt. Durch die zeitliche Verschiebung des Trockenfallens zum Watt hat das Spülbecken für die Vögel seine besondere Bedeutung. Auch konnte durch Anordnung einer Bodenschwelle für den Flachwasserbereich eine für Watvögel günstige Wassertiefe geschaffen werden. Das umliegende Grünland unterliegt weiterhin einer für den Seevogelschutz vorteilhaften extensiven Beweidung mit Jungrindern. Die Anwendung von Herbiziden oder gar Pestiziden, von Kunstdünger und Gülle sowie eine Grasmahd sind absolut ausgeschlossen.

Zur Erhaltung von Arten der Salzwiesen-Pflanzengesellschaft wird der Sommerpolder im Winter sechsmal geflutet, zweimal als völliger Einstau für alle Flächen über zwei bis drei Tage und viermal als Grabeneinstau. Da die Häufigkeit von Sturmfluten in der Regel dafür nicht ausreicht, wird im übrigen bei erhöhten Tiden durch das Spülsiel geflutet.



Abb. 2.11. Eisräumung durch Spülung im Außentief, vom Hafen seewärts

Diese Nutzungen bestätigen die geglückte Verquickung der wasserwirtschaftlichen Aufgaben der Spülanlage mit den Interessen des Naturschutzes.

Die Schlickablagerungen im Spülbecken sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens mit untersucht werden. Sollte das Spülbecken in zwei bis drei Jahrzehnten bis zur Spülsiel-Sohlschwelle angefüllt sein, muß es von einem Cutterbagger geräumt werden. Die Baggerung im Spülbecken hat den Vorteil, daß sie

- nur in großen Zeitabständen notwendig wird,
- ohne gegenseitige Behinderung mit dem Schiffsverkehr bei langfristiger Einplanung durchgeführt werden kann
- und jeder gebaggerte m^3 als Auffangraum für erneute Verschlickung auch Nutzen bringt.

B Das Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs AT-S“ mit Naturuntersuchungen am Neßmersieler Außentief

1. Vorbemerkung zu den Forschungsprojekten über Außentiefs

1.1 Veranlassung

Die etwa 80 Außentiefs an der deutschen Nordseeküste und sonstige Hafenzufahrten unterliegen einer mehr oder weniger starken Verschlickung und genügen daher häufig nicht den Anforderungen, die für die Binnenentwässerung und den Schiffsverkehr an sie gestellt werden. Die Räumung der Außentiefs ist ein besonderes Problem. Der Sielzug, unterstützt durch den Schiffsverkehr, reicht zur Freihaltung des Außentiefs vielfach nicht aus. Mit Hilfe eines Stromräumbootes kann in vielen Fällen eine genügende Tiefe erhalten werden. Die sonst regelmäßig notwendigen Baggerungen mit Cutterbaggern führen verfahrens- und gerätebedingt in der Regel zu nicht erforderlichen Übertiefen. Sie erfordern daher häufig eine zu große Bodenbewegung und sind somit besonders energieaufwendig und kostspielig. Außerdem verursacht die Wiederablagerung des Baggerguts auf Salzwiesen oder Wattflächen unerwünschte ökologische Eingriffe.

Die Zusammenhänge für die natürliche Entwicklung der Außentiefquerschnitte, für die Schaffung und Erhaltung ausreichender Tiefe und Querschnitte unter gezielter Ausnutzung der Spülung und des Räumbooteinsatzes werden in dem in drei Arbeiten behandelten Forschungsvorhaben des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) mit Förderung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) systematisch untersucht und erforscht. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Wirkung des Schiffsverkehrs gelegt.

1.2 Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“

Das vom Bauamt für Küstenschutz (BfK) als Antragsteller durchgeführte Vorhaben „AT-S“ soll die Wirksamkeit einer Vergrößerung von Außentiefquerschnitten durch gezielte Spülung untersuchen. Es sollen Grundlagen für die Bemessung von Spülziel und Spülbecken und für die Optimierung der Sielsteuerung zur bestmöglichen Tiefenstabilisierung des Außentiefs erarbeitet werden. Es wird dabei der Frage nachgegangen, ob zur Räumung schllickig-schluffiger Sedimente einer intensiven Spülräumung oder einem Gegenstau zur Verringerung des beginnenden starken Flutstromes der Vorzug zu geben ist.

Durch Naturmessungen werden die Zusammenhänge zwischen Tideverlauf, Tideströmung, Spülströmung, Schwebstofftransport und Querschnittsentwicklung erfaßt. Aber auch andere Einflußgrößen wie Seegang auf dem Watt, Spülbeginn und Spüldauer werden dabei untersucht. Die Auflandungsrate des Spülbeckens durch das regelmäßige Füllen mit schwebstoffbeladenem Seewasser ist ebenfalls von Interesse. Außerdem ergeben die Messungen wissenschaftliche Grundlagen für die Beurteilung des Transportvermögens von Tideströmungen. Erwartet werden somit umfangreiche Erkenntnisse für die praktische Lösung von Ingenieuraufgaben. Auch die Wirkungsweise eines Stromräumbootes und Möglichkeiten zur Optimierung seines Einsatzes werden in die Untersuchung einbezogen. Im übrigen ist der Einfluß des Schiffsverkehrs besonderen Untersuchungen vorbehalten (s. 1.3 und 1.4).

1.3 Forschungsprojekt „Natürliche Querschnitte von Außentiefs (AT-N)“^{*)}

Das vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (LW) als Antragsteller durchgeführte Vorhaben „AT-N“ soll die natürlichen Zusammenhänge zwischen den maßgebenden Einflußgrößen von Außentiefssystemen an der deutschen Nordseeküste mit überwiegender Sielbetrieb untersuchen. Die Ergebnisse sollen Beiträge für Bewertungs- und Bemessungsgrundlagen, für die Auswirkung künstlicher und natürlicher Veränderungen sowie maßgebende Einflüsse auf hydrologische und morphologische Zustandsgrößen liefern.

Anhand von Ähnlichkeitsuntersuchungen werden die Beziehungen zwischen Kenngrößen für den Binnenabfluß, den Sielbetrieb, die Tideverhältnisse und die Außentiefmorphologie überwiegend auf der Grundlage von vorhandenem Archivmaterial analysiert. Der Einfluß der Schifffahrt auf die Schwebstoffführung in Außentiefs soll durch Naturversuche exemplarisch bewertet werden. Die dazu erforderlichen Untersuchungsverfahren – insbesondere für die kontinuierliche automatische Messung von Sedimentkonzentrationen – wurden schrittweise unter Einbeziehung der zwischenzeitlichen Erkenntnisse entwickelt und optimiert.

1.4 Der Einfluß des Schiffsverkehrs^{**)}

Im Rahmen des Forschungsvorhabens hat die Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD) Naturmessungen im Neßmersieler Außentief durchgeführt, die den Einfluß der Schifffahrt auf die Wasserstände und die bodennahen Strömungen deutlich machen.

Die VBD-Untersuchungen sollen helfen, die komplexen Zusammenhänge zwischen Fahrwasserquerschnitt, Schiffstiefgang, Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung, die für den Transport von Sohlenmaterial mitbestimmend sind, bei unterschiedlichen Tideverhältnissen zu klären.

1.5 Durchführung der Forschungsprojekte über Außentiefs

Mitglieder der Projektgruppen:

Ausführende Stelle des Projektes „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“:

Bauamt für Küstenschutz, Jahnstr. 1, 2980 Norden 1,

LBD Heie F. Erchinger (Projektleitung)

Dipl.-Ing. Hans-Gerd Coldewey

Dipl.-Ing. Klaus Probst

Bautechn. Johann Krey

^{*)} siehe Beitrag RENGER und BEDNARCZYK in diesem Heft

^{**)} siehe Beitrag MÜLLER und BINEK in diesem Heft

Ausführende Stelle des Projektes „Natürliche Querschnitte von Außentiefs“:

Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein, Saarbrückenstr. 38, 2300 Kiel,
Dr.-Ing. Eberhard Renger (Projektleitung und Geschäftsführung für das Gesamtprojekt)
Dipl.-Ing. Klaus Bednarczyk
Dipl.-Ing. Ulla von See
Verm.Techn. Uwe Gutsche

Untersuchung der Einflüsse durch Schiffsverkehr:

Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Klödenerstr. 77, 4100 Duisburg 1,
Dr.-Ing. Ernst Müller
Ing. Helmut Binek

Weitere Mitglieder der Projektgruppe:

Dr.-Ing. Hans-Joachim Stephan, Forschungsstelle Küste des Nds.
Landesamts für Wasserwirtschaft, Norderney
LBD Roelf Carsjens, Nds. Hafenamts Emden (bis 1984)
BD Gerd Frerichs, Nds. Hafenamts Norden (ab 1985)

Die Naturversuche wurden überwiegend am „Naturmodell“ Neßmersieler Außentief bei Neßmersiel, Landkreis Aurich, 15 km östlich der Stadt Norden/Ostfriesland durchgeführt. Die Vorbereitungen und Voruntersuchungen einschl. Testen der Meßanlagen wurden 1982 und 1983 vorgenommen. Die Hauptmessungen und -untersuchungen sind in den Jahren 1984, 1985 und 1986 durchgeführt worden.

2. Morphologische und hydrologische Gegebenheiten am Neßmersieler Außentief

2.1 Das Außentief und seine Seitenräume

Das rd. 2 km lange Außentief beginnt am Spülsiel und endet an der Neßmersieler Balje. Auf den ersten 500 m ist es seitlich vom Deichvorland eingefasst. An der Westseite ist dieses erhöht und zu Hafenanlagen ausgebaut. Die Böschungen sind an dieser Seite befestigt. Die Hafenkajungen sind mit Spundwänden eingefasst.

Auf weiteren 1200 m ist an der Westseite des Außentiefs ein Leitdamm errichtet, dessen Krone von NN + 0,9 m auf NN + 0,5 m am Leuchtfeuer abfällt. Der Leitdamm besteht aus Betonfertigteilen. An der Ostseite ist der Fuß durch Steinschüttung gesichert, während an der Westseite des Leitdamms kleine, niedrige Abweiser die Eintiefung einer Rinne am Leitdammfuß verhindern. Die von 40 auf 80 cm unter MThw abfallende Leitdammkrone hat sich auch in winterlichen Ostwindlagen bewährt, da sie selbst bei etwas erniedrigten Tidewasserständen das treibende Eis nicht staut und damit die Vereisung der Rinne nicht fördert. Am Leitdammkopf führt der Stromversatz zur Ablagerung einer Plate, die zu einer östlichen Ausbuchtung des Außentiefs vor Einmündung in die Neßmersieler Balje zwingt.

An der Ostseite des Außentiefs fällt das grüne Deichvorland zum unbegrünten Watt ab. Im Schutze der Hafenanlagen sind die Seegangskräfte derart gedämpft, daß sich die Kante des

Vorlandes (ostfriesisch: des Hellers) hält, ohne daß sie durch eine Lahnung geschützt zu werden braucht. Weiter seewärts steigt die ostseitige Böschung des Außentiefs mit nach oben flacher werdender Böschungsneigung asymptotisch an bis zur Wattoberfläche, deren Höhe von NN + 0,75 m an der Hellerkante auf NN -0,50 m am Prielrand in Höhe des Leitdammkopfes abfällt. Mehrere, sich besonders nach Eiswintern verlagernde und stärker einschneidende Priele münden von dieser östlichen Wattfläche ins Außentief. Da eine zeitweilig starke Ausräumung von Priele zu erheblichen Eintreibungen in das Außentief führt, werden solche Priele ggf. zur Verhinderung weiterer rückschreitender Erosion abgedämmt. Mit einer in die Wattoberfläche einbindenden kurzen Holzspundwand mit V-förmig angelegter Oberkante liegt die Prieleinmündung dann nach Lage und Höhe fest.



Abb. 2.12. Blick vom Spülsiel auf Hafen und Außentief während des Spülens kurz vor Tnw

Bezogen auf die topographische Wattwasserscheide ergeben sich die in Tab. 1 aufgeführten Einzugsgebiete und Tidevolumina (Grundlage: Küstenkarte 1975) wie folgt:

Tabelle 1. Einzugsgebiete und Tidevolumina für das Neßmersieler Außentief

Außentief-Station (m)	Einzugsgebiet (ha)	Tidevolumen (10^6 m^3)
600	19	0,14
1 000	33	0,34
1 250	45	0,51
1 600	55	0,67

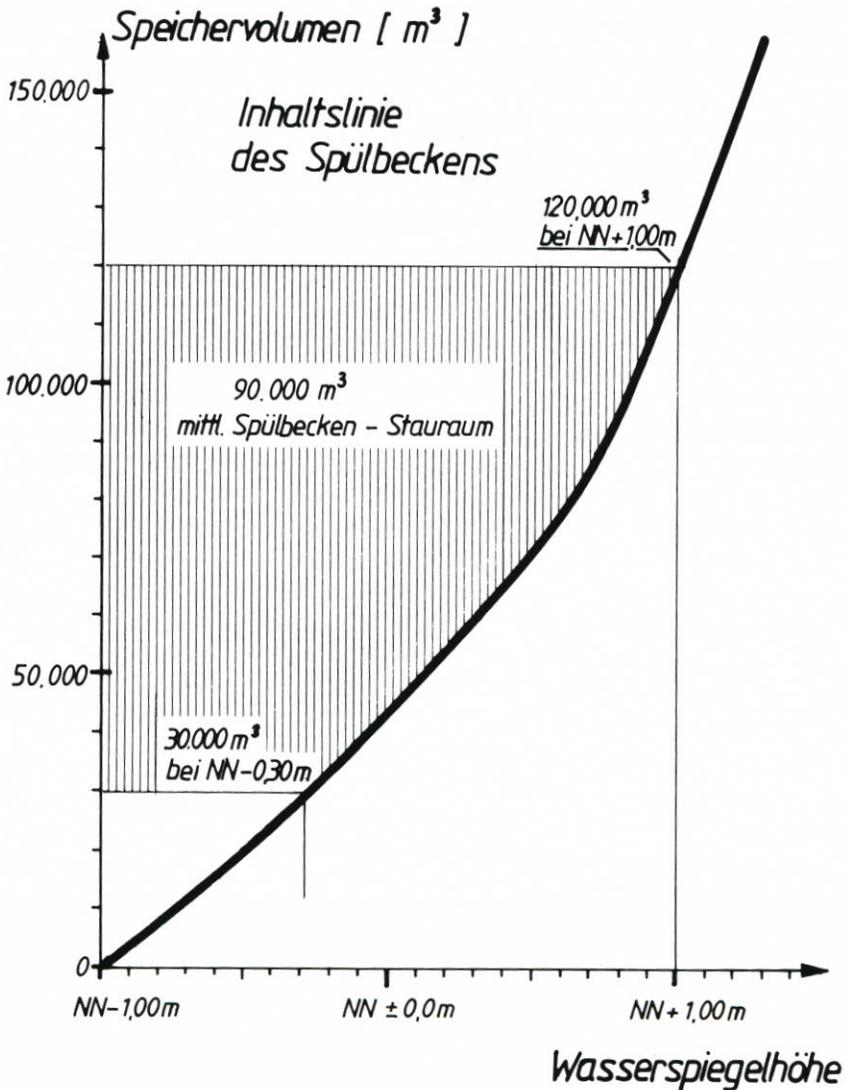


Abb. 2.13. Speicherinhaltslinie des Spülbeckens

2.2 Speicherinhalt des Spülbeckens

Das insgesamt 13,9 ha große Spülbecken wurde in den Jahren 1979/80 nach einem Landschaftspflegeplan als Vogelrast- und -brutgebiet angelegt. Etwa 290 000 m³ Klei- und Sandboden wurden im Zuge von Deichbaumaßnahmen entnommen. In seinem tiefen Bereich liegt die Sohle auf NN -5 bis -6 m.

In Höhe der Spülsiel-Sohlschwelle von NN -1,0 hat das Spülbecken eine Fläche von 3,7 ha. Die an diese ständig mit Wasser bedeckte Fläche anschließende Uferzone ist bis zur Höhe NN + 0,5 m 2,4 ha groß. Zwischen den Höhen NN + 0,5 bis 0,8 m ist eine nahezu ebene Zone mit etwa 5 ha Größe angelegt, die im östlichen Bereich eine Insel umschließt (Abb. 6.1). Das umliegende Grünland und die vorgenannte Insel liegen auf NN + 1,6 bis 1,8 m.

Wenn das Spülbecken in mittleren Tiden bis zum Peil von NN + 1,0 m (MHW-Peil) gefüllt wird, trägt das Speichervolumen oberhalb der Drempele-Oberkante von NN -1,0 m 120 000 m³ (s. Speicherinhaltslinie, Abb. 2.12). Dieses Gesamtvolumen steht jedoch als Spülwassermenge nicht voll zur Verfügung, da die Restwassermengen wegen geringer Abflußhöhe am Siel in der Regel nicht abfließen können. Außerdem nimmt der Abfluß stark ab, wenn der Spülbeckenwasserstand unter NN -0,3 m abfällt, so daß die vorher durch die Räumströmung aufgenommenen Außentiefsedimente wieder zu Boden sinken. Abzüglich dieses „nicht räumwirksamen“ Restvolumens von 30 000 m³ beträgt die mittlere Spülwassermenge etwa 90 000 m³.

Die Form des Spülbeckens mit der hochliegenden Ebene zwischen NN + 0,5 bis 0,8 m hat den Nachteil, daß nach niedrig auflaufenden Tiden nur eine geringe Spülwassermenge zur Räumung des Außentiefs zur Verfügung steht. Als Nachteil hat sich im vergangenen Winter erwiesen, daß beispielsweise bei einem Speicherpeil von NN + 0,6 m – das sind 40 cm unter dem MHW-Peil – das Spülbecken nur noch 40 000 m³ Spülwasser faßt. Zur Vergrößerung des Fassungsvermögens sollte daher die hochgelegene, ebene Randzone des Spülbeckens um 0,4 bis 0,5 m vertieft werden, wodurch nach niedrig auflaufenden Tiden etwa 50 % mehr Spülwassermenge verfügbar wäre. Nachteile für den Naturschutz ergeben sich dadurch nicht, da diese Fläche nach jeder Spülung wie bisher trockenfällt bzw. hinter einer leicht höheren Schwelle als Flachwasserzone für die Watvögel einen interessanten Rast- und Nahrungsbiotop darstellt.

2.3 Haupttidewasserstände in Neßmersiel

Das Mittel tidehochwasser für den Pegel Neßmersiel (Steuerpegel des Spülsiels) wurde durch Vergleichsrechnung mit dem gewässerkundlichen Pegel Bengersiel überprüft. Die Regressionsrechnung für ca. 380 Wertepaare aus den Monaten November 1984 bis Oktober 1985 ergibt, daß das Thw Neßmersiel i. M. um 7,5 cm niedriger als in Bengersiel aufläuft. Für die maßgebende Jahresreihe 1976/85 wurde am Pegel Bengersiel das MThw = NN + 1,37 m nach Wasserstandslisten des WWA Aurich berechnet. Für Neßmersiel gilt dann MThw = NN + 1,30 m. Dieser Wert konnte durch Vergleichsrechnungen mit den Wasserständen am gewässerkundlichen Pegel Borkum bestätigt werden.

Das Tnw in Neßmersiel wird durch den Spülbetrieb beeinflusst. Es ist vorgesehen, daß das unbeeinflusste MTnw aus einer größeren Anzahl von Meßwerten aus dem Jahre 1986 berechnet werden soll. Für die wenigen vorliegenden unbeeinflussten 21 Wertepaare ergibt sich durch Vergleichsrechnung vorläufig eine MTnw von NN -1,26 m am Steuerpegel des Spülsiels. Weiter seewärts fällt das MTnw bis Meßstelle III auf NN - 1,30 m. Der Ebbeast der

Tidekurve im Neßmersieler Außentief (Meßstelle III) zeigt einen flachen Verlauf mit einer Ebbedauer von i. M. 6 Stunden 36 Minuten, während der Flutast steil ansteigt und seine Dauer i. M. 5 Stunden 49 Minuten beträgt. Dieser typische Verlauf wird um so ausgeprägter, je näher der Meßpunkt am Siel liegt. Die Ebbedauer erhöht sich am Siel um ca. 20 Minuten. Die Flutdauer wird dementsprechend kürzer.

3. Durchführung der Naturmessungen im Forschungsprojekt „Tiefenstabilisierung“

3.1 Einrichtung der Meßstellen

Im Neßmersieler Außentief sind an drei ausgewiesenen Meßquerschnitten Dauermeßstationen eingerichtet. Die Meßstelle I liegt in Hafennähe, ca. 600 m seawärts des Spülsiels. Meßstelle II liegt im mittleren Abschnitt des Außentiefs, ca. 1000 m vom Siel entfernt. Die III. Meßstelle wurde am äußeren Ende des Außentiefs vor der Einmündung in die Neßmersieler Balje angeordnet (Abb. 2.2).

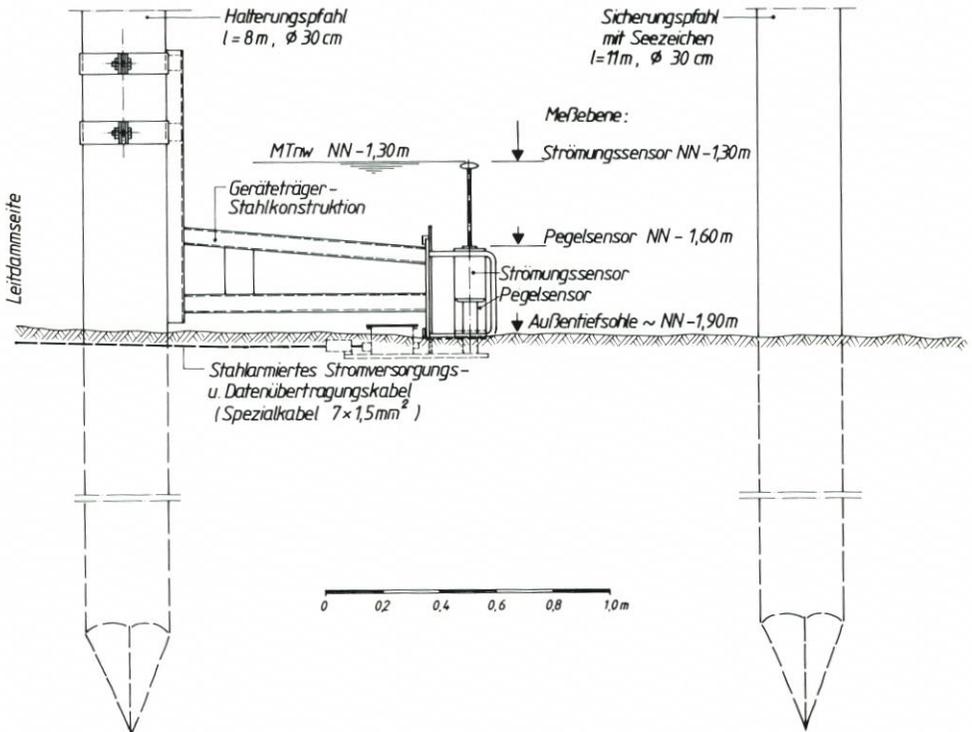


Abb. 3.1. Pegel- und Strömungsmessstelle

Jede Meßstation besteht aus einem Drucksensor für die Wasserstandsmessung und einem Strömungssensor für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in Längs- und Querrichtung zur Außentiefachse (Abb. 3.1). An der II. und III. Meßstelle werden außerdem der Schwebstoffgehalt mit vollautomatischen Sedimentmeßgeräten (Sediwa, Abb. 3.2) gemessen.

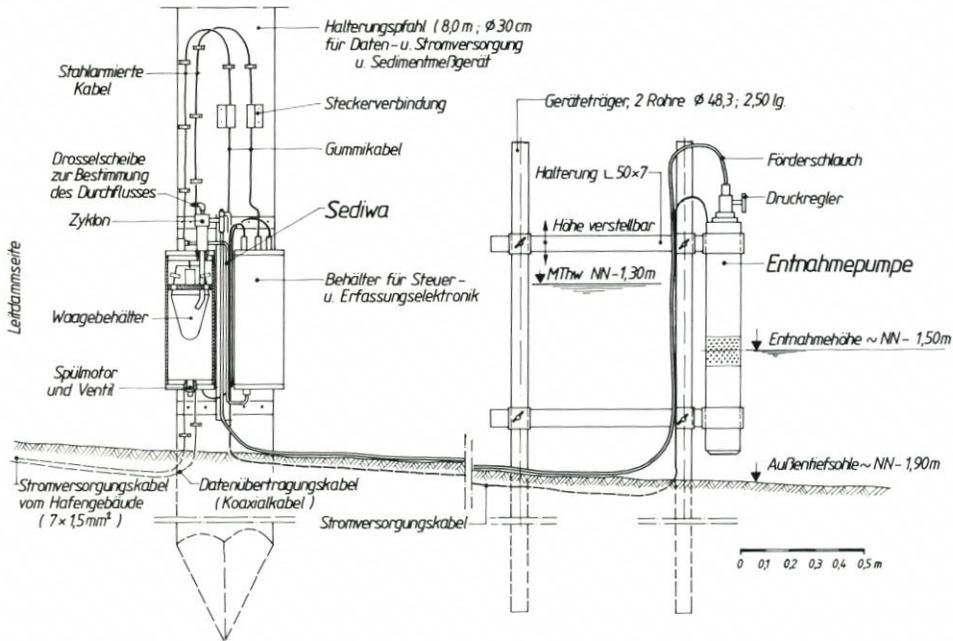


Abb. 3.2. Dauerentnahmestelle für Schwebstoffmessungen mit „Sediwa“

Zusätzlich können wahlweise an der II. Meßstelle oder am Spülsiel automatische Schwebstoffmessungen durchgeführt werden.

Mit Hilfe der an den drei Meßstellen ermittelten Wasserstands-Meßwerte wird das Fließgefälle im Außentief erfaßt. Die simultanen Dauermessungen ermöglichen es, die Zusammenhänge zwischen Tideverlauf, Strömungsgeschwindigkeiten einschl. Beschleunigungs- und Verzögerungseffekten und dem jeweiligen Schwebstoffgehalt zu untersuchen.

Alle Meßdaten werden über Seekabel zur Zentralstation am Steuerstand des Spülsiels übertragen.

3.2 Zentrale Datenerfassung

Die zentrale Datenstation besteht aus einer Digitalanzeige für die drei Pegel, einem Datalogger zur Speicherung der Meßwerte, einem Mehrfach-Schreiber sowie einem Barometergeber zum Ausgleich des Luftdrucks bei den Wasserstandsmessungen und einer Mittelwertelektronik.

Die zur Zentralstation am Steuerstand des Spülsiels übertragenen Meßwerte werden auf Magnetband gespeichert und außerdem von dem Mehrfach-Schreiber auf Registrierpapier aufgezeichnet.

Da die Druckdosen zur Messung des Wasserstandes bei einem bestimmten Luftdruck kalibriert worden sind, wird eine Korrektur – bezogen auf den jeweilig herrschenden Luftdruck – vorgenommen (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982): Zur Luftdruckmessung ist ein Aneroid-Barometer Typ Lambrecht mit Induktivmeßumformer in die Zentralstation eingebaut. Das Gerät enthält einen sechsteiligen Dosensatz als Luftdruck-Meßelement. Die druckabhängige Längenänderung des Dosensatzes wird über Hebel und Kette vergrößert und in Drehbewegungen der Zeigerachse umgeformt. Unter dem Zeiger des Meßgerätes kann der

aktuelle Luftdruck örtlich abgelesen werden. Zur elektronischen Verarbeitung der Luftdruckwerte ist das Gerät mit einem Induktiv-Meßumformer versehen, der den Verschiebungsweg des auf den Barometerdosen angeordneten Spulenkerns in einen eingetretenen Ausgangsstrom $0 \dots 20 \text{ mA} = 945 \dots 1055 \text{ mbar}$ wandelt.

Als Seewasserdichte ist ein Mittelwert von $1,024 \text{ g/cm}^3$ im Meßwertwandler fest eingestellt.

Da die Meßdaten nur in bestimmten Zeitabschnitten auf Magnetband abgespeichert werden können, wurde eine spezielle Mittelwertelektronik entwickelt, die die anfallenden Meßwerte für vorgegebene Zeiträume mittelt. Eine Abspeicherung von Zufallswerten ist insbesondere für die Strömungsgeschwindigkeiten wenig sinnvoll. Als Zeittakt für die Abspeicherung der Meßwerte wurden zunächst 5 Minuten gewählt. Für die Auswertung der Sedimentmessungen zeigte sich dann die Verkürzung auf eine Minute als zweckmäßig.

An die Mittelwertelektronik sind 13 Meßkanäle angeschlossen. Von diesen Kanälen sind sechs für die Signale der Strömungssensoren (je Sensor Quer- und Längsströmung), drei für die Signale der Drucksensoren und zwei für die Signale der Sedimentmeßgeräte belegt. Die letzten beiden Kanäle sind für die beiden Steuerpegel des Spülsiels (Pegel-Spülbecken und Pegel-Außentief) eingerichtet.

Die Mittelwertbildung ist technisch wie folgt gelöst (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982): Die momentanen Meßwerte werden ständig durch einen Spannungs/Frequenzwandler in Impulse umgesetzt, deren Frequenz proportional zum Meßwert ist. Während der Mittelung werden die Impulse von einem Zähler summiert. Aus dem Zählerstand, dividiert durch die Mittelungszeit, wird der Mittelwert gebildet. Der Mittelwert wird in einem Ausgaberegister gespeichert und steht als Ausgangssignal an, bis er nach Ablauf der nächsten Mittelungszeit durch den neuen Mittelwert ersetzt wird.

Die Mittelungszeit wird für alle Kanäle gemeinsam in einem Umschalter eingestellt. Möglich sind eine, zehn, dreißig, sechzig und 300 Sekunden. In der Schalterstellung „0“ werden die Momentanwerte ohne Mittelwert direkt angegeben. Diese Meßkanäle sind an den Datalogger angeschlossen.

Der Datalogger kann weitere zehn Kanäle aufnehmen. Sie sind belegt für das Datum, die Uhrzeit, die Schützstellungen des Spülsiels und die Kontrollwerte aus den Sedimentmessungen, wie Pumpenleistung und Zellendruck, sowie Signale aus den optischen Schwebstoffmessungen.

Die Meßdaten werden auf sogenannten Drei-M-Kassetten aufgezeichnet, die eine Speicherkapazität von rund 4 Mio Byte entsprechend 250 000 Meßwerten besitzen.

Für das Einlesen der umfangreichen Daten in den amtseigenen Rechner – Typ Commodore 8096 – wurde ein Leseprogramm entwickelt. Mit Hilfe dieses Computerprogramms können sämtliche Daten geordnet auf dem Bildschirm des Rechners abgerufen und in tabellarischer Form ausgedruckt werden. Außerdem werden die Wasserstands-, Strömungs- und Schwebstoffgangelinien mit Hilfe eines Plotters gezeichnet und statistisch ausgewertet.

3.3 Hydrometrische Untersuchungen

3.3.1 Wasserstände

Da die Außentiefquerschnitte im Verhältnis zur Breite des von und nach Baltrum verkehrenden Fährschiffes sehr eng sind und außerdem mit Verlagerungen des Außentiefs zu rechnen war, wurde auf die Errichtung von festen Schwimmerpegeln verzichtet. Statt dessen

wurden platzsparende, leicht zu montierende Drucksonden für die Wasserstandsmessungen verwendet. Die Drucksonden – Typ SETRA 204 – (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982) sind in robuste PVC-Gehäuse eingebaut. Der Wassereinlaß erfolgt durch einen bewuchsgeschützten Ringspalt. Der Druck wird über eine Membran und über Silikonöl auf den Meßwertgeber (Druckdose) übertragen. Die Druckdose besteht aus einem geschlossenen Edelstahlblock und einer zentralbefestigten, isolierten, plattenförmigen Elektrode, die zusammen eine veränderliche Kapazität bilden. Mit steigendem Druck wird die Kapazität kleiner. Diese Kapazitätsänderung wird elektronisch in ein lineares Gleichspannungssignal umgewandelt, das in einen eingprägten Strom (0 . . . 20 mA) umgesetzt wird.

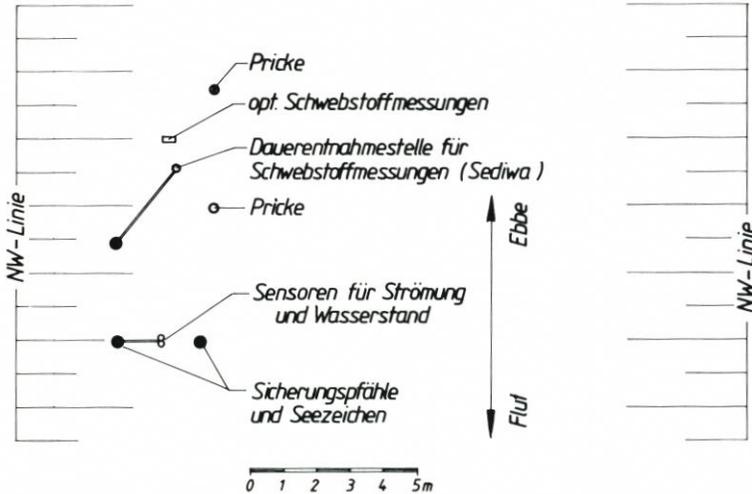


Abb. 3.3. Anordnung der Meßgeräte an Meßstelle II

Die Sensoren werden über Seekabel mit Strom versorgt, ebenso werden die Meßdaten über das gleiche Seekabel zur beschriebenen Zentralstation am Spülsiel übertragen. Die Anordnung der Meßeinrichtung ist aus Abb. 3.3 zu ersehen.

Da die Sensoren aus Gründen der Betriebssicherheit in Meßwertgebern für Absolutdruck ausgerüstet sind, müssen ihre Ausgangssignale für den jeweiligen Luftdruck korrigiert werden, damit eine Pegelmessung möglich wird. Bei Absolutdruckgebern über diese Korrektur würde eine Luftdruckänderung von z. B. 10 mbar eine Wasserstandsänderung von ca. 10 cm vortäuschen.

Die Drucksonden werden durch Vergleichsablesung des an der jeweiligen Meßstelle angebrachten Lattenpegels kalibriert.

3.3.2 Strömungen

Die Strömungssensoren arbeiten nach dem magnetohydrodynamischen Prinzip (Norddeutsche Seekabelwerke, 1982). Die Strömung induziert in einem elektromagnetischen Feld zwischen zwei Elektroden eine proportionale Spannung. Durch Anordnung von zwei in ihrer Achse senkrecht aufeinander stehenden Elektrodenpaaren werden die x- und y-Komponenten der durch die Elektrodenanordnung gegebenen Ebene gemessen. Der Meßbereich beträgt -5 bis $+5$ m/s und die Meßwerthäufigkeit 40 Werte je Sekunde.

Mit den Strömungssensoren wird die Fließgeschwindigkeit an einem festliegenden Punkt im Querschnitt gemessen. Um die Beziehung zur mittleren Geschwindigkeit über die Querschnittsbreite und -tiefe zu erhalten, sind zusätzlich Strömungsmessungen mit dem Ott'schen Meßflügel durchgeführt worden (Abb. 3.4). Von der Meßbühne eines schwenkbaren Meßauslegers wurden die Strömungsmessungen in drei Meßlotrechten über die gesamte Außentief-



Abb. 3.4. Strömungs- und Schwebstoffmessungen vom Meßausleger über den Außentiefquerschnitt

breite von jeweils drei Tiefenstufen mit einem Zeitabstand von 10 Minuten, bzw. während der Spülphase von 5 Minuten, jeweils eine Tide lang durchgeführt. Die berechneten mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten wurden zu der am Sensorkopf erfaßten Strömungsgeschwindigkeit in Beziehung gesetzt. Der Sensorwert konnte als repräsentativer Wert mit ausreichender Genauigkeit gewertet werden.

3.4 Schwebstoffmessung

3.4.1 Einsatz der Sedimentwaage (Sediwa)

Für eine kontinuierliche Dauermessung der instationären Sedimentbewegungen im Außentief wurde die neue vollautomatische Sedimentwaage (Sediwa) eingesetzt. Meßgeräte und Meßverfahren sind im Beitrag von RINGER und BEDNARCZYK in diesem Heft und dem dort angegebenen Schrifttum eingehend beschrieben. Die gewählte Anordnung einer Dauermeßstation ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Das Gesamtgerät ist für den Unterwassereinsatz ausgelegt. Das Seewasser einschl. dessen Schwebstoffe werden durch eine Kreiselpumpe zu einem Hydrozyklon befördert, der das

Meßgut separiert und den eingedickten Suspensionsstrom in das Meßgerät der Unterwasserwaage führt. Das Gewicht wird in einer Halbleiter-DMS-Meßzelle kontinuierlich bestimmt. Nach Erreichen einer eingestellten Gewichtsschwelle wird das Meßgefäß automatisch gespült. Die Pumpe wird per Kabel mit Strom versorgt; ebenso werden die Meßdaten per Kabeltelemetrie zur Zentralstation übertragen. Die Zentralstation enthält die Elektronik der Kabeltelemetrie, einen Mikroprozessor und die Steuereinrichtung für die Meßabläufe (Meerestechnik-Elektronik, 1983). Die Meß- und Kontrolldaten werden auf Registrierpapier aufgezeichnet und auf Magnetband des beschriebenen Dataloggers gespeichert.

Die an den Meßstellen II und III durchgeführten Dauermessungen lieferten wertvolle Meßergebnisse. Die Praxis des Meßeinsatzes unter Seebedingungen hat jedoch auch gezeigt, daß das Meßgerät Sediwa einen hohen Unterhaltungsaufwand erfordert und insbesondere die Pumpen einem hohen Verschleiß unterliegen. Das Feinstkorn $\varnothing < 5 \mu$ wird von diesem Gerät nicht erfasst (RENGER, 1982).

Um während der Hauptmessungen durchgehende Meßreihen zu erhalten, wurde an Meßstelle II zusätzlich ein optisches Schwebstoffmeßgerät eingesetzt.

3.4.2 Vergleichende optische Schwebstoffmessungen

Das Attenuationsmeßgerät (Trübungsmeßgerät) zeichnet sich aus durch eine mechanisch robuste und kompakte Konstruktion. Es arbeitet mit Gleichlicht und gegenüberliegenden Fenstern. Die Meßstrecke zwischen den Fenstern beträgt 10 mm (Abb. 3.5). Das Meßsignal wird im Unterwasserteil in eine Frequenz gewandelt und damit der Betrieb mit Einleiterkabel

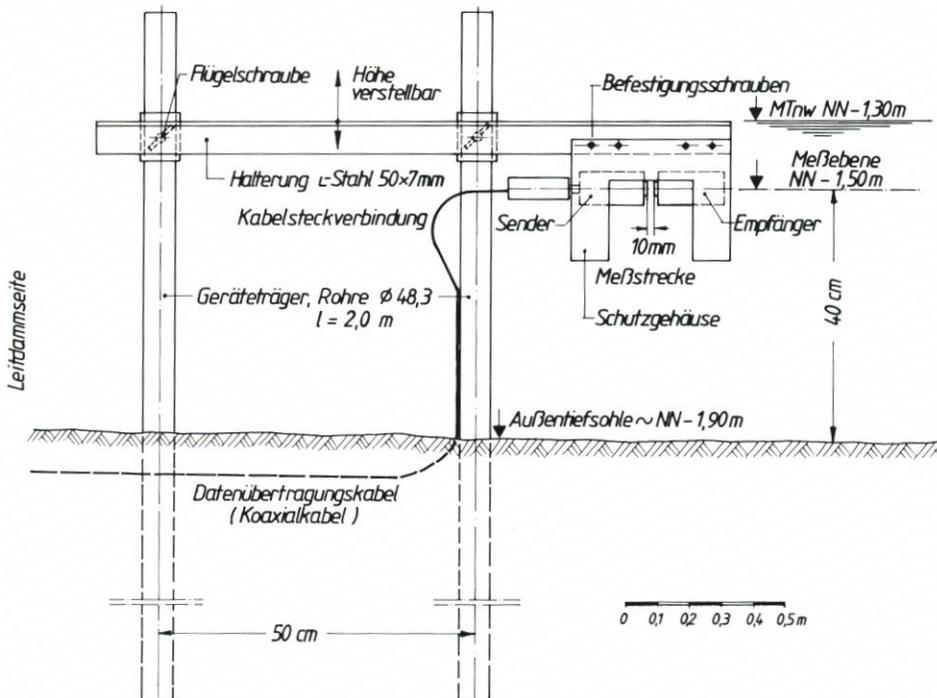


Abb. 3.5. Optisches Schwebstoffmeßgerät (Extinktionsmeßgerät) mit Halteungsvorrichtung im Außentief (Meßstelle II)

ermöglicht. Die in das Wasser eingeleiteten Lichtstrahlen, die entlang der Meßstrecke auf absorbierende oder streuende Partikel treffen, erreichen nicht den Empfänger. Diese Lichtschwächung wird gemessen und als elektronisches Signal wiedergegeben. Das Gerät arbeitet im Bereich von 1024 bis 2048 Hz. Die volle Frequenz von 2048 Hz wird im klaren Wasser wiedergegeben, in sehr trübem Wasser nur noch 1024 Hz.

Der empfangene Strahlungsfluß F_t wird gemessen und durch den eingestrahnten Strahlungsfluß F_o geteilt. Dieser Wert wird Transmission T genannt.

Der negative natürliche Logarithmus der Transmission ergibt, bezogen auf die Strecke L , den Attenuationskoeffizienten c .

$$T = F_t/F_o \quad (1)$$

$$c = (-\ln T)/L \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

Der Meßfehler des Attenuationskoeffizienten durch Vorwärtsstreuung wird auf 5 % geschätzt (OHM, 1974).

Vergleichbare optische Schwebstoffmessungen während des Spülbetriebs an Meßstelle II mit den Meßwerten der Sedimentwaage (Sediwa) ergeben die in Abb. 3.6 dargestellte mittlere Regressionskurve zwischen Attenuation in Prozent und dem Schwebstoffgehalt in mg/l. Für die Korrelationsrechnung wurden nur Meßwerte nach Erreichen der maximalen Geschwindigkeit berücksichtigt, um Beschleunigungseinflüsse nach Beginn der Spülung auszuschließen.

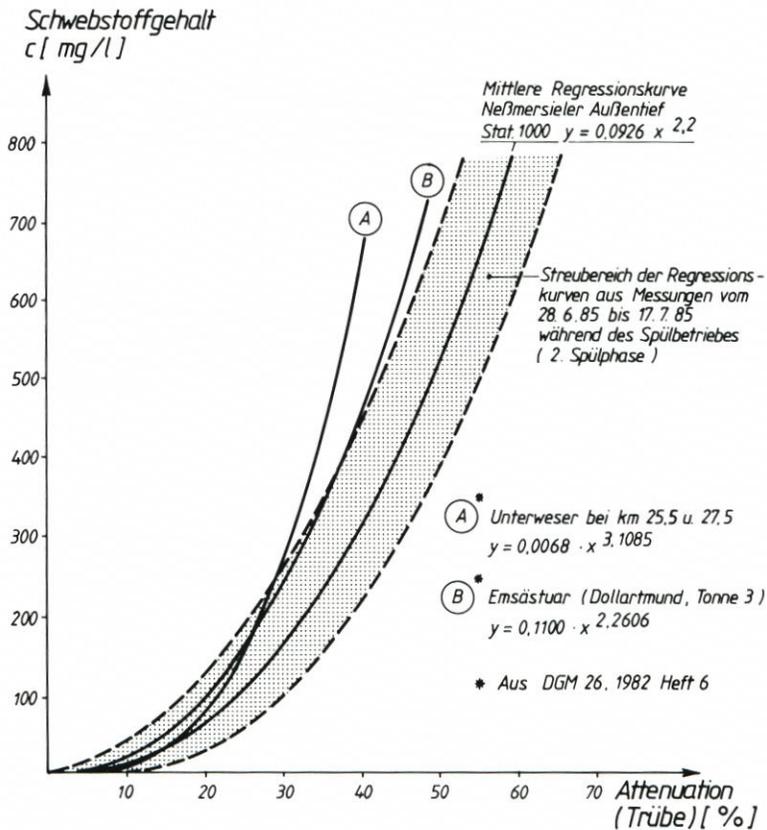


Abb. 3.6. Abhängigkeit zwischen Attenuation aus optischen Messungen und Schwebstoffgehalt aus Messungen mit der Sedimentwaage (Sediwa)

Für verschiedene Spülereignisse ergeben sich unterschiedliche Funktionen, vermutlich bedingt durch unterschiedliche Kornverteilungen. Die für die einzelne Funktion errechneten Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,8 und 0,93. Zum Vergleich sind hierzu Regressionskurven für die Unterweser und Ems (Dollart) aufgetragen (REINEMANN u. a., 1982).

Optische Schwebstoffmessungen haben den Nachteil, daß der Bezug zu Schwebstoffgewichten nur für gleiche Schwebstoffkorngrößen oder -verteilungen gültig ist. Ein hoher biologischer Anteil der Schwebstoffzusammensetzung, z. B. nach starkem Algenwachstum, erhöht die Trübe auch in dem Fall gleichbleibender Schwebstoffkonzentrationen. Vergleichsmessungen sind daher nur für einen begrenzten Zeitraum maßgebend. Diese Bedingung konnte in Neßmersiel weitgehend erfüllt werden. Im Unterschied zur Sediwa werden auch die Feinteile $< 5 \mu$ mit erfaßt.

4. Einflußfaktoren auf den Schwebstoffgehalt

4.1 Schwebstoffgehalt bei unbeeinflussten Tideströmungen

4.1.1 Unbeeinflusste Tideströmungen

Unter unbeeinflussten Tideströmungen soll in diesem Zusammenhang der natürliche Flut- bzw. Ebbstrom ohne Einfluß durch Wind, Schiffsverkehr oder Auslassen von Speicherwasser verstanden werden. Hierzu ist der mittlere Tideverlauf im Neßmersieler Außentief untersucht worden.

Die Strömungsmessungen haben ergeben, daß der Ebbstrom nach Kenterung nur langsam zunimmt und im mittleren Bereich des Außentiefs Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,3 m/s erreicht. Zum Leitdammende hin erhöht sich das Maximum der Ebbstromgeschwindigkeit auf 0,4 bis 0,6 m/s.

Der natürliche Flutstrom dagegen ist an Meßstelle III nur geringfügig höher als an Meßstelle II. Infolge des steilen Wasserstandsanstiegs werden in Einzelfällen hohe Flutstromspitzen bis zu einem Meter pro Sekunde gemessen.

Für ein Tnw von NN $-1,50$ m an Meßstelle III zeigt der Analogschrieb (Abb. 4.4) 45 Minuten nach Tnw an Meßstelle II eine Flutstromspitze von 1,0 m/s. Außer den Wasserständen und Strömungen enthält Abb. 4.4 die Ganglinien des Schwebstoffgehalts und der Durchflußmenge durch das Spülsiel. Zur Zeit des Flutstrommaximums beträgt in diesem Beispiel das Fließgefälle vom Leitdammende (Meßstelle III) bis zum Hafen (Meßstelle I) rd. 25 cm entsprechend 25‰. Bei diesem relativ niedrigen Tnw läuft der erste Flutstrom ähnlich einer Bore durch das Außentief und füllt zunächst das Hafenbecken. Die in das Außentief fließende Wassermenge nimmt mit steigendem Wasserstand zu, bis schließlich das mit hoher Fließgeschwindigkeit einfließende Wasser im Hafenbecken kurzzeitig höher als am Leuchfeuer aufläuft und darauf die Fließgeschwindigkeit an Meßstelle II bis auf 0,1 m/s abfällt. Dieser Schwingungsvorgang ist an Meßstelle II ausgeprägter als an Meßstelle III und wiederholt sich noch einmal in gedämpfter Form bei einem Wasserstand um NN, bis schließlich die seitlich angrenzenden Wattflächen überflutet werden und sich ein Flutstrom von 0,3 bis 0,4 m/s einstellt.

Diese Messungen belegen, daß der Flutstrom im Neßmersieler Außentief deutlich überwiegt. Messungen aus dem Jahre 1979, vor Beginn der Außentiefspülungen (BLANKENSTEIN u. a., 1984), ergeben ebenfalls, daß der Bereich des Neßmersieler Außentiefs „flutstromorientiert“ ist.

4.1.2 Schwebstoffeintrag durch Tideströmung

Während der oben beschriebenen Phase des Flutstroms kurz nach T_{nw} ist das Wasser mit sehr viel Schwebstoffen angereichert. Im Beispiel Abb. 4.4 beträgt die maximale Schwebstoffkonzentration 700 mg/l an Meßstelle II. Diese Schwebstoffe setzen sich nach Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Außentief bzw. Hafenbecken ab.

Die bisher ausgewerteten Schwebstoff-Parallelmessungen an Meßstelle II und III zeigen, daß der Schwebstoffgehalt während der Flutstromspitzen an beiden Meßstellen etwa gleich hoch ist. In einem Einzelfall wurden allerdings auch wesentlich höhere Schwebstoffkonzentrationen an der Meßstelle III gemessen.

Die natürliche Ebbstromgeschwindigkeit reicht an der äußeren Meßstelle III zeitweilig aus, um Sedimente in Suspension zu versetzen. Für die Meßstelle II kann diese Aussage nach den Messungen mit der automatischen Sedimentwaage (Sediwa) nicht bestätigt werden.

Die Dauermessungen zeigen, daß durch die natürlichen, unbeeinflussten Tideströmungen mehr Schwebstoff in das Außentief hinein- als heraustransportiert wird.

4.1.3 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Schubspannung

Im Zusammenhang dieser Untersuchungen ist auch die infolge der Räumströmung wirkende, tangential an der Sohle des Außentiefs angreifende Schub- oder Schleppspannung τ_0 ermittelt worden. Die Schubspannung ist linear abhängig vom Wasserspiegelgefälle und hydraulischen Radius (ZANKE, 1982).

$$\tau_0 = \rho \times g \times R \times I \quad [\text{N/m}^2] \quad (3)$$

Mit	ρ = Dichte des Wassers	[kg/m ³]
	g = Erdbeschleunigung	[m/s ²]
	R = Hydraulischer Radius	[m]
	I = Spiegelgefälle	[-]

Für die Untersuchung der Schubspannung an Meßstelle II ist das mittlere Wasserspiegelgefälle zwischen Meßstelle I und III ermittelt und der hydraulische Radius vereinfacht mit der mittleren Wassertiefe über der Außentiefsohle gleichgesetzt worden. Entsprechend der o. g. Grenzwerte für die kritische Geschwindigkeit können Grenzs Schubspannungen angegeben werden. Nach ersten Untersuchungen ist für eine wirksame Räumung von Außentiefs des Typs Neßmersiel zu fordern, daß die Grenzs Schubspannung von $\tau_c = 1,6 \text{ N/m}^2$ wesentlich überschritten wird. Dieser Frage der kritischen Schubspannung oder Grenzs Schleppspannung soll in weiteren Messungen und Untersuchungen noch vertiefend nachgegangen werden.

4.2 Wirkung der Spülströmung

4.2.1 Spülbeeinflusste Strömungen

Die Auswertung der durch die Spülungen beeinflussten Strömungsmeßwerte ergibt, daß der Ebbstrom gegenüber dem Flutstrom deutlich überwiegt. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten nehmen während des i. M. etwa drei Stunden andauernden Spülvorgangs auf Werte zwischen 0,6 und 1,1 m/s auf der gesamten Außentiefenlänge zu. Während des Meßzeitraums vom Juli bis Oktober 1985 wurden z. B. 80 % aller Tiden durch Spülungen beeinflusst.

Tabelle 2. Strömungsparameter 24. 6. bis 13. 10. 1985

Zeitraum	Häufigkeit der Spülungen bez. auf die Anzahl der Tiden (%)	V_i (m/s)			$\int V_i dt : \int V_e dt$	Überschreitungshäufigkeit				
		Meßst. II	Meßst. III	Meßst. II		$V_i > 0,4$ m/s (%)	$V_e > 0,4$ m/s (%)	Meßst. II	Meßst. III	
24. 06.-21. 07. 85	96	0,16	0,18	0,30	1:2,6	1:3,7	0,7	1,4	14,3	18,4
22. 07.-18. 08. 85	85	0,15	0,19	0,28	1:2,0	1:3,5	0,9	2,0	13,1	17,1
19. 08.-15. 09. 85	84	0,13	0,18	0,23	1:2,5	1:3,0	0,4	1,9	9,6	13,0
16. 09.-13. 10. 85	55	0,12	0,20	0,12	1:1,4	1:2,6	1,0	2,3	1,1	13,0
Mittelwert	80	0,14	0,19	0,23	1:2,2	1:3,2	0,7	1,9	9,5	15,4

Die Ebbstromgeschwindigkeit von 0,5 m/s wurde dabei i. M. 1,5 Stunden lang überschritten. Die jeweilige Dauer und Größe der künstlich erhöhten Ebbströmung ist sehr stark abhängig von dem nicht zu beeinflussenden natürlichen Tideverlauf an der Einmündung des Neßmersieler Außentiefs zur Neßmersieler Balje und der jeweils gewählten Steuerung des Spülsiels (Abschn. 4.2.4).

Wie unter Abschn. 4.1 beschrieben, überwiegt in unbeeinflussten Tiden der Flutstrom. Nach Messungen aus dem Jahre 1979 (BLANKENSTEIN u. a., 1984) beläuft sich der Verhältniswert der Stromintegrale (Flutstromintegral zu Ebbstromintegral) auf 1:0,8 im mittleren Bereich des Außentiefs. Infolge der Spülwasserzugabe kehrt sich der Verhältniswert der Stromintegrale um und wird für den Meßzeitraum 1985 zu 1:2,2 im mittleren Bereich des Außentiefs (Meßstelle II) und 1:3,2 an Meßstelle III (Tab. 2).

4.2.2 Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Wenn die Geschwindigkeit eines Stromes über einem aus Einzelkörnern gebildeten ebenen Bett langsam gesteigert wird, setzen sich bei der sogenannten kritischen Geschwindigkeit die ersten Körner in Bewegung. Für die Bemessung von Spülströmen für Außentieferräumung ist dieser Wert von Bedeutung.

Die kritische Geschwindigkeit ist u. a. abhängig von Korndurchmesser, von der Lagerungsdichte und ggf. von einer vorhandenen Kohäsion bzw. biologischen Verfestigung (FÜHRBÖTER, 1983). Die Untersuchung von Sedimentproben, die an den Meßstellen entnommen wurden, ergab mittlere Korndurchmesser zwischen 0,06 und 0,11 mm für ein von feinem Schlick freigespültes Außentief.

Schwebstoffgehalt [mg/l]

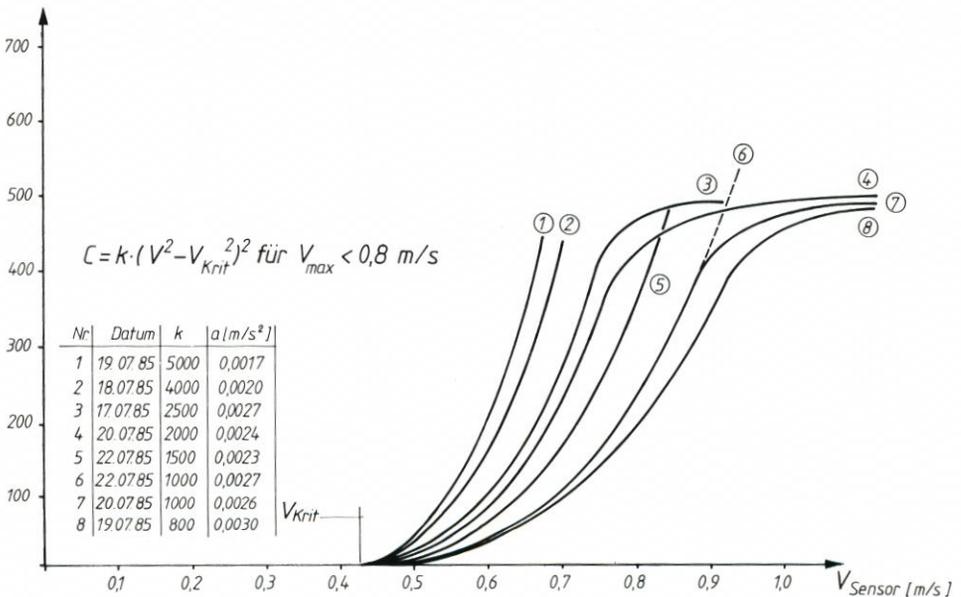


Abb. 4.1. Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit und Beschleunigung des Spülstromes

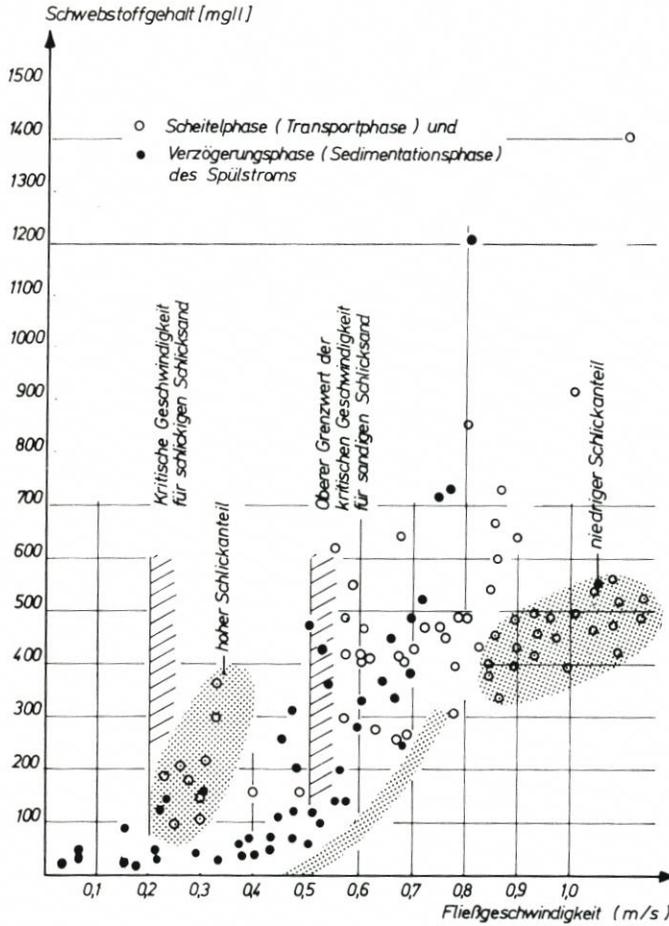


Abb. 4.2. Schwebstoffgehalt in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit

Die kritische Geschwindigkeit für ein unverfestigtes steriles Material dieser Korngröße liegt nach SHIELDS um 0,18 m/s (ZANKE, 1982). Nach den vorliegenden Meßergebnissen liegt der Bewegungsbeginn von Sedimenten in dem vom Schlick freigespülten Neßmersieler Außentief zwischen 0,4 und 0,5 m/s (Abb. 4.1 und 4.2). Daher ist für die Räumung des Neßmersieler Außentiefs eine Mindestspülgeschwindigkeit zu fordern, die 0,5 m/s deutlich überschreitet. Für diesen Bereich wurde der Zusammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit untersucht. Aus theoretischen Ansätzen ist folgende Beziehung bekannt:

$$c = k \times (v^2 - v_{krit}^2)^2 \text{ (mg/l)} \quad (4)$$

- c = Schwebstoffgrammkonzentration (mg/l)
- v = Fließgeschwindigkeit (m/s)
- v_{krit} = kritische Geschwindigkeit (m/s)
- k = Konstante

Diese untersuchte Beziehung gilt nur für Geschwindigkeiten < 0,8 m/s, da in den Meßreihen nach Überschreitung dieser Geschwindigkeit keine weitere Schwebstoffzunahme

zu verzeichnen war. Der Faktor k ist abhängig von der Beschleunigung des Spülstroms und liegt für die Meßwerte vom Juli 1985 zwischen 800 und 5000 (Abb. 4.1). Je größer die Geschwindigkeitszunahme bei Spülbeginn ist, desto kleiner wird k , d. h., daß die Schwebstoffkonzentration langsamer zunimmt.

Die in Abb. 4.1 dargestellten Zusammenhänge gelten nur für ein Außentief ohne frische Schlickablagerungen, wie es im Juli 1985 vorlag.

Im Jahre 1984 wurde der Spülbetrieb für eineinhalb Monate ausgesetzt und anschließend das Verhalten des frisch abgelagerten Schlicks untersucht. Die Messungen des Schwebstoffgehalts an Meßstelle II zeigten, daß das frisch abgelagerte schlickige Material bereits ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 m/s erodiert und in Schwebelagung bleibt. In Abb. 4.2 sind Meßwerte des Schwebstoffgehaltes in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit aus der Scheitelphase und der Verzögerungsphase des Spülstroms aufgetragen. Mit abnehmender Fließgeschwindigkeit nimmt das Transportvermögen des Spülstroms deutlich ab. Abb. 4.2 enthält ebenfalls die Meßwerte für den Außentiefzustand ohne frische Schlickablagerungen.

4.2.3 Optimierung der Räumwirkung

Zur Optimierung des Spülbetriebes in Neßmersiel wurden in den Hauptmessungen die Spülwassermenge sowie der Spülbeginn in Abhängigkeit zum Außenwasserstand variiert. Die Untersuchungen zur Optimierung der Räumwirkung sind noch nicht abgeschlossen. Einige grundsätzliche Erkenntnisse und Erfahrungen sollen hier anhand von Beispielen erläutert werden:

Für eine effektive Räumung des Außentiefs muß die Ebbstromgeschwindigkeit durch Auslassen von Spülwasser über einen möglichst langen Zeitraum die kritische Geschwindigkeit überschreiten. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichend bemessene Spülwassermenge und ein niedriger Wasserstand im Außentief. Um eine möglichst lange Räumphase und

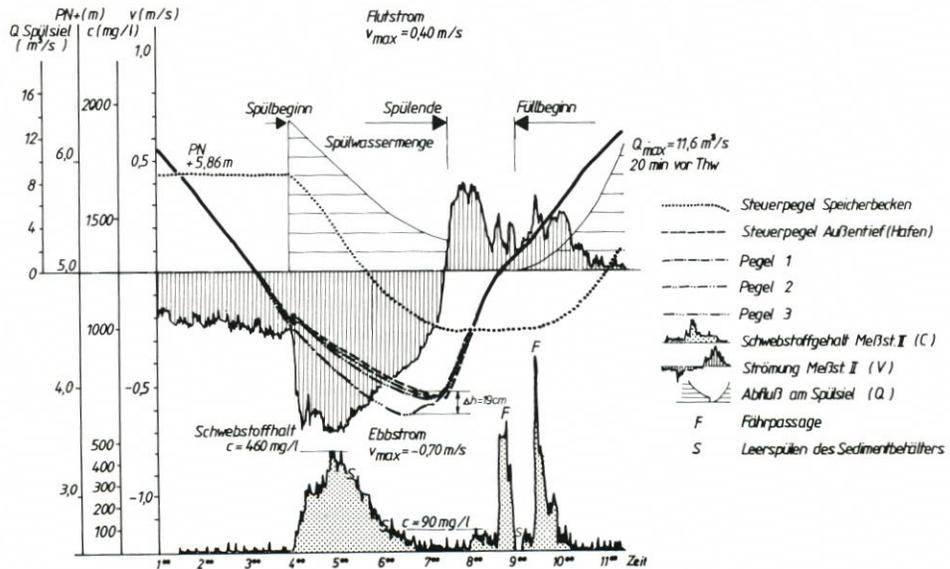


Abb. 4.3. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 28. 7. 1984

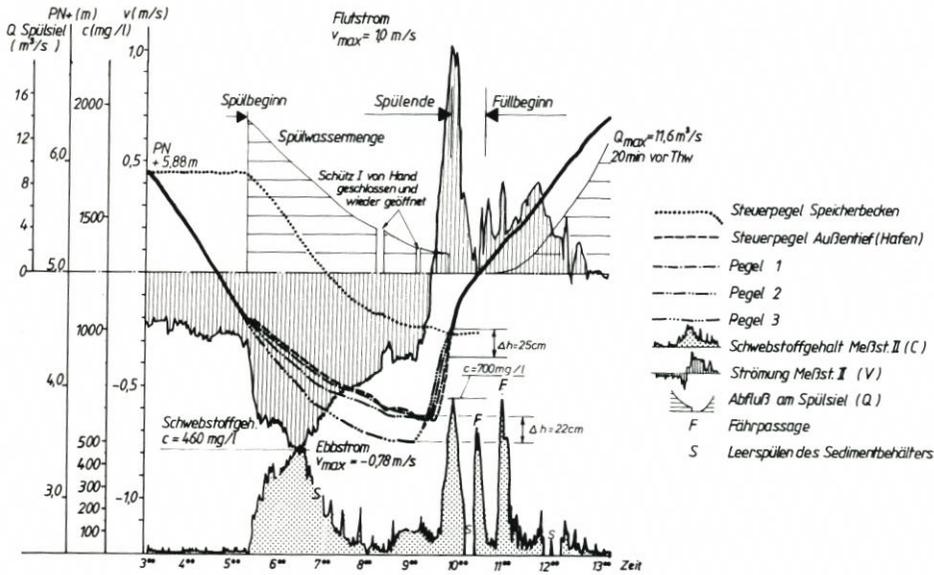


Abb. 4.4. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 30. 7. 1984

ausreichend lange Transportwege (Stromwege) zu erreichen, muß möglichst früh vor dem Niedrigwasser mit dem Spülen begonnen werden, damit sich das erforderliche Fließgefälle über einen längeren Zeitraum einstellen kann und das mitgeführte Material nicht mehr im Außentief ausfällt.

Diese Zusammenhänge sollen anhand der Ganglinien auf Abb. 4.3 und 4.4 erläutert werden: Bei einem Spülbeckenwasserstand von etwa PN + 5,9 m und einem Außenwasserstand von PN + 4,6 m wird mit dem Spülen im Falle a) (Abb. 4.3) ca. 2,5 Stunden bzw. im Falle b) (Abb. 4.4) bereits 3,7 Stunden vor Niedrigwasser aufgrund der erniedrigten Tidekurve besonders früh begonnen. Während der ersten zwei Spülstunden mit hohem Sieldurchfluß wird die kritische Geschwindigkeit von 0,5 m/s wesentlich überschritten. Im Fall a) wird eine maximale Geschwindigkeit von 0,7 m/s und im Fall b) von 0,78 m/s erreicht. Im Fall b) wird eine höhere Geschwindigkeitsspitze erreicht, da das Niedrigwasser um 20 cm unter dem normalen Tnw abfällt und sich somit ein größeres Fließgefälle einstellen kann. Das Geschwindigkeitsmaximum wird bei einem Gefälle im Fall a) von 0,19 ‰ und b) von 0,22 ‰ zwischen den Meßstellen I und III erreicht. In beiden Fällen wurde an Meßstelle II ein maximaler Schwebstoffgehalt von 460 mg/l gemessen. Die Dauer der hohen Schwebstoffkonzentration beträgt etwa 2,5 Stunden. Darüber hinaus wird durch die längere Spülphase in b) noch über eine Stunde lang eine nur wenig erhöhte Schwebstoffkonzentration bis zu 100 mg/l (Abb. 4.4) gemessen. Mit dem Spülstrom werden im Falle a) 42 t und im Falle b) 53 t seewärts verfrachtet.

Aufgrund vorliegender Messungen bringt es keinen Vorteil, bei einem höheren Außenwasserstand als PN + 4,6 m mit dem Spülen zu beginnen. Zu dieser Zeit sind die Randflächen des Außentiefs noch überflutet, so daß die ausgelassenen Wassermengen nicht nur durch die eigentliche Rinne, sondern auch über die Seitenräume und somit durch einen großen benetzten Querschnitt mit relativ kleiner Geschwindigkeit abfließen. Das Wasserspiegelgefälle und das Stromarbeitsvermögen erreichen daher keine optimalen Werte. Außerdem herrscht am Siel bei einem höheren Außenwasserstand ein geringeres Gefälle und somit ein geringerer Durchfluß.

Es hat sich gezeigt, daß durch einen Spülbeginn bei einem Wasserstand von PN + 4,3 m, also um 30 cm niedriger als in den oben beschriebenen Beispielen, eine lange Räumphase mit wesentlich mehr als 0,5 m/s Fließgeschwindigkeit und damit eine maximale Ausräumung erreicht wird. Es wurden dabei erreicht (Meßzeitraum 1985):

Fließgeschwindigkeit 0,5 m/s über i. M. 1,8 Std.

max. Geschwindigkeit i. M. 0,85 m/s

max. Schwebstoffgehalt i. M. 580 mg/l

Schwebstofftransport während des Spülens i. M. 70 t

4.2.4 Wirkung des Gegenstaus

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, treten besonders in Springtiden mit einem Tnw unter NN -1,4 m kurze, hohe Flutstromgeschwindigkeiten ca. eine Stunde nach Tnw auf. Infolgedessen werden über etwa eine halbe Stunde hohe Schwebstoffkonzentrationen in das einströmende Tidewasser eingetragen (Abb. 4.4).

Die Flutstromspitzen können gedämpft und damit der Sedimenteintrag verringert werden, wenn zu diesem Zeitpunkt noch genügend Wasser im Spülbecken für einen Gegenstau zur Verfügung steht. Dieses ist bei der vorgegebenen Spülbeckengröße dann der Fall, wenn

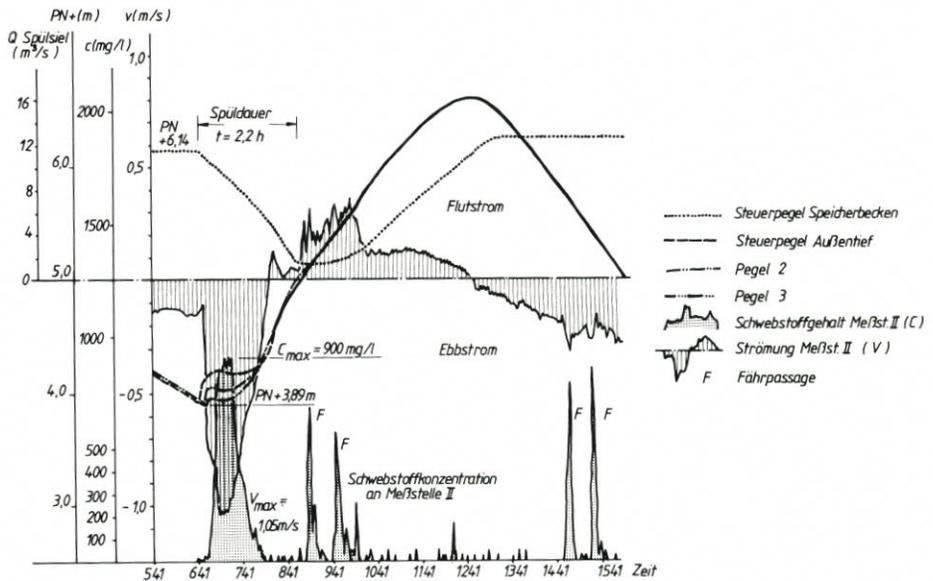


Abb. 4.5. Auszug aus den Dauermessungen der Wasserstände, Strömungen und Schwebstoffgehalte am 1. 8. 1985

zuvor entweder mit geringer Spülwassermenge gedrosselt (kleine Schützöffnung) gespült oder erst später mit dem Spülen begonnen wird. In beiden Fällen ist die Räumwirkung nicht sehr groß.

Für den Gegenstaubetrieb ist ein entsprechend später Spülbeginn (z. B. Außenwasserstand PN + 3,9 m) in Abb. 4.5 dargestellt. Kurzzeitig wird eine hohe Spülgeschwindigkeit von $V_{\max} = 1,05$ m/s erreicht. Die kritische Geschwindigkeit von 0,4 . . . 0,5 m/s wird aber nur

eine Stunde lang überschritten. Dementsprechend wird kurzfristig ein Schwebstoffmaximum von 900 mg/l gemessen. Diese hohe Schwebstoffkonzentration wird in diesem Beispiel nur erreicht, weil genügend frisch abgelagerter Schlick im Außentief vorhanden ist. Immerhin werden etwa 25 Tonnen Schwebstoffe durch den Querschnitt an Meßstelle II seewärts transportiert. Durch den späten Spülbeginn kann während des Flutastes bis zu einem Außenwasserstand von etwa $NN \pm 0$ mit einer Spüldauer von 2,2 Stunden gespült und die erste Flutstromspitze auf etwa 0,1 m/s Fließgeschwindigkeit gedämpft werden.

Der Gegenstau verhindert, daß die in etwa 10% der gemessenen und durch Spülung beeinflussten Tiden auftretenden hohen Flutstromspitzen ($v \geq 0,5$ m/s) Schwebstoffe in das Außentief und den Hafbereich transportieren. Dafür muß auf einen effektiven Teil der Räumphase verzichtet werden. Ein Vergleich des Gegenstaubetriebs mit den beschriebenen Beispielen für den ausschließlichen Räumbetrieb ergibt folgende Schwebstofftransporte durch den Querschnitt an Meßstelle II. Die Schwebstofftransporte infolge Schiffsverkehr werden dabei nicht mit einbezogen.

Mit dem Spülstrom werden in Beispiel a) (Abb. 4.3) 42 t und in Beispiel b) (Abb. 4.4) 53 t seewärts transportiert. Der erste einsetzende Flutstrom trägt im Fall a) nur etwa eine Tonne und im Fall b) mit der außergewöhnlich hohen Flutstromspitze 21 Tonnen in den hafennahen Bereich des Außentiefs ein. Stellt man die in den Beispielen a) und b) ermittelten Massen dem bei großem Frischschlickangebot ermittelten Transport von 25 Tonnen aus dem Beispiel des Gegenstaubetriebes gegenüber, so läßt sich der Schluß ziehen, daß für die Gegebenheiten in Neßmersiel ein langer, effektiver Räumbetrieb dem Gegenstaubetrieb, der nur in wenigen Fällen mit hohen Flutstromspitzen eine nennenswerte Wirkung hat, vorzuziehen ist.

Der Schwebstoffeintrag in das Außentief und in den Hafen infolge Strömung, Schiffsverkehr und Seegang ist nicht durch den Spülbetrieb einflußbar. Die in diesen Fällen abgelagerten Sedimente müssen durch den Räumbetrieb wieder entfernt werden.

4.3 Windabhängige Seegangseinflüsse

Die die Wattoberfläche bildenden schlickig-schluffigen Sedimente werden bei Wind durch die Grundberührung des Seegangs auf dem Watt in stärkerem Maße aufgewirbelt und mit der Tiderströmung weitertransportiert.

Bei südwestlichen bis nordwestlichen Winden über 8 m/s – entsprechend 5 Bft – konnte nach Überfluten des Leitdammes (Oberkante der Krone i. M. $NN + 0,6$ m) eine deutliche Zunahme der Schwebstoffkonzentration an der Meßstelle II im Außentief festgestellt werden. In Abb. 4.6 sind gemittelte Meßwerte des Schwebstoffgehaltes und die mittlere Windgeschwindigkeit – gemessen an der etwa 14 km entfernt liegenden Wetterwarte Norderney – aufgetragen. Die Mittelungszeiträume liegen zwischen einer und drei Stunden. Während dieser Zeit waren jeweils die Windgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration weitgehend gleichbleibend. Der Zusammenhang zwischen der aus dem Windfeld berechneten Wellenhöhe und der Schwebstoffkonzentration konnte bestätigt werden. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Seegangsenergie und damit auch die Turbulenzintensität zu, so daß immer mehr Schwebstoffe in das Seewasser eingetragen werden und in Schwebelassen bleiben. Bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 15 m/s aus West-Süd-West mit etwa 0,5 m signifikanter Wellenhöhe wurde ein mittlerer Schwebstoffgehalt von 640 mg/l etwa 40 cm über der Außentiefsohle gemessen (Abb. 4.6).

Angesichts dieser Meßergebnisse ist es verständlich, daß Außentiefs häufig nach sturmflutreichen Wintern verhältnismäßig stark aufgelandet sind.

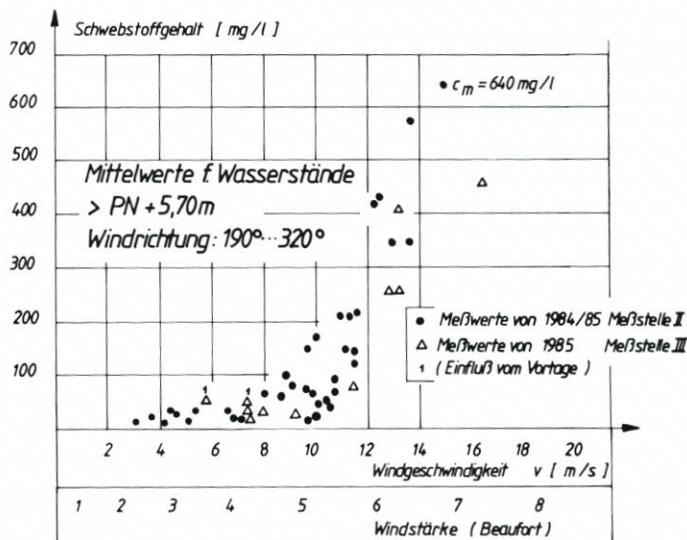


Abb. 4.6. Abhängigkeit zwischen Schwebstoffgehalt und Windgeschwindigkeit an Meßstelle II und III

4.4 Schiffseinflüsse

Einen nicht unwesentlichen Einfluß auf den Schwebstofftransport hat der Schiffsverkehr in den Außentiefs. Dieser Spezialfall wird ausführlich von RINGER und BEDNARCZYK in diesem Heft behandelt. In den Abbildungen 4.3, 4.4 u. 4.5 sind deutlich die von den Ein- und Ausfahrten der nach Baltrum verkehrenden Fähre erzeugten Schwebstoffspitzen – gekennzeichnet mit „F“ – zu erkennen. Diese Sedimentumlagerungen infolge von Schiffsverkehr können sich sowohl positiv – im Sinne der Erhaltung einer Außentiefgrube – als auch sehr negativ auswirken. Negativ wirken sie sich vorwiegend im hafennahen Bereich aus, da sich hier insbesondere die bei Flutstrom mitgebrachten Schwebstoffe wegen der geringen natürlichen Tideströmung absetzen und nicht wieder heraus transportiert werden. Z. B. war nach dem eineinhalb Monate andauernden Aussetzen des Spülbetriebs im Hafengebiet eine derartige hohe Verlandung zu verzeichnen, daß diese Ablagerungen nicht mehr durch natürlichen Sedimenttransport zu erklären waren. Verursacher war hier – und das belegen die Messungen eindeutig – die für das Außentief an sich zu große Fähre, die den Tidestrom – wenn auch nur kurzfristig – mit Schwebstoffen sehr stark anreichert.

Nachteilig wirkt es sich dabei auch aus, daß die Fähre während der Flut so früh wie möglich bei gerade ausreichendem Wasserstand einfährt und damit hinsichtlich der Sedimentumlagerung besonders wirksam ist, während bei der Fahrt nach Tidehochwasser die Abfahrtszeit stets sicherer bei höherem Wasserstand kalkuliert wird, da ein während der Ebbe festkommendes Schiff nicht vor der nächsten Flut wieder frei kommt.

5. Veränderungen der Außentiefquerschnitte

5.1 Vermessungen

Das Neßmersieler Außentief wird – wie auch die anderen Außentiefs im Amtsbereich des Bauamtes für Küstenschutz – seit 1973 regelmäßig durch Peilungen mit dem Flächenechogra-

phen des Meßschiffes „Memmert“ überwacht. Der Echograph registriert die Tiefe des Gewässerbettes in zehn Sohlen-Längsschnitten mit einem jeweiligen seitlichen Abstand von 2 m, so daß das Gewässer in einer Peilfahrt auf insgesamt 20 m Breite kontinuierlich erfaßt wird. Die 100-KHZ-Echolote sind am Schiffsrumpf sowie an zwei seitlichen, je 8 m langen Auslegern befestigt. Mit Hilfe der Flächenpeilungen werden Vorflut u. Schiffbarkeit der Außentiefs beurteilt sowie ggf. Baggerungen überwacht.

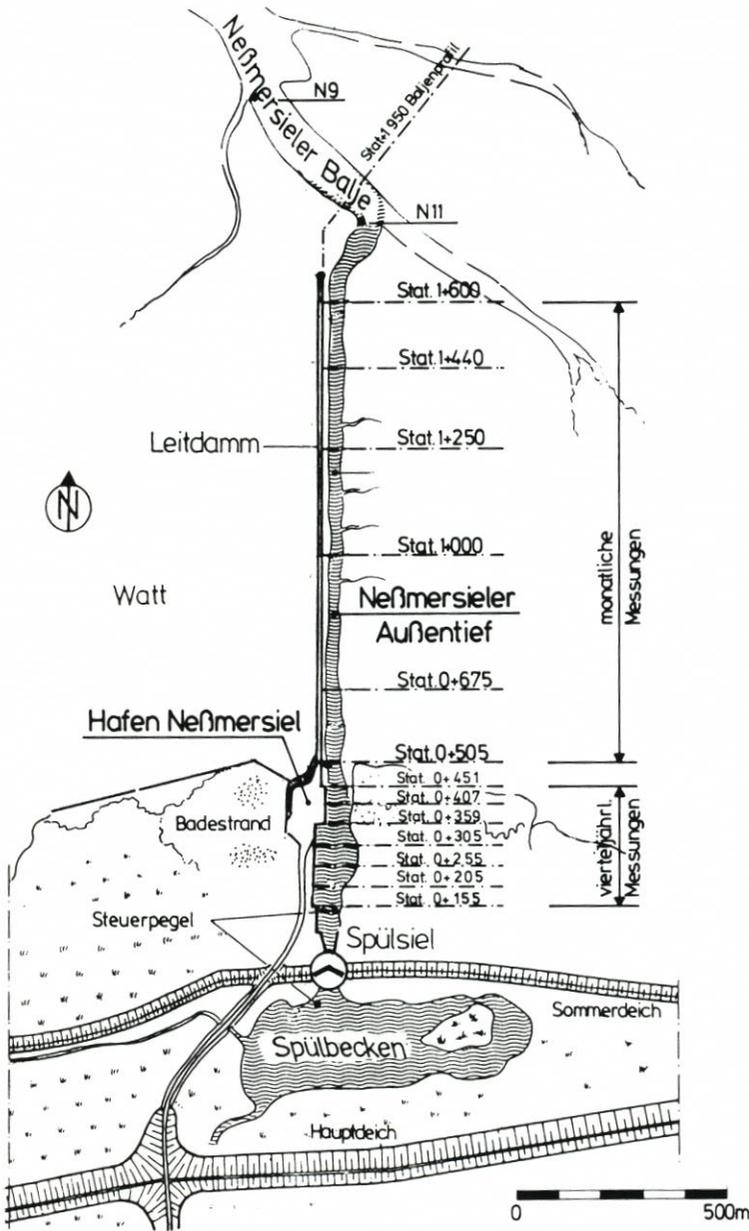


Abb. 5.1. Übersicht der regelmäßig vermessenen Außentiefprofile

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Neßmersieler Außentief zusätzlich in festgelegten Profilen nach Möglichkeit monatlich nivelliert (Abb. 5.1), um kurzfristige Veränderungen der Querschnitte mit Übergangsbereich zum Watt untersuchen zu können. In den Profilen wird alle 2 m ein Punkt gemessen. Im übrigen liefern die Nivellements genauere Werte (s. 6.3), während die Echolottiefen nur auf etwa ± 1 dm genau zu erfassen sind. Wegen des Meßzeitaufwands und der Tideabhängigkeit müssen die Nivellements auf die sechs ausgewählten Profile von Stat. 0 + 505 bis 1 + 600 beschränkt werden. Die übrigen Profile werden zwei bis dreimal pro Jahr aufgenommen.

5.2 Veränderungen von Außentiefsohle und -querschnitten

Die Auswirkung der gesteuerten Spülströme auf die Querschnittsform des Außentiefs ist in Abb. 5.2 schematisch dargestellt. Die Querschnittsform läßt sich durch ein Trapez angleichen. Auf der Westseite des Querschnitts liegt der Leitdamm, und nach Osten, in der Abbildung rechts, schließt sich das Watt des Einzugsgebietes an.

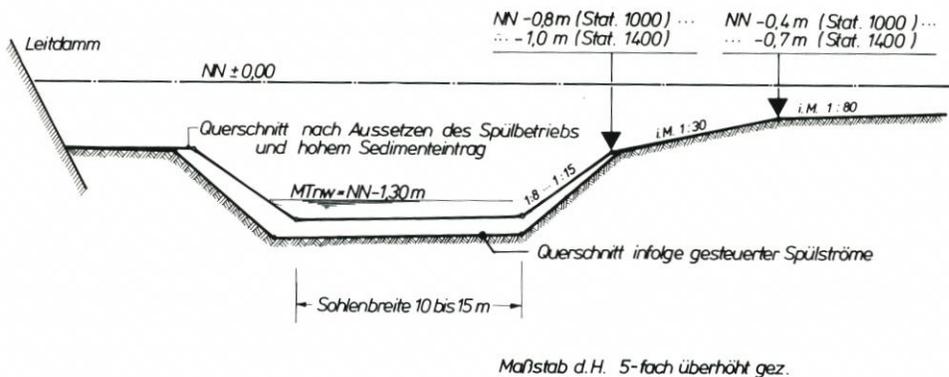


Abb. 5.2. Formparameter des Neßmersieler Außentiefs

Zunächst soll auf die Veränderung der Parameter entlang der Außentiefachse hingewiesen werden: Die Breite der Sohle nimmt mit der Entfernung zum Siel zu. Die seitlich anschließende Neigung des Trapezquerschnitts beträgt etwa 1:8 bis 1:15. Sie wird nach außen zunehmend flacher. Der anschließende Übergangsbereich zum Watt ist 1:30 bzw. 1:80 im Anschluß an das Watt geneigt. Die Böschungsknickpunkte liegen mit zunehmender Entfernung zum Siel – angepaßt an die Wattlage – niedriger. Die Außentiefquerschnitte werden offensichtlich – neben anderen Einflußfaktoren – durch die Füll- und Entleerungsvorgänge ihrer Wateinzugsgebiete beeinflusst. Sie werden mit zunehmender Entfernung vom Siel größer (Abb. 5.4, Tab. 1 in Abschn. B 2.1). Die gesteuerten Spülströme wirken sich so aus, daß sie die Sohle vertiefen und verbreitern und den unteren Bereich der Böschung steiler werden lassen. Nach Aussetzen des Spülbetriebs und dem Sedimentieren von Schwebstoffen wird der Querschnitt insgesamt wieder flacher. Diese Veränderungen der Formparameter sind besonders ausgeprägt im hafennahen Bereich, da hier die Auswirkung der gesteuerten Spülströme im Vergleich zu den natürlichen Einflußparametern größer ist.

Die langfristige Veränderung des Außentiefs läßt sich anhand der Sohlenlage darstellen, die aus den Flächenpeilungen bzw. den vorhandenen Nivellements ausgewertet worden sind. Die Höhenlage der Sohle wird aus den fünf niedrigsten Meßpunkten der Querschnitte auf 10

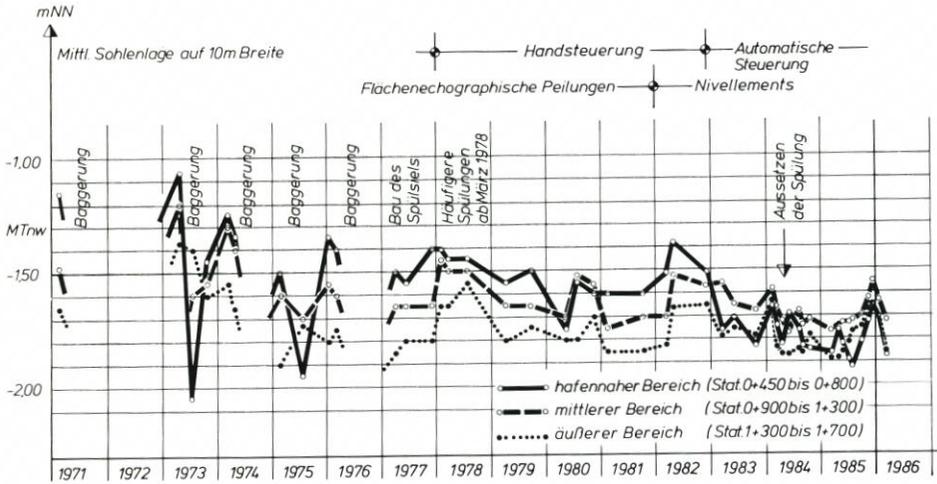


Abb. 5.3. Langfristige Entwicklung der Außentiefen

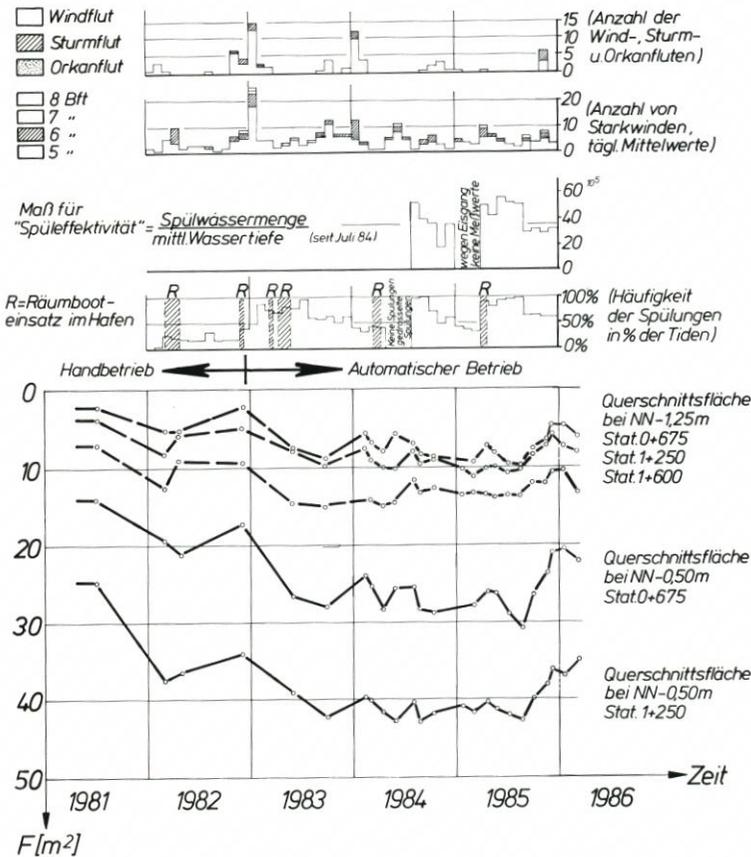


Abb. 5.4. Entwicklung der Außentiefenquerschnittsflächen

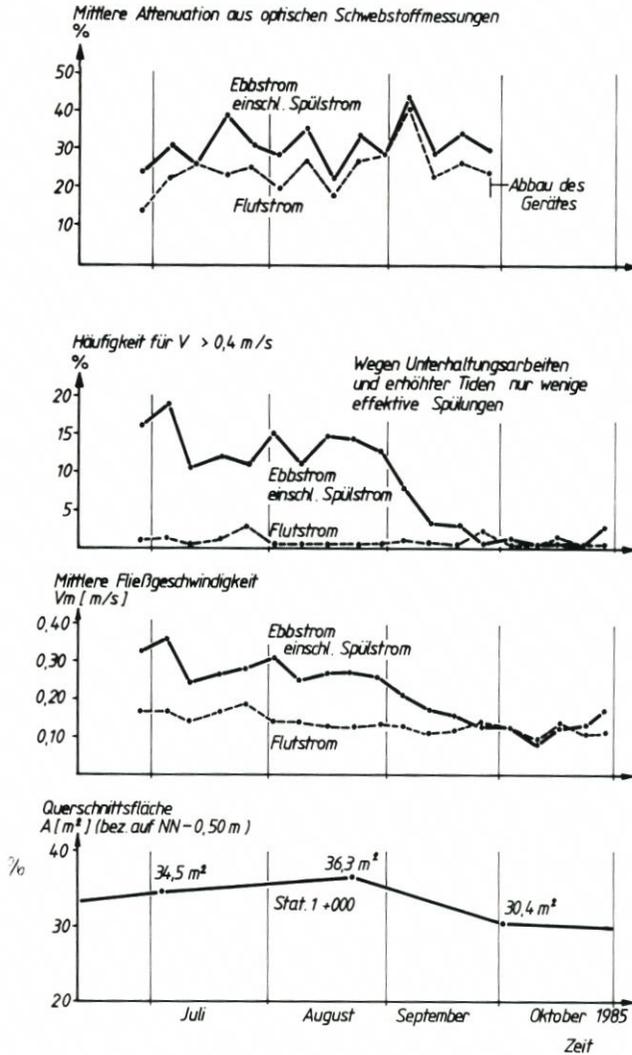


Abb. 5.5. Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung

m Gesamtbreite bestimmt. In Abb. 5.3 sind die mittleren Sohlenlagen für die Querschnitte im hafennahen (Stat. 0 + 450 bis 0 + 800), mittleren (Stat. 0 + 900 bis 1 + 300) und äußeren Bereich (Stat. 1 + 300 bis 1 + 700) des Neßmersieler Außentiefs jeweils zusammengefaßt und deren Entwicklung seit 1971 ablesbar.

Nach Einbau der automatischen Steuerung ist der hafennahe Außentiefbereich mit seinen engeren Durchflußquerschnitten stärker an der Sohle ausgeräumt worden. Im einzelnen ist die aus den Nivellements berechnete Entwicklung der Außentiefquerschnitte seit 1981 auf Abb. 5.4 dargestellt.

Die auf die gewählten Bezugshorizonte NN - 1,25 m (entsprechend etwa dem MTnw) und NN - 0,5 m bezogenen Querschnittsflächen zeigen tendenziell eine ähnliche Veränderung wie die Sohlentiefe. Seitdem die Spülströme aus dem Siel automatisch gesteuert werden, haben die Durchflußquerschnitte auf gesamter Außentiefänge - also auch im äußeren Bereich

– zugenommen. Während die zu- und abfließenden Tidevolumina mit der Entfernung zum Siel zunehmen und sich entsprechend querschnittsvergrößernd auswirken, hat die durch die Geometrie des Siels und des Spülbeckens vorgegebene Spülwassermenge eine für alle Querschnitte in etwa gleiche Querschnittsvergrößerung zur Folge.

Im Jahre 1985 hat die Ausräumung der Querschnitte durch gesteuerte Spülströme offensichtlich ihren Scheitelpunkt erreicht. Zu erkennen ist auch, daß künstlich vertiefte Querschnitte empfindlich auf hohen Sedimenteintrag reagieren. Abb. 5.4 zeigt, daß die Querschnitte nach einer größeren Anzahl von Starkwinden ab Windstärke 6 kurzfristig abnehmen. Dies gilt vor allem für den hafennahen (z. B. Stat. 0 + 675) und den mittleren Bereich (z. B. 1 + 250) des Außentiefs. Wenn darüber hinaus die Spüleffektivität infolge erhöhter Tideniedrigwasserstände gering ist und nur eine geringere Sedimentausräumung bewirkt oder der Spülbetrieb aus anderen Gründen unterbrochen wird, hält die Querschnittsabnahme längere Zeit an, wie insbesondere ab Ende August 1985 festzustellen ist.

Der äußere Abschnitt des Außentiefs (z. B. in Stat. 1 + 600) reagiert nicht so empfindlich auf höheren Schwebstoffeintrag bei Starkwindlagen, da offensichtlich die Sedimente infolge höherer natürlicher Tideströmungen nicht zur Ablagerung kommen. Die Entwicklung zeigt allerdings Mitte des Jahres 1984 und ab Oktober 1985 eine Querschnittsabnahme, die auf die Unterbrechungen des Spülbetriebs zurückzuführen ist und in folgendem Abschnitt 5.3 näher erläutert wird. Nach regelmäßigem Spülbetrieb sind die eingetriebenen Sedimente bis Anfang März 1986 zumindest an der Sohle wieder ausgeräumt worden.

5.3 Querschnittsentwicklung in Abhängigkeit von Schwebstoffeintrag und Spülströmung

In Abb. 5.5 ist ein Auszug der Querschnittsentwicklung an Meßstelle II (Stat. 1 + 000) vom Juni bis Oktober 1986 dargestellt. Zeitgleich dazu sind aufgetragen die wöchentlichen Mittelwerte der Flut- und Ebb- einschl. Spülstromgeschwindigkeit sowie die Überschreitungshäufigkeit für die Grenzgeschwindigkeit 0,4 m/s und die mittlere Attenuation aus optischen Schwebstoffmessungen. In den Monaten Juni bis August 85 mit Querschnittszunahme wird die Grenzgeschwindigkeit von 0,4 m/s während des Spülens 10 bis 15 % des gesamten Meßzeitraums, d. h. in 1,3 bis 1,9 Std. einer Tide, überschritten. Die mittlere steuerungsbeeinflusste Ebbströmung überschreitet 0,25 m/s. Im September nimmt die Häufigkeit der Spülgeschwindigkeiten $\geq 0,4$ m/s bis auf nahezu 0 ab. Die Auftragung der Strömungswerte zeigt, daß in den Monaten September bis Oktober wegen erforderlicher Unterhaltungsarbeiten am Tosbecken und wegen erhöhter Tideniedrigwasser nur wenige effektive Spülungen durchgeführt werden konnten. Außerdem weisen die optischen Schwebstoffmessungen Anfang November hohe Schwebstoffgehalte im Seewasser infolge von Seegangseinfluß nach. Die Schwebstoffe sedimentieren in dem künstlich vertieften Außentief und werden infolge geringer Spülstromgeschwindigkeit nicht wieder erodiert. Infolgedessen nimmt die Querschnittsfläche innerhalb NN – 0,5 m an der Meßstelle II von 36,3 m² auf 30,4 m² Anfang Oktober ab.

Mit diesen Dauermessungen konnte nachgewiesen werden, daß der durch Spülung vergrößerte Querschnitt nur offengehalten werden kann durch jeweils mindestens 1,5 bis 2,0 Std. dauernde Spülströme mit hoher Fließgeschwindigkeit von wesentlich mehr als 0,4 m/s.

6. Sedimentation im Spülbecken

6.1 Schwebstoffmessung im Spülsiel

Für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Spülsiel und -becken zur Außentiefräumung ist die Kenntnis des Schlickfalls im Spülbecken eine wichtige Grundlage.

Tideoffene Bodenentnahmestellen im Watt sind häufig bereits nach drei bis sieben Jahren völlig verlandet. Z. B. war die im Jahr 1979 im östlichen Neßmer Watt gebaggerte Sandentnahmestelle für den Hauptdeichbau im Jahre 1985 – also sechs Jahre später – bis auf ein kleines Restvolumen zum ursprünglichen Wattniveau wieder verfüllt.

Da das Spülbecken durch einen Sommerdeich vom Watt getrennt ist und nur während der schwebstoffärmsten Tidephase (Abschn. A 2.2) gefüllt wird, ist dessen Verlandungszeit erheblich länger. Die Messungen im Außentief haben bestätigt, daß die dem Spülbecken zufließenden Wassermengen keinen wesentlichen Einfluß auf die Fließgeschwindigkeit oder den Schwebstoffgehalt im Außentief (Abb. 6.2) haben.

Um den Schwebstoffgehalt im Spülsiel mit den gemessenen Werten im Außentief vergleichen zu können, wurden im Oktober bis Dezember 1985 am Einlauf des Spülsiels optische Schwebstoffmessungen durchgeführt.

Außerdem wurden aus dem Spülbecken während des Füllens Wasserproben entnommen, die darauf hinweisen, daß bei Normal-Wetterlagen tatsächlich nur Wasser mit geringem Schwebstoffgehalt (Meßwerte ≤ 10 mg/l) in das Spülbecken gelangt (ARLT, 1986).

Die optischen Dauermessungen am Spülsiel zeigen, daß die Attenuation (Trübe) häufig kurz vor der Tidehochwasserzeit zunimmt.

Die Fließgeschwindigkeit im Hafenbecken und in dem Bereich zwischen Hafen und Siel ist relativ gering und überschreitet auch beim Füllen nicht den Wert von i. M. 0,15 m/s, so daß eine wesentliche Schwebstoffanreicherung infolge von Füllbetrieb nicht anzunehmen ist. Die

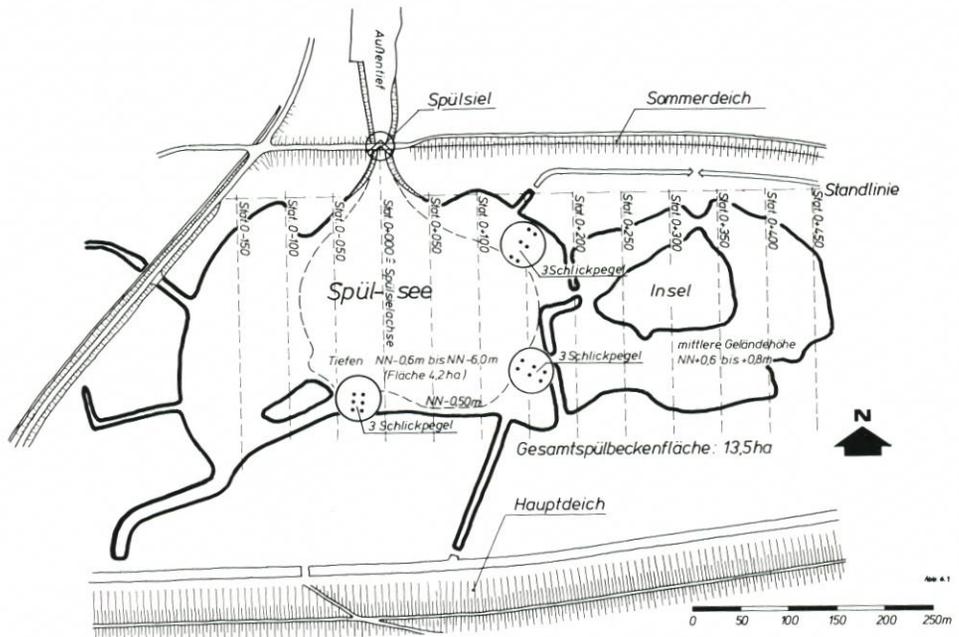


Abb. 6.1. Übersicht des Spülbeckens mit Lage der Schlickpegel und Meßprofile

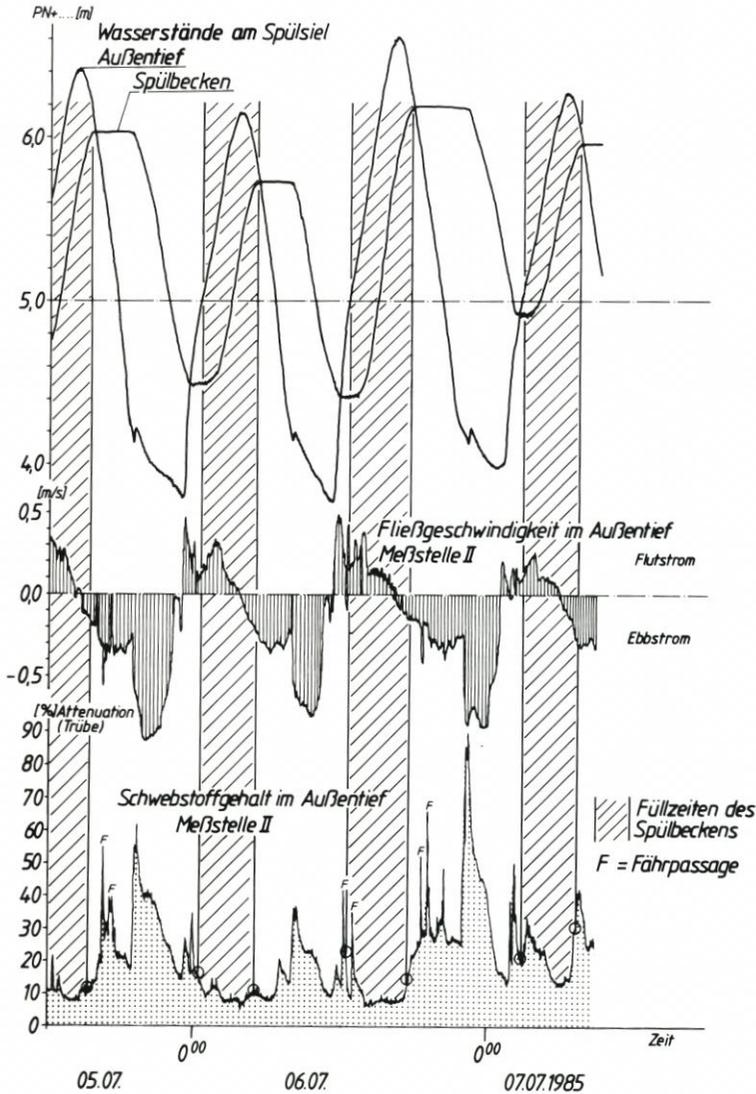


Abb. 6.2. Dauermessungen der Wasserstände, Fließgeschwindigkeit und Schwebstoffgehalte

leicht erhöhten Schwebstoffgehalte am Siel sind häufig nach Anlege- und Wendemanövern der Fähre im Hafenbecken festzustellen. Offensichtlich bleiben die aufgewirbelten feinen Kornfraktionen noch sehr lange in Schwebelage und werden in Richtung Siel transportiert.

Die Untersuchung von Sedimentproben an der Sohle des Außentiefs hat ergeben (ARLT, 1986), daß der Feinsandanteil im Wendekreisbereich der Fähre relativ hoch ist und in Richtung Siel abnimmt. Auch diese Untersuchung deutet darauf hin, daß sich der Feinsandanteil aus den aufgewirbelten Sedimenten der Fährschiffmanöver sehr schnell wieder absetzt, während die feineren Kornfraktionen von der relativ geringen Strömung weitertransportiert werden.

Im übrigen sind die am Spülsiel gemessenen Schwebstoffgehalte abhängig von den

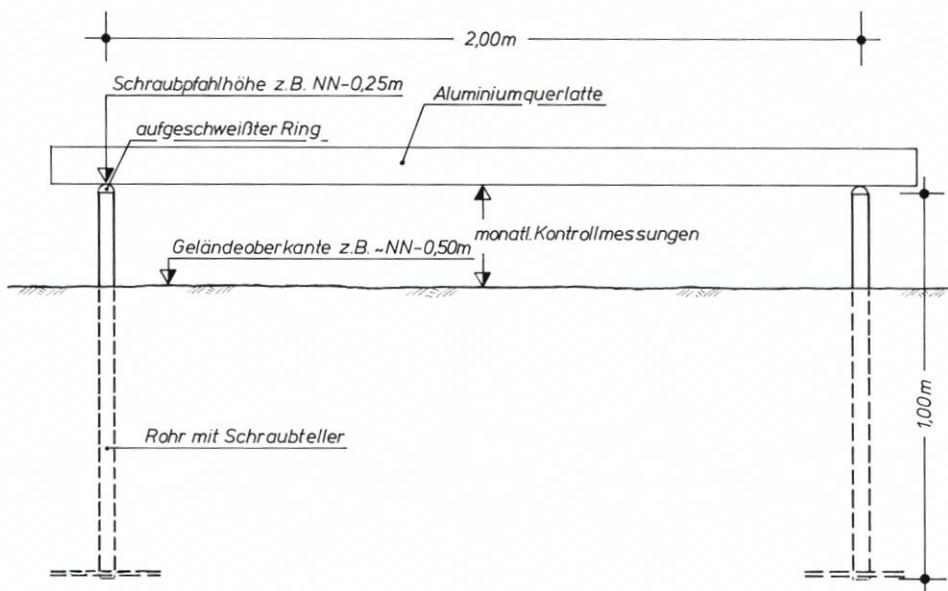


Abb. 6.3. Darstellung eines Schlickpegels

Witterungsbedingungen (s. auch Abschn. 4.3) und weisen stark unterschiedliche Werte auf, so daß sich die Spülbeckenverlandung aufgrund von nur drei Monate andauernden Schwebstoffmessungen nicht ermitteln läßt, zumal die Mengenabschätzungen aus optischen Meßwerten mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Zusammenhänge sollen jedoch noch weiter untersucht werden.

6.2 Schlickpegelmessungen

Zur Überwachung der Spülbeckenverlandung werden regelmäßig Schlickpegelablesungen sowie Nivellements und Peilungen in festgelegten Profilen durchgeführt. Im folgenden soll zunächst über die Schlickpegel berichtet werden, die an drei trockenfallenden Bereichen des Spülbeckens jeweils in drei verschiedenen Höhenlagen aufgestellt worden sind (Abb. 6.1).

Die Schlickpegel bestehen aus zwei in den Boden eingedrehten Schraubpfählen mit einem horizontalen Teller von ca. 30 cm Durchmesser, die 2 m auseinander stehen (Abb. 6.3). Auf der Oberkante der gleich hoch aufragenden Pfähle wird beim Messen des Geländeniveaus eine Aluminiumlatte gelegt. Der Abstand zwischen der Unterseite dieser Latte und der Geländeoberkante wird im monatlichen Zeitabstand mit Millimeter-Genauigkeit gemessen. Zwei Pegel werden seit 1981 und die übrigen seit 1984 beobachtet.

Aus den Einzelmessungen ergeben sich aufgrund unterschiedlicher örtlicher Einflüsse z.T. wechselnde Auf- und Abträge. An den drei südwestlichen Schlickpegeln (Abb. 6.1) wurden bisher überwiegend Abträge gemessen, woraus zu schließen ist, daß in dem künstlich angelegten Becken noch Umlagerungen stattfinden und höher gelegene Teilflächen infolge Seegang und Füllströmung erodieren und Material in tiefer gelegene Zonen abgeben. An den übrigen sechs Schlickpegeln wurde ein mittlerer Auftrag von etwa 6 mm/Jahr gemessen. Unterschiede zwischen den in den Höhenlagen $NN + 0,5$ m, $NN \pm 0$ u. $NN - 0,5$ m angelegten Pegeln lassen sich noch nicht nachweisen. Der Meßzeitraum ist noch zu kurz, um gesicherte Aussagen machen zu können. Die Einzelergebnisse der Schlickpegelmessungen werden im Schlußbericht erläutert.

6.3 Ergebnisse aus Nivellements und Peilungen

Die Spülbeckenfläche wird in parallelen Profilen mit jeweils 50 m Abstand nivelliert und in der nicht trockenfallenden Fläche gepeilt (Abb. 6.1). Die Profile sind vor Ort durch Festpunkte markiert. In den Profilen wird in der Regel alle 5 m ein Punkt gemessen. Die Nivellier- bzw. Peillatte ist mit einem Teller von \varnothing 30 cm als Aufsetzfläche versehen, damit sie nicht in den weichen Schlick einsinken kann.

Auf den höher gelegenen Flächen des Ostteils des Spülbeckens (NN + 0,6 m) wurden bisher keine Geländeänderungen gemessen, die das Maß der Meßgenauigkeit von ± 1 cm überschreiten. Wesentliche Geländeänderungen sind nur auf den tiefer gelegenen Flächen des Spülbeckens festzustellen. Offensichtlich sammeln sich hier die in den See eingetragenen feinen Schwebstoffe. Die Untersuchung der entnommenen Spülbecken-Sedimentproben ergibt sehr geringe Medianwerte der Korngrößen von 0,007 mm an den tiefsten Stellen des Sees bis 0,076 mm in den Randbereichen (ARLT, 1986). Die für die Korngrößenbestimmung angewendete „CILAS-Laser-Granulometer-Methode“ erfordert eine Vorbehandlung des Probenmaterials, wodurch organische Bestandteile zerstört werden und chemische und biologische Bindungen verlorengehen.

Zur Ermittlung eines Verlandungstrends werden die gemessenen Querschnittsflächen aus den vier Profilen des tieferen, nicht trockenfallenden Seebereichs zu einem Mittelwert zusammengefaßt und Regressionsgeraden für die Querschnittsentwicklung, bezogen auf die Bezugshorizonte NN + 1,0 m und NN - 0,6 m, berechnet. Die gemessenen mittleren Querschnittsflächen mit den berechneten Regressionsgeraden sind auf Abb. 6.4 dargestellt. Der Hauptverlandungsraum des Spülbeckens liegt unterhalb des Bezugshorizonts von etwa NN - 0,6 m. Erst nach Überschreiten dieses Verlandungshorizonts wird das vorhandene Spülvolumen wesentlich eingeschränkt. Aufgrund des bisher festzustellenden Verlandungstrends wird diese Grenze in etwa 25 Jahren nach dem Bezugsjahr 1982 erreicht (Abb. 6.4).

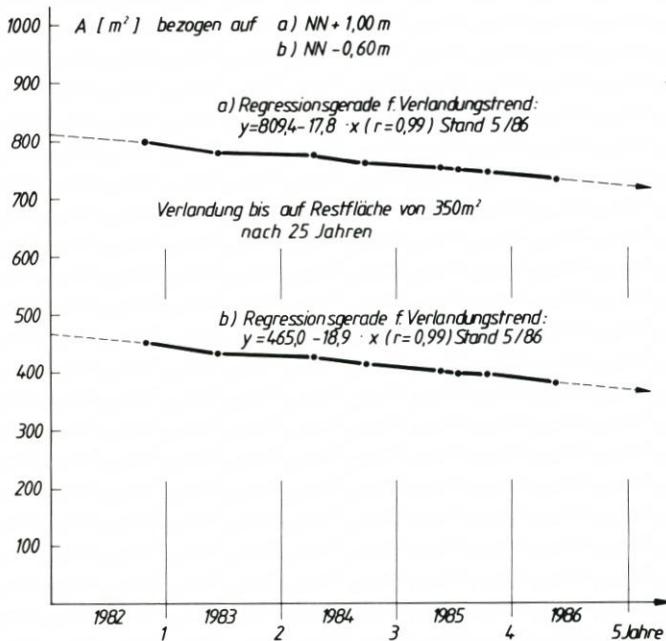


Abb. 6.4. Verlandungstrend des Spülbeckens

Bezogen auf eine Breite des verlandenden tieferen Spülbeckenbereiches von etwa 150 m, beträgt das mittlere jährliche Verlandungsvolumen 2650 m^3 . Mit der mittleren jährlichen in das Spülbecken eingelassenen Wassermenge von rd. 36 Mio. m^3 ergibt sich für die abgesetzten Feststoffe eine Raumkonzentration von etwa $0,0000736 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Nimmt man weiterhin an, daß das Raumgewicht des durch die Handpeilung aufgemessenen, stark wasserhaltigen Schlicks etwa mit $1,5 \text{ t/m}^3$ angesetzt werden kann, so beträgt die mittlere Feststoffkonzentration der in das Spülbecken eingelassenen Wassermengen 110 mg/l .

Aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes von drei Jahren und der getroffenen Annahmen über den Verlandungsbereich stellt die angegebene Feststoffkonzentration nur eine grobe Schätzung dar. Sie ist im übrigen stark abhängig von den Witterungsbedingungen und unterliegt nicht unerheblichen jahreszeitlichen Schwankungen. Einen wesentlichen Einfluß auf die Spülbeckenverlandung haben sicher auch die aus Naturschutzgründen im Winter durchzuführenden Polderflutungen. Der Schlickfall im Spülbecken wird weiterhin durch Peilungen genau verfolgt.

7. Ausblick

Das Ergebnis der bisherigen Untersuchungen zeigt, daß Außentiefquerschnitte durch gesteuerte Spülströme vertieft und verbreitert werden können.

Für die Dimensionierung des Spülbeckens und Spülsiels sowie für die optimale Steuerung der Anlagen sollen als Ergebnis der bisherigen Untersuchungen und der z. Z. noch laufenden Messungen Empfehlungen erarbeitet werden, die mit dem Schlußbericht vorgelegt werden. Darüber hinaus wird der Einsatz und die Wirksamkeit eines Stromräumbootes bei abgestuft gesteuerten Spülströmen untersucht.

Überbreite Querschnitte, die aus Gründen des Schiffsverkehrs z. B. in Häfen benötigt werden, sind durch zusätzlichen Räumbooteinsatz vom Schlick zu räumen. In Neßmersiel z. B. ist einmal pro Jahr ein etwa 14tägiger Räumbooteinsatz im Hafenbereich ausreichend, wenn in der übrigen Zeit durch Spülung der Verschlickung entgegengewirkt wird. Außentiefs ohne Spülanlage werden bevorzugt durch Räumbooteinsatz unterhalten.

Ziel dieser weiteren, z. Z. laufenden Untersuchungen soll sein, die Auswirkung von Räumfahrzeugen auf den Schwebstofftransport in Außentiefs und das Transportverhalten des Tidestroms zu untersuchen. Insbesondere soll der Sättigungsschwebstoffgehalt in Abhängigkeit von der Transportgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Grundlagen über den äußerst komplexen Problemkreis des hydraulischen Feststofftransports im Tidegebiet können ausschließlich Naturmessungen liefern, so wie sie im Neßmersieler Außentief durchgeführt werden.

8. Schriftenverzeichnis

- ARLT, S.: Die Auswirkung des Spülbetriebs und der Einfluß des Fährverkehrs auf das Sedimentationsgeschehen im Neßmersieler Außentief. Geol.-Pal. Institut der Universität Kiel, unveröffentlichter Zwischenbericht einer Diplomarbeit, März 1986.
- BAUAMT FÜR KÜSTENSCHUTZ NORDEN: Forschungsvorhaben „Tiefenstabilisierung von Außentiefs (AT-S)“. Jahresberichte 1983, 1984, 1985.
- BLANKENSTEIN, H., BRANDT, G. u. NIEMEYER, H. D.: Strommessungen im Bereich des Neßmer Außentiefs. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft – Forschungsstelle Küste – Jahresbericht 1984.
- COLDEWEY, H. G.: Sielzugberechnung unter Berücksichtigung von Außentiefverlusten. Wasser und Boden, H. 10, 1979.

- DIEKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitt. des Franz.-Inst., Univ. Hannover, H. 60, 1985.
- DVWK: Regeln zur Wasserwirtschaft – Schwebstoffmessungen. Gelbdruck, 1984.
- ERCHINGER, H. F.: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Abschn. Küsteningenieurwesen. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 6. Aufl., 1982.
- ERCHINGER, H. F.: Außentiefräumung durch vollautomatisches Spülsiel in Neßmersiel – Spülbekken als Vogelrast- und -brutgebiet. Wasser und Boden, H. 8, 1984.
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, H. 3, 1983.
- LÜDERS, K. u. LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon. Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
- MANZENRIEDER, H.: Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs. Mitt. des Leichtweiß-Inst., TU Braunschweig, H. 77, 1983.
- MEERESTECHNIK-ELEKTRONIK GmbH: Steuergerät Sedimentmessungen, 1983 – unveröffentlicht.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- Nds. WASSERWIRTSCHAFTSVERWALTUNG: Jahresbericht. Wasser und Boden, H. 7/8, 1958.
- NORDDEUTSCHE SEEKABELWERKE AG: „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“ – Meßkette Neßmersiel – 1982 – unveröffentlicht.
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, H. 42, 1985.
- RAUDKIVI, A. J.: Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer-Verlag, 1982.
- REINEMANN, L., SCHEMMER, H. u. TIPPNER, M.: Trübungsmessungen zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts. DGM 26, H. 6, 1982.
- RENGER, E.: Zweidimensionale Stabilitätsanalysen von Tidebecken und Watteinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, H. 34, 1979.
- RENGER, E.: Dauermessungen des suspendierten Feststoffgehalts im Tidegebiet mit Hilfe von Durchlaufzentrifugen. Intermaritec 82, Bericht 418.
- RENGER, E. u. BEDNARCZYK, K.: Schifffahrtserzeugte Schwebstofftransporte im Neßmersieler Außentief. Die Küste, H. 44, 1986.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979–1981. Die Küste, H. 37, 1982.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1981–1983. Die Küste, H. 40, 1984.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI 1983–1986. Die Küste, H. 44, 1986.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. des Franzius-Instituts, TU Hannover, H. 34, 1970.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Windstauentwicklung im Küstengebiet der Deutschen Bucht. Wasser und Boden, H. 1, 1986.
- ZANKE, K.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, 1982.

Strömungsänderungen durch fahrende Schiffe im Neßmersieler Außentief

Von Ernst MÜLLER und Helmut BINEK

Zusammenfassung

Durch Bodendruckmessungen im Neßmersieler Außentief wurden mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung die Übergeschwindigkeiten neben fahrenden Schiffen ermittelt.

Die normierten Ergebnisse zeigen, daß die Größe der Schiffe, die Wassertiefe und somit das Querschnittsverhältnis „n“ den dominierenden Einfluß auf die Übergeschwindigkeiten besitzen.

Die größte mittlere Übergeschwindigkeit beträgt ca. 40 % der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser, die größte maximale Übergeschwindigkeit ca. 110 %, wobei in beiden Fällen das Querschnittsverhältnis $n = 3$ ist.

Als Endergebnis werden zwei Diagramme gegeben, in denen gemittelte (integrierte) Übergeschwindigkeiten $\frac{\Delta V_m}{V_w}$ und die Maximalwerte $\frac{\Delta V_{max}}{V_w}$ über dem Querschnittsverhältnis $n = \frac{A_{AT}}{A_M}$ aufgetragen worden sind.

Summary

The changes in flow on the side of running ships have been determined from pressure measurements on the bottom of the Neßmersieler Außentief with the aid of Bernoulli equation.

Dimensionless results show the dominating influence of the ship size, the waterdepth and consequently the ratio of cross-sectional areas „n“.

The highest mean backflow value amounts to 40 % of the ship's speed against water with absolute maximum values amounting to about 110 %, whereby the ratio of cross-sectional areas in both cases is $n = 3$.

In conclusion two diagrams are presented in which the integrated mean backflow and the maximum values of the backflow dependent on ratio of cross-sectional areas are plotted.

Inhalt

1. Einleitung	65
2. Aufgabenstellung	66
3. Vorarbeiten	66
4. Theoretische Überlegungen	66
5. Meßtechnik, Meßplatz	73
6. Versuchsdurchführung	76
7. Auswertung	80
8. Ergebnisse	80
9. Symbolverzeichnis	87
10. Schriftenverzeichnis	88

1. Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen, die zur Stabilisierung der Außentiefs an der deutschen Nordseeküste, d. h. gegen Versandung und Verschlickung, durchgeführt werden, sollten auf

Veranlassung des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) von der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD) Messungen durchgeführt werden, die den Einfluß der Schifffahrt auf den Sedimenttransport deutlich machen.

Die VBD-Untersuchungen sollten helfen, die komplexen Zusammenhänge zwischen Fahrwasserquerschnitt, Schiffstiefgang, Fahrgeschwindigkeit, Rückstromgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkungen, die für den Transport von Sohlenmaterial mitbestimmend sind, zu klären.

Während einer Vorbesprechung am 17. 5. 1982 im Bauamt für Küstenschutz, Norden, wurden zwischen den beteiligten Stellen

- dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein, Kiel,
- dem Bauamt für Küstenschutz, Norden,
- und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg,

die Aufgaben besprochen und festgelegt.

2. Aufgabenstellung

Für die Versuchsanstalt ergab sich folgende Aufgabe:

Messung und Quantifizierung der durch Motorschifffahrt verursachten hydrodynamischen Komponenten unter verschiedenartigen Parameterkombinationen wie Schiffgröße, Fahrtrichtung, Fahrtgeschwindigkeit, Tideverhältnisse, Schwebstoffkonzentrationen.

3. Vorarbeiten

Zur Bestimmung eines geeigneten Meßplatzes fand am 17. 5. 1982 eine Ortsbesichtigung am Neßmersieler Außentief statt. Dabei konnten die geographischen Verhältnisse bei verschiedenen Wasserständen in Augenschein genommen (Abb. 1a-c) und die geeigneten Querschnitte für die Messungen festgelegt werden (Abb. 2).

In der Zeit vom 23.-27. 8. 1982 sind Vorversuche zur Erprobung der Meßtechnik durchgeführt worden.

Die VBD hat während dieser Vorversuche Druckänderungen am Boden der Fahrrinne des Außentiefs gemessen, während einige Schiffe durch den Meßquerschnitt fuhren. Der Meßgeber war ca. 500 m vom Hafenkopf und ca. 18 m seitlich vom Leitdamm entfernt installiert worden (s. Abb. 2). Eine Anordnung des Gebers in Außentiefmitte (Längsachse) hätte bei Fahrt der Baltrumfähren bei extremem Niedrigwasser zu Beschädigungen des Druckgebers und der Bodenplatten der Fährschiffe führen können, was auf jeden Fall zu vermeiden war.

Bei den Vorversuchen konnten die Änderungen des Wasserdrucks durch die Fahrt von drei Schiffen unterschiedlicher Größe gemessen werden. Die Meßwerte wurden drahtlos mit Hilfe einer PCM-Anlage (Puls-Code-Modulation) vom Meßquerschnitt zu den instationären Empfangs- und Aufzeichnungsgeräten am Hafenkopf übertragen.

4. Theoretische Überlegungen

Jedes Hindernis in strömendem Wasser bzw. jedes fahrende Schiff in ruhigem Wasser verursacht im umgebenden Wasser eine Druckveränderung, die wiederum eine Geschwindig-



Abb. 1a-c

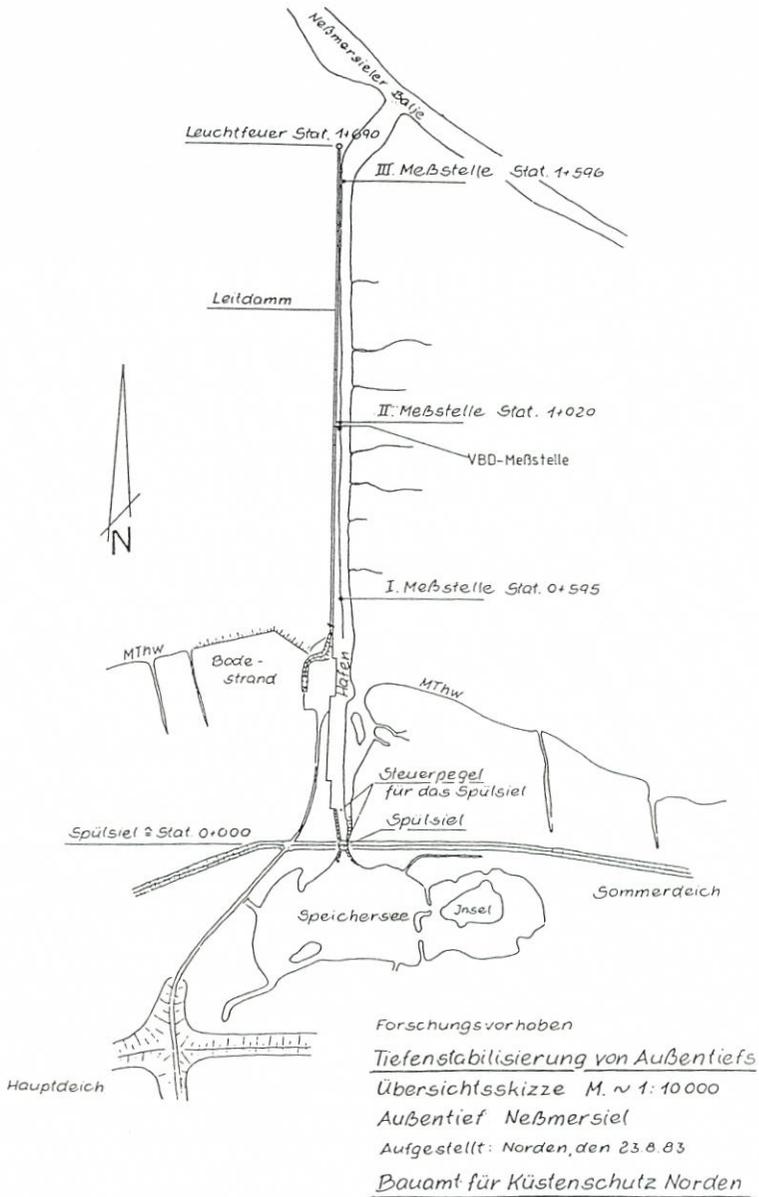
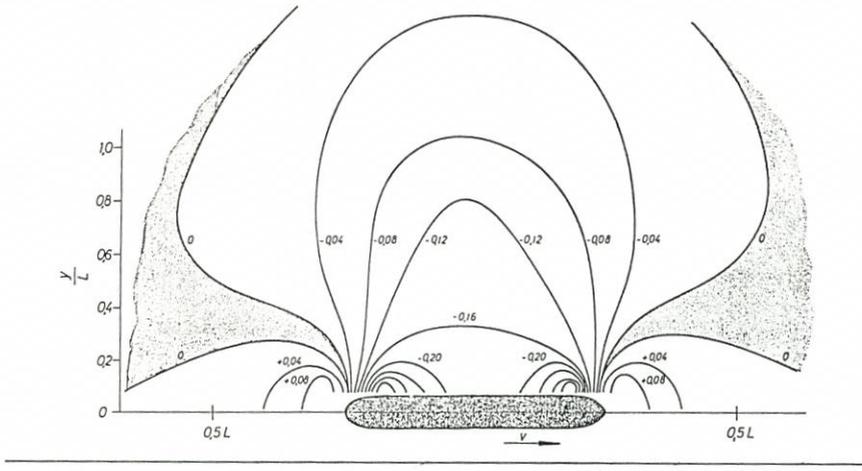


Abb. 2

keitsänderung der Wasserteilchen bedingt. An der Wasseroberfläche wird die Druckänderung als Verformung sichtbar, und zwar als lokale Störung, die mit dem Schiff mitläuft, und als freie oszillierende Oberflächenwellen, die hinter dem Schiff zurückbleiben (MÜLLER, 1966). Die lokale Verformung besteht aus Erhebungen an Bug und Heck, dem sog. Bug- und Heckstau, und einer Absenkung im Mittschiffsbereich, der sog. Mittschiffsmulde. Auf begrenzter Wassertiefe bildet sich diese lokale Verformung bereits bei geringen Fahrgeschwindigkeiten stark aus (s. Abb. 3). Durch die Mittschiffsmulde, die eine relativ große seitliche Ausdehnung besitzt, wird die Wassertiefe, und damit der Wasserquerschnitt, neben dem Schiff beträchtlich



Niveaulinien neben einem fahrenden Schiff Δh [m]

MS „Johann Welker“ ; L = 80,0 m ; B = 9,5 m ; T = 2,0 m ; V = 13 km/h = 7 kn

Abb. 3

verringert. Demzufolge muß nach der Kontinuitätsbedingung das Wasser in diesem Bereich mit vermehrter Geschwindigkeit am Schiff vorbeiströmen. Die hier bereits vorhandene, aus der Verdrängung des Schiffes resultierende Übergeschwindigkeit wird dadurch noch weiter vergrößert.

Im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser, z. B. in einem Kanal, ist die lokale Wasseroberflächenverformung deutlich verändert gegenüber unbeschränkter Fahrwasserbreite (MÜLLER, 1969). Die Mittschiffmulde weitet sich zu einer Seitenmulde aus, d. h., sie erstreckt sich neben dem Schiff über dessen gesamte Länge. Dabei ändert sich die Muldentiefe innerhalb eines Querschnitts zwischen Bordwand und Kanalwand nur unwesentlich (s. Abb. 4). Die Bug- und Heckstaugebiete werden flächenmäßig geringer, so daß sie nur schwierig aufzumessen sind.

MS „Johann Welker“ im Dortmund- Ems- Kanal

Tiefgang T = 2,0 m ; Wassertiefe h = 3,5 m ; Schiffsgeschw.: v = 9,0 km/h \cong 4,9 kn

$$n = \frac{A_{AT}}{A_M} = 5,7$$

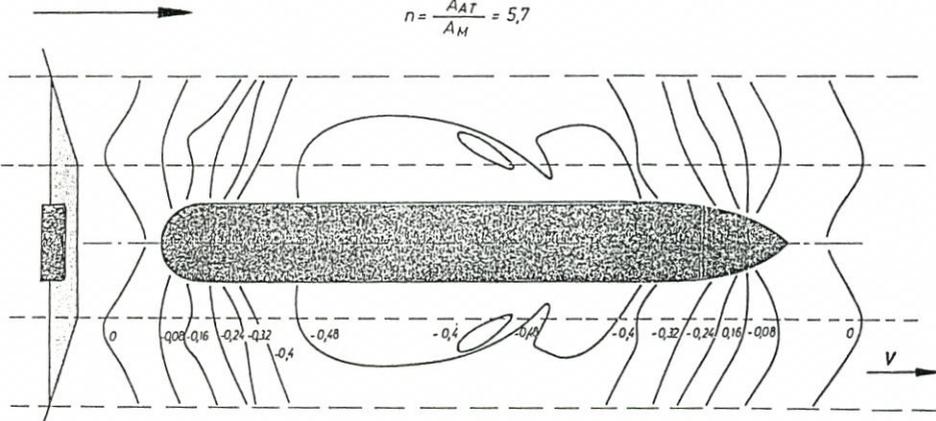


Abb. 4

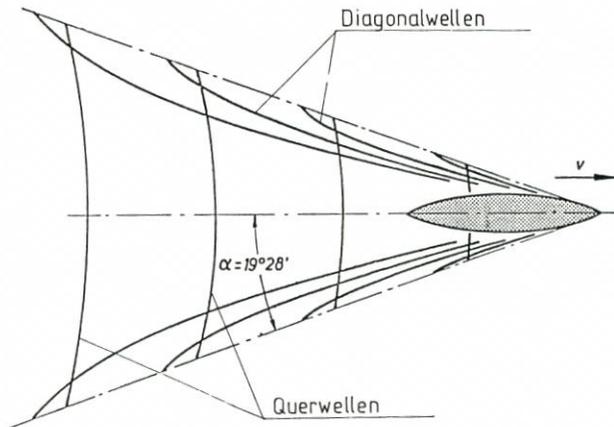


Abb. 5

Deutlich sichtbare, freie Oberflächenwellen (s. Abb. 5), die Einfluß auf die Druckverteilung am Schiffskörper nehmen, entstehen i. allg. erst bei Geschwindigkeiten, die FROUDESchen Längenzahlen

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} > 0,18 \quad (1)$$

entsprechen.

Bei geringer werdender Wassertiefe verändert sich das Wellenbild, was sich in Abhängigkeit von der FROUDESchen Tiefenzahl

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

darstellt. Im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich

$$F_{nh} < 1 \text{ bzw. } V < \sqrt{g \cdot h}$$

öffnet sich der Winkel der Diagonalwellen mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Länge der Querwellen wird immer größer, bis sie bei Erreichen der kritischen Zahl

$$F_{nh} = 1 \text{ (Stauwellengeschwindigkeit)}$$

gänzlich verschwunden sind. Der Winkel der Diagonalwellen hat sich dann von $\alpha = 19^\circ 28'$ auf $\alpha = 90^\circ$ geöffnet, d. h., die Wellenfront steht senkrecht zur Schiffslängsachse. Im überkritischen Geschwindigkeitsbereich schließt sich der Diagonalwinkel wieder. Bei etwa 2,5- bis 3facher Stauwellengeschwindigkeit ist der Kelvinwinkel wieder erreicht.

Die kommerzielle Schifffahrt fährt auf begrenzter Wassertiefe – vor allem im Kanal – im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich. Ausnahmen sind Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge wie Schnellboote, Gleitboote, Tragflügelboote etc.

Die Fahrwasserverhältnisse in einem Außentief sind mit denen in einem Kanal von unregelmäßigem Querschnitt zu vergleichen. Die Wasseroberflächenverformung und damit die Druck- und Geschwindigkeitsänderungen neben dem Schiff werden denen in einem Kanal gleichen. Bei Fahrgeschwindigkeiten, die erheblich unter der kritischen Geschwindigkeit liegen, kann der Strömungsverlauf neben dem Schiff hier in erster Näherung als eindimensional angenommen werden, d. h., merkliche Veränderungen der Geschwindigkeit finden nur in Längsrichtung statt:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = V_0 + u \equiv V_0 + \Delta V \neq 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = v \approx 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = w \approx 0 \quad (3)$$

mit Φ Geschwindigkeitspotential
 V_0 Anströmgeschwindigkeit einer Parallelströmung, Schiffsgeschwindigkeit
 $u \equiv \Delta V$, v , w Komponenten der Störgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit

Damit kann angenommen werden, daß die Bernoulligleichung

$$\rho/2 V_0^2 + \rho gh + p_0 = \rho/2 (V_0 + \Delta V)^2 + \rho g (h + \Delta h) + p_0 + \Delta p \quad (4)$$

im gesamten betrachteten Strömungsbereich Gültigkeit besitzt. Hierbei wird stationäre Strömung vorausgesetzt, d. h.

$$\frac{\partial (V_0 + u)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Die linke Seite der Gleichung (4) gibt die hydrodynamischen Verhältnisse in ungestörter Strömung wieder, die rechte Seite die in gestörter Strömung. Dabei bedeuten weiter

- g = Erdbeschleunigung
- h = Wassertiefe
- p_0 = konstanter Druck (Atmosphärendruck)
- ρ = spez. Masse, Dichte
- Δh = Wasseroberflächenverformung, Änderung der Ortshöhe
- Δp = Änderung der Druckhöhe

Setzt man in Gleichung (4) die Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegenüber Wasser V_w gleich der Anströmgeschwindigkeit V_0 , also

$$V_w = V_0 \quad (6)$$

und faßt die Wasseroberflächenverformung Δh , also die Änderung der geometrischen Höhe, und die Änderung der Druckhöhe Δp zusammen (eindimensionale Strömung) und betrachtet diese als Änderung des statischen Drucks

$$\Delta p_{\text{stat.}} = \rho g \Delta h + \Delta p, \quad (7)$$

so läßt sich Gleichung (4) umformen in

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\text{stat.}}}{\rho/2 V_w^2}} - 1 \quad (8)$$

Aus der Messung der statischen Druckänderung $\Delta p_{\text{stat.}}$ und der Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser

$$V_w = V_L \pm V_{\text{Str}} \equiv V_0 \quad (9)$$

- V_L = Geschwindigkeit des Schiffes gegenüber Land
- V_{Str} = Geschwindigkeit der Tideströmung

läßt sich somit die Übergeschwindigkeit, die das fahrende Schiff in Längsrichtung im umgebenden Wasser induziert, ermitteln.

Daß die Anwendung dieser Methode zur Ermittlung der Rückstromgeschwindigkeit eines in einem Kanal fahrenden Schiffes quantitativ zu erfreulich genauen Ergebnissen führt, ist von MÜLLER (1969) nachgewiesen worden.

$h = 3,5\text{ m}$ $v = 8,0\text{ km/h} \approx 4,3\text{ kn}$ $T = 2,5\text{ m}$
 Abstand der Meßstelle aus Kanalmitte = $6,5\text{ m}$

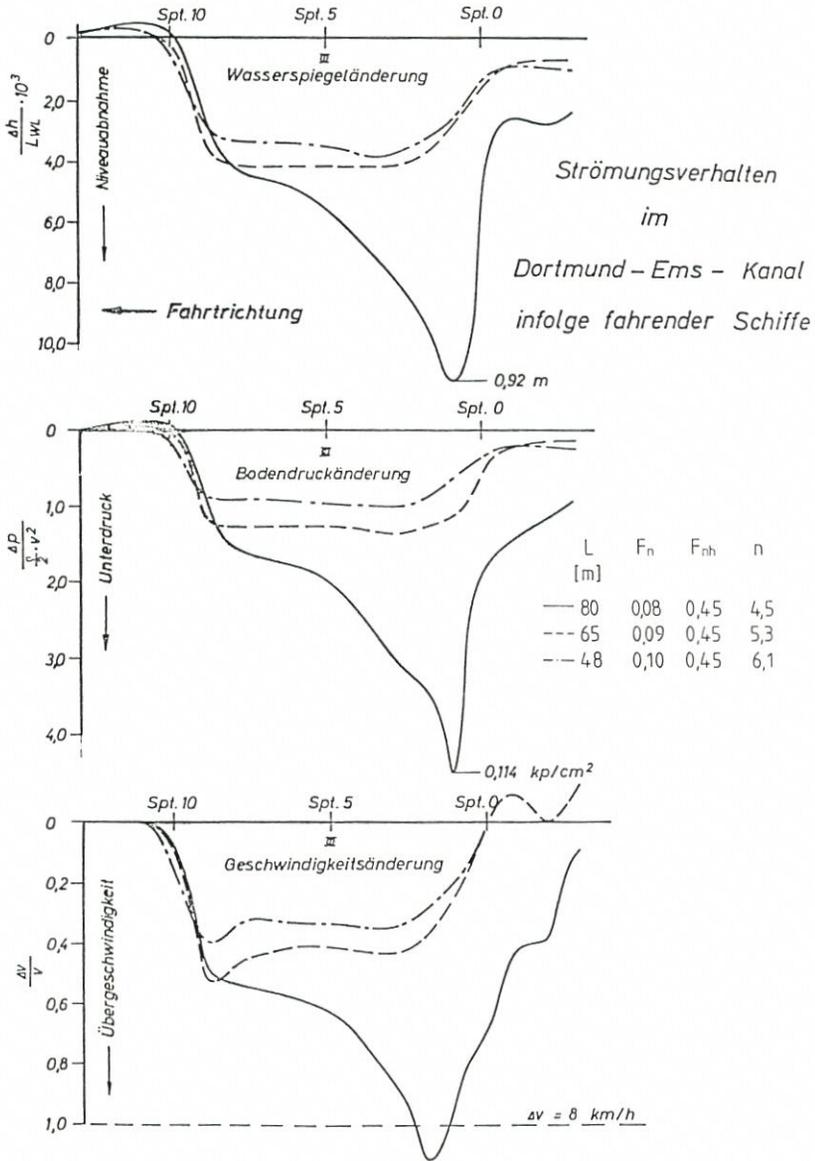


Abb. 6

In Abb. 6 werden die hydrodynamischen Veränderungen in unmittelbarer Nähe längs dreier unterschiedlicher Schiffe im Dortmund-Ems-Kanal gezeigt. Wassertiefe, Fahrge-
 schwindigkeit und Tiefgang waren konstant. Das Verhältnis von Kanalquerschnitt zu Schiffs-
 Hauptspantquerschnitt war jedoch unterschiedlich. Für die beiden kleineren Schiffe erge-
 ben sich über die gesamte Schiffslänge (Spant 10 \approx Vorsteven, Spant 0 \approx Achtersteven) jeweils
 annähernd gleichbleibende Werte, d. h., die Bernoulligleichung (4) ist in der dargelegten Form

gültig. Für das größere Schiff zeigt sich eine erhebliche Änderung. Im Hinterschiffsbereich bildet sich ein starkes, örtlich begrenztes Unterdruckgebiet aus, sichtbar durch eine tiefe Wasserspiegelabsenkung, die mit starken Übergeschwindigkeiten verbunden ist. Die Strömung ist hier nicht mehr stationär. Es besteht die Gefahr der Grundberührung infolge starker Parallelabsenkung des Schiffes und achterlicher Vertrimmung. Das größere Schiff fährt offensichtlich zu schnell.

In diesem Fall deutet ein Vergleich der „normalen“ FROUDESchen Tiefenzahl

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{8}{3,6 \sqrt{9,81 \cdot 3,5}} = 0,379$$

mit der „örtlichen“ FROUDESchen Tiefenzahl im Bereich der starken Muldenvertiefung

$$F_{nh}^x = \frac{(V + \Delta V)}{\sqrt{g \cdot (h - \Delta h)}} = \frac{(8 + 8)}{3,6 \sqrt{9,81 (3,5 - 0,92)}} = 0,883$$

die hydrodynamischen Veränderungen an, die ein im begrenzten Fahrwasser fahrendes Schiff verursacht. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Mulde erreicht fast die Stauwellengeschwindigkeit. In diesem Bereich läßt sich Gleichung (4) nicht mehr exakt anwenden.

5. Meßtechnik, Meßplatz

Bei jedem Versuch ist anzustreben, die gesuchte physikalische Größe direkt zu messen. Im vorliegenden Fall wäre das die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers nach Richtung und Größe.

Bekannte handelsübliche Geschwindigkeitsmeßgeber besitzen jedoch eine zu niedrige

Anordnung der Meßgeber auf der Meßplatte (1984)

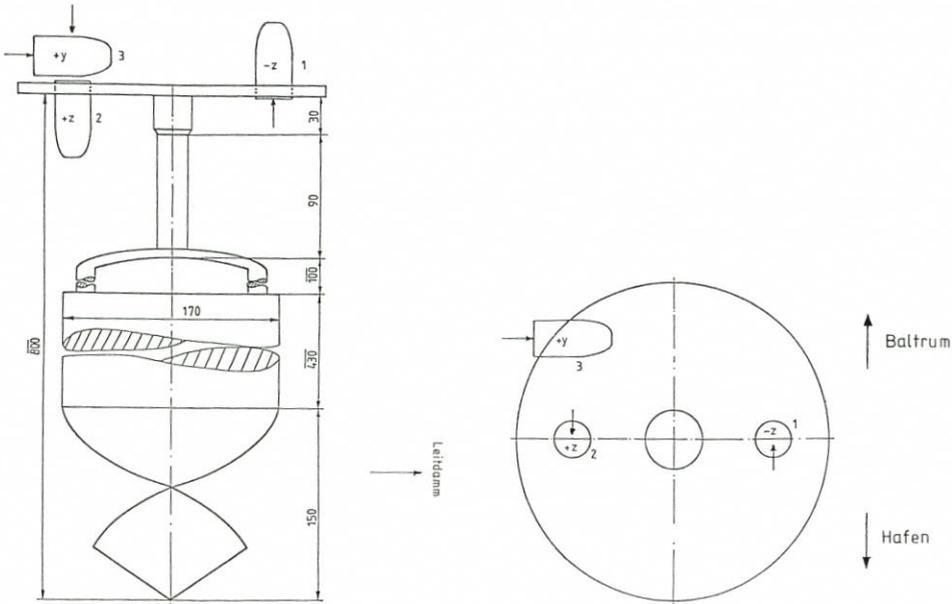


Abb. 7

Eigenfrequenz, so daß die Wiedergabe der zu messenden Größe phasenversetzt und damit auch amplitudenverfälscht erfolgt.

Deshalb wurde auf die indirekte Ermittlung der Geschwindigkeit durch Messen der Druckänderung und Erreichen der Geschwindigkeitsänderung nach Gleichung (8) ausgewichen. Es wurden Druckmeßgeber verwendet mit einem Meßbereich von 0 bis 0.075 M Pa. Diese Druckgeber sind auf einer Scheibe montiert worden, die wiederum an einem Erdbohrer angeschweißt war (Abb. 7). Dieser Erdbohrer wurde soweit in die Sohle des Außentiefs eingebracht, bis die Trägerscheibe bündig mit OK Sohle abschloß. Die Druckgeber sind im Modelltank der VBD sowohl statisch als auch dynamisch kalibriert worden. Die Calibrierungen zeigten, daß die an den Meßpunkten auftretende Verdrängungsströmung bei Vorbeifahrt des Schiffes überwiegend parallel zur Schiffslängsachse verlief.

Die Durchführung der Versuche erfolgte im Zeitraum von zwei Jahren (1983 u. 1984), wobei die Meßtechnik des 2. Jahres gegenüber dem 1. Jahr etwas verändert worden ist.

Aufgrund der Ergebnisse des Jahres 1983 wurde die Anordnung der Druckmeßgeber auf der Trägerscheibe für die Messungen in 1984 geändert. Zusätzlich wurde in einem 5 m vom Meßquerschnitt entfernten Querschnitt ein Geschwindigkeitsmeßgeber der Norddeutschen Seekabelwerke installiert, der Geschwindigkeiten in einer Ebene, also in zwei Richtungen aufnehmen kann. Obwohl dessen Eigenfrequenz für die Messungen zu niedrig war, sollte eine Kontrollmessung damit erfolgen, um einen Anhaltspunkt für die auftretenden Geschwindigkeiten in Querrichtung zu erhalten.

Einen Eindruck vom Außentief, von der Lage der Meßstelle und den Schwierigkeiten beim Anbringen der Meßgeber und der Datenübertragungsgeräte vermitteln die Fotoaufnahmen der Abbn. 8 bis 10.



Abb. 8



Abb. 9



Abb. 10

6. Versuchsdurchführung

Nach dem Aufbau der Meßkette erfolgte eine Überprüfung der Geräte, bevor mit den Messungen begonnen wurde. Der seitliche Abstand der Schiffe ist während der Meßfahrten nicht gemessen worden. Die Schiffsführer hatten die Anweisung erhalten, möglichst in Mitte Außentief zu fahren.

Versuche August 1983: Meßbeginn war der 29. 8. 1983, 12.00 Uhr. Die letzte Messung erfolgte am 1. 9. 1983 nach 14.00 Uhr. Als Versuchsobjekte standen zur Verfügung:

Kutter WESTERDIECK: Länge 10,5 m, Breite 3,25 m, Tiefgang 0,7 m

Fähre BALTRUM I: Länge 45,7 m, Breite 12,0 m, Abladetiefgang 0,8 m
und diverse Sportfahrzeuge, d. h. Motorboote und Segelyachten.

Es sind insgesamt 33 Messungen durchgeführt worden, wovon 18 auf die BALTRUM I entfielen, 8 auf die WESTERDIECK und 7 auf Sportboote.

Die Abbn. 11 bis 19 zeigen die Schiffsquerschnitte des Kutters WESTERDIECK und der Fähre BALTRUM I, eingezeichnet in den Meßquerschnitt des Neßmersieler Außentiefs bei den verschiedenen untersuchten Wasserständen.

Versuche September 1984: Diese Versuchsreihe begann am 5. 9. 1984 um 17.35 Uhr und endete am 7. 9. 1984 gegen 10.15 Uhr. Versuchsobjekte waren ebenfalls wieder der Kutter WESTERDIECK (Abmessungen s. o.) und die Fähre BALTRUM I (Abmessungen s. o.). Zusätzlich standen

Kutter MEMMERT: Länge 16 m, Breite 4,22 m, Tiefgang 0,9 m und

Fähre BALTRUM III: Länge 35,0 m, Breite 7,0 m, Tiefgang 0,8 m
für die Messungen zur Verfügung sowie 4 Sportboote.

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 2,9$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 4,5,9$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

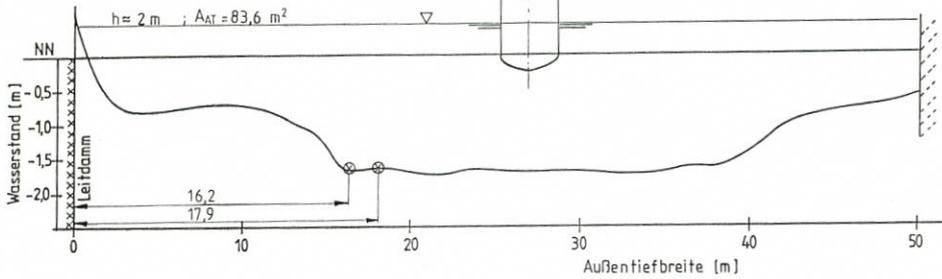


Abb. 11

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 2,7$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 44,6$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

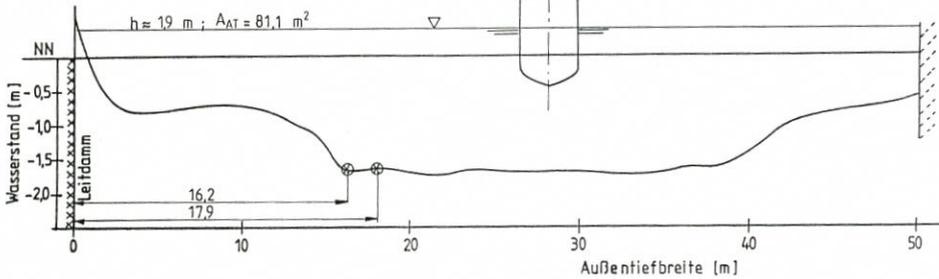


Abb. 12

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

Kutter WESTERDIEK

L = 10,5 m

B = 3,25 m

T = 0,7 m

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 20,3$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

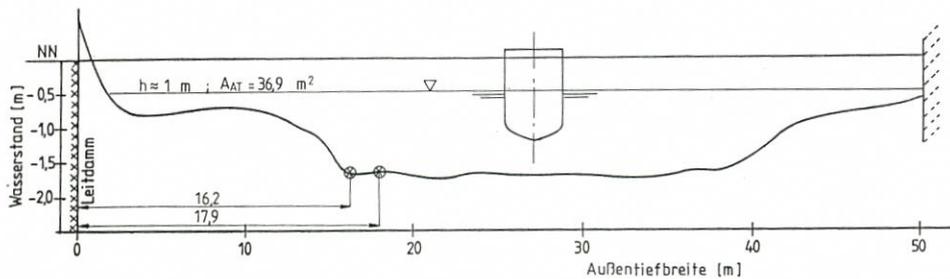


Abb. 13

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$\frac{h}{T} \approx 3,3$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 13,5$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

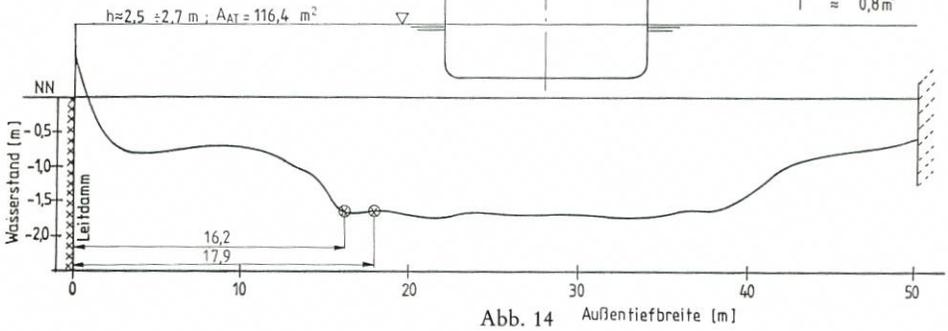
Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m



Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$\frac{h}{T} \approx 2,9$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 12$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

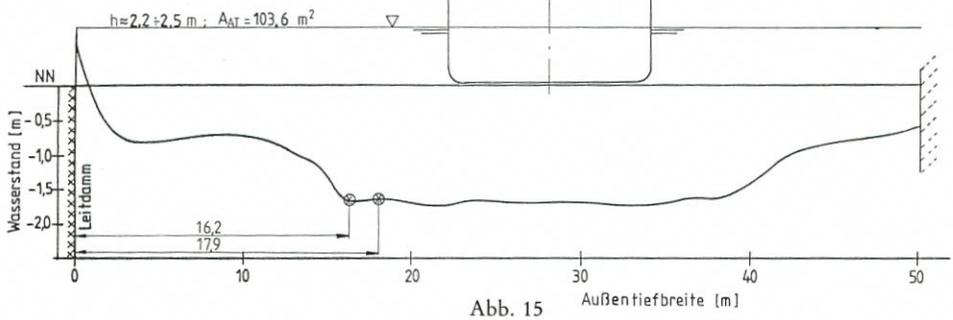
Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m



Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$\frac{h}{T} \approx 2,3$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 9,1$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

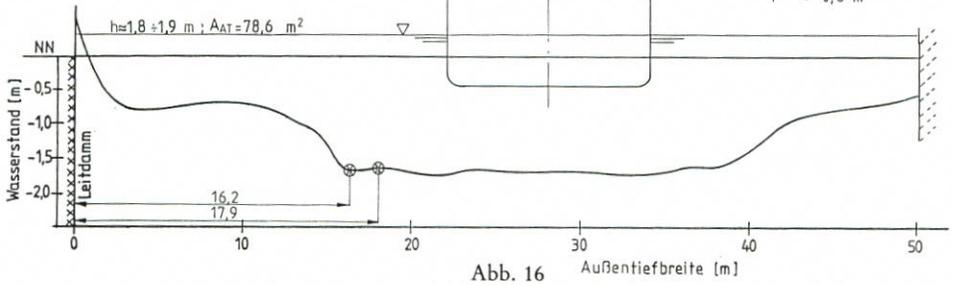
Fähre BALTRUM I

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m



Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1,9 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 7,1 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

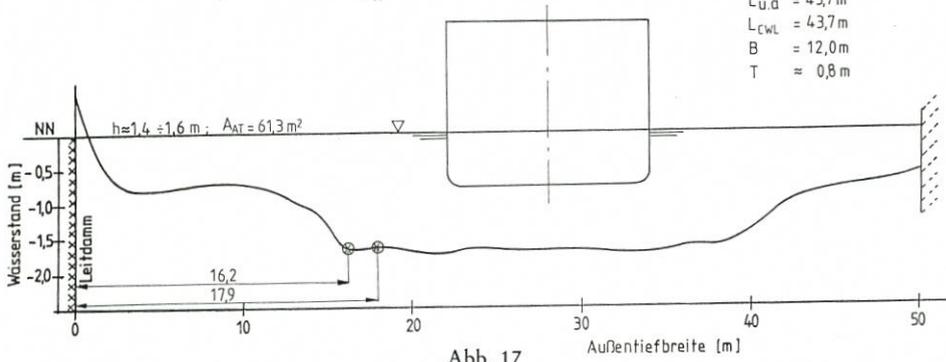


Abb. 17

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1, \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 6,2 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

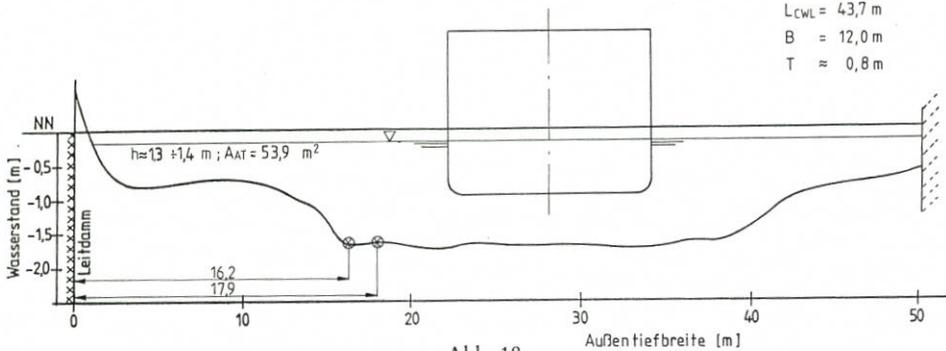


Abb. 18

Neßmersieler Außentief Station 1+000

Versuchsdatum 18.8.1983

$$\frac{h}{T} \approx 1,4 \quad ; \quad n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 4,6 \quad (\text{bez. auf } 50 \text{ m Außentiefbreite})$$

Fähre BALTRUM I

- $L_{ü,a} = 45,7 \text{ m}$
- $L_{cwl} = 43,7 \text{ m}$
- $B = 12,0 \text{ m}$
- $T \approx 0,8 \text{ m}$

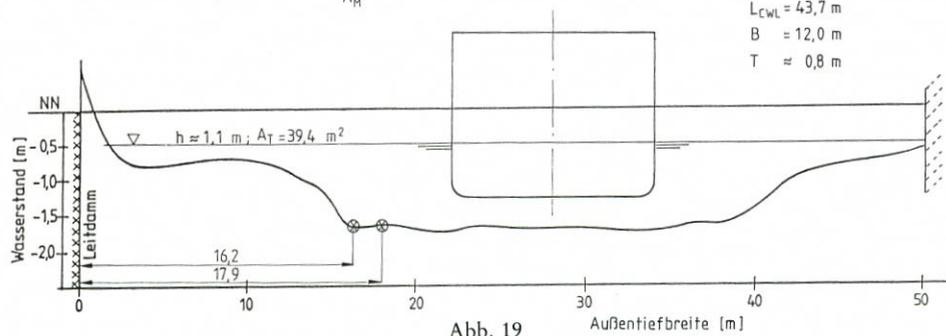


Abb. 19

Es konnten 25 Messungen durchgeführt werden, davon 3 mit der BALTRUM I, 2 mit der BALTRUM III, 10 mit der MEMMERT, 4 mit der WESTERDIECK und 6 mit Sportfahrzeugen.

Die Querschnittsrelationen für diese Meßreihe sind für Kutter WESTERDIECK, Kutter MEMMERT, Fähre BALTRUM III und Fähre BALTRUM I in den Abbn. 20 bis 28 dargestellt.

7. Auswertung

Bereits bei der Auswertung der Meßergebnisse des Jahres 1983 zeigte sich, daß alle Geber den Druckverlauf unabhängig von ihrer Anordnung auf der Befestigungsscheibe nahezu gleichwertig wiedergaben. Dadurch konnte die weitere Bearbeitung vereinfacht werden.

Die Ergebnisse wurden als dimensionslose Größen $\Delta V/V_w$ bzw. DV/VW (EDV-Bezeichnung) über dem dimensionslosen Weg $\frac{x}{L}$ bzw. $2X/L$ aufgetragen (s. als Beispiel Abbn. 29 bis 33). Dabei bedeuten

$2X/L = -1$ Bug im Meßquerschnitt

$2X/L = 0$ Mitte Schiff im Meßquerschnitt

$2X/L = 1$ Heck im Meßquerschnitt

Alle weiteren Erklärungen sind im Symbolverzeichnis gegeben.

Die Strömungsänderungen, die der Kutter WESTERDIECK hervorruft, sind zwar deutlich meßbar, jedoch relativ gering. Die Wassertiefen lagen mit Ausnahme einer Fahrt bei ca. $h = 2$ m, wodurch auch das Querschnittsverhältnis „n“ einen großen Wert erreichte.

Stärkere Übergeschwindigkeiten ergeben sich neben dem fahrenden Kutter MEMMERT. Auch hier ist der Einfluß der Wassertiefe bzw. der n-Zahl eindeutig zu ersehen.

Ganz wesentliche Rückstromgeschwindigkeiten werden durch die beiden Fähren BALTRUM I und BALTRUM III erzeugt. Die Unterdruckmulde und damit das Übergeschwindigkeitsgebiet bildet sich hier bei Wassertiefen $h \geq 2$ m annähernd symmetrisch zum Hauptspant aus. Erst bei Wassertiefen unter $h = 2$ m wird die Mulde asymmetrisch, und es kommt zu einer Vertiefung und damit sehr hohen Wassergeschwindigkeiten im Achterschiffsbereich.

Bei einigen Diagrammen ist zu sehen, daß die durch die Oberflächenwellen bedingten oszillatorischen Druckänderungen auf den Gewässerboden noch durchschlagen. Die Amplituden dieser Änderungen sind aber deutlich geringer als die Maximalwerte der Unterdrücke bzw. Übergeschwindigkeiten, die aus der lokalen Verformung resultieren.

8. Ergebnisse

Die im vorigen Kapitel genannten Abbildungen zeigen recht klar die erheblichen Übergeschwindigkeiten neben bzw. unter fahrenden Schiffen im begrenzten Fahrwasser. Für jede der auswertbaren Fahrten wurden eine mittlere Übergeschwindigkeit durch Integration bestimmt und diese Werte über einem geeigneten Parameter aufgetragen. Als unabhängige Variable (Abszissenwert) bot sich das im Wasserbau vielfach benutzte Querschnittsverhältnis

$$n = \frac{\text{Außentiefquerschnitt}}{\text{Schiffshauptspant}} = \frac{A_{AT}}{A_M}$$

an.

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter „WESTERDIEK“

$$\frac{h}{T} \approx 3,1 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 4,63 \text{ (bez. a. 50m Außentiefbreite u. NN)}$$

L = 10,5 m
B = 3,25 m
T = 0,7 m

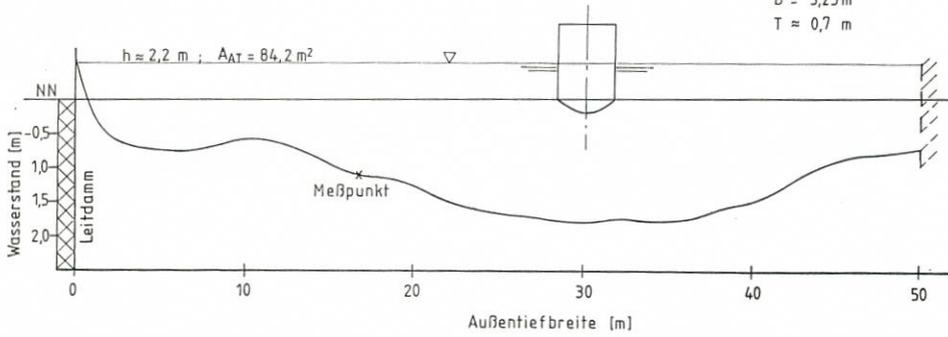


Abb. 20

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter MEMMERT

$$\frac{h}{T} \approx 2,3 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 25,2 \text{ (bez. auf 50m Außentiefbreite)}$$

L = 16,0 m
B = 4,22 m
T = 0,9 m

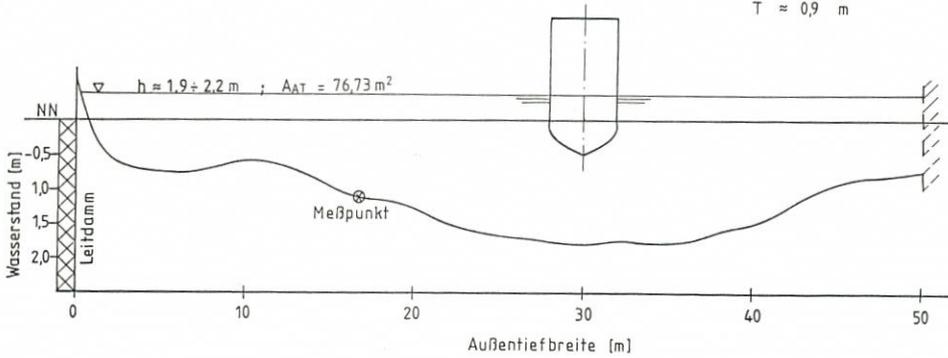


Abb. 21

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Kutter MEMMERT

$$\frac{h}{T} \approx 1,8 ; n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 19,5 \text{ (bez. auf 50m Außentiefbreite)}$$

L = 16,0 m
B = 4,22 m
T = 0,9 m

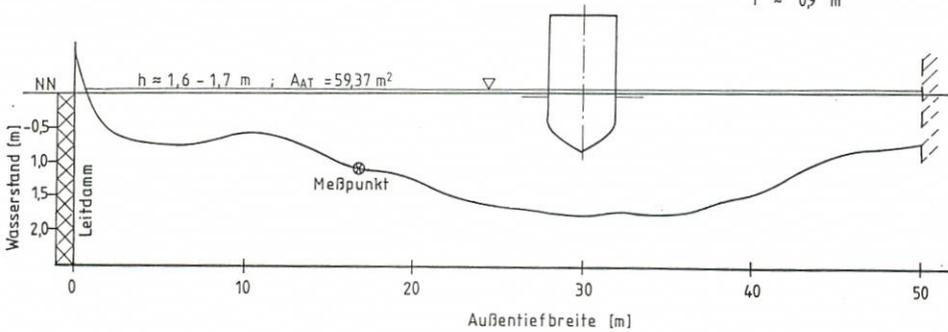


Abb. 22

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Kutter MEMMERT

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

L = 16,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,3$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 10,7$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 4,22 m

T ≈ 0,9 m

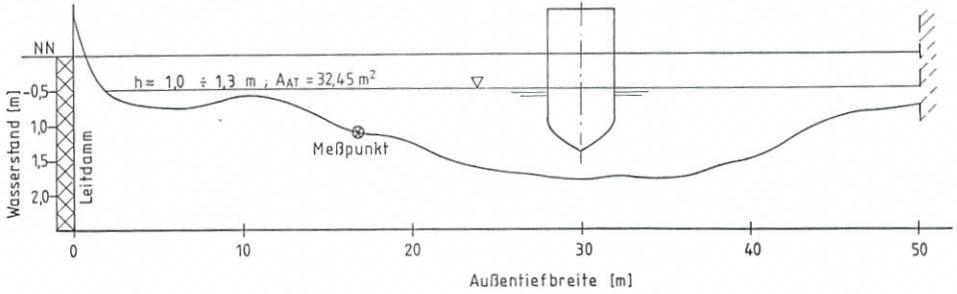


Abb. 23

Neßmersieler Außentief Station 0+915,5

Fähre BALTRUM III

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Lü.a = 35,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 6$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 7,0 m

T ≈ 0,8 m

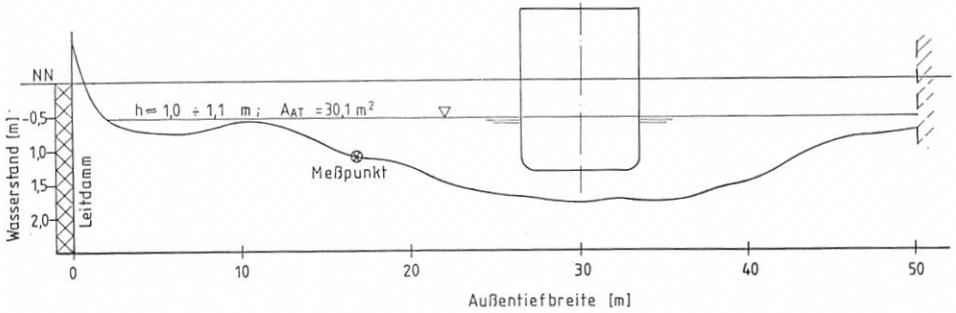


Abb. 24

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Fähre BALTRUM III

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Lü.a = 35,0 m

$\frac{h}{T} \approx 1,1$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 5,2$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

B = 7,0 m

T ≈ 0,8 m

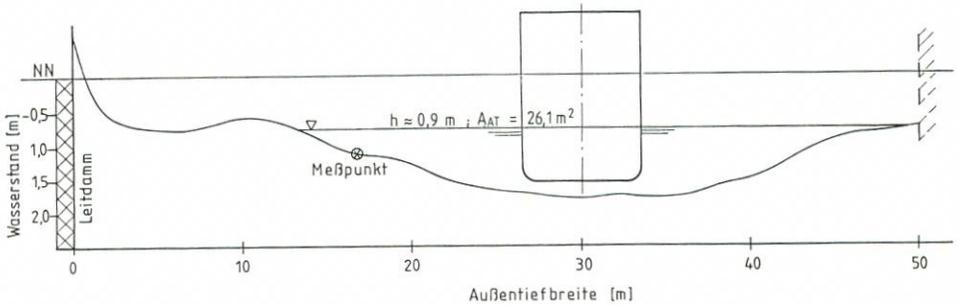


Abb. 25

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 2,6$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 8,9$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m

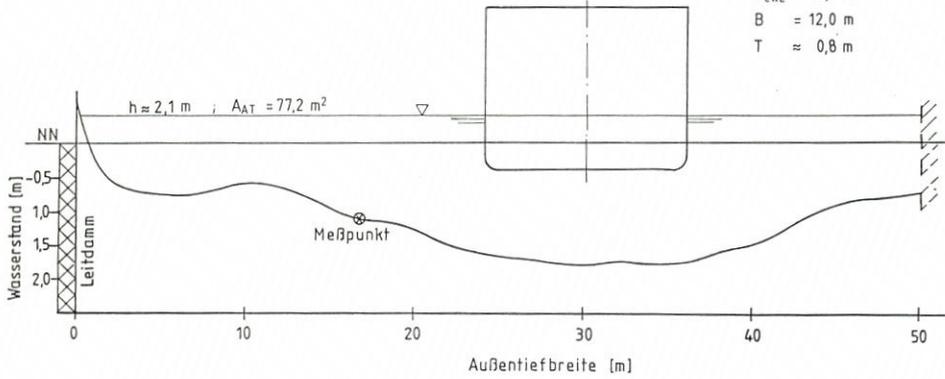


Abb. 26

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 1,4$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 3,5$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m

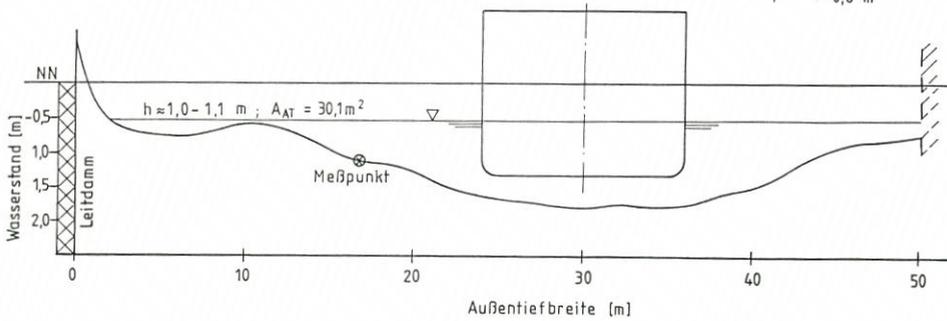


Abb. 27

Neßmersieler Außentief Station 0+951,5

Versuchsdatum 5.-7.9.1984

Fähre BALTRUM I

$\frac{h}{T} \approx 1,1$; $n = \frac{A_{AT}}{A_M} \approx 3,0$ (bez. auf 50 m Außentiefbreite)

$L_{üa} = 45,7$ m

$L_{cwl} = 43,7$ m

$B = 12,0$ m

$T \approx 0,8$ m

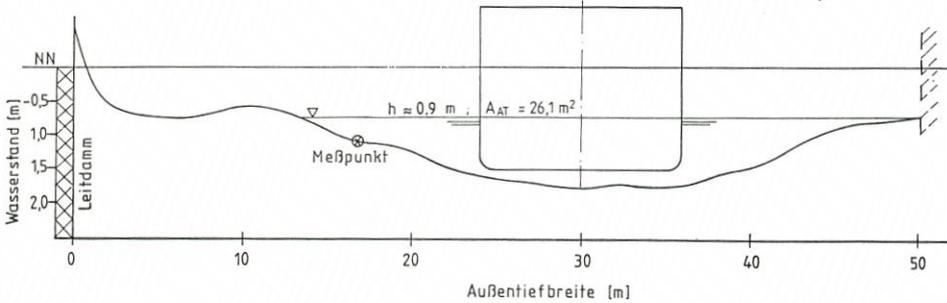


Abb. 28

Versuche 29.8.-1.9.1983 Einfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta H} \approx 12$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	BEZ.	VG (KN)	VG (M/S)	VST (M/S)	VW (M/S)	H (M)	H/T
9	29.8.83	14.35	Flut ◻	CVPX1	6.259	3.220	0.060	3.160	2.33 2.91
16	30.8.83	15.35	Flut *	CVPX1	6.162	3.170	0.050	3.120	2.47 3.09
23	30.8.83	18.18	Ebbe ■	CVPX1	4.685	2.410	-0.220	2.630	2.15 2.69
29	31.8.83	15.45	Flut ▲	CVPX1	5.384	2.770	0.180	2.590	2.17 2.71

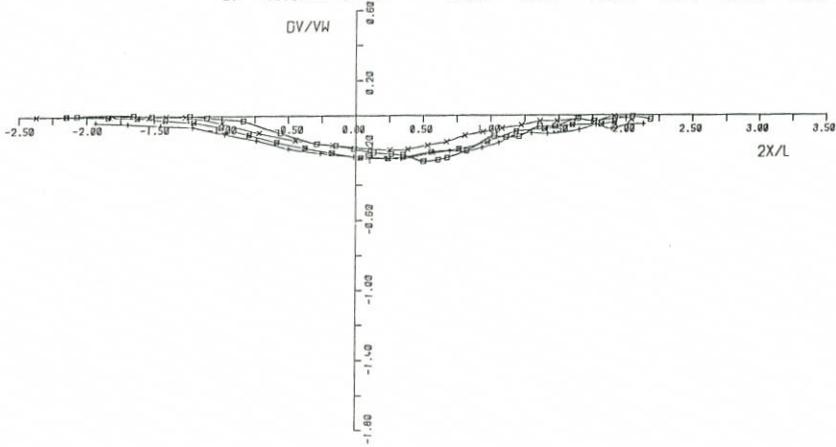


Abb. 29

Versuche 29.8.-1.9.1983 Ausfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta H} \approx 7.1$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	BEZ.	VG (KN)	VG (M/S)	VST (M/S)	VW (M/S)	H (M)	H/T
4	29.8.83	13.03	Flut ◻	CVPX2	3.530	1.820	-0.190	2.010	1.59 2.00
14	30.8.83	13.23	Flut *	CVPX2	3.460	1.700	-0.170	1.950	1.49 1.86
27	31.8.83	13.55	Flut ■	CVPX2	2.700	1.430	-0.250	1.600	1.40 1.75

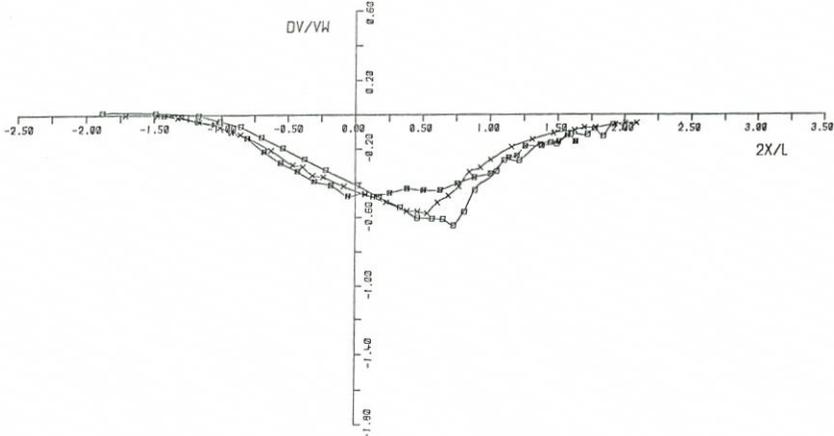


Abb. 30

Versuche 29.8.-1.9.1983 Einfahrt Neßmersiel

MS "BALTRUM I"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta M} \approx 4.6$$

Fahrt	Dat.	Uhrz.	Flut	BEZ.	VG(KN)	VG(M/S)	VST(M/S)	VH(M/S)	H(M)	H/T
26	31.8.83	13.18	Flut	o CVPXI	3.832	1.560	0.240	1.320	1.05	1.31
31	1.9.83	13.55	Flut	x CVPXI	2.819	1.450	0.250	1.200	1.06	1.33

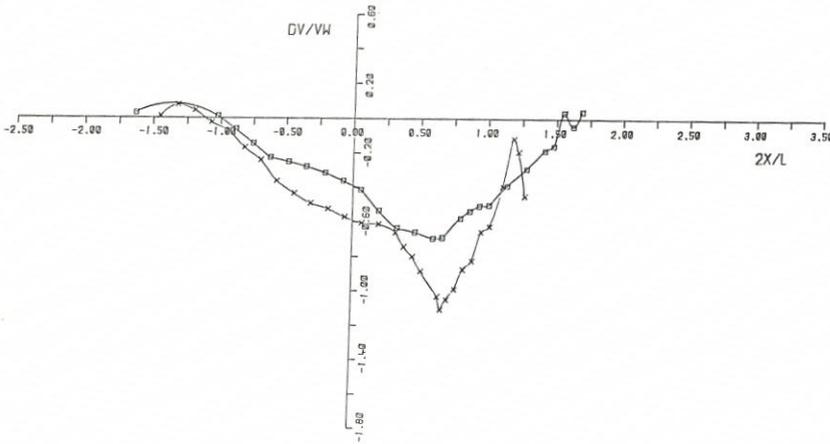


Abb. 31

Versuche 5.9.-7.9.1984 Neßmersiel

Kutter "MEMMERT"

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta M} \approx 10.7$$

H/T	Fahrt	Dat.	Uhrz.	Ausfahrt	Flut	BEZ.	VG(KN)	VG(M/S)	VST(M/S)	VH(M/S)	H(M)
1.09	4	5.9.84	18.00	Ausfahrt	o	CVPY	5.561	2.861	-0.808	2.941	0.985
1.43	8	5.9.84	18.50	Einfahrt	x	CVPY	6.821	3.509	0.825	3.184	1.284
1.43	16	6.9.84	12.10	Einfahrt	o	CVPY	5.777	2.972	-0.200	3.172	1.291

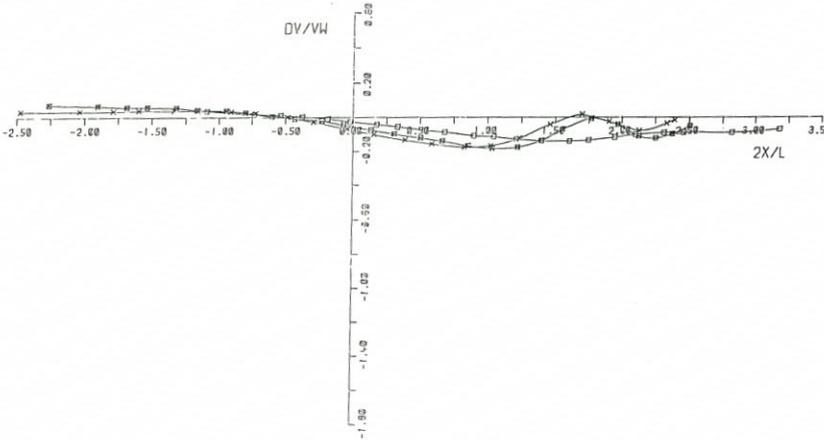


Abb. 32

Versuche 5.9.-7.9.1984 Ausfahrt Neßmersiel

Fahrt	H/T	n = $\frac{\Delta L}{\Delta t}$	Dat.	Uhrz.	MS	BEZ.	VG (KN)	VC (M/S)	VST (M/S)	VH (M/S)	HIM
6	1.32	≈ 3.5	5.9.84	18.10	MS "BALTRUM I" Flut	CVPY	3.563	1.833	-0.035	1.868	1.050
18	1.42	≈ 6.0	6.9.84	19.10	MS "BALTRUM III" Flut	CVPY	3.293	1.694	-0.175	1.869	1.132

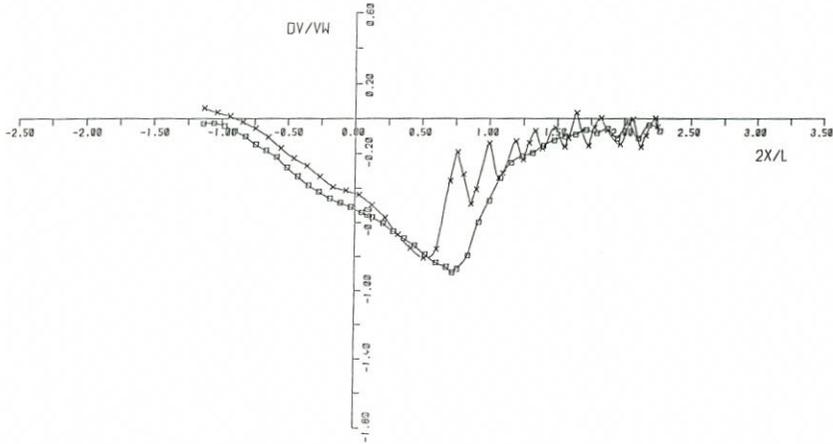


Abb. 33

In Abb. 34 sind diese Mittelwerte der axialen Übergeschwindigkeiten aller Messungen aufgetragen. Es zeigt sich eine erwartete deutliche Zunahme der Rückstromgeschwindigkeit mit geringer werdender n -Zahl. Die Fahrgeschwindigkeiten der Schiffe sind als Parameter nicht erkennbar. Die größte mittlere Übergeschwindigkeit liegt bei ca. 40 % der Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser für $n \approx 3$.

Ähnlich verhalten sich die Maximalwerte der axialen Übergeschwindigkeiten (Abb. 35). Die Zunahme mit geringer werdender n -Zahl ist aber bei diesen Werten erheblich größer. Der größte Wert liegt hier bei 110 % der Fahrgeschwindigkeit gegen Wasser. Der Einfluß der Tideströmung auf die Ergebnisse ist durch den Bezug auf die Geschwindigkeit gegen Wasser V_W eliminiert worden. Dadurch ergeben sich keine merklichen Differenzen bei Ein- und Ausfahrt der Schiffe.

Nachdrücklich muß betont werden, daß diese Diagramme nur Gültigkeit besitzen für das Neßmersieler Außentief. Erhebliche Änderungen in den Abmessungen des Außentiefs können zu völlig anderen Kurvencharakteristiken führen. Eine Allgemeingültigkeit dieser n -Abhängigkeit ist nicht nachgewiesen worden. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, beide dargestellten Kurven durch eine mathematische Funktion zu approximieren.

Die Messungen zeigten einwandfrei, daß in den sehr kleinen Querschnitten des Neßmersieler Außentiefs durch die Verdrängungsströmung infolge Fahrt größerer Schiffe erhebliche Rückstromgeschwindigkeiten neben den Schiffen und – was gefolgert werden darf – auch unter dem Schiffsboden entstehen. Dadurch wird das lose Bodenmaterial aufgewirbelt. Zu welcher Verwirbelung des Sediments es dann durch Einwirkung des Schraubenstrahls kommt, konnte im Rahmen der bisherigen Untersuchungen nicht geklärt werden. Es ist zu empfehlen, dieser Frage nachzugehen. Dabei müßte jedoch die Meßtechnik verändert werden.

Weiterhin ist zu empfehlen, die im Neßmersieler Außentief durchgeführten Messungen auch in anderen Außentiefs durchzuführen, um die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu überprüfen oder zu sichern. Eine zweidimensionale Messung sollte zukünftig angestrebt werden.

Mittlere axiale Übergeschwindigkeiten
neben einem fahrenden Schiff
im Neßmersieler Außentief

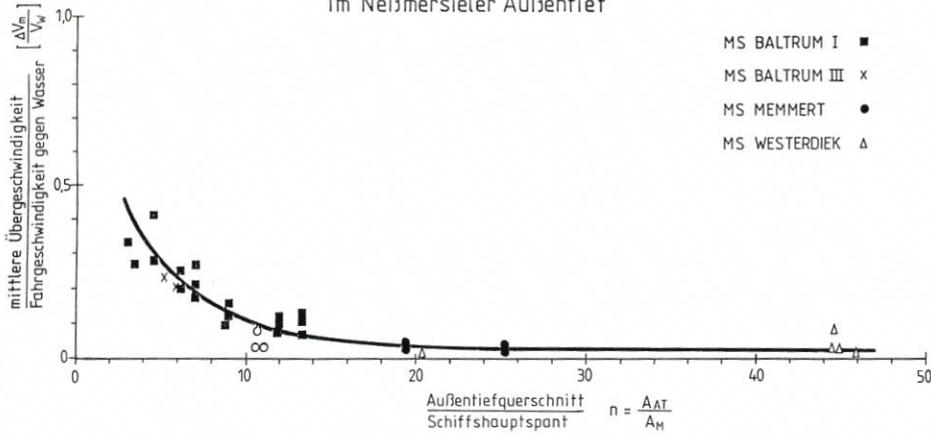


Abb. 34

Maximalwerte der axialen Übergeschwindigkeiten
neben einem fahrenden Schiff
im Neßmersieler Außentief

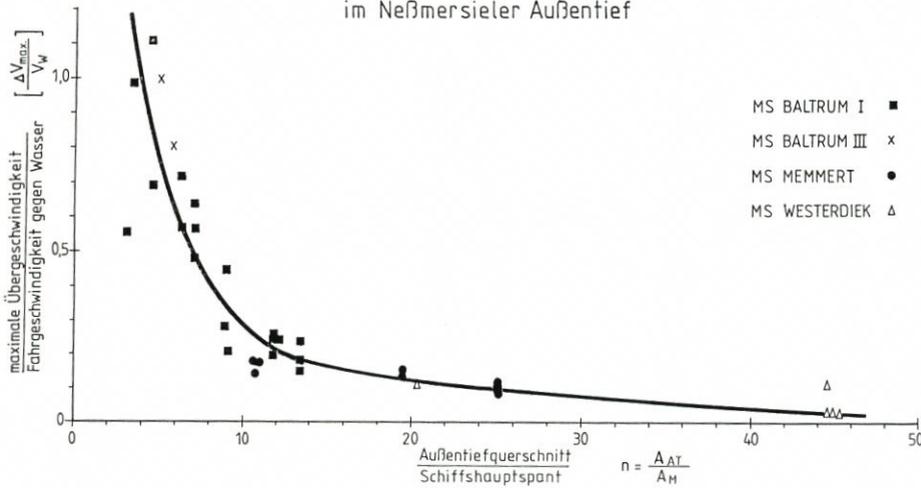


Abb. 35

9. Symbolverzeichnis

- A_{AT} Querschnitt des Außentiefs
- A_M Hauptspantfläche des Schiffes
- B Schiffsbreite
- $DV = \Delta V = u$ Zusatzgeschwindigkeit, Übergeschwindigkeit, Rückstromgeschwindigkeit (in axialer Richtung)
- $F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$ Froude Längenzahl

$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$	Froude Tiefenzahl
g	Gravitationskonstante
h	Wassertiefe
L	Schiffslänge
$L_{\text{ü.a.}}$	Länge des Schiffes über alles
L_{WL}	Länge des Schiffes in der Wasserlinie
$n = \frac{A_{AT}}{A_M}$	Querschnittsverhältnis, -zahl
p_0	Atmosphärendruck
t	Zeit
T	Schiffstiefgang
u, v, w	Komponenten der Störgeschwindigkeit
V	Geschwindigkeit allgemein
V_0	Anströmgeschwindigkeit, Schiffsgeschwindigkeit
V_L	Geschwindigkeit gegenüber Land
V_{Str}	Strömungsgeschwindigkeit
V_w, VW	Geschwindigkeit gegen Wasser
x, X	Längskoordinate
α	Wellenöffnungswinkel
ρ	spez. Masse
Φ	Geschwindigkeitspotential
Δh	Wasserflächenverformung
Δp	Druckänderung

10. Schriftenverzeichnis

- BINEK, H. u. MÜLLER, E.: Einzelfahrten von Schubverbänden in Schifffahrtskanälen. HANSA, Jg. 113, H. 8, 1976.
- BINEK, H. u. MÜLLER, E.: Passieren von Schubverbänden in Schifffahrtskanälen. HANSA, Jg. 114, H. 20, 1977.
- FELKEL, K.: Die Problematik der Sohlenerosion des Oberrheins. Zeitschrift für Binnenschifffahrt u. Wasserstraßen, Nr. 8, 1977.
- GROLLIUS, W.: Druckmessungen bei Schrägschleppversuchen mit frei krägendem Modell auf begrenzter Wassertiefe. Schiff und Hafen, H. 6, 1979.
- KAUFMANN, W.: Technische Hydro- und Aeromechanik. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1954.
- KNISS, H. G.: Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen in Binnenschifffahrtskanälen. Diss., TU Braunschweig, 1982.
- MÜLLER, E.: Untersuchung der Verformung der Wasseroberfläche durch die Verdrängungsströmung bei der Fahrt eines Schiffes auf flachem Wasser. VBD-Mitteilung Nr. 83, 1966.
- MÜLLER, E.: Untersuchung der Wasseroberflächenverformung beim Begegnen zweier Schiffe im Kanal. VBD-Mitteilung Nr. 101, Teil 2, 1969.
- MÜLLER, E. u. BINEK, H.: Systematische Modellversuche mit Schubleichterverbänden. Schiff und Hafen, H. 11, 1976.
- PLATE, U. u. KEIL, G. W.: Sediment-Transport in einem Seeschifffahrtskanal. Die Küste, H. 21, 1971.
- SCHÄLE, E.: Strömungsmessungen in einem Stillwasserkanal trapezförmigen Querschnitts. Schiff und Hafen, Jg. 20, H. 4-9, 1968.
- SCHRÖDER, H. TH. u. HOFMANN, W.: Beanspruchung der Böschung eines Schifffahrtskanals. Schiff und Hafen, Jg. 20, H. 4-9, 1968.

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

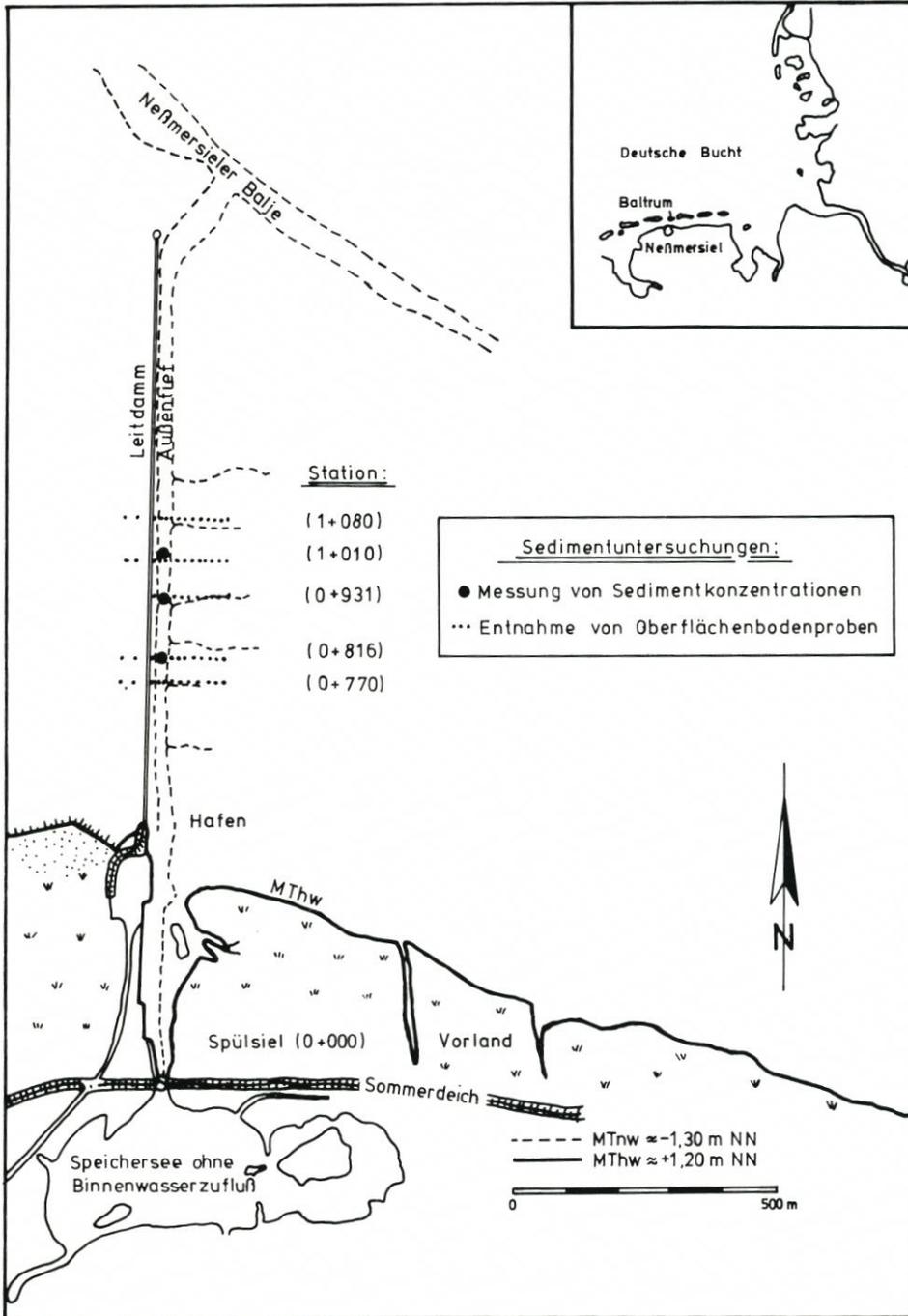


Abb. 1. Lageplan des Neßmersieler Außeniefs mit Meßpunkten für die Schiffsuntersuchungen

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-

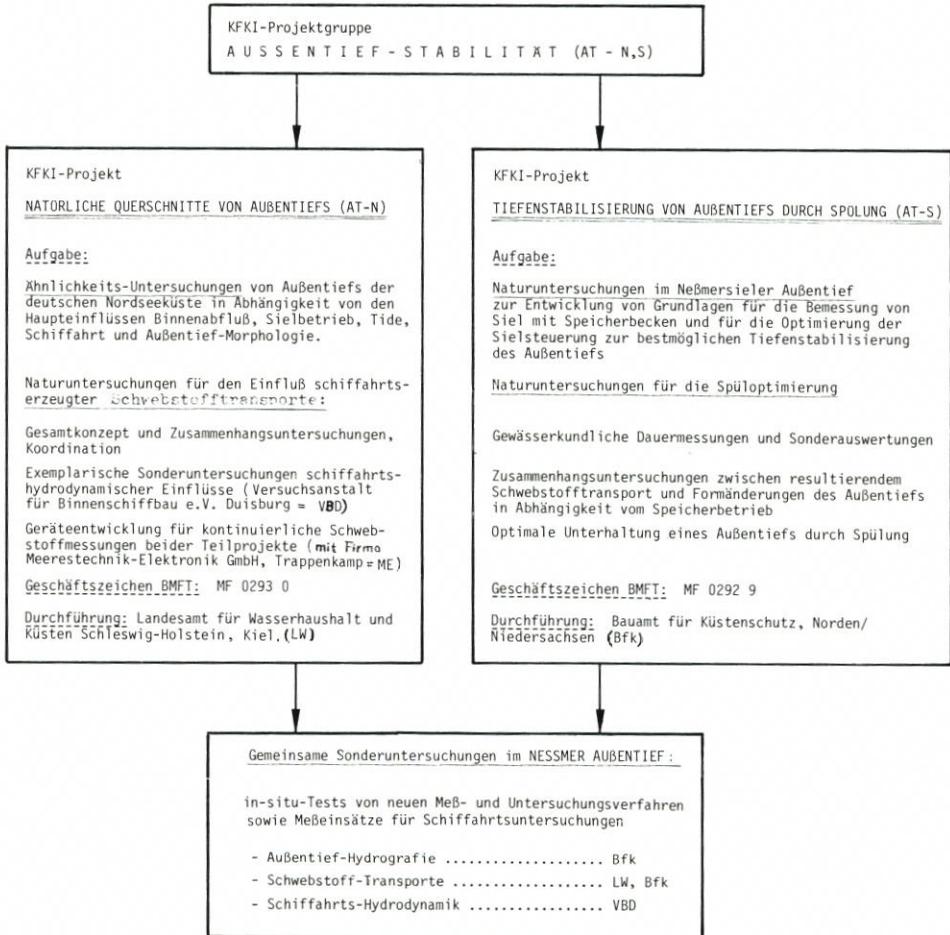


Abb. 2. Teilaufgaben der KFKI-Projektgruppe „Außentief-Stabilität (AT-N, S)“

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.

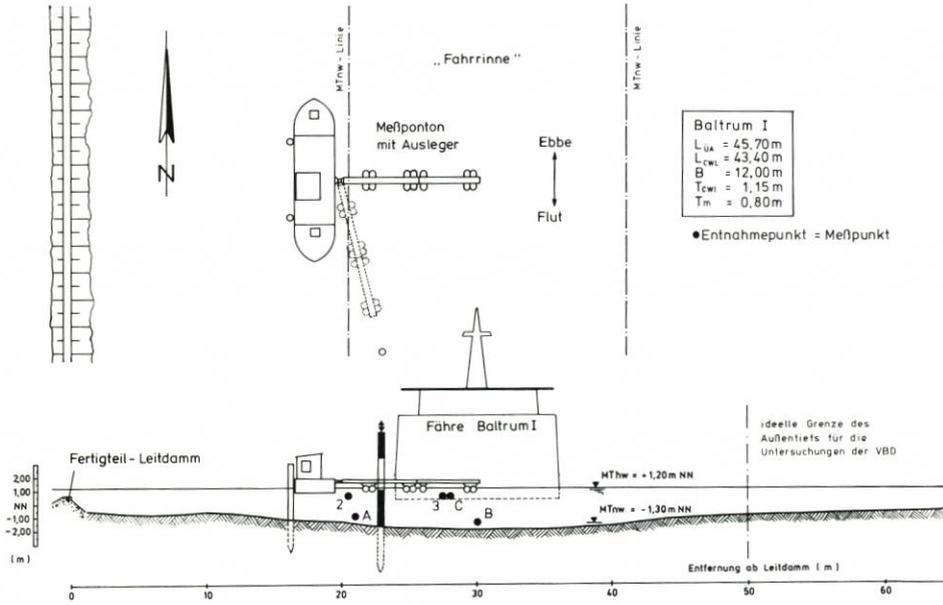


Abb. 3. Querschnitts-interne Zuordnung von Meßpunkten, Geräteträgern und Fährinne / Station 1 + 010

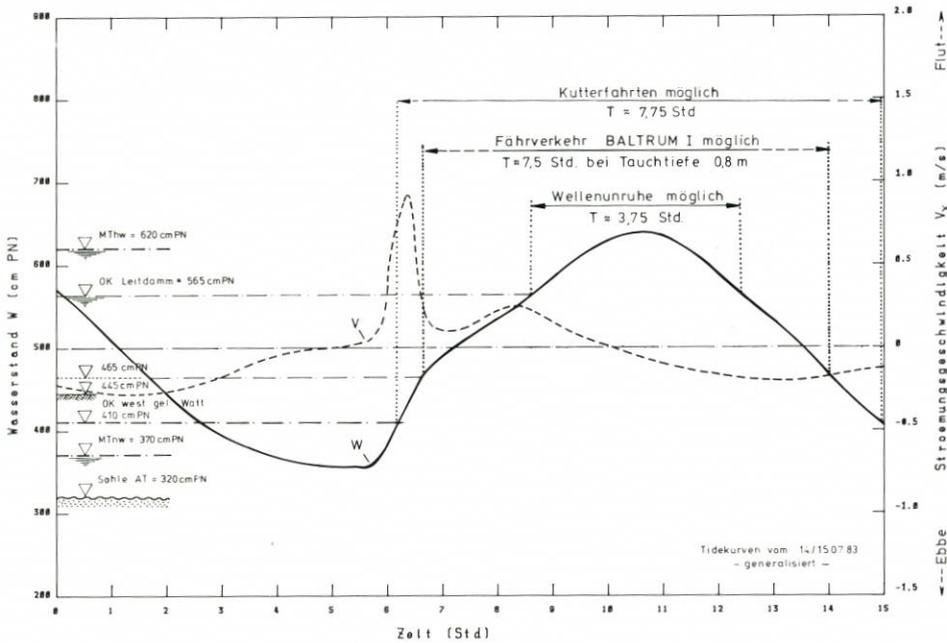


Abb. 4. Grenzwasserstände für Schiffsverkehr / Station 1 + 010

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 m³/h) bzw. 0,16 l/s (≈ 0,58 m³/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 (ΔG) der Gewichtssummenlinien (G(t)) in frei wählbaren Zeitschritten (Δt) zur Berechnung der Schwebstoffkonzentration (C), mit Beginn im Sekundenbereich, herangezogen werden.

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

mit ΔG in (g), Δt 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).

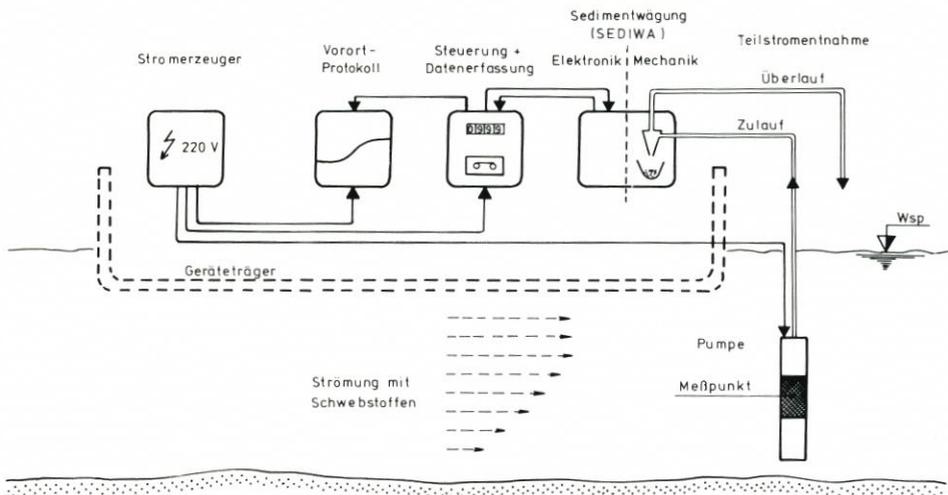


Abb. 5. Gerätekonfiguration für das vollautomatische Meßverfahren zur kontinuierlichen Dauermessung von Schwebstoffen (System SEDIWA = Sedimentwaage)

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 Schlämanteils. 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 Spüleistung. 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

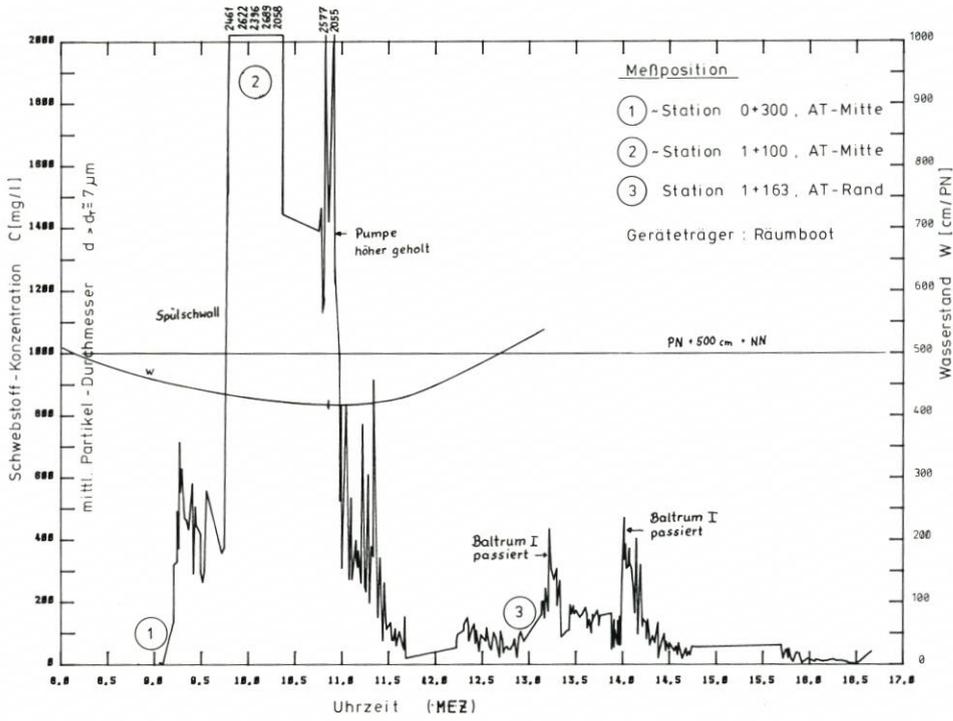


Abb. 6. Vorversuche: Schwwebstoff-Ganglinie 25. 8. 1982

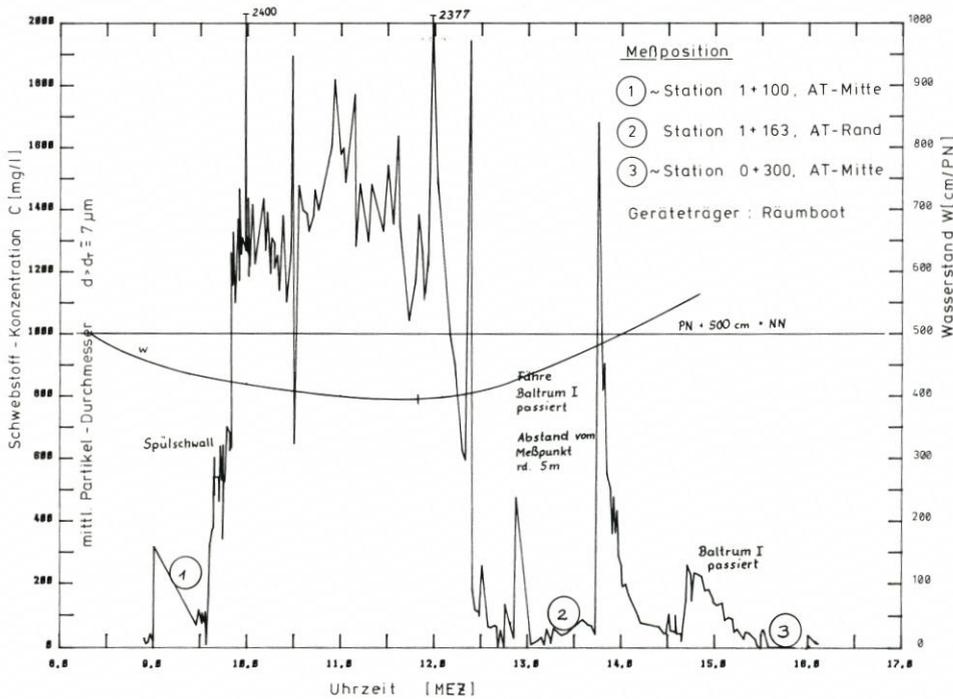


Abb. 7. Vorversuche: Schwwebstoff-Ganglinie 26. 8. 1982

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 Verschwenkungsmanöver 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.

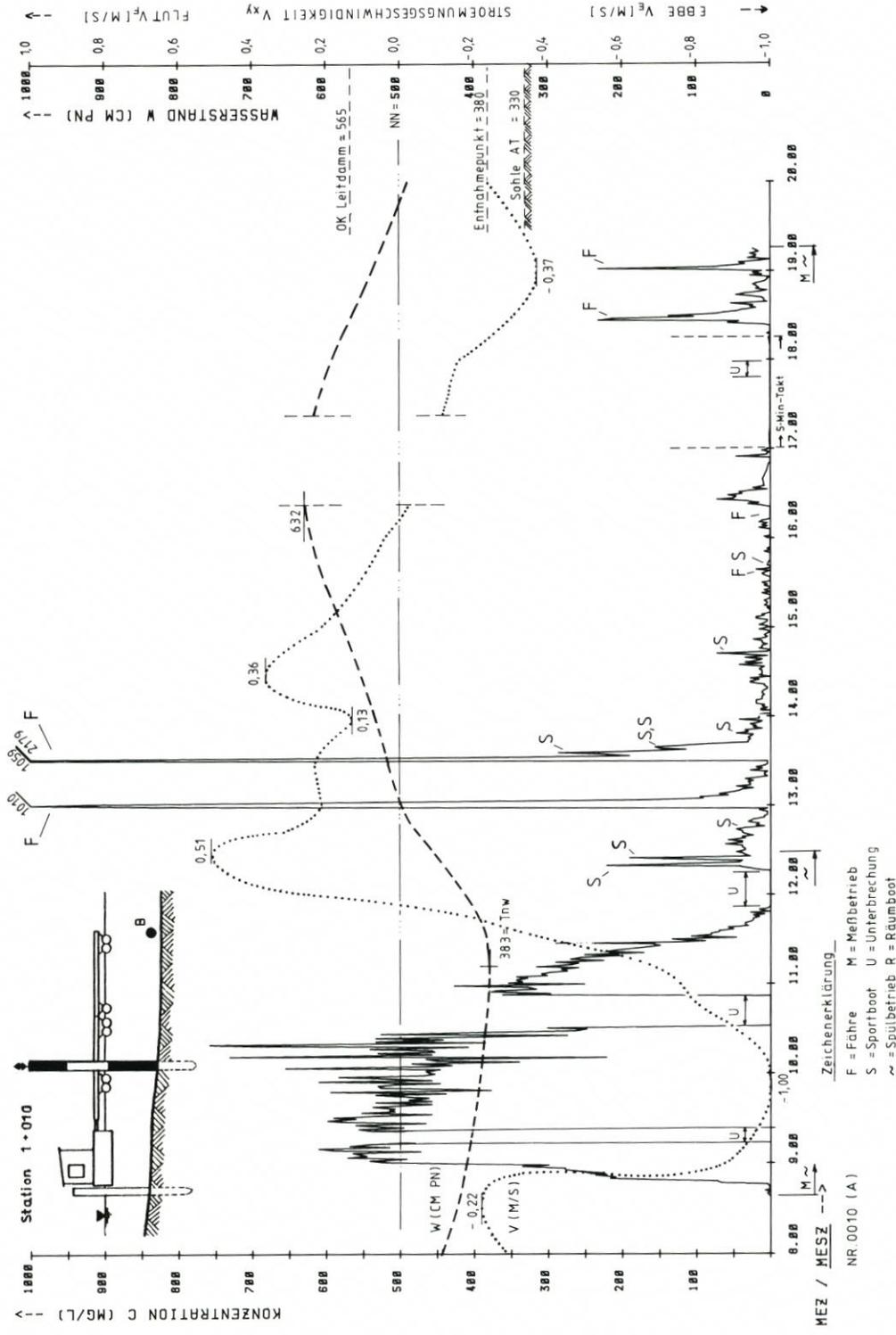


Abb. 8. Hauptversuche '83: Schwebstoff-Ganglinie 30. 8. 1983, Meßpunkt B, 0,5 m ü. Sohle

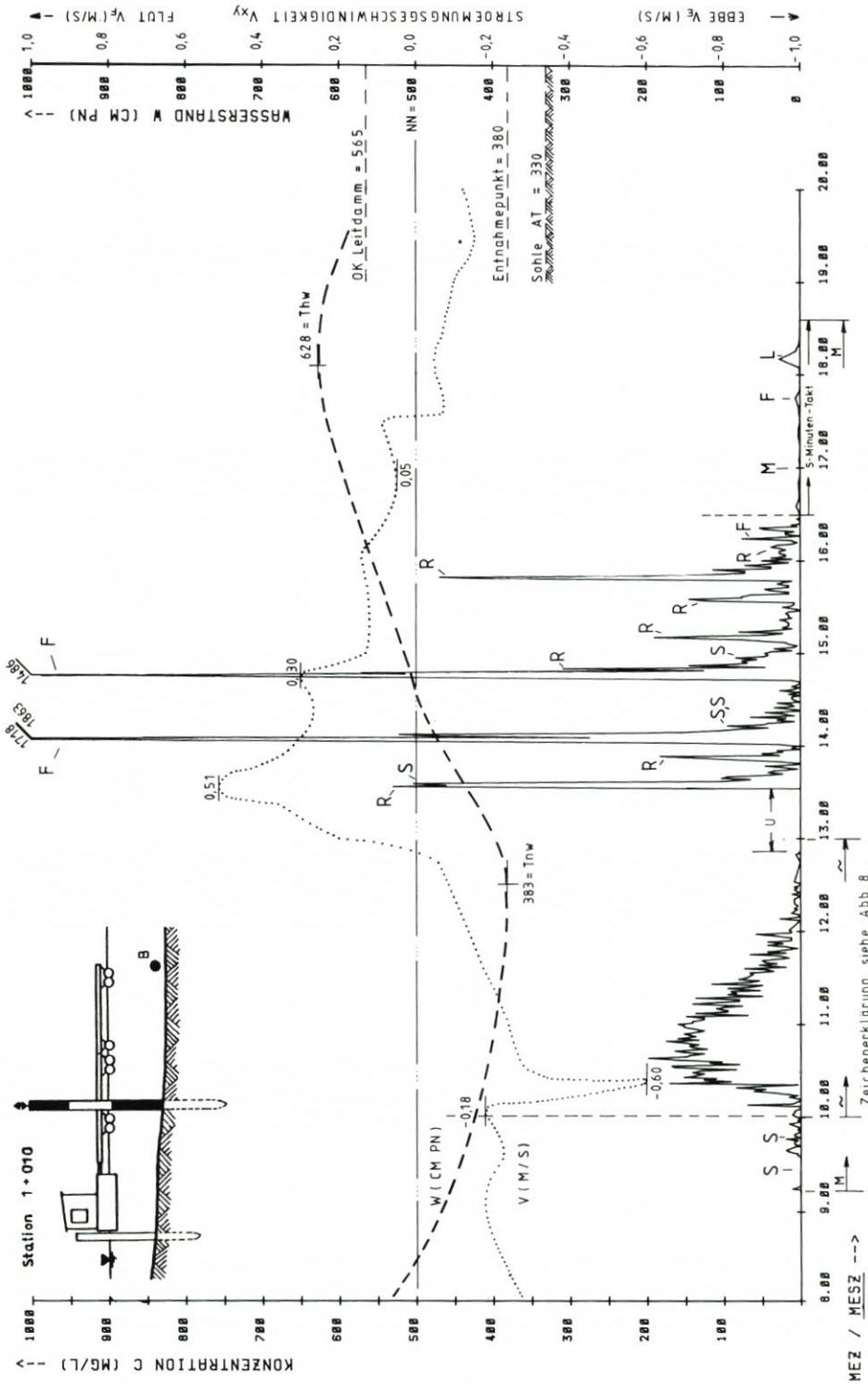


Abb. 9. Hauptversuche '83: Schwefelstoff-Ganglinie 1. 9. 1983, Meßpunkt B, 0,5 m ü. Sohle

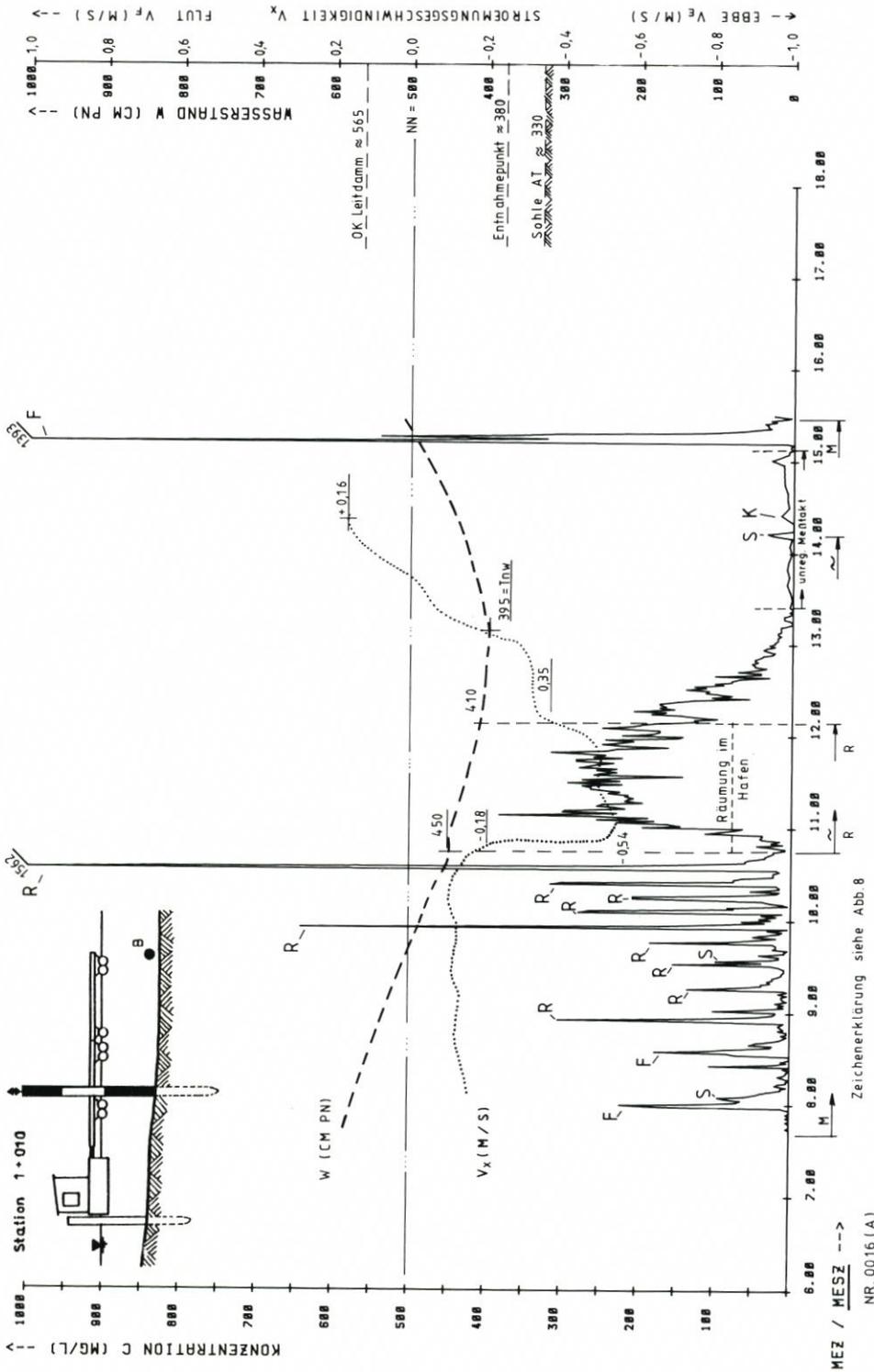


Abb. 10. Hauptversuche '83: Schwebstoff-Ganglinie 2. 9. 1983, Meßpunkt B, 0,5 m ü. Sohle

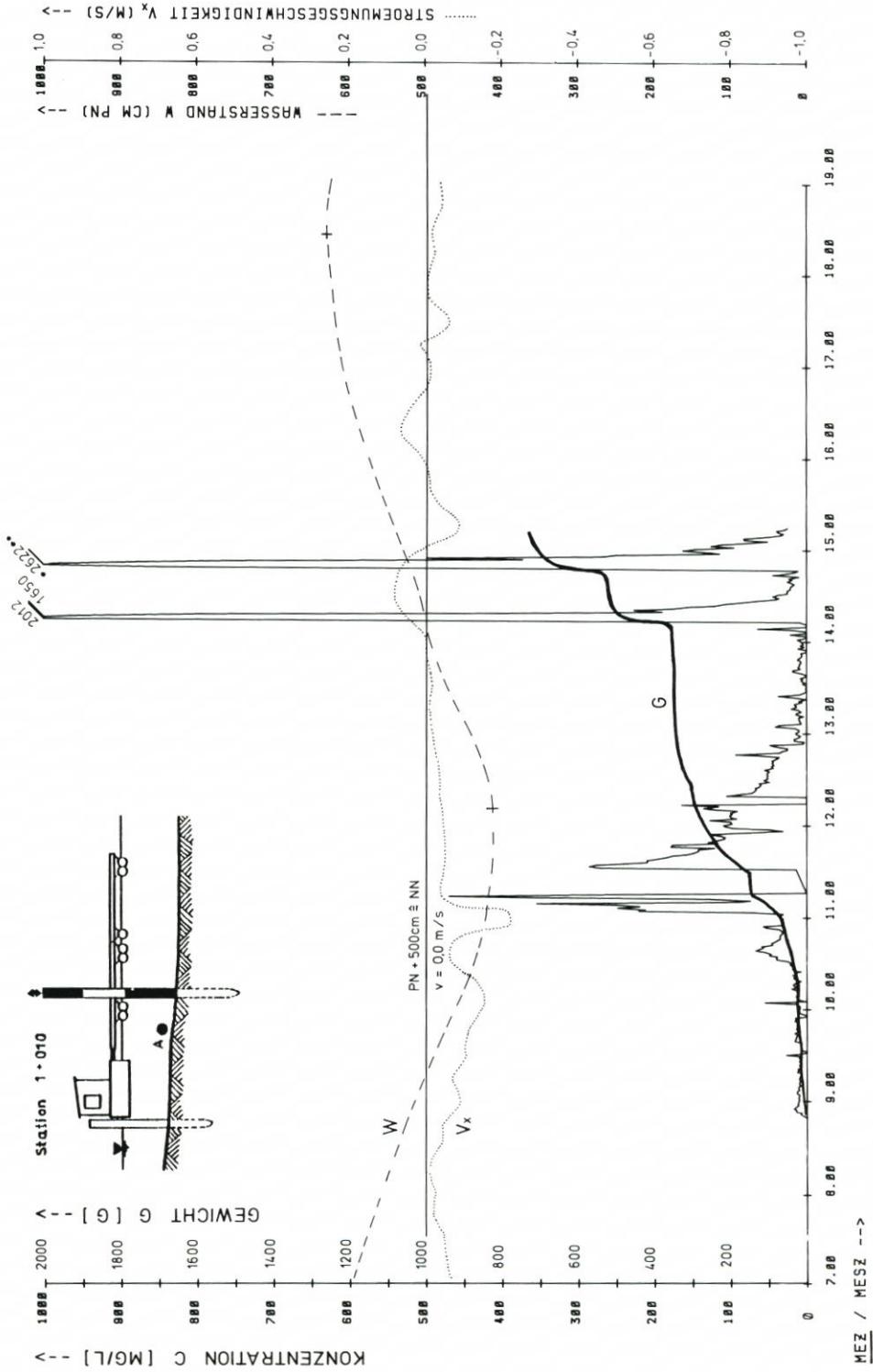


Abb. 11. Hauptversuche '84: Schwefstoff-Ganglinie 4. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

MEZ / MESZ -->
NR 0064 (A)

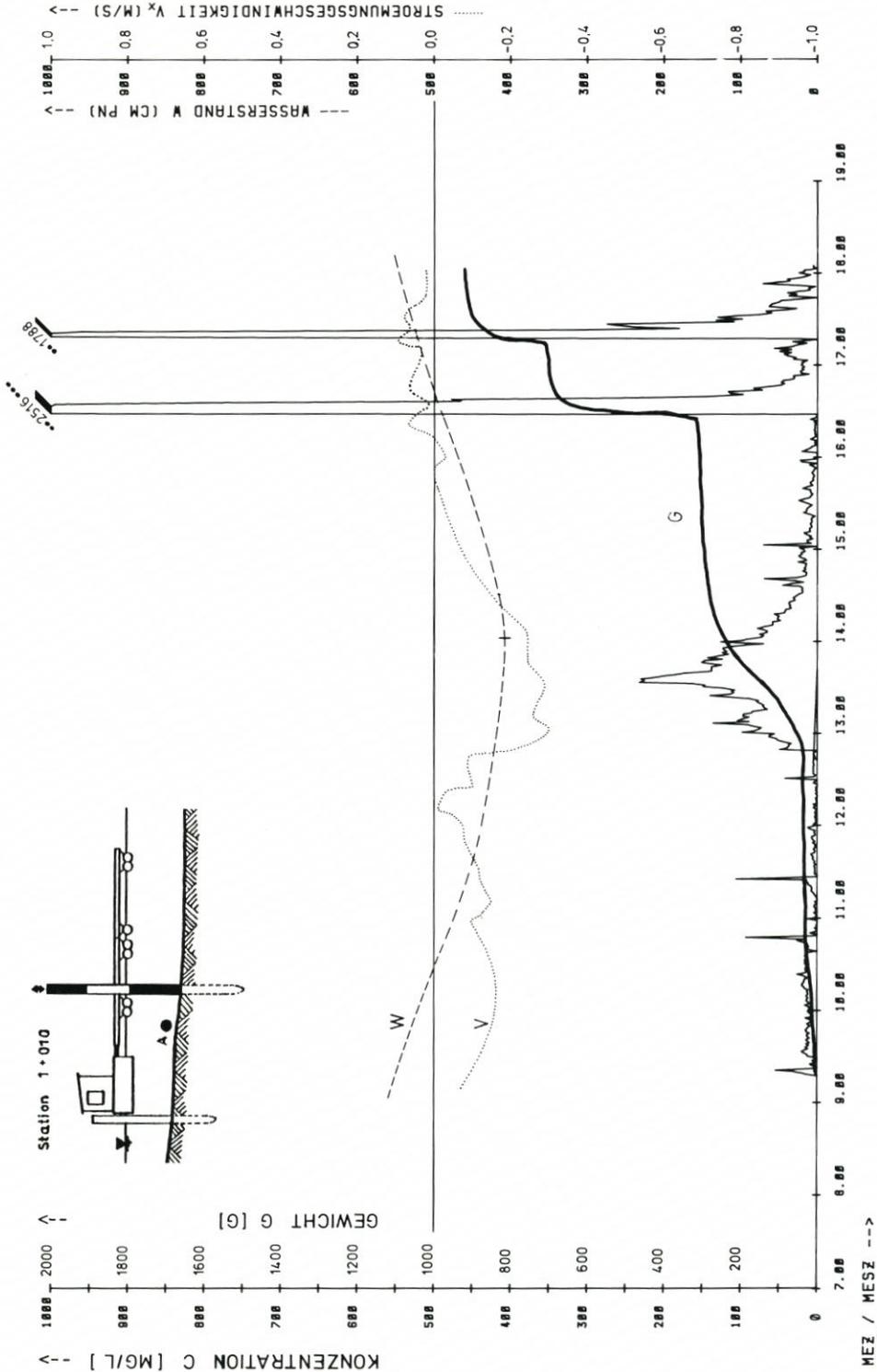


Abb. 12. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 5. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

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

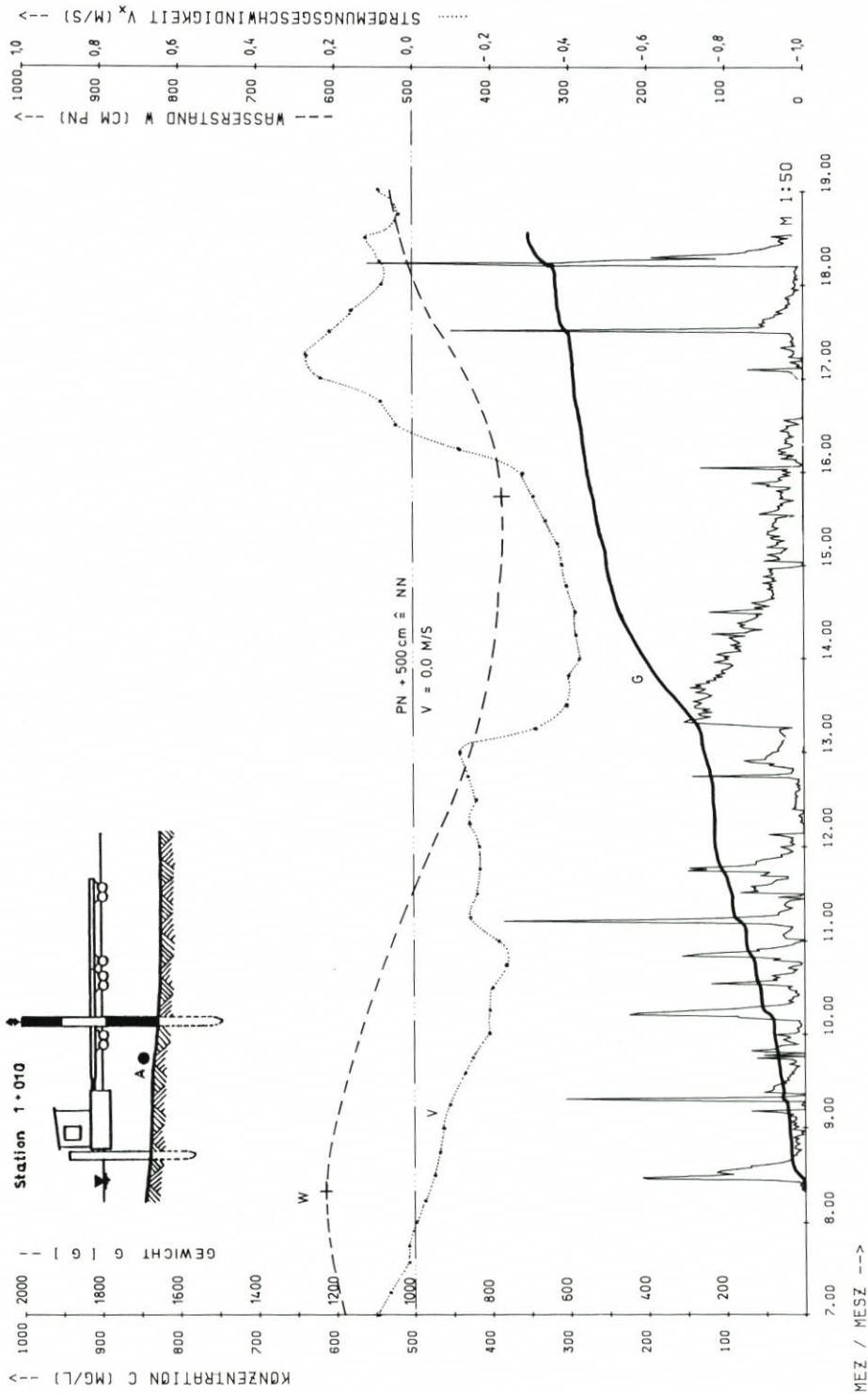


Abb. 13. Hauptversuche '84: Schwefelstoff-Ganglinie 6. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

MEZ / MESZ --->
NR. 0090 (A)

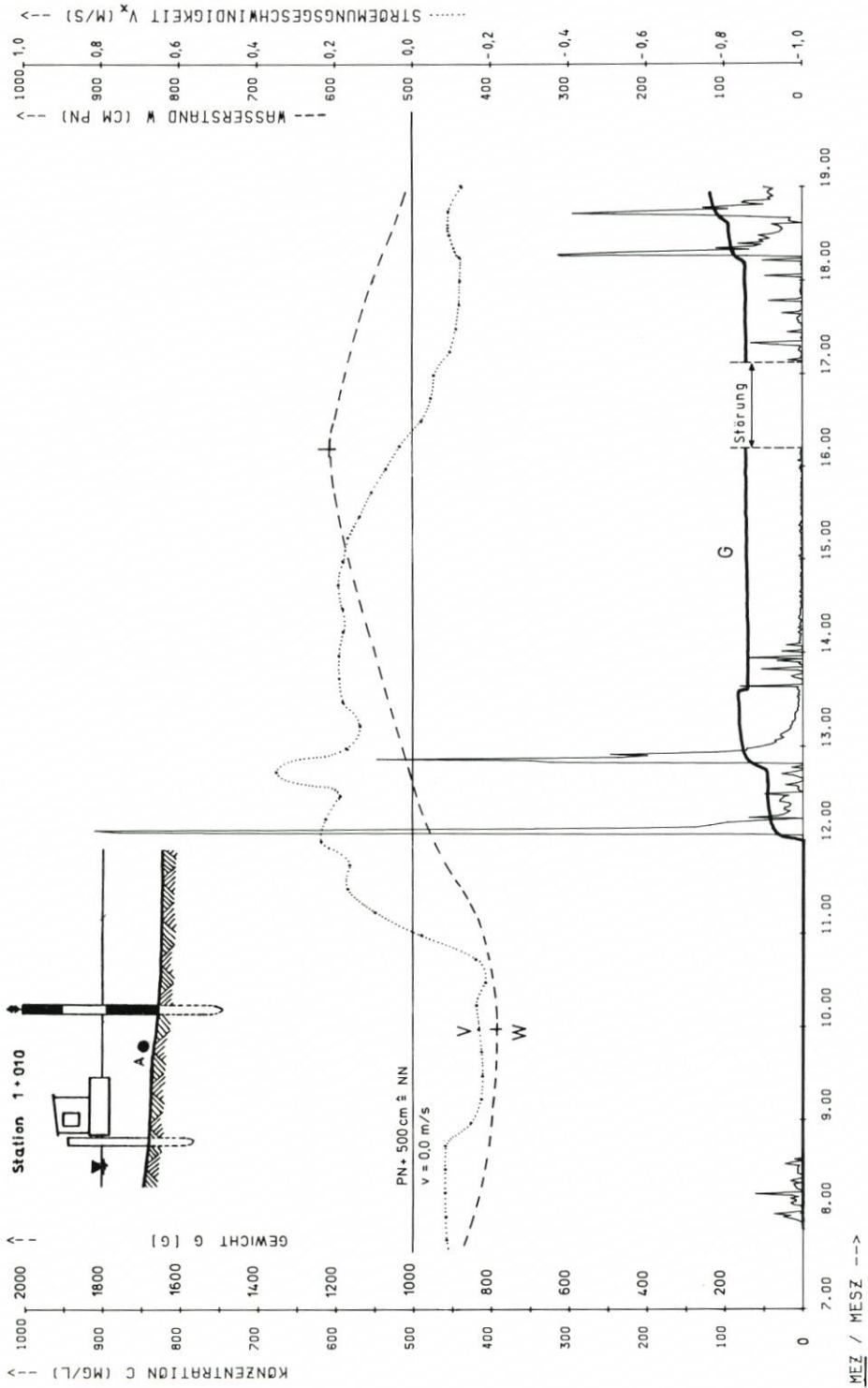


Abb. 14. Hauptversuche '84: Schwefelstoff-Ganglinie 18. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

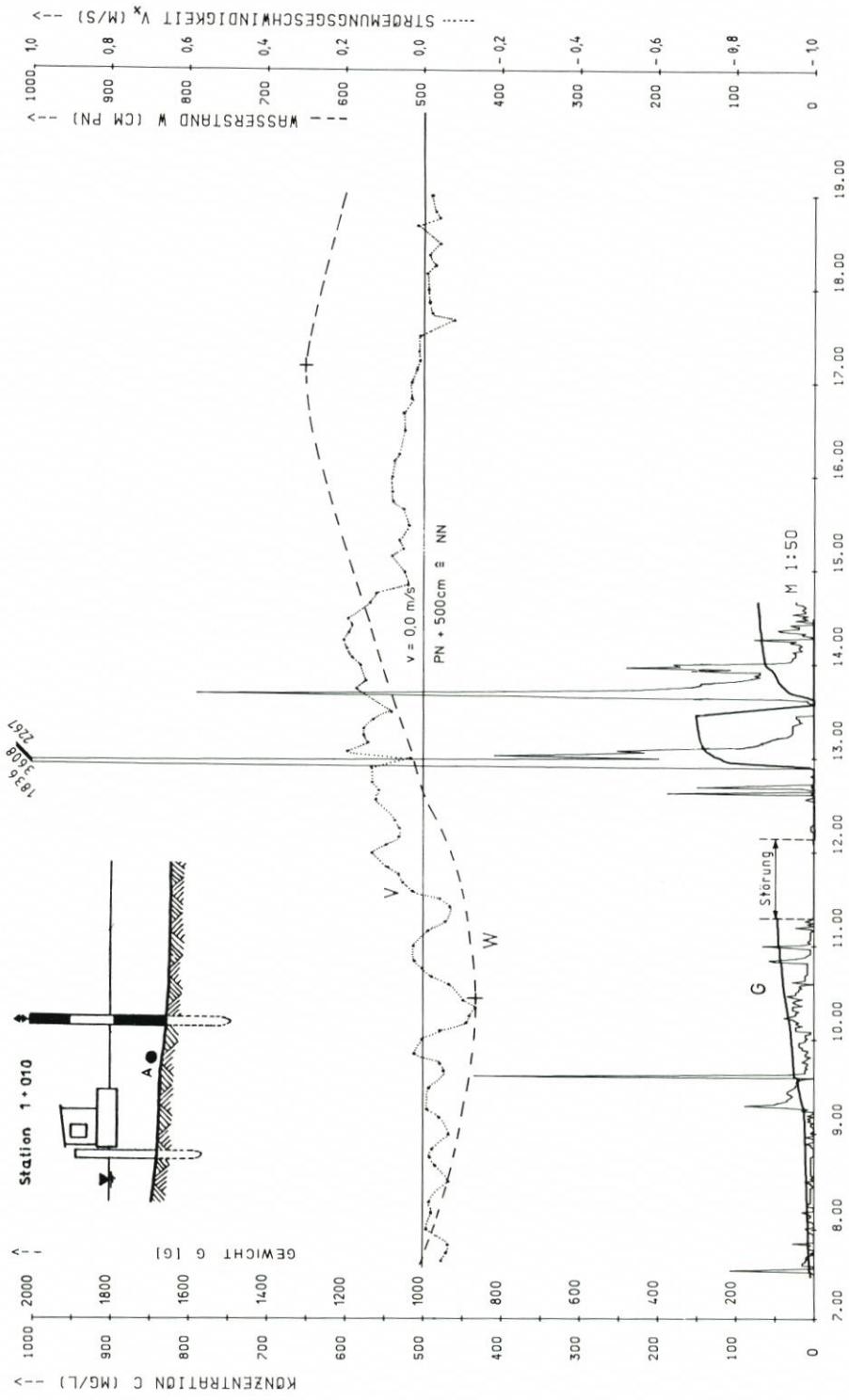


Abb. 15. Hauptversuche '84: Schwefelstoff-Ganglinie 19. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

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

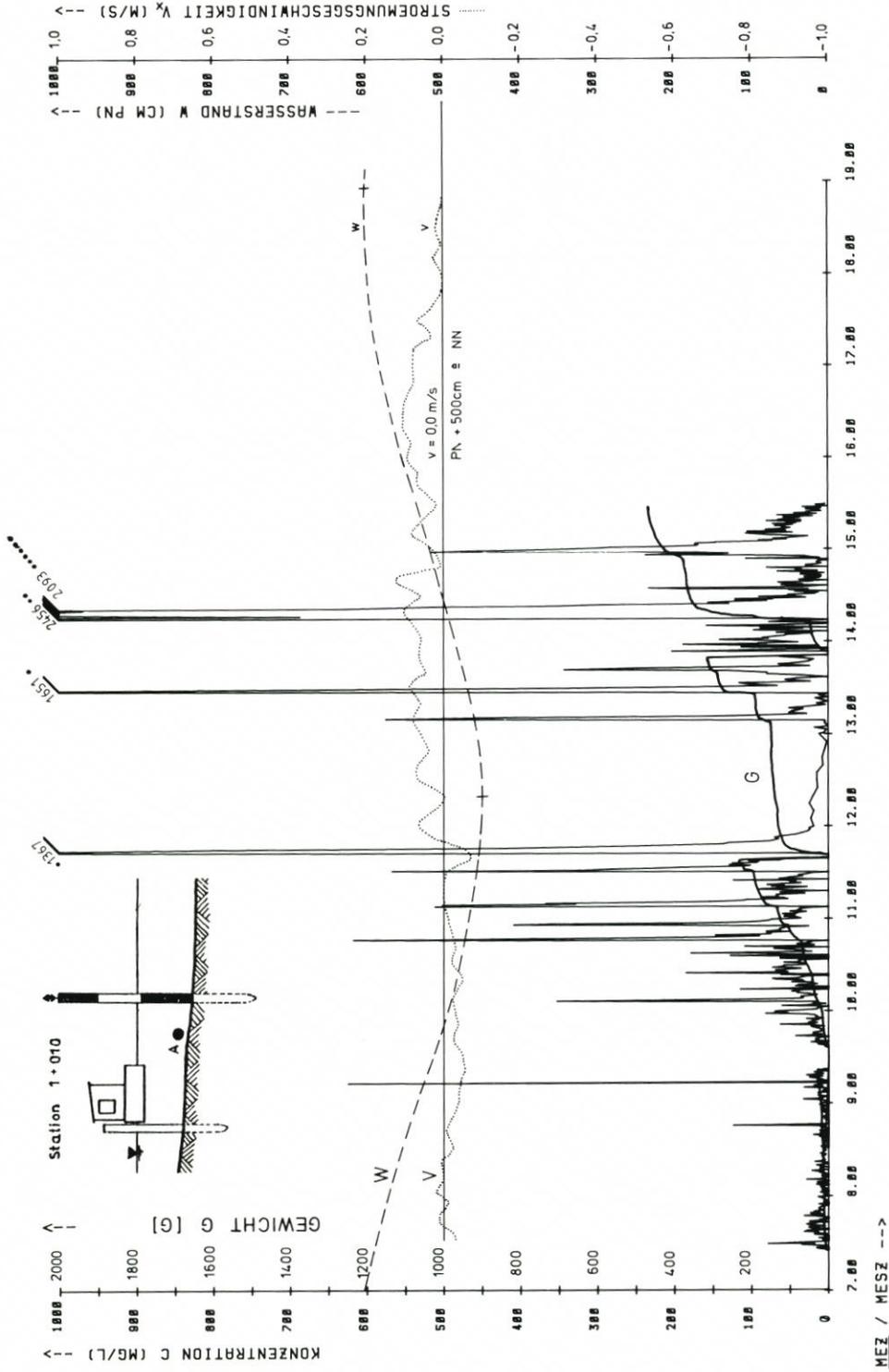


Abb. 16. Hauptversuche '84: Schwebstoff-Ganglinie 20. 9. 1984, Meßpunkt A, 0,5 m ü. Sohle

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

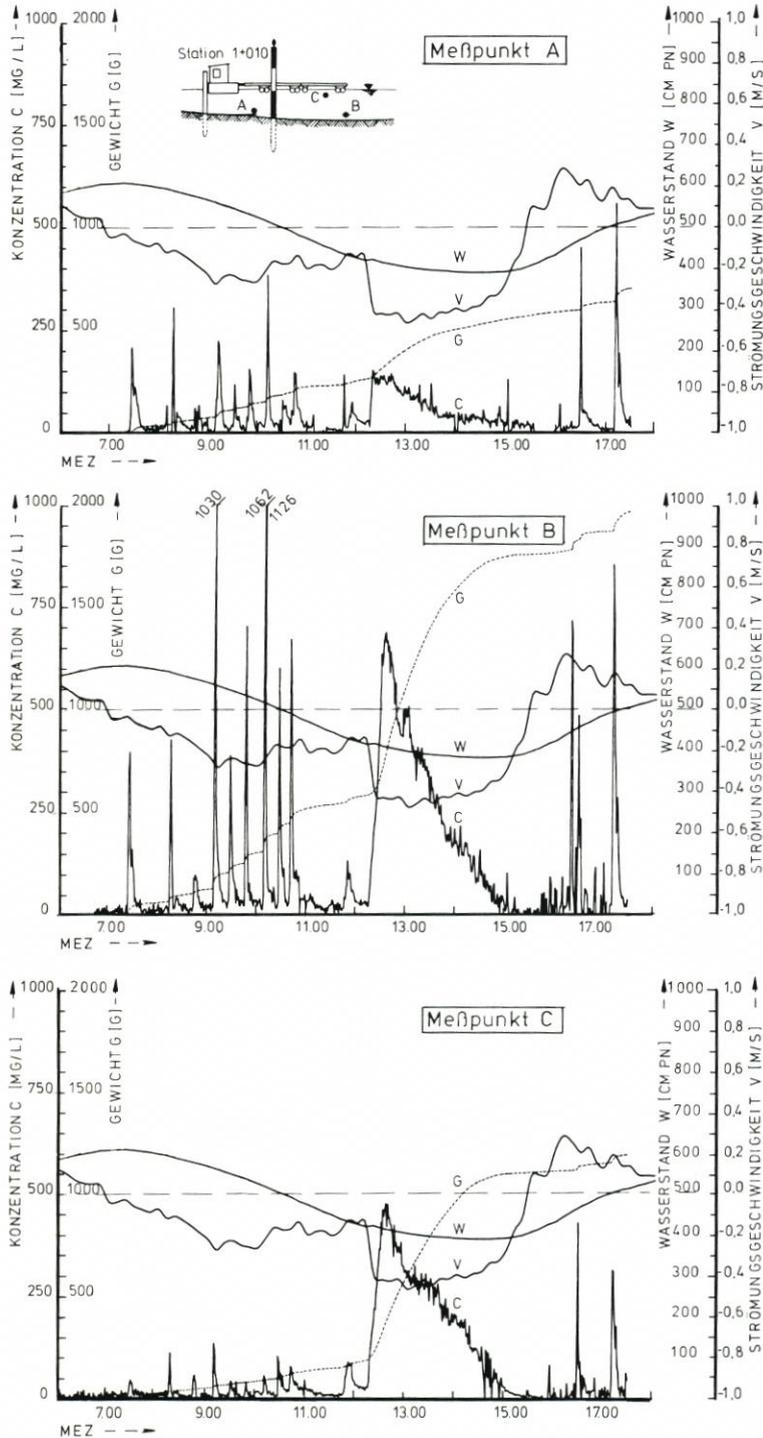


Abb. 17. Vergleich Meßpunkte A-B-C: Schwebstoff-Ganglinien und Gewichtssummenkurven vom 6. 9. 1984

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 Hafentechnischen 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

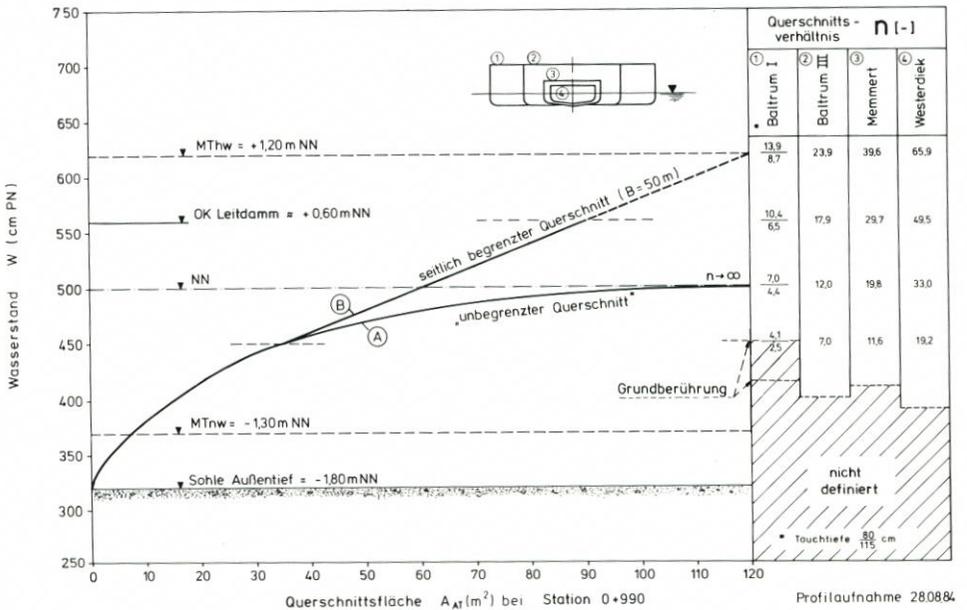


Abb. 18. Vertikale Aufweitung des Außentiefquerschnittes mit Querschnittsverhältnissen n [-]

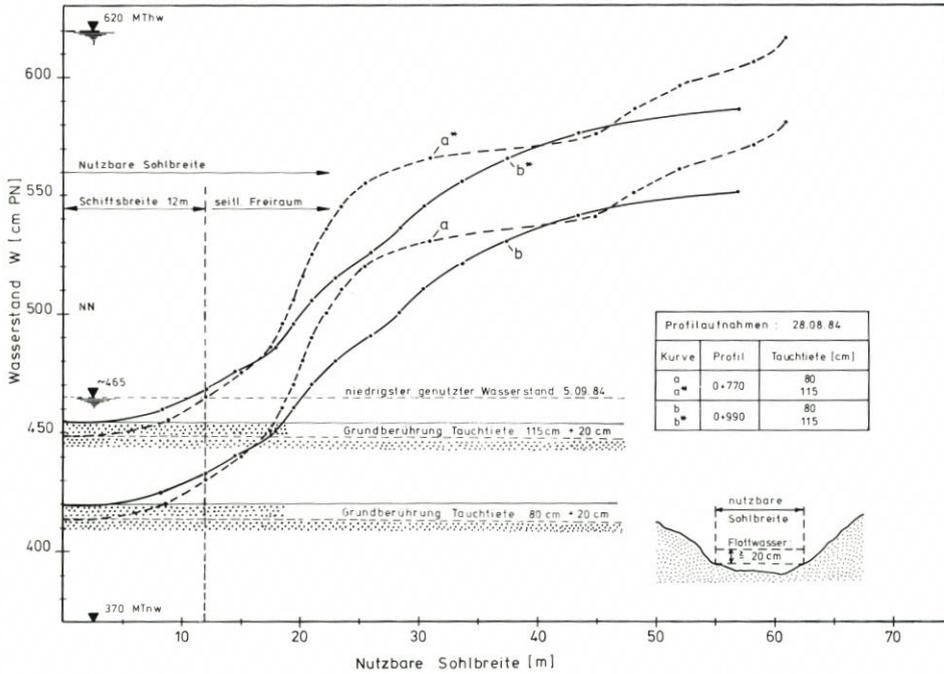


Abb. 19. Nutzbare Sohlbreiten für BALTRUM I unter Tideeinfluß in den Profilen 0 + 770 und 0 + 990

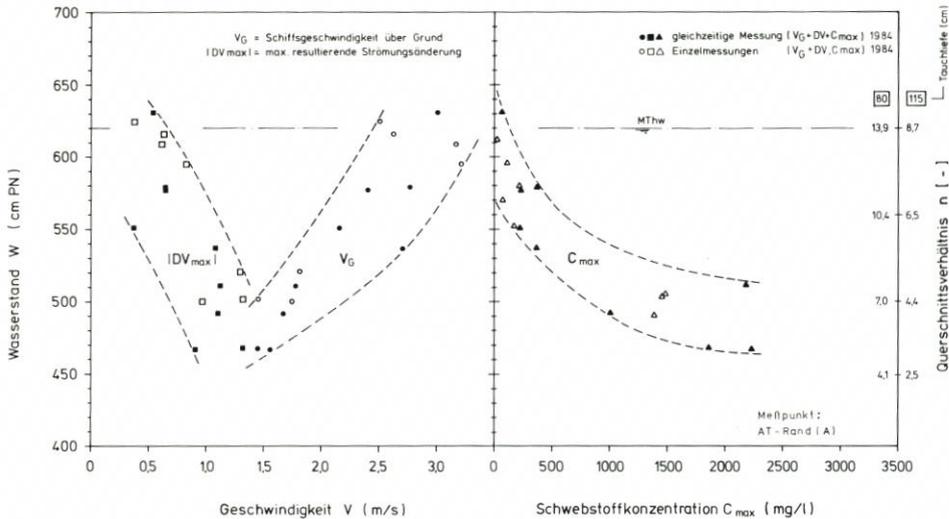


Abb. 20. Geschwindigkeit der BALTRUM I, resultierende Strömungsänderung und erzeugte Schwebstoffkonzentration

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.

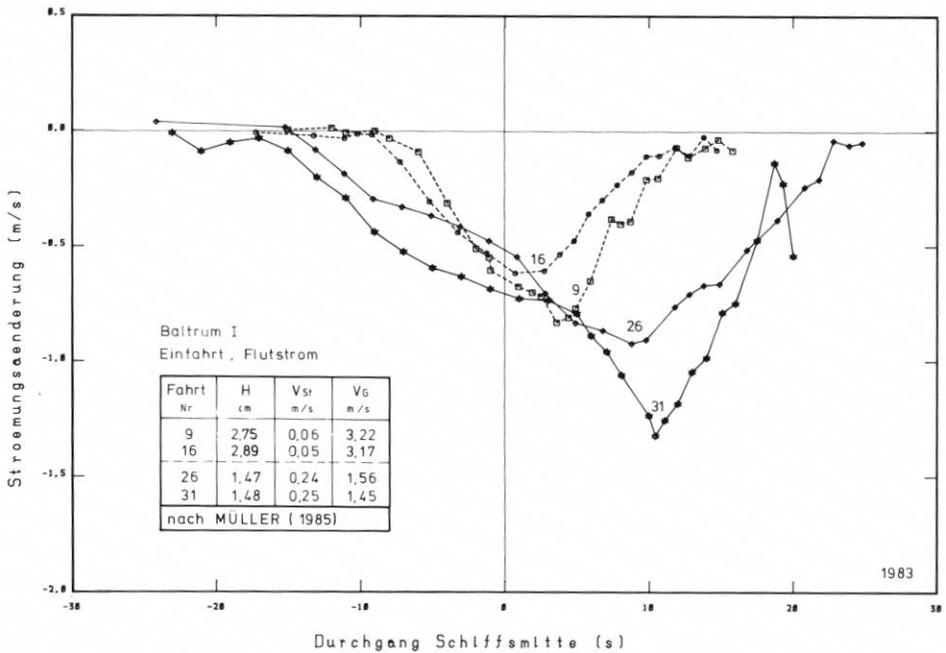


Abb. 21. Strömungsänderungen am Außentieftrand bei Passage der BALTRUM I

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

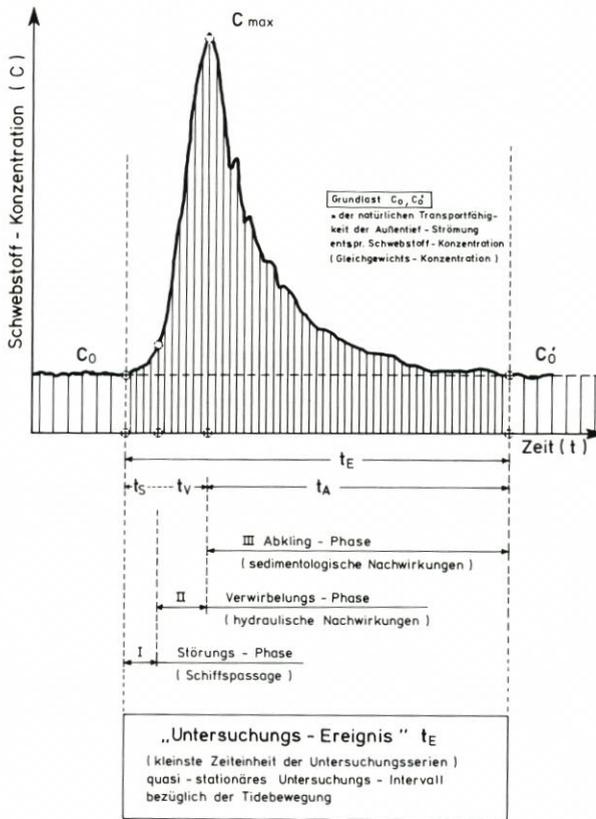


Abb. 22. Schematischer Verlauf der Schwebstoff-Ganglinie bei Schiffspassage

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 Wasserspiegelhöhe 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-

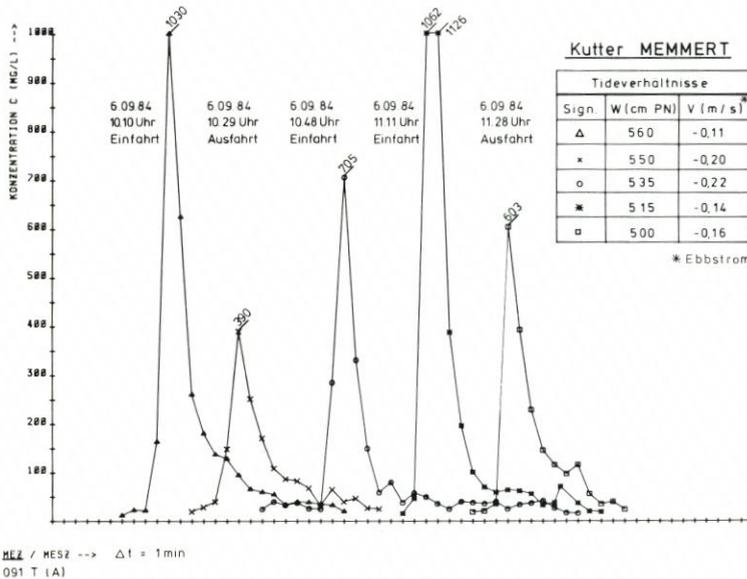
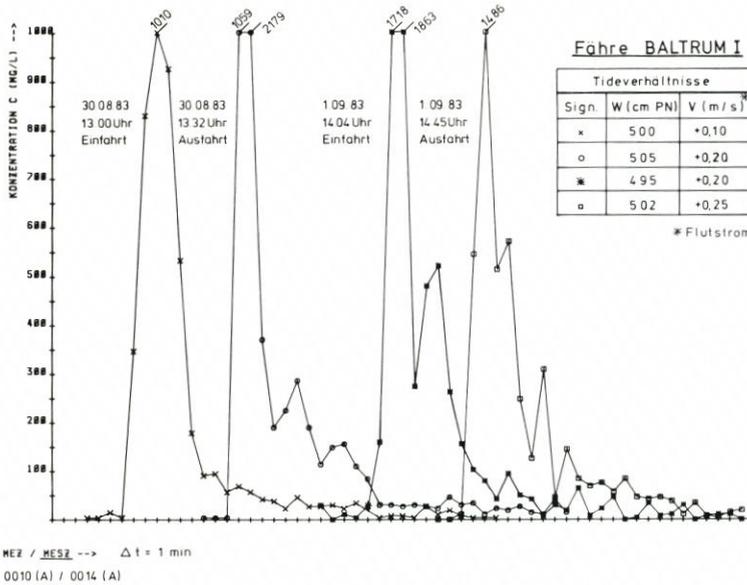


Abb. 23. Schifffahrtserzeugte Schwebstoff-Ganglinien / Beispiele für Meßpunkt B, Station 1 + 010

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.

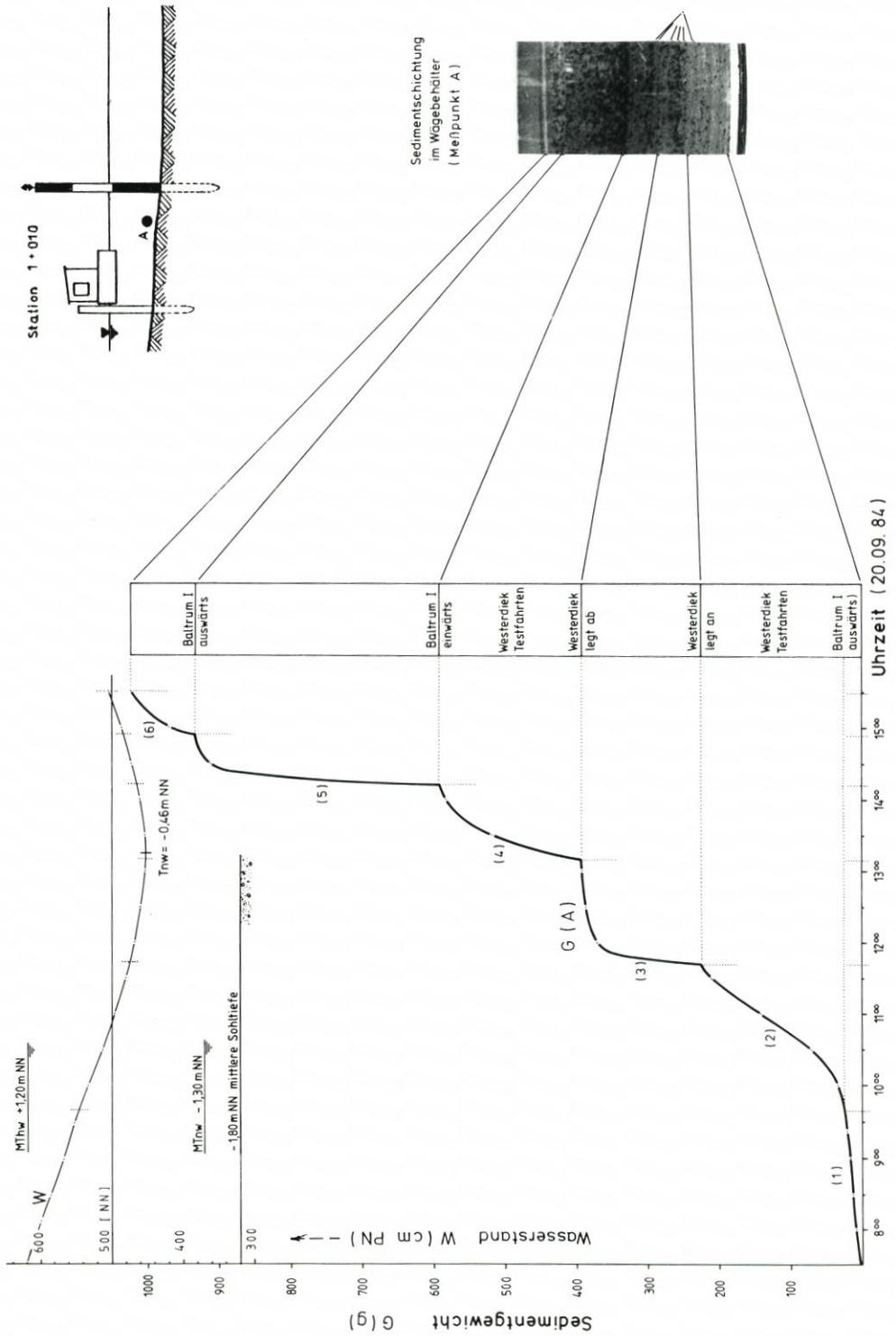


Abb. 24. Gewichtssummenkurven extrahierter Schwebstoffe unter besonderem Einfluß des Schiffsverkehrs / Meßpunkt A, 20. 9. 1984

Das besondere Augenmerk verdient die dem Gesamtzeitraum zugehörige Füllung des Wägebehälters 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 Auflentiefmitte 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 Auflentiefs 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

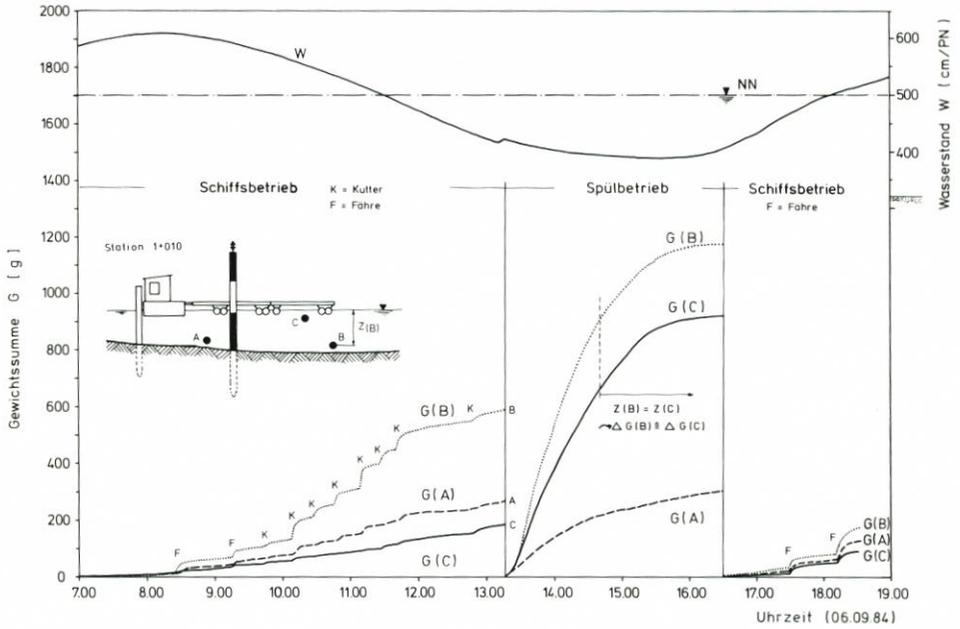


Abb. 25. Ereignisbezogener Vergleich der Gewichtssummenkurven / Meßpunkte A, B und C, 6. 9. 1984

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.

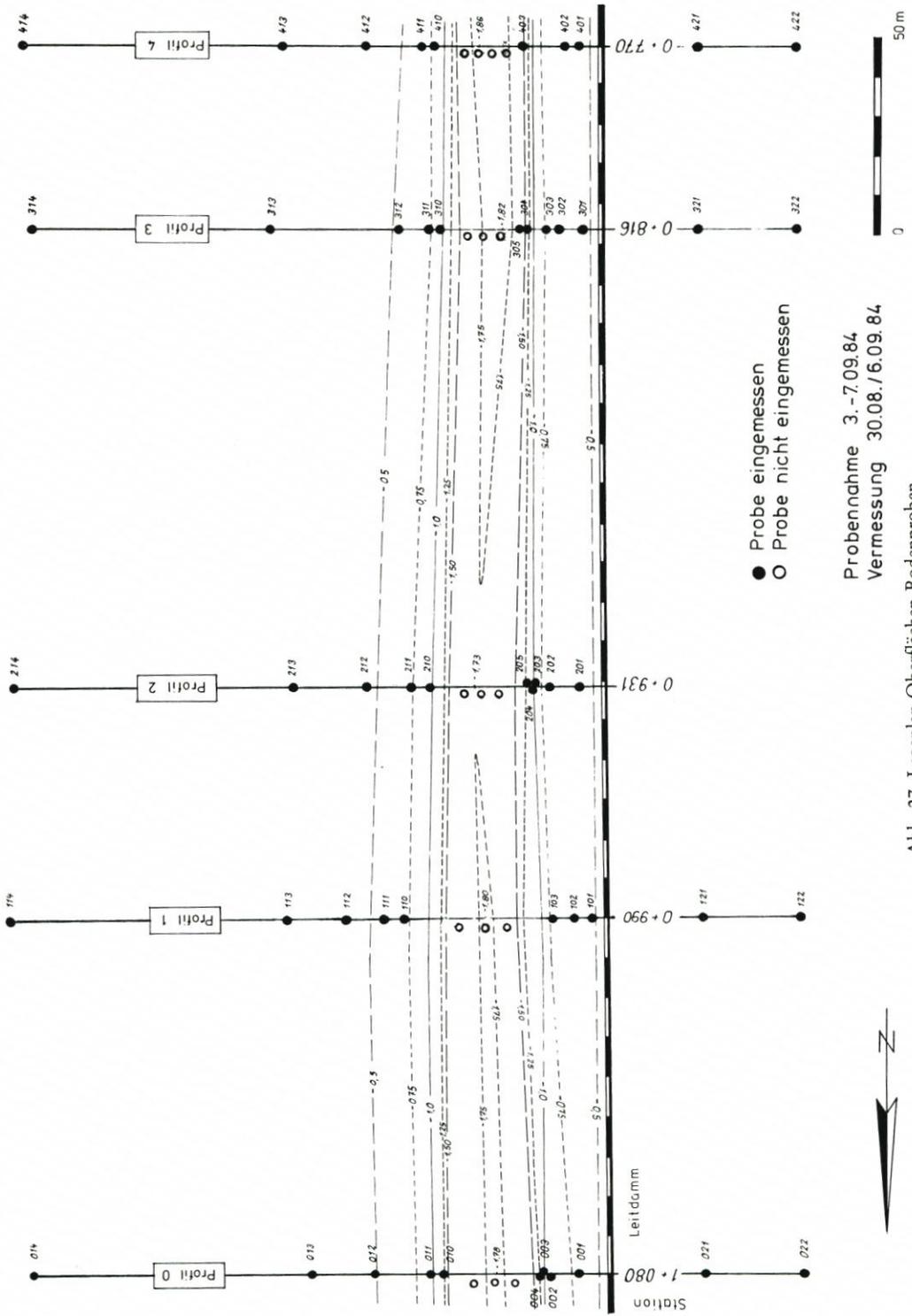
In der nachfolgenden Analyse von Sedimenten im Bereich der Meßstelle werden die hier getroffenen Annahmen und Feststellungen untermauert.

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 Schwebefindlicher Teilchen. Schlickige Außentiefiränder 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 Probemengen 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.



Probennahme 3.-7.09.84
Vermessung 30.08./6.09.84

Abb. 27. Lageplan Oberflächen-Bodenproben

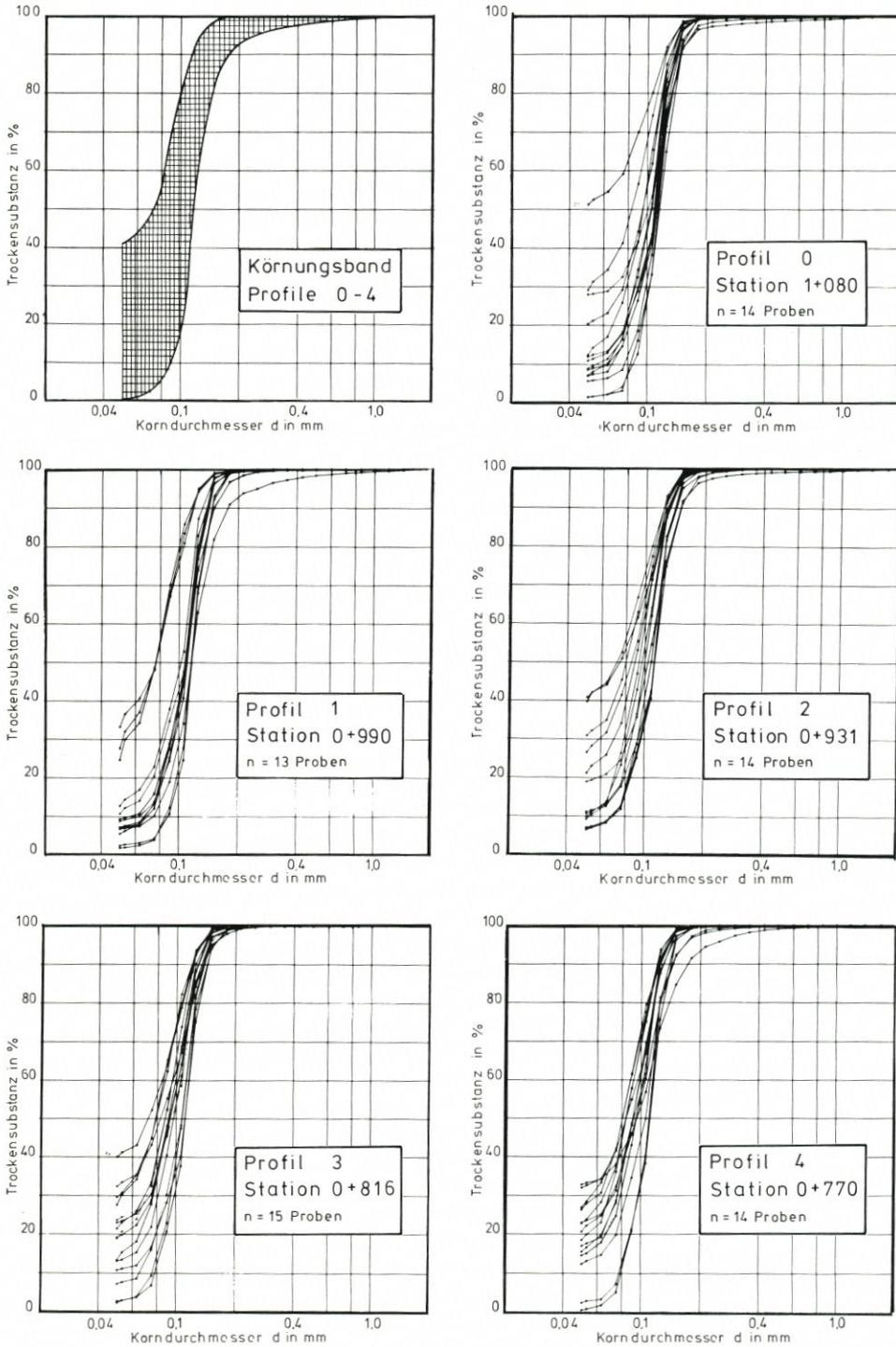


Abb. 28. Körnungsband und Korngrößenverteilung der Bodenproben als Σ Schlammkorn + Siebkorn (Def. Schlammkorn: $d \leq 0,05$ mm, Siebdurchgang nach ASTM)

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 Bühnen abgelagert werden können. Als derart geschützter Bereich käme hier die Wattfläche östlich des Leitdamms in Betracht, wobei die Außentief Rinne 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

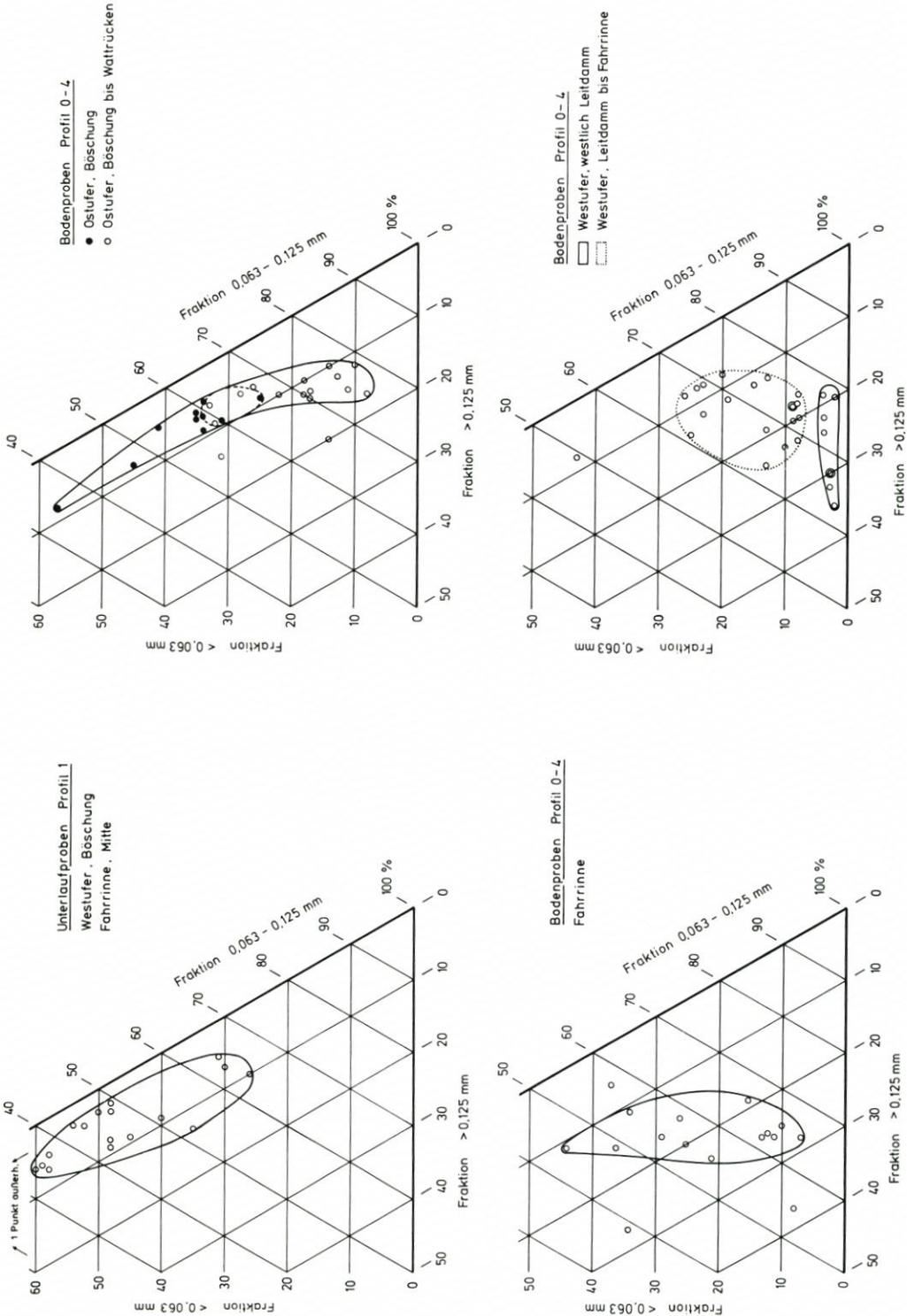


Abb. 29. Bodenproben in Dreikomponentendarstellung, gegliedert nach Entnahmebereichen

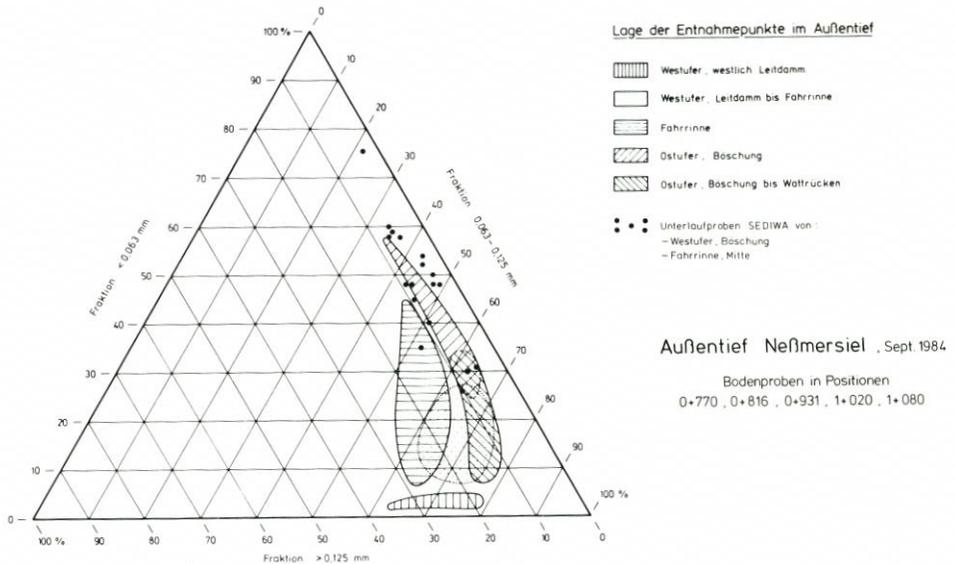


Abb. 30. Bodenzusammensetzungen im Außentiefbereich nach ausgewählten Profilen

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.

Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe (Abschlußbericht eines KFKI-Projektes)

VON WINFRIED SIEFERT und HORST LASSEN

Zusammenfassung

Im Rahmen des KFKI-Projektes „Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tideästuaren“ wurden vergleichende Untersuchungen in Ems, Weser und Elbe durchgeführt. Dabei wurden zum einen die Scheitelwasserstände bei mittleren Tiden und Sturmfluten in ihrer Entwicklung seit 1940 beleuchtet, zum anderen der Ablauf einzelner Sturmfluten analysiert. Die wichtigsten Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Vor der deutschen Nordseeküste sind in den letzten drei Jahrzehnten die MThw um rd. 5 cm gestiegen, die MTnw um denselben Betrag gefallen.
- An den Mündungen der drei Ästuarie haben Höhe und Häufigkeit von Sturmfluten merklich zugenommen; dies ist im übrigen überall an der deutschen Nordseeküste feststellbar: in drei Jahrzehnten 50 % mehr Tiden mit Sturm oder Starkwind bei Anstieg der mittleren Sturmfluthöhen um rd. 3,5 dm.
- In den Ästuaren selbst haben sich die Wasserstände jedoch nicht nur entsprechend der Entwicklung an der Küste erhöht, sondern noch ausgeprägter. Dies führte generell zu deutlich höheren Sturmfluthöhen in den oberen Tidebereichen.
- Die Eintrittszeiten der Tide- und Sturmflutscheitel im Ästuar selbst, nach Eintritt am Mündungspegel, zeigen ebenfalls Veränderungen, allerdings nur in der Weser oberhalb von Vegesack und in der Elbe oberhalb von Brokdorf. Hier sind die Scheitel zeitlich näher zusammengerrückt. Generell bedeutet dies: In den Flüssen sind Sturmfluten in den letzten Jahrzehnten häufiger, höher und „schneller“ geworden. Daraus ist allerdings keine Prognose abzuleiten.

Alle Angaben beziehen sich auf einen aktuellen Zustand um 1980. Wenn sich die Tideverhältnisse an der Küste weiter so verändern wie in den letzten Jahrzehnten, wird dies deutliche Auswirkungen auf den Energiehaushalt der Flüsse haben. Um sie dann feststellen und Schlüsse daraus ziehen zu können, sollten ähnliche Untersuchungen weitergeführt und die Methode verbessert werden.

Summary

Comparative measurements were made in the Ems, Weser and Elbe Estuaries in the context of the German Coastal Engineering Board sponsored research project "Generation and Course of Storm Surges in German Estuaries". In this study both mean high and low water levels by mean and storm tides since 1940 were investigated and isolated events evaluated.

The most significant results can be summarized as follows:

- *In the past three decades, the mean high water level has risen by approx. 5 cm and the mean low water level has fallen by this same amount.*
- *The heights and frequencies of storm surges at the estuary mouths have increased drastically; this phenomenon has occurred along the entire German North Sea coast. Within three decades the number of tides associated with storms or strong winds has increased by 50 % and the mean storm surge elevation by 35 cm.*
- *Increase in the water level within the estuaries is even more pronounced than the increases at the mouths. This has led to significantly higher storm surge heights in the upper estuary reaches.*
- *The storm surge propagation speed has also changed in the Weser upstream of Vegesack and in the Elbe upstream of Brokdorf. The phase lag between peak occurrences has decreased.*

In general this implies that during the past decades storm surges in German estuaries have become "faster", occur more frequently and have more extreme heights. Future developments can not however be extrapolated from this information.

Inhalt

- 1. Einführende Bemerkungen 134
 - 1.1 Veranlassung 134
 - 1.2 Untersuchungszeitraum, Betreuung und Förderung 135
 - 1.3 Arbeitsumfang 135
 - 1.4 Ziele 139
- 2. Aufbereitung und Bearbeitung des Datenmaterials 139
- 3. Tide- und Sturmflutentwicklung seit 1940 140
 - 3.1 Nordseeküste 140
 - 3.2 Ems 149
 - 3.3 Weser 150
 - 3.4 Elbe 153
- 4. Mittlere Tiden und Sturmfluten 1976 und 1981 156
 - 4.1 Ems 156
 - 4.2 Weser 158
 - 4.3 Elbe 163
- 5. Schriftenverzeichnis 167
 - Symbolverzeichnis 168
 - Pegelverzeichnis 168

1. Einführende Bemerkungen

1.1 Veranlassung

Im Laufe der letzten drei Jahrzehnte hat eine Entwicklung stattgefunden, deren Ursachen und deren weiterer Fortgang bis heute nicht erforscht sind:

Sturmfluten, die im Mündungsgebiet der deutschen Tideflüsse nur mittlere Höhen erreichen und dort als unbedeutend angesehen werden, laufen im oberen Tidebereich dieser Flüsse zu Höhen auf, die in früheren Jahren wesentlich seltener vorgekommen sind. In der Elbe dokumentiert sich dies z. B. durch eine Zunahme der mittleren HThw-Höhen-Differenz

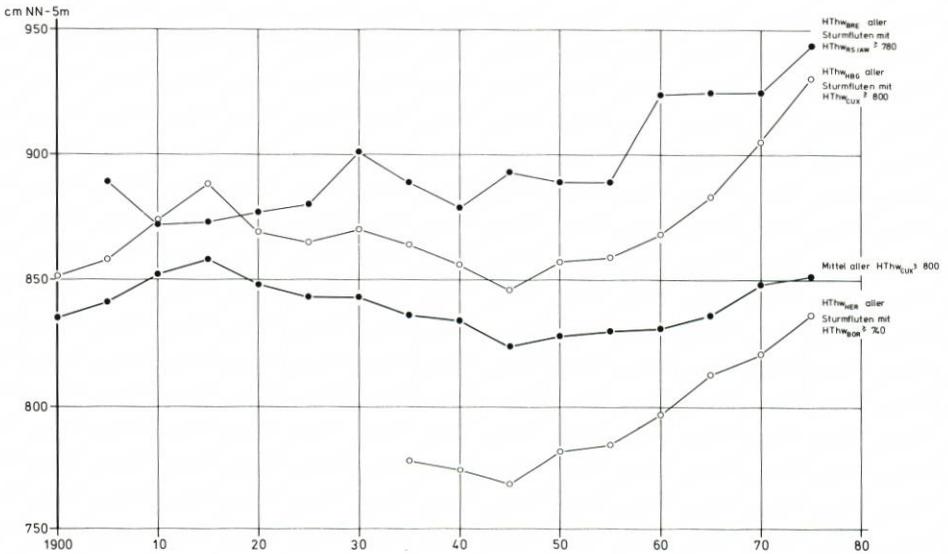


Abb. 1. Entwicklung gemittelter Sturmflutwasserstände 1900 bis 1980 in Ems, Weser und Elbe

Cuxhaven-Hamburg um rd. 0,5 m innerhalb von 30 Jahren. (Als HThw wird hier der Sturmflutscheitel bezeichnet.) Gleiche Tendenzen sind aus Weser und Ems bekannt: Sturmfluten, deren HThw $\geq 1,5$ m über MThw an der Mündung auflief, erreichten dort die auf Abb. 1 wiedergegebenen Werte.

Damit werden bei den recht häufigen Windlagen, die diese Sturmfluten erzeugen, zunehmend kritische Wasserstände in den oberen Tidegebieten überschritten. Solange der (möglicherweise sich ändernde) Ablauf dieser Sturmfluten nur wenig bekannt ist, kann über die weitere Entwicklung keine Aussage gemacht werden. Sie ist jedoch im Hinblick auf den Vorhersagebedarf von eminenter Bedeutung.

Bevor die zukünftigen Veränderungen abgeschätzt werden können, ist eine gründliche Analyse der bisherigen Entwicklung erforderlich. Dazu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag liefern.

1.2 Untersuchungszeitraum, Betreuung und Förderung

Die folgenden Untersuchungen wurden als Projekt des KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) von Mitte 1983 bis Mitte 1985 durchgeführt und von einer Projektgruppe begleitet, deren Mitglieder*) nicht nur die wissenschaftliche Arbeit förderten, sondern auch für die Bereitstellung umfangreichen Datenmaterials sorgten.

Die Arbeiten wurden finanziell durch Mittel des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und durch Eigenmittel der beteiligten Behörden und Dienststellen unterstützt.

1.3 Arbeitsumfang

Tide- und Sturmflutveränderungen mit erkennbarem Trend sind in Tideflüssen zurückzuführen auf Veränderungen in den Flüssen selbst oder unterhalb der Seegrenze, also in der Nordsee. Da Ems, Weser und Elbe in den letzten Jahrzehnten ausgebaut wurden, läge es nahe, damit die Veränderungen zu erklären, wenn sich nicht durch zeitgleiche, geradezu plötzliche Trendänderungen in allen Flüssen sowie durch meßbare Veränderungen an den Mündungsspegeln Hinweise häuften, die auch auf Einflüsse von See hindeuten. Es müssen also neben den Wirkungen von Baumaßnahmen auch mögliche Tide- und Windstauänderungen in der Deutschen Bucht und in der Nordsee in die Betrachtungen einbezogen werden.

Wenn das Problem umfassend bearbeitet werden sollte, müßten meteorologische und hydrologische Daten vom Eingang in die Nordsee (etwa Island/Färöer), aus der Nordsee selbst und von ihren Rändern herangezogen werden. Da dies in absehbarer Zeit nicht möglich sein wird, mußte die Bearbeitung auf ein Teilgebiet beschränkt werden. Sie konzentriert sich

*) Der Projektgruppe gehörten an:

RD Dipl.-Oz. ANNUTSCH, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg

BD Dipl.-Ing. BLIESENER, Wasserwirtschaftsamt Bremen (ab 1985)

BD Dipl.-Ing. DIETZE, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich

RD Dr. HOFFMANN, Seewetteramt, Hamburg

RBD Dipl.-Ing. SCHULZ-KOSEL, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel

Prof. Dr.-Ing. SIEFERT, Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg, Cuxhaven (Obmann)

BD Dr.-Ing. STRÖHMER, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

LBD Dipl.-Ing. WÖBKEN, Wasserwirtschaftsamt Brake

OBRDr.-Ing. WUNDES, Wasserwirtschaftsamt Bremen (bis 1985)

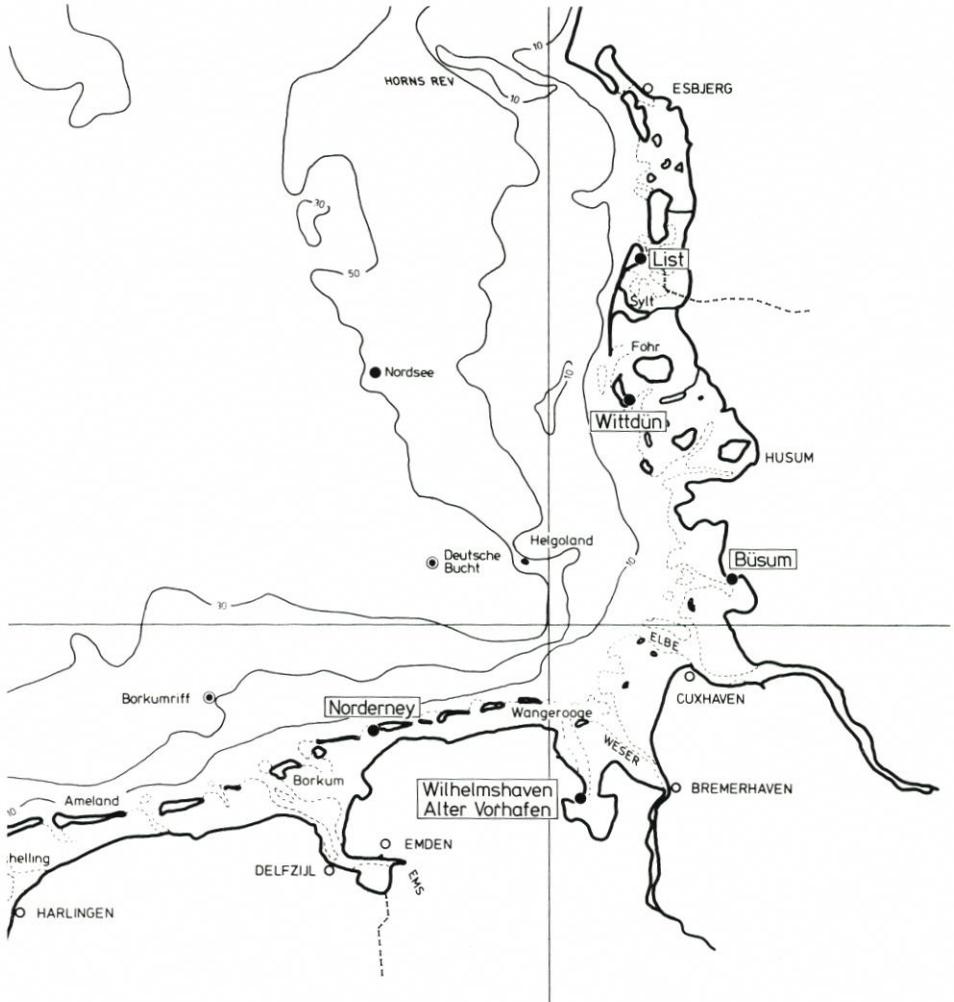


Abb. 2. Deutsche Bucht mit den untersuchten Küstenpegel-Standorten

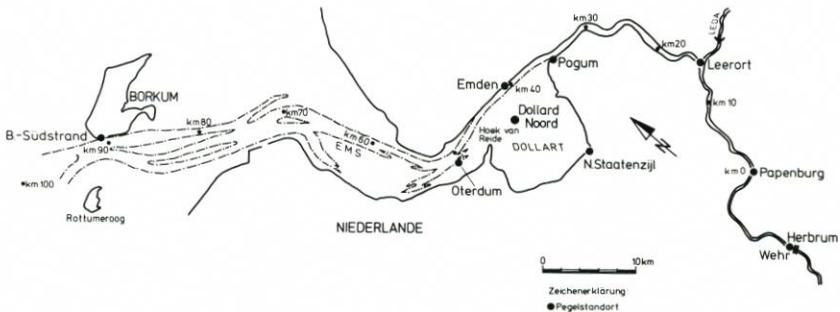


Abb. 3. Lageplan der Ems

Tabelle 1. Vergleiche zwischen Ems, Weser und Elbe

	Ems	Weser	Elbe
künstl. Tidegrenze bei	Herbrum	Bremen-Hemelingen	Geesthacht
km vom Mündungspegel	107	119	141
mittl. Oberwasserabfluß (rd.)	75 m ³ /s	320 m ³ /s	720 m ³ /s
Mündungspegel	Borkum-Südstrand	LT. Alte Weser	Cuxhaven
MThb am Mündungspegel (um 1980)	2,3 m	2,85 m	3,05 m
MThb am Pegel der Tidegrenze (um 1980)	2,1 m	3,8 m	1,5 m
mittl. Eintrittszeitdifferenz (um 1980) der Thw von der Mündung zur Tidegrenze	3.40 h	3.15 h	5.00 h
allgemeiner Thb-Verlauf	stromauf erst zu-, dann abnehmend	mehrfach zwischen Zu- und Abnahme wechselnd	mehrfach zwischen Zu- und Abnahme wechselnd
typischer HThw-Verlauf	steigend bis Leerort, dann fallend	leicht steigend bis Tidegrenze (mit Min. bei BRA-ELS)	steigend bis Hamburg, dann fallend*)
bedeutendste Häfen	Emden	Bremerhaven/Bremen	Hamburg
stromauf vom Mündungspegel gelegen (rd.)	50 km	50/100 km	100 km
Fahrwassertiefe unter KN (um 1980)	12,5 m bis Leichterplatz 8,5 m bis EMD	12,0 m bis BHV 11,0 m bis NOR 9,0 m bis BRE	13,5 m bis HBG
Besonderheiten des Ästuars	Dollart als große seitliche Meeresbucht	oberhalb von BHV tiefe Rinne, wenig Vorland	Stromspaltungsgebiet in HBG

*) bis 1962 steigend bis STA-SUL, dann fallend

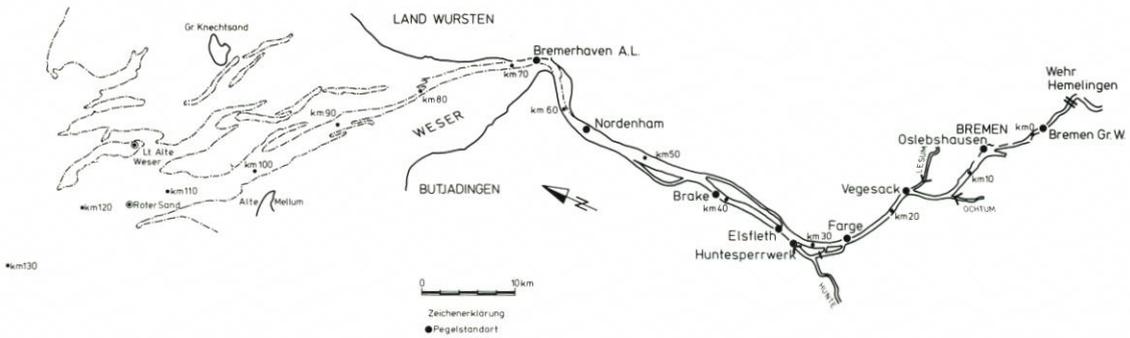


Abb. 4. Lageplan der Weser

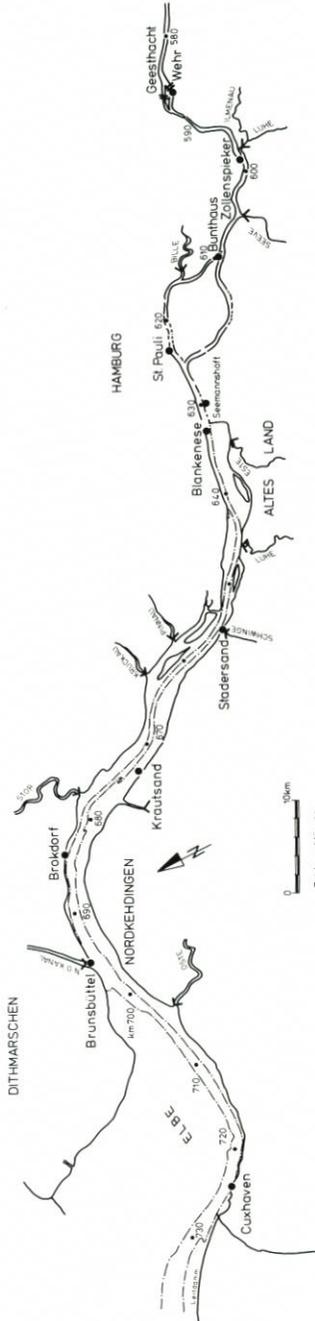


Abb. 5. Lageplan der Elbe

also auf die Deutsche Bucht und deren Ästuar. Nach dem Projektvorschlag von 1982 sollten Daten von relevanten Stationen analysiert werden, die ausgewählt werden sollten aus

- etwa 7 meteorologischen Stationen (Wind und Luftdruck)
- etwa 5 Pegeln je Tidefluß (Scheitelwerte, Tidekurven)

– 5 weiteren Pegeln an der Küste oder im Küstenvorfeld (Abb. 2 zeigt die Stationen Norderney, Wilhelmshaven/Alter Vorhafen, Büsum, Wittdün und List).

Darüber hinaus war vorgesehen, Ergebnisse aus dem 1983 abgeschlossenen KFKI-Projekt „Tide und Windstau im Küstenvorfeld“ (SIEFERT und LASSEN, 1985), aus Untersuchungen am Leichtweiß-Institut (FÜHRBÖTER und JENSEN, 1985) und aus Energiebetrachtungen (SIEFERT, 1984) mit einzubeziehen.

Ein Teil des Programms wurde im Laufe der Arbeiten modifiziert. So wurde u. a. die Anzahl der berücksichtigten Pegelstationen erhöht. Herangezogen wurden in der

E m s: Herbrum, Papenburg, Leerort, Pogum, Emden, Oterdum, N. Staatenzyl (Abb. 3)

W e s e r: Weserwehr UW, Bremen/Gr. Weserbr., Oslebshausen, Vegesack, Farge, Elsfleth, Hüntesperrwerk, Brake, Nordenham, Bremerhaven A. L. (Abb. 4)

E l b e: Geesthacht UW, Zollenspieker, Bunthaus, Hbg.-St. Pauli, Seemannshöft, Blankenese, Stadersand, Krautsand, Brokdorf, Brunsbüttel (Abb. 5)

Dafür wurde der meteorologische Teil der Arbeit verringert, weil auf eine neue Veröffentlichung des Seewetteramtes zurückgegriffen werden konnte (DUENSING et al., 1985).

Die Projektgruppe hält energetische Untersuchungen zum Sturmflutablauf für einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Geschehens. Die dazu durchgeführten Analysen sind jedoch noch nicht veröffentlichungsreif, zumal die o. g. Arbeit des Verfassers Ungenauigkeiten und Fehler enthält, worauf der Schriftleiter dieser Schriftenreihe, Herr Dr.-Ing. GÖHREN, freundlicherweise hingewiesen hat.

1.4 Ziele

Als erstes Ziel der Untersuchungen wurde in der Projektplanung die Darlegung der Sturm- und Sturmflutentwicklung in der Deutschen Bucht in den letzten Jahrzehnten gesehen. Zweites Ziel der Untersuchungen sollte sein, den Ablauf von Sturmfluten zu erkennen und daraus Rückschlüsse auf Veränderungen dieses Ablaufes in den Flüssen in den letzten Jahren sowie Folgerungen für zukünftige Entwicklungen zu ziehen. Außerdem sollte die Arbeit auch die Basis zur Verbesserung der Sturmflutvorhersagen erweitern.

2. Aufbereitung und Bearbeitung des Datenmaterials

Die statistische Bearbeitung gliedert sich in drei Teile, und zwar

a) die Ermittlung der **Ä n d e r u n g** der mittleren **T i d e w a s s e r s t ä n d e** an der Küste, bei der auf 10- und 19jährige Mittel und auch auf Arbeiten im Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig zurückgegriffen werden konnte. Hier wurden u. a. für die Pegel Borkum-Südstrand, Norderney, Wilhelmshaven, Cuxhaven, Büsum und List die Säkularrends ermittelt (JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER und JENSEN, 1985). Beispiel:

Der Säkularanstieg im Jahr 1904 ergibt sich aus dem Anstieg der Regressionsfunktion der Zeitreihe von 1855 bis 1904 (= 50 Jahre), extrapoliert auf einen Zeitraum von 100 Jahren. Der Säkularanstieg im Jahr 1905 ergibt sich entsprechend aus der Zeitreihe von 1856 bis 1905 (= 50 Jahre). Diese Rechenoperation wird dann bis zum Ende der Zeitreihe, also bis zum Jahr 1983, wiederholt.

Für die Säkulartrendfunktion mit einer Gruppengröße von $N = 25$ Jahren gilt das entsprechende (1855 bis 1879 = 25 Jahre, extrapoliert auf 100 Jahre).

b) die Ermittlung der **S t u r m f l u t e n t w i c k l u n g** an der Küste, und zwar für die Pegel

Borkum-Südstrand, Wilhelmshaven, Alte Weser/Roter Sand, Cuxhaven und Wittdün mit den Winddaten der Station Scharhörn, die sich als repräsentativ für die Deutsche Bucht erwiesen haben.

c) die Analyse der Höhen und Eintrittszeiten der Sturmflutscheitel in den Flüssen seit 1941, und zwar als Differenzen zu den Daten der Mündungspegel. Es sind für die

Em s : Borkum zu Emden, Leerort, Papenburg, Herbrum

Weser : Roter Sand/Alte Weser zu Bremerhaven, Brake, Vegesack, Bremen*)

Elbe : Cuxhaven zu Brokdorf, Glückstadt, Schulau, Hamburg*, Zollenspieker, Geesthacht

Die Ergebnisse wurden zu 10jährigen übergreifenden Mitteln zusammengefaßt. Alle Höhen sind auf den Horizont NN -5 m bezogen worden. (Das Pegelnull [PN] weicht ja bekanntlich an vielen Orten einige Zentimeter von dieser Kote ab.)

Die deutschen Ästuarie, in die heute noch – nach der Absperrung der Eider und der größeren Nebenflüsse – Sturmfluten eindringen können, sind auf Abb. 3 bis 5 dargestellt. Tab. 1 zeigt einige geographische, topographische und hydrologische Vergleiche. Erläuterungen dazu gibt auch Abb. 6.

3. Tide- und Sturmflutentwicklung seit 1940

3.1 Nordseeküste

Verschiedene Veröffentlichungen haben in den letzten Jahren aufgezeigt, wie sich die mittleren Tideverhältnisse und das Sturmflutgeschehen während der vergangenen Jahrzehnte verändert haben. Da die Entwicklungen überall an der Küste der Deutschen Bucht gleichsinnig aufgetreten sind, können sie mit den Daten weniger Pegel dokumentiert werden, wobei die Mündungspegel der drei Ästuarie eingeschlossen werden (Tab. 2). Aufgelistet sind 10jährige übergreifende Mittel. Die Daten stammen aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern der entsprechenden Jahre.

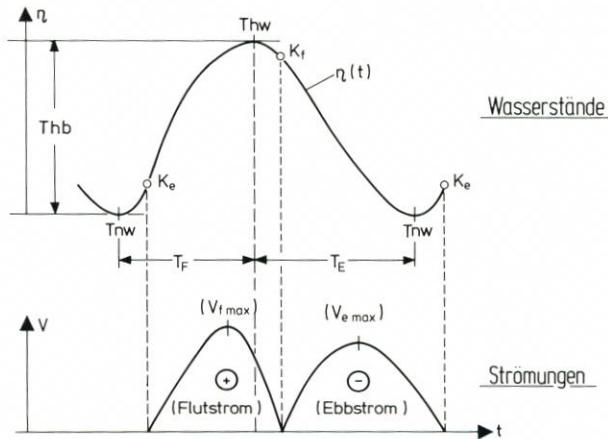


Abb. 6. Meßbare Tideparameter

* Wenn Bremen genannt, dann stets Gr. Weserbrücke
Wenn Hamburg genannt, dann stets St. Pauli

Die Zahlen der Tab. 2 zeigen folgendes: In den letzten rd. drei Jahrzehnten sind die MThw etwa um 5 cm (genau: 2 bis 11 cm) gestiegen, die MTnw aber etwa um 5 cm (genau: 1 bis 10 cm) gefallen; Ausnahmen bilden hier Borkum und die Wesermündung mit einem MTnw-Anstieg von 2 bis 4 cm.

Auf der Basis derselben Daten, jedoch weiter zurückreichender Reihen, hat JENSEN (1984) die auf Säkula hochgerechneten Thw- und Tnw-Änderungen und deren Trends für elf Küstenpegel im einzelnen ermittelt (Tab. 3).

Er kommentiert u. a. wie folgt:

„Die MTnw- und MThw-Zeitreihen zeigen an den ausgewählten Pegelstationen einschließlich einiger markanter Entwicklungen und Ergebnisse innerhalb der Zeitreihen eine gute Übereinstimmung. Die Varianz bzw. Standardabweichung der MTnw-Zeitreihen ist wesentlich größer als die der MThw-Zeitreihen. Der Mittelwert des Säkularanstiegs der MTnw-Zeitreihen aller untersuchten Pegel, die eine Zeitreihe von mehr als 80 Jahren aufweisen, beträgt $6 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}/100$

Tabelle 2. Veränderung 10jähriger Mittel der MThw und MTnw an der Nordseeküste

Pegel	MThw/MTnw in cm NN - 5 m der Dekade							
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	(1976/84)
Borkum-Südstrand	592/373	593/375	593/372	595/373	599/377	604/377	599/372	604/375
Norderney	611/375	611/378	610/374	610/374	613/377	614/378	613/373	
Wilhelmshaven	662/302	662/303	664/299	666/298	670/300	670/299	669/294	
Alte Weser/ Roter Sand	629/343	618/346	622/346	624/341	631/349	630/349	631/347	
Cuxhaven	638/353	637/356	637/352	638/351	643/355	644/354	643/348	649/347
Büsum	647/328	645/329	646/327	648/326	651/328	652/328	653/326	
Wittdün	602/366	604/368	605/363	607/361	612/364	613/362	613/356	
List	569/405	570/406	570/402	570/400	573/402	572/401	572/397	
	Veränderung in cm gegenüber dem Mittel 1941/50							
Borkum-Südstrand	+ 1/+2	+1/-1	+3/-	+ 7/+4	+12/+4	+ 7/- 1	+12/+2	
Norderney	- /+3	-1/-1	-1/-1	+ 2/+2	+ 3/+3	+ 2/- 2		
Wilhelmshaven	- /+1	+2/-3	+4/-4	+ 8/-2	+ 8/-3	+ 7/- 8		
Alte Weser/ Roter Sand	-11/+3	-7/+3	-5/-2	+ 2/+6	+ 1/+6	+ 2/+ 4		
Cuxhaven	- 1/+3	-1/-1	- /-2	+ 5/+2	+ 6/+1	+ 5/- 5	+11/-6	
Büsum	- 2/+1	-1/-1	+1/-2	+ 4/-	+ 5/-	+ 6/- 2		
Wittdün	+ 2/+2	+3/-3	+5/-5	+10/-2	+11/-4	+11/-10		
List	+ 1/+1	+1/-3	+1/-5	+ 4/-3	+ 3/-4	+ 3/- 8		

Tabelle 3. Mittlerer Säkularanstieg für 11 Nordsee-Küstenpegel (JENSEN, 1984)

Zeitreihe	Anzahl der Jahre	Mittlerer Säkularanstieg		
		MTnw cm/100 Jahre	MThw cm/100 Jahre	MThb cm/100 Jahre
gesamte Zeitreihe mit N>80	>80	6 ± 10	23 ± 4	17 ± 12
1884 bis 1983	100	3 ± 16	25 ± 4	22 ± 16
1934 bis 1983	50	$- 4 \pm 11$	33 ± 9	35 ± 15
1959 bis 1983	25	-13 ± 30	64 ± 15	76 ± 30

Jahre; der Mittelwert für die MThw-Zeitreihen ergibt einen Säkularanstieg von $23 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}/100$ Jahre. Die statistische Signifikanz der berechneten Säkularanstiegswerte ist bei den MThw-Zeitreihen wesentlich größer.

Die Säkulartrenduntersuchungen mit einer Gruppengröße von $N = 25$ Jahren heben verfahrensgemäß Veränderungen in der Entwicklung der Zeitreihen stärker hervor. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit $N = 25$ Jahren deuten darauf hin, daß die Entwicklung im Bereich der MThw-Zeitreihen noch nicht abgeschlossen ist.“

Diese Darstellung ist sicherlich möglich, auch wenn sie eine Extrapolation eines 25 Jahre langen Zeitraumes auf das Vierfache beinhaltet. Es bleibt – in Übereinstimmung mit Tab. 2 – die Tatsache, daß in den letzten Jahrzehnten vor der deutschen Nordseeküste die MThw stärker als zuvor angestiegen, die MTnw abgefallen und damit die MThb größer geworden sind. Daran ändert auch nichts, daß die Wechsel der Pegelstandorte in Borkum und Norderney unberücksichtigt blieben.

JENSENS Ergebnisse können aber auch anders interpretiert werden und sind dann für die Praxis verständlicher. Zunächst sollte man sich darüber klar sein, daß ein Wert von z. B. $64 \text{ cm}/\text{Jh}$ eine Geschwindigkeit darstellt, die über einen bestimmten Zeitraum gemessen wurde und von deren Dauer über ein ganzes Jahrhundert nichts gesagt ist. Der Autor selbst schreibt, daß der ermittelte Trend statistisch abgesichert nur etwa auf das 1,5fache des Untersuchungszeitraumes extrapoliert werden darf. Das führt dann zu folgenden Aussagen (Tab. 4):

Innerhalb der nächsten 38 Jahre kann mit einem MThw-Anstieg von rd. 24 cm gerechnet werden. Die weitere Entwicklung ist abzuschätzen und deutet auf knapp 30 cm in den nächsten 100 Jahren hin. Genauere Aussagen über einen möglichen schnelleren MThw-Anstieg nach den ersten 38 Jahren sind erst in ein bis zwei Jahrzehnten zu erwarten.

Die säkularen Veränderungen wurden bisher üblicherweise durch Ausgleiche 19jähriger Mittel bestimmt. Abb. 7 zeigt die Entwicklungen der Tidescheitelhöhen in Cuxhaven und Hamburg. Da letztere durch Maßnahmen in und an der Elbe beeinflusst sind, sollen die Veränderungen in Cuxhaven näher beleuchtet werden. So ergeben sich durch optischen Ausgleich der 19jährigen Mittel¹⁾ für willkürlich ausgewählte Zeiträume folgende Trends:

Zeitraum	Veränderungen in cm/Jh .	
	MThw	MTnw
1865/90 ²⁾	± 0	$- 20$
1880/1930	$+ 31$	
1920/76	$+ 19$	
1905/60		$+ 18$
<u>1876/1976</u>	<u>$+ 24$</u>	<u>$+ 17$</u>

Dabei wurden für Cuxhaven nur Wasserstände ab 1855 verwendet, die entspr. den Ausführungen bei SIEFERT und LASSEN (1985) für die Zeit bis 1900 aus korrigierten Daten bestehen.

Die Sturmflutentwicklung seit 1940 war in den letzten Jahren ebenfalls Gegenstand mehrerer Veröffentlichungen. Diese können hier insoweit ergänzt werden, als sie zu aktualisieren sind und für verschieden festgelegte Kollektive angegeben werden (Tab. 5).

¹⁾ Das Mittel „1976“ umfaßt z. B. den Zeitraum 1967 bis 1985

²⁾ D. h. 26 19jährige Mittel

Tabelle 4. Extrapolierter Säkularanstieg nach Tab. 3 für begrenzte Extrapolations-Zeiträume

mittlere MThw-Anstiegsgeschw. cm/Jh	Untersuchungs-Zeitraum Jahre	Extrapolations-Zeitraum Jahre	MThw Anstieg im Extrapolations-Zeitr. cm
23	80	120	28
25	100	150	38
33	50	75	25
64	25	38	24

Das Resultat ist wiederum weitgehend einheitlich: Von 1941/50 auf 1976/84 hat die Anzahl an Sturmfluten überall stark zugenommen. Sofern die Kollektive nicht nur hohe, sondern auch mittelhohe Sturmfluten enthalten, liegt die Zunahme bei 100 % oder sogar darüber. Die Anzahl hoher Sturmfluten ist dabei gleichzeitig bis etwa 1966/75 überproportional gestiegen (Tab. 5):

- Von 1 auf 9 in Borkum
- von (8) auf 13 in Wilhelmshaven
- von 0 auf 7 bei Roter Sand/Alte Weser
- von 3 auf 13 in Cuxhaven

Bis 1976/84 ist sie etwa gleich geblieben, während die Anzahl niedrigerer Sturmfluten weiter zugenommen hat. Dieses erklärt auch, warum die mittleren Höhen der jeweils nach oben

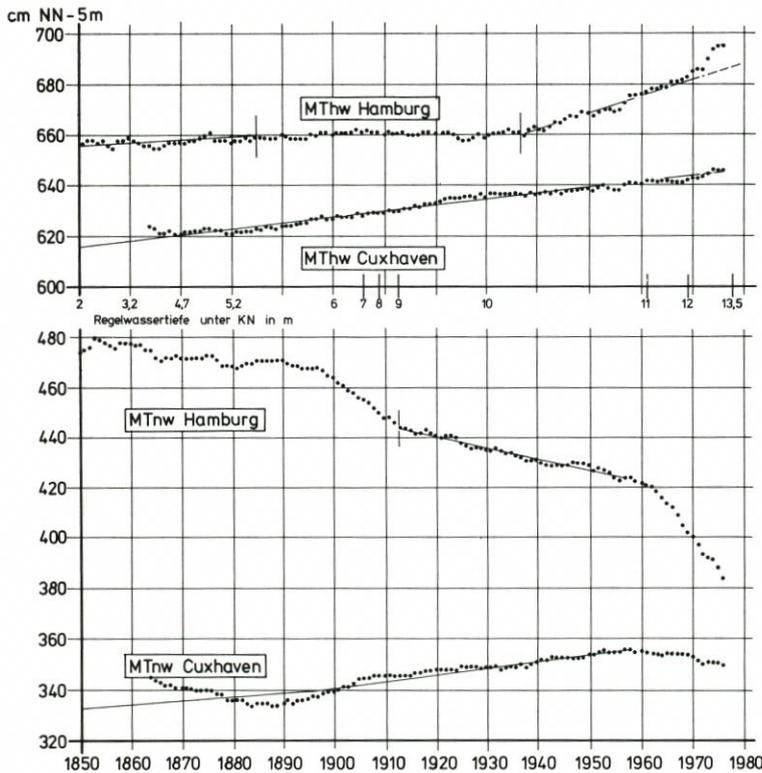


Abb. 7. 19jährige übergreifende Mittel der Thw und Tnw in Cuxhaven und Hamburg

Tabelle 5. Veränderung 10jähriger Mittel der HThw an der Nordseeküste

Pegel/ Kollektiv ausgewählter HThw	Anzahl/mittlere Höhe in cm NN - 5 m der Sturmfluten in der Dekade									
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	(1976/84)		
Borkum-Südstrand										
Windstau CUX ≥ 2 m ^{*)}	21/721	18/730	15/745	20/742	32/734	38/740	34/764	43/743		
HThw _{BOR} \geq MThw _{BOR} + 1,5 m	9/760	7/775	9/771	8/778	13/782	21/777	21/789	17/794		
HThw _{BOR} ≥ 740	10/758	8/771	9/771	12/767	17/776	22/776	24/784	22/783		
HThw _{BOR} ≥ 780	1/-	2/808	2/808	3/816	7/801	9/805	11/819	10/816		
Wilhelmshaven										
Windstau CUX ≥ 2 m		18/813	15/833	20/828	32/814	38/819	34/850	43/830		
HThw _{WHV} ≥ 850		8/869	8/874	6/896	9/896	11/906	13/924	18/892		
HThw _{CUX} ≥ 850		4/873	4/875	3/905	7/891	13/892	14/916	14/902		
Roter Sand/Alte Weser (PN RS = NN - 4,90)										
Windstau CUX ≥ 2 m	19/750	16/761	15/767	20/764	32/736	38/771	32/798	43/781		
HThw _{RS/AW} ≥ 780	4/795	4/803	5/800	5/814	10/824	16/829	19/833	21/823		
HThw _{RS/AW} ≥ 810	-/-	1/-	1/-	1/-	3/867	7/860	10/864	12/846		
Cuxhaven										
Windstau CUX ≥ 2 m	21/793	18/803	15/809	20/808	32/802	38/811	35/838	45/829	1975/84	
Gesamtzahl	32/800	26/806	22/811	29/809	45/806	48/812	41/834	50/827		
HThw _{CUX} \geq MThw _{CUX} + 1,5 m	22/821	20/824	19/827	23/829	32/833	35/843	39/848	53/840		
\geq MThw _{CUX} + 2,0 m	3/877	5/861	5/859	6/873	11/875	14/884	14/901	18/886		
≥ 800	20/824	18/828	18/829	22/831	29/837	32/848	37/851	52/841		
≥ 850	3/877	4/868	4/864	3/902	7/892	13/887	14/901	17/888		
Wittlün										
Windstau CUX ≥ 2 m		18/732	15/752	20/743	32/737	38/744	35/769	43/775		
Windstau WIT $\geq 1,6$ m				30/752	38/765	35/771	31/786			

*) unvollständige Reihe entspr. CHRISTIANSEN, SAARE und SIEFERT (1985)

offenen Kollektive fast überall bis 1971/80 gestiegen und danach wieder abgefallen sind. Der Anstieg liegt bei den größeren Kollektiven zwischen 3 und 4 dm, bei denen der hohen Fluten bei 2 dm (BOR) bis 6 dm (WHV).

Die gewählten Kollektive sind nicht gleichwertig. Einige Zahlen geben die Überschreitungen bestimmter Horizonte an. Da diese Zahlen natürlich durch gleichzeitigen MThw-Anstieg beeinflusst werden, sind andererseits auch Kollektivgrenzen auf MThw bezogen worden.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung des Hamburger Sturmflutwarndienstes wurde eine große Anzahl von Sturmfluten analysiert, die alle in Cuxhaven die Windstauhöhe von 2 m im Verlaufe der Tide überschritten (SIEFERT und CHRISTIANSEN, 1983). Die Veränderungen, die sich an dieser Auswahl zeigen, sind für die anderen Pegel denen in Cuxhaven gegenübergestellt (Tab. 5). Sie ergeben von 1941/50 auf 1971/80 eine Höhenzunahme von

- 43 cm in Borkum
- rd. 40 cm in Wilhelmshaven
- 48 cm bei Roter Sand/Alte Weser
- 45 cm in Cuxhaven
- rd. 40 cm in Wittdün

Tabelle 6. Monats- und Jahresmittel der Thw an den Pegeln Roter Sand (bis 1964) und Alte Weser, abgezogen von den Werten in Cuxhaven (nach LIETZ, 1986).

Hinweis auch für Tab. 7: PN sind für RS mit NN - 4,82 m und für AW mit NN - 4,96 angesetzt

Jahr	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAE	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	J-MI
1960	-3	-5	-1	-2	-3	6	2	5	3	5	3	-2	0
1961	6	8	2	5	16	5	9	10	12	9	6	3	8
1962	4	6	10	14	6	9	9	13	9	8	7	6	9
1963	1	4	-1	-4	1	3	4	5	8	6	6	9	3
1964	9	5	4	5	-2	4	6	7	8	8	9	1	5
1965	17	13	13	15	14	20	24	29	29	20	17	15	19
1966	13	16	14	13	24	15	19	16	20	18	19	10	16
1967	11	15	20	21	26	19	16	17	15	15	13	19	17
1968	12	18	21	15	19	17	15	14	17	15	18	20	17
1969	11	9	7	11	8	18	16	14	16	10	13	10	12

Tabelle 7. Monats- und Jahresmittel der Tnw an den Pegeln Roter Sand (bis 1964) und Alte Weser, abgezogen von den Werten in Cuxhaven (nach LIETZ, 1986)

Jahr	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAE	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	J-MI
1960	-5	-6	-3	-4	-8	-2	1	1	0	0	-2	-6	-3
1961	-3	-1	-5	-1	5	0	4	4	5	2	1	-1	0
1962	0	1	2	7	-1	0	1	1	1	2	1	-2	1
1963	-3	-2	-6	-8	-3	-4	-1	-2	0	0	-1	-2	-3
1964	-2	-7	-7	-5	-10	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-11	-6
1965	6	4	3	8	8	7	4	-2	1	7	7	5	5
1966	8	9	3	0	7	2	4	4	6	5	5	2	4
1967	2	8	10	10	11	11	6	7	6	7	7	8	8
1968	8	11	12	4	9	5	5	7	13	12	14	13	10
1969	2	-1	0	-1	0	6	4	4	9	7	8	5	4

Änderungen der Wasserstände an der Küste und in den Ästuaren im Laufe der letzten 100 Jahre hat DIETZE (1983) zusammengestellt.

Berücksichtigt man die Gesamtzahl der Sturmfluten, die obigem Windstau-Kriterium entsprechen, so erhält man eine Zunahme der Ereignisse (d.h. alle kleineren bis hohen Sturmfluten, bei denen nach Erfahrung mindestens 7 Bft aus aufländigen Richtungen gemessen wurde) von 32 auf 41 – sogar 32 auf 50 bis 1976/84 – und einen HThw-Anstieg von 34 cm in Cuxhaven. Daraus ist zu schließen:

– In den letzten drei Jahrzehnten haben sich die Tiden mit Sturm oder Starkwind um rd. 50 % vermehrt.

– Vor der Küste und an den Mündungen der Ästuare sind die mittleren Sturmfluthöhen um rd. 3,5 dm in rd. 30 Jahren gestiegen (worin der MThw-Anstieg enthalten ist).

Abschließend sei erwähnt, daß sämtliche Wasserstände auf NN – 5 m bezogen wurden. Das PN am Pegel Alte Weser wurde mit NN – 4,96 m angesetzt, dasjenige am Pegel Roter Sand nicht mit NN – 4,82, sondern mit NN – 4,90 m. Begründung: Eine Auswertung der Monats- und Jahresmittel von LIETZ (1986) zeigt sowohl bei den MThw wie bei den MTnw deutliche Sprünge beim Übergang von RS auf AW (1964 auf 1965 in Tab. 6 und 7), wenn PN (RS) = NN – 4,82 m angesetzt wird: rd. 11 cm im Thw und rd. 9 cm im Tnw. Die Erklärung für die Differenz der Differenzen kann über die Ergebnisse eines anderen KFKI-Projektes gegeben werden. Danach ist mit

$$MThw_{RS} \approx MThw_{AW} + 2 \text{ cm}$$

$$MTnw_{RS} \approx MTnw_{AW}$$

zu rechnen (SIEFERT und LASSEN, 1985). Deshalb wurde das PN (RS) korrigiert um die Differenz, die sich schon aus der Einwägung 1952 (PN = NN – 4,82 m) und dem hydrostatischen Nivellement 1966 (PN = NN – 4,90 m) ergeben hatte.

Die Ergebnisse hinsichtlich der Zunahme der Tiden mit Sturm oder Starkwind, wie sie aus den Scheitelwasserständen abgeleitet wurden, stehen nicht im Einklang mit neuen meteorologischen Untersuchungen. So schreiben DUENSING et al. (1985) u. a. zusammenfassend:

„Die vorliegenden meteorologischen Meßreihen zeigen mit mathematisch-statistischer Sicherheit keine periodischen Vorgänge oder Trends. Meteorologische Vorgänge treten in einzelnen Zeitabschnitten ‚zufällig häufig‘ auf.

Nicht die Gesamtzahl der Stürme, sondern die Häufigkeit von Nordweststürmen und in geringem Maße auch von Südweststürmen ist entscheidend für die Häufigkeit von Sturmfluten. Weder aus den Winddaten der Feuerschiffe, noch aus den längeren Reihen der Küstenstationen oder auch der Häufigkeit von Nordwest-Wetterlagen der letzten 100 Jahre läßt sich eine Zunahme von nordwestlichen Starkwinden und Stürmen zu Lasten der anderen Windrichtungen oder Geschwindigkeiten nachweisen.“

Über die Schwierigkeiten bei der Auswertung heißt es dort u. a.:

„Eine Zunahme der Starkwinde kann nicht direkt aus den Meßreihen gefolgert werden. Die z. T. seit 1924 vorliegende Reihe der Winddaten der Feuerschiffe weist einen Bruch auf. Vor dem 1. 1. 1957 handelt es sich um Schätzungen nach der Beaufort-Skala, danach um Messungen. Diese wurden mittels der mit Mängeln behafteten, aber international gültigen Beaufort-Äquivalentskala umgerechnet. Weil in der alten Skala die untere Grenze des Starkwindes (6–7 Bft) bei 22 kn liegt, eigentlich aber 24 kn betragen müßte, ergibt sich für die in Beaufort-Stärken umgerechneten Windmessungen eine zu große Häufigkeit von Starkwind. Umgekehrt ist es bei schweren Stürmen und Orkanen (≥ 10 Bft), da die Äquivalentskala 48 kn als untere Grenze angibt, es jedoch 46 kn sein müßten. Stürme (≥ 8 Bft) sind nicht betroffen, da deren untere Grenze (34 kn) in der Umrechnungsskala richtig angegeben ist. So erscheinen seit Beginn der Messungen (1957) die Häufigkeiten der Starkwinde (6–7 Bft) stark erhöht, die der Windstärken 10 Bft gegenüber früher stark reduziert, obgleich die Anzahl mittlerer und schwerer Sturmfluten seit diesem Termin schwach zugenommen hat.

Tabelle 8. HThw-Entwicklung in der Ems am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt										
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80				1971/80
BOR $H_{ThwBOR} \geq 740$ Mittel =	758	771	771	767	776	776	784				784
Diff. zum Pegel EMD:	103/1.33	86/1.37	76/1.37	73/1.27	73/1.24	76/1.31	78/1.28				78/1.28
LEE:	(92)*										107/2.35
PAP:											67/3.28
HER:	+ 10/4.39	+ 11/5.04	+ 14/5.05	31/4.54	38/4.46	46/4.53	52/4.51				52/4.51
BOR $H_{ThwBOR} \geq 780$ Mittel =	(nur 1 Ereignis)	(808)	(808)	816	801	805	819				819
		(nur 2 Ereign.)									
Diff. zum Pegel EMD:	-	(85/1.30)	(85/1.30)	85/1.12	78/1.09	83/1.23	90/1.23				90/1.23
LEE:	-				98/2.11	107/2.25	120/2.29				120/2.29
PAP:	-				50/2.58	57/3.20	65/3.18				65/3.18
HER:	-	(- 8/4.27)	(- 8/4.27)	+ 18/4.30	43/4.40	37/5.03	41/4.54				41/4.54
EMD $H_{ThwEMD} \geq 850$ Mittel =					885	890	13				13
Diff. zum Pegel HER:					- 45/3.36	- 49/3.40	- 53/3.39				- 53/3.39

*) ohne die Flut vom 4. 2. 44 mit $\Delta H = 199$ cm

Tabelle 9. Sturmfluten in der Ems von 1941 bis 1980, deren Scheitelhöhe bei Borkum mindestens 780 cm NN - 5 m erreichte

Nr.	Sturmflut Datum	BOR		EMD		LEE		PAP		HER	
		Zeit	Höhe cm NN - 5 m								
49	4. 2. 44	18.50	813	20.18	1012					22.20	790
64	22.12.54	7.06	830	8.20	943					10.50	793!
66	23./24.12.54	20.40	785	22.25	842					1.50	806
78	16./17. 2. 62	21.27	883	22.25	972			23.29	897	3.10	(856)
79	17. 2. 62	8.45	781	9.48	874			11.30	853	13.00	853
85	13./14. 2. 65	19.53	783	21.09	857	22.13	872	22.52	821	0.05	792
89	10./11.12.65	23.30	784	0.35	850	1.42	869	2.45	845	4.00	851
90	1.12.66	0.30	786	2.10	846	3.09	861	4.08	828	6.05	816
94	23./24. 2. 67	22.06	798	22.45	881	23.50	915	0.50	870	2.10	859
95	1. 3. 67	1.35	792	2.42	874	3.44	890	4.40	841	6.25	830
113	13.11.73	11.28	805	13.14	884	14.30	910	15.15	855	17.05	818
114	16.11.73	1.20	800	3.00	880	4.07	907	5.05	856	7.05	835
115	19.11.73	17.48	836	19.37	942	20.26	971	21.07	902	22.58	858
117	6./ 7.12.73	19.42	808	20.55	906	21.53	933	22.50	876	0.35	853
119	14.12.73	0.30	834	1.57	926	2.55	949	3.50	884	5.30	854
125	3. 1. 76	11.44	833	13.15	930	14.30	971	15.16	919	17.02	906
126	3./ 4. 1. 76	23.11	857	0.15	958	1.20	981	2.00	929	3.25	915
127	20./21. 1. 76	1.12	847	1.34	938	2.43	962	3.25	900	5.24	879
128	21./22. 1. 76	1.06	786	2.36	889	3.42	921	4.50	875	6.00	866
131	15.11.77	0.47	785	2.16	822	3.25	880	4.25	839	6.00	818
134	30.12.77	0.53	820	2.14	924	3.24	951	4.00	894	5.30	862

Tabelle 10. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Herbrum-Borkum

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz HER-BOR	
		ΔH cm	ΔT h
1941/45	12	30	4.38
46/50	9	60	4.53
51/55	9	23	5.10
56/60	7	48	4.42
61/65	14	51	5.01
66/70	18	65	4.37
71/75	22	55	5.00
76/80	14	63	4.32

Alle Schlußfolgerungen, die diesen Bruch in der Reihe nicht berücksichtigen, sind deshalb falsch, so z. B. die Aussage, die auf den Beobachtungen der deutschen Feuerschiffe der Jahre 1953 bis 1969 basiert, daß die Häufigkeit der Beaufortstärken ≥ 10 abgenommen habe. Bei den niederländischen Feuerschiffen hingegen ist eine solche Abnahme nicht zu bemerken.“

Die durchgehenden Windmessungen auf der Düneninsel Scharhörn durch Strom- und Hafengebäude Hamburg seit 1965 lassen allerdings – in Übereinstimmung mit anderen Stationen (List, Cuxhaven) – eine Zunahme der Häufigkeit hoher Windstärken aus stauwirksamen Richtungen erkennen: Die jährliche Dauer von Winden mit Stärken über 6 Bft aus 240° bis 330° hat von 1965 bis 1983 um gut 20 % zugenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß in den Jahren um 1970 die Häufigkeit starker Winde relativ gering und in den Jahren davor ähnlich derjenigen in den folgenden Jahren war. Sturm ab Stärke 8 Bft ist allerdings bis etwa 1975 jeweils gleich häufig und danach zunehmend oft auf Scharhörn gemessen worden, so daß sich dessen Dauer auf das Zwei- bis Dreifache verlängerte.

3.2 E m s

Statistische Untersuchungen über die Sturmflutentwicklung von 1941/50 bis 1971/80 umfassen Daten der Pegel Borkum (BOR), Emden (EMD), Leerort (LEE), Papenburg (PAP) und Herbrum (HER). Die Kollektive für die 10jährigen Mittel der Höhen- und der Eintrittszeit-Differenzen wurden nach den Höhen an der Mündung ausgewählt, in diesem Falle für

$$HThw_{BOR} \geq 740 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$$

$$HThw_{BOR} \geq 780 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$$

und auf Tab. 8 zusammengestellt. Die wichtigsten Einzelwerte sind in Tab. 9 aufgelistet. Daneben liegen 5jährige Mittel ΔH und ΔT zwischen BOR und HER von Sturmfluten vor, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt (Tab. 10).

Dieses Kollektiv umfaßt alle hohen Sturmfluten, aber auch eine Reihe von Ereignissen, die nur wenig erhöhte HThw zeigten, wenn etwa um Tnw erheblicher Windstau auftrat. Als Resultate ergeben sich folgende Charakteristika und Tendenzen:

- Mittlere und hohe Sturmfluten ($HThw_{BOR} \geq 740 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$) weisen über die letzten Jahrzehnte zunächst leicht fallende, ab 1961/70 dann leicht steigende HThw-Differenzen EMD-BOR auf; dieselbe Tendenz, jedoch mit ausgeprägtem Anstieg, zeigen die hohen Sturmfluten ($HThw_{BOR} \geq 780 \text{ cm NN} - 5 \text{ m}$). Dabei sind die mittleren Differenzen EMD-BOR nur rd. 0,5 dm höher als bei dem vorgenannten Kollektiv.

- In den letzten beiden Jahrzehnten sind die Differenzen LEE-BOR und PAP-BOR bei beiden Kollektiven schneller gewachsen als EMD-BOR. 1961/70 lag z. B. LEE 2 dm höher als EMD, 1971/80 waren es dagegen 3 dm. PAP lag zunächst 2 bis 3 dm unter EMD, später nur noch 1 bis 2 dm. Nach 1962 wurden die Überschwemmungsgebiete oberhalb von PAP eingedeicht.
- Daraus folgt, daß sich der über die Jahrzehnte geringe Anstieg zwischen BOR und EMD stromauf fortsetzt, zwischen EMD und LEE aber noch verstärkt wird und bis PAP dann etwa bleibt.
- Bis 1951/60 liegen die ΔH HER-BOR für mittlere und hohe Sturmfluten kurz über 1 dm, 1956/65 schon bei 3 dm, 1971/80 bei 5 dm, wobei interessanterweise die Differenzen für die hohen Ereignisse seit 1961/70 mit 4 dm etwa konstant geblieben sind. Die Entwicklung von BOR bis PAP setzt sich also in ähnlicher Weise bis HER fort, wenn auch nicht ganz übereinstimmend.
- Werden die Kollektive durch andere Sturmfluten erweitert, so zeigt sich insgesamt über die Jahre ein Trend zur größeren HThw-Differenz, die im 5jährigen Mittel inzwischen von rd. 3 dm auf rd. 6 dm angestiegen ist (Tab. 10).
- Die Eintrittszeit-Differenzen zwischen BOR und HER haben in den letzten Jahrzehnten eher zu- als abgenommen, und zwar fast ausschließlich auf der Strecke BOR-EMD. Diese Entwicklung steht im Gegensatz zu der in Weser und Elbe, ist aber zumindest teilweise über (zufällige) Überlagerungen von Tide und Windstau zu erklären.
- Zusätzlich wurden die Kollektive mit $HThw_{EMD} \geq 800$ und ≥ 850 cm NN -5 m analysiert. Es zeigte sich, daß beide nahezu identisch mit den oben für die $HThw_{BOR}$ gewählt sind und keine zusätzlichen Aussagen gestatten (Beispiel auf Tab. 8).

3.3 Weser

Die statistischen Untersuchungen von 1941/50 bzw. 1961/70 bis 1971/80 umfassen Daten der Pegel Roter Sand/Alte Weser (RS/AW), Bremerhaven (BHV), Brake (BRA), Vegesack (VEG) und Bremen-Gr. Weserbrücke (BRE). Wie bei den anderen Ästuaren wurden die Kollektive nach den Höhen für den Mündungspegel ausgewählt, und zwar für

$$\begin{aligned} HThw_{RS/AW} &\geq 780 \text{ cm NN } -5 \text{ m} \\ &\geq 810 \text{ cm NN } -5 \text{ m} \end{aligned}$$

Die Grenzen sind den für BOR gewählten etwa gleichwertig. Die wichtigsten Daten sind auf Tab. 11 zusammengestellt, die 10jährigen übergreifenden Mittel auf Tab. 12. Darüber hinaus wurden 5jährige Mittel der HThw-Differenzen RS/AW-BRE derjenigen Sturmfluten gebildet, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt (Tab. 13).

Daran werden insgesamt folgende Charakteristika und Tendenzen deutlich:

- Mittlere und hohe Sturmfluten ($HThw_{RS/AW} \geq 780$ cm NN -5 m) zeigen - abgesehen von 1956/65 - weitgehend konstante Höhendifferenzen BHV-RS/AW zwischen 7 und 8 dm. Hier wird der allgemeine HThw-Anstieg an der Küste also mit gleichem Wert in die Weser übertragen. Hohe Sturmfluten dagegen ($HThw_{RS/AW} \geq 810$ cm NN -5 m) sind gerade im letzten Jahrzehnt in BHV gegen AW um rd. 1 dm gestiegen.
- Das erstere Kollektiv zeigt für BRA-RS/AW praktisch gleiche Werte wie für BHV-RS/AW. Bei hohen Sturmfluten war früher die Differenz BRA-RS/AW um rd. 1 dm kleiner als BHV-RS/AW. Heute sind sie fast gleich.
- Anders entwickelten sich die Werte ΔH bis VEG: Im ersten Kollektiv liegen sie 1971/80 um rd. 1 dm höher als früher und 2 dm über den ΔH bis BHV, während es in den Jahrzehnten

Tabelle 11. Sturmfluten in der Weser von 1941 bis 1980, deren Scheitelhöhe bei Roter Sand bzw. Alte Weser mindestens 810 cm NN - 5 m erreichte

Nr.	Sturmflut Datum	RS/AW		BHV		BRA		VEG		BRE	
		Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m
61	16. 1. 54	(7.50)	(812)	9.16	874					12.33	890
64	22. 12. 54	9.00	830	9.50	928					11.41	934
78	16./17. 2. 62	22.05	908	22.45	1035				1022	2.45	1041
88	2. 11. 65	5.30	816	6.30	864	7.11	871	2.10	875	8.32	887
89	11. 12. 65	1.02	816	2.00	880	3.04	886	3.49	905	4.00	920
90	1. 12. 66	2.00	818	2.50	888	3.42	870	4.49	882	5.22	899
94	23./24. 2. 67	23.01	834	0.16	914	1.07	904	1.58	910	2.20	922
95	1. 3. 67	2.53	858	3.49	902	4.56	893	5.48	907	6.05	917
113	13. 11. 73	13.27	853	14.42	917	15.51	918	16.44	929	16.52	945
114	16. 11. 73	3.26	863	4.18	949	5.10	937	6.35	939	6.18	959
115	19. 11. 73	18.57	865	19.47	966	20.45	944	22.14	952	21.35	960
117	6./ 7. 12. 73	20.40	879	21.46	972	22.50	948	0.13	955	0.10	960
119	14. 12. 73	2.26	868	3.45	957	4.40	942	5.47	958	5.47	965
125	3. 1. 76	13.39	910	14.21	1018	15.50	1012	16.48	1013	17.08	1033
126	4. 1. 76	1.07	831	2.11	893	3.00	912	4.04	927	4.26	949
127	21. 1. 76	2.40	914	3.16	994	5.02	987	5.40	994	6.25	1011
128	22. 1. 76	3.00	824	4.05	923	5.15	937	6.03	955	6.02	968
131	14./15. 11. 77	2.12	815	3.16	880	4.13	882	5.00	910	5.30	936
134	31. 12. 77	1.50	831	1.51	936	3.22	946	4.18	967	4.20	981

Tabelle 12. HThw-Entwicklung in der Weser am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt						
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80
RS/AW $HThw_{RS/AW} \geq 780$	795	803	801	814	824	829	833
Diff. zum Pegel							
BHV	83/0.53	75/0.55	74/1.02	96/0.52	77/0.57	69/1.05	74/1.01
BRA					74/2.06	69/2.02	79/1.56
VEG					84/2.57	83/3.03	94/3.00
BRE	101/3.46	89/3.40	89/3.46	122/3.49	102/3.29	96/3.15	111/3.15
RS/AW $HThw_{RS/AW} \geq 810$	-	(821) (nur 2 Ereign.)	(821)	(nur 1 Ereign.)	842	847	859
Diff. zum Pegel							
BHV		(72/1.08)	(72/1.08)	-	71/0.57	74/1.02	87/0.54
BRA				-	67/1.59	64/1.58	83/2.03
VEG				-	75/3.03	74/3.05	95/3.06
BRE				-	89/3.25	86/3.10	110/3.12

Tabelle 13. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Bremen-Roter Sand/Alte Weser

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz BRE-RS/AW	
		ΔH cm	ΔT h
1941/45	12	101	3.39
46/50	9	136	3.50
51/55	9	102	4.06
56/60	7	105	3.34
61/65	14	120	3.17
66/70	18	98	3.13
71/75	22	108	3.09
76/80	14	122	3.08

davor rd. 1 dm war. Diese Tendenz wird vor allem durch die hohen Sturmfluten bestimmt, deren Differenzen zu RS/AW früher in BHV und VEG etwa gleich waren, heute aber in VEG rd. 1 dm größer sind, obwohl sie auch in BHV um 1 dm stiegen. Ab Herbst 1979 waren sämtliche Sturmflutsperrwerke in Betrieb.

- Die Höhendifferenzen BRE-RS/AW lagen für das größere Kollektiv seit 1941/50 stets zwischen 9 und 12 dm, ohne daß ein Trend erkennbar ist. Daraus folgt, daß der Anstieg bei RS/AW um 3 bis 4 dm in 30 Jahren direkt auch in BRE zu verzeichnen ist. Das bestätigen auch die 5jährigen Mittel der Tab. 13 trotz erheblicher windstaubedingter Schwankungen.
- Auch die Eintrittszeit-Differenzen zwischen RS/AW und BHV haben sich in den letzten Jahrzehnten bei Sturmfluten nicht merklich geändert. Dies gilt sogar weiter stromauf bis VEG. Erst oberhalb davon wurden die ΔT kürzer, und zwar seit den 50er Jahren um rd. 30 min, so daß heute Sturmfluten ab VEG bis zum Wehr Hemelingen fast zeitgleich ihren Scheitel erreichen.

3.4 Elbe

Für die Pegel CUX und HBG wurde eine ausführliche Dokumentation aller Sturmfluten seit 1661 mit umfangreichen statistischen Berechnungen vorgelegt (CHRISTIANSEN, SAARE und SIEFERT, 1985). Für weitere Pegel*) wurden aus einer zweiten Studie (SAARE und SIEFERT, 1985) Werte entnommen und teilweise schon veröffentlicht (Strom- und Hafengebäude Hamburg, 1985). Die wichtigsten Daten sind in Tab. 14 und 15 zusammengestellt. Als Ergebnisse für mittlere und hohe Sturmfluten sind festzuhalten:

- Die Sturmfluthöhen sind von 1941/50 auf 1975/84 an der Mündung in Cuxhaven deutlich angestiegen. Diese Entwicklung ist jedoch nicht elbe-spezifisch, sondern allgemein an der deutschen Nordseeküste festzustellen.
- In BRO verändern sich die ΔH und ΔT gegen CUX in all den Jahrzehnten nicht.
- Vor 1966/75 ist in der Elbe kaum ein HThw-Anstieg von CUX bis STA vorhanden; erst danach wird er deutlich. Die Höhendifferenzen gegen Cuxhaven stiegen inzwischen von rd. 2 dm auf rd. 3,5 dm.

*) Im einzelnen sind dies: Brokdorf, Kollmar, Stadersand, Schulau, Hbg.-Blankenese, -Seemannshöft, -Köhlbrandhöft, -Amerikahöft, -Schöpfstelle, -Ernst-August-Schleuse, -Altenwerder, -Hamburg, Bunthaus und Zollenspieker

Tabelle 14. Sturmfluten vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg von 1941 bis 1980, und zwar: Alle Ereignisse, deren Scheitelhöhe bei Cuxhaven mindestens 850 cm NN - 5 m erreichten

Lfd. Nr.	Dat. (für Cux-Hbg)		Thw Terschelling		Thw Borkum		Thw Cuxhaven		Thw Hbg.-St. P.		Q _o Neu Darchau m ³ /s
	Tag	Jahr	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	Zeit	Höhe cm NN - 5 m	
44	18./19.	10. 41			22.06	756	0.17	903	4.40	918	1180
51	1. / 2. 3.	45			0.19	747	2.58	862	7.34	911	1547
59	24. 10.	49			11.45	737	13.35	866	18.00	841	232
61	16. 1.	54			7.10	773	9.45	869	14.15	914	260
64	22. 12.	54			7.06	830	9.50	883	14.32	935	518
67	12./13.	1. 55			2.30	728	4.15	854	8.47	883	1700
69	18./19.	1. 56			2.05	753	4.00	853	8.50	864	1050
77	12. 2.	62			17.33	742	19.34	858	23.35	926	922
78	16./17.	2. 62			21.27	883	(22.40)	(995)	3.08	1070	952
88	1. / 2. 11.	65	2.15	738	4.00	773	5.58	874	10.15	938	420
89	10./11.	12. 65	22.00	745	23.30	784	1.46	856	6.12	890	840
90	30. 11. / 1. 12.	66	23.00	741	0.30	786	2.48	880	7.00	900	774
94	23./24.	2. 67	20.30	755	22.06	798	23.20	899	3.20	996	1692
95	28. 2. / 1. 3.	67	24.00	755	1.35	792	3.27	888	7.28	936	1430
103	2. / 3. 10.	70	21.30	715	0.02	747	2.28	852	6.39	891	446
113	13. 11.	73	10.30	763	11.28	805	14.13	896	18.24	965	336
114	15./16. 11.	73	0.05	765	1.20	800	3.35	923	7.54	981	367
115	19. 11.	73	17.00	734	17.48	836	19.30	907	23.39	1000	364
117	6. / 7. 12.	73	18.00	720	19.42	808	21.25	939	0.59	1033	423
119	13./14. 12.	73	23.15	780	0.30	834	2.45	922	7.22	1005	423
121	5. 12.	74	0.50	725	1.48	758	4.37	853	8.14	916	887
123	25./26.	1. 75	21.10	645	22.00	708	23.50	851	3.30	908	1650
125	3. 1.	76	10.30	747	13.00	823	14.20	1010	17.10	1145	460
126	3. / 4. 1.	76	21.45	825	23.41	847	1.48	862	5.19	919	460
127	20./21. 1.	76	23.20	800	1.26	841	3.16	970	6.35	1058	1400
128	21./22. 1.	76	0.30	715	1.08	785	3.45	880	7.38	980	1400
131	14./15. 11.	76	23.45	743	1.27	775	3.12	872	6.17	953	837
134	30./31. 12.	77	23.15	760	0.48	828	2.15	890	5.25	955	825

Tabelle 15. HThw-Entwicklung in der Elbe am Beispiel 10jähriger Mittel

Kriterium	HThw in cm NN - 5 m am Ausgangspegel sowie $\Delta H/\Delta T$ in cm bzw. h zum Ausgangspegel im Jahrzehnt									
	1941/50	1946/55	1951/60	1956/65	1961/70	1966/75	1971/80	1976/84	1981/90	1986/94
CUX HThw _{CUX} \geq 800	824	828	829	831	837	848	851	842		
Diff. zum Pegel										
BRO			7/1.15	11/1.21	12/1.29	10/1.31	12/1.29			
STA			11/2.56	14/2.55	16/2.59	19/3.01	33/2.46			
SUL			17/3.34	24/3.32	26/3.33	32/3.29	51/3.11			
HBG	19/4.20	28/4.19	29/4.19	36/4.14	45/4.08	57/3.59	78/3.40	90/3.26		
BUN			35/4.47	46/4.40	53/4.31	65/4.22	88/4.04			
ZOL			45/5.20	55/5.10	63/5.01	74/4.52	102/4.26			
CUX HThw _{CUX} \geq 850	877	868	864	902	892	887	901	888		
Diff. zum Pegel										
BRO			10/1.24	21/1.44	18/1.32	12/1.34	13/1.31			
STA			17/3.05	20/3.01	21/3.00	24/3.04	35/2.46			
SUL			22/3.45	49/3.46	38/3.40	39/3.34	54/3.11			
HBG	13/4.28	25/4.32	34/4.38	51/4.26	54/4.12	63/4.05	77/3.43	92/3.18		
BUN			38/5.05	51/4.44	58/4.32	66/4.27	84/4.05			
ZOL			42/5.33	56/5.07	54/5.13	64/5.05	90/4.32			
CUX HThw _{CUX} \geq MThw _{CUX} + 150	821	824	827	829	833	843	848	841		
HBG:	23/4.16	36/4.15	34/4.20	36/4.13	45/4.07	56/3.59	78/3.39	90/3.26		
CUX HThw _{CUX} \geq MThw _{CUX} + 200	877	861	859	873	875	884	901	886		
HBG	13/4.28	28/4.30	35/4.35	45/4.20	51/4.13	61/4.06	77/3.43	93/3.18		

Tabelle 16. Fünfjährige Mittel von Sturmfluten, deren Windstau in Cuxhaven 2 m überschritt; hier: Zeit- und Höhendifferenzen Hbg-St. Pauli-Cuxhaven

Zeitraum	Anzahl	HThw-Differenz HBG-CUX	
		ΔH cm	ΔT h
1941/45	12	29	4.30
46/50	9	54	4.14
51/55	9	48	4.25
56/60	7	37	4.20
61/65	14	51	4.15
66/70	18	52	4.00
71/75	22	63	3.56
76/80	14	88	3.18
81/85	30	80	3.25

- Weiter oberhalb, wo die hohen Sturmfluthöhen bis Hamburg stromauf ansteigen und dann bis Zollenspieker etwa gleich hoch bleiben oder sogar wieder leicht abfallen, ist die Entwicklung differenzierter: In HBG ist ein fast gleichmäßiger HThw-Anstieg von 1941/50 bis 1975/84 erkennbar. Die Differenzen der Höhen zu Cuxhaven sind in dieser Zeit von 2 auf 9 bzw. von 1,5 auf 9 dm gestiegen. Darin enthalten sind der Anstieg der MThw-Differenz und der Einfluß der Baumaßnahmen an und in der Elbe.
- Die ΔH ZOL-CUX sind bei beiden Kollektiven inzwischen noch um rd. 1 dm mehr als die ΔH HBG-CUX angestiegen.
- Die Eintrittszeit-Differenzen der HThw gegen CUX verhalten sich in der Elbe etwas anders als die ΔH : in BRO haben sie sich bis heute praktisch nicht verändert (rd. 1.30h). In STA nehmen sie seit 1971/80 ab, von SUL bis ZOL etwa seit 1966/75. Die Verkürzung dieser Differenzen ist erheblich (in HBG rd. 50 min/20 Jahren, in ZOL rd. 60 min/20 Jahren). Berücksichtigt man dabei den starken Anstieg der Höhendifferenzen zu CUX an diesen Orten (rd. 45 cm/20 Jahren bzw. rd. 50 cm/20 Jahren) und den HThw-Anstieg in CUX selbst (rd. 30 cm/20 Jahren), so ist generell von einer Erhöhung der Sturmfluthöhen in der Elbe bei gleichzeitiger Verkürzung der Laufzeit auszugehen, wobei beides verstärkt für den Bereich oberhalb STA gilt.

Weitere Einzelheiten sind den o. g. Studien zu entnehmen, die Differenzen der fünfjährigen Mittel der Tab. 16.

4. Mittlere Tiden und Sturmfluten 1976 und 1981

4.1 Ems

Für einen Vergleich wurden die Tiden von Tab. 17 herangezogen (Abb. 8 und 9). Die mittlere Flutdauer T_F beträgt (mittl. Juni-Werte 1961/80):

T_F in Reide	6.00 h	PAP	4.53 h	
	POG	5.59 h	HER	4.25 h
	LEE	5.10 h		

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen

- in EMD K_e etwa 45 min nach T_{nw} und K_f etwa 25 min nach Thw
- in POG K_e etwa 30 min nach T_{nw} und K_f etwa 20 Min nach Thw

Tabelle 17. Scheitelwasserstände in der Ems

Tide	Wasserstand in cm NN – 5 m im Querschnitt ¹⁾					Q _o m ³ /s
	Reide ²⁾	POG	LEE	PAP	HER	
mittl. Tide 1975/77						
MThw	625	636	653	665	680	67
MTnw	325	343	380	421	461	
3. 1. 76 (125)	920	950	971	919	907	120
4. 1. 76 (126)	<u>948</u>	<u>973</u>	<u>981</u>	<u>927</u>	<u>916</u>	120
20. 1. 76	<u>770</u>	<u>785</u>	<u>803</u>	<u>800</u>	<u>800</u>	160
21. 1. 76 (127)	928	949	962	900	880	180
21. 1. 76 (127a)	827	856	869	847	850	180
22. 1. 76 (128)	879	902	921	875	867	200
mittl. Tide 1979/81						
MThw	632	646	663	674	693	88
MTnw	325	333	376	434	500	
24. 11. 81 (146)	789	804	835	805	806	140
24. 11. 81 (147)	<u>905</u>	<u>928</u>	<u>950</u>	892	865	140
24. 11. 81 (148)	891	918	941	<u>894</u>	<u>879</u>	140

¹⁾ vgl. Abb. 3
²⁾ interpoliert zwischen Dollard-Noord, Oterdum und Emden (Abb. 3)

- in LEE K_e etwa 15 min nach Tnw und K_f etwa z. Z. Thw
 - in PAP K_e etwa 10 min nach Tnw und K_f etwa 25 min vor Thw.
- Die Flutstromgrenze liegt zwischen PAP und HER.

Als topographische Ausgangsparameter wurden nach den Unterlagen, die die Mitglieder der Projektgruppe zur Verfügung stellten, die mittleren Breiten b_m über MTnw ermittelt, und zwar getrennt für 1976 und 1981, für die mittleren Tiden und für jede Sturmflut. Die Werte änderten sich kaum, weil an der Ems keine großen Vorländer mehr vorhanden sind, die nach 1976 hätten eingedeicht werden können.

Die Scheitelhöhen charakterisieren den Sturmflutablauf nur sehr mangelhaft. So sind vom Typ her die Sturmfluten Nr. 127/128 und 147/148 am ehesten vergleichbar, während die höchsten dieser Fluten, Nr. 125/126, eher gesondert zu betrachten sind. Dennoch zeigen alle Sturmflutperioden das für die Ems typische Bild mit stromauf bis LEE steigenden HThw, die weiter bis HER deutlich fallen. Ganz anders entwickeln sich die mittleren Tiden, deren Thw und Tnw stromauf „klassisch“ ansteigen. Der Unterschied zwischen 1976 und 1981 geht dabei weitgehend zu Lasten des Oberwasserabflusses.

4.2 W e s e r

Die bearbeiteten Tiden werden durch die hydrologischen Parameter der Tab. 18 charakterisiert (Abb. 10 und 11). Die mittlere Flutdauer beträgt (berechnet über die 1. Junihälfte 1975/81):

T _F in	BHV	6.00 h	ELS	5.36 h	OSL	5.14 h
	NOR	6.00 h	FAR	5.32 h	BRE	5.00 h
	BRA	5.43 h	VEG	5.26 h	HEM	4.53 h

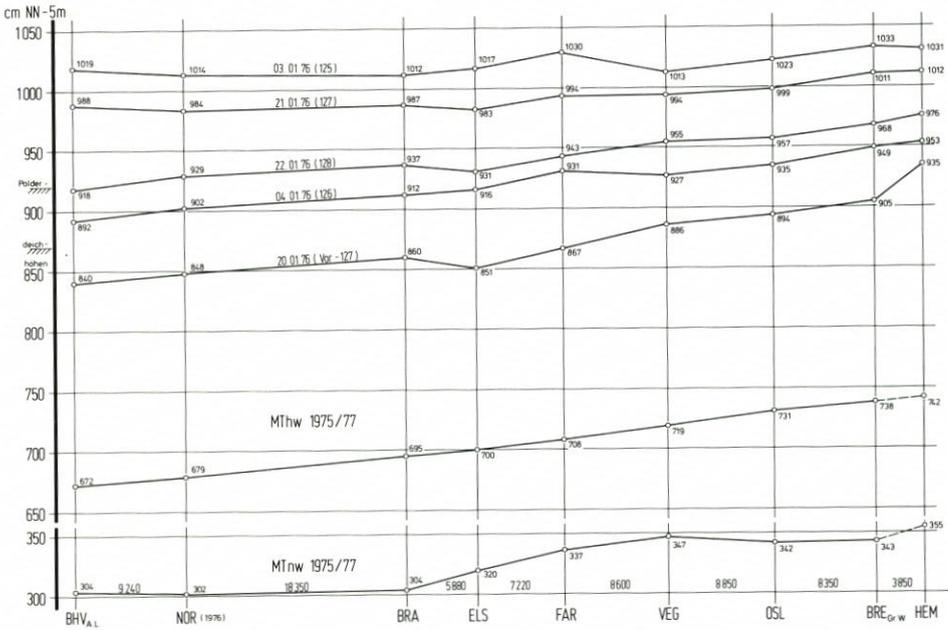


Abb. 10. Sturmfluten von 1976 in der Weser

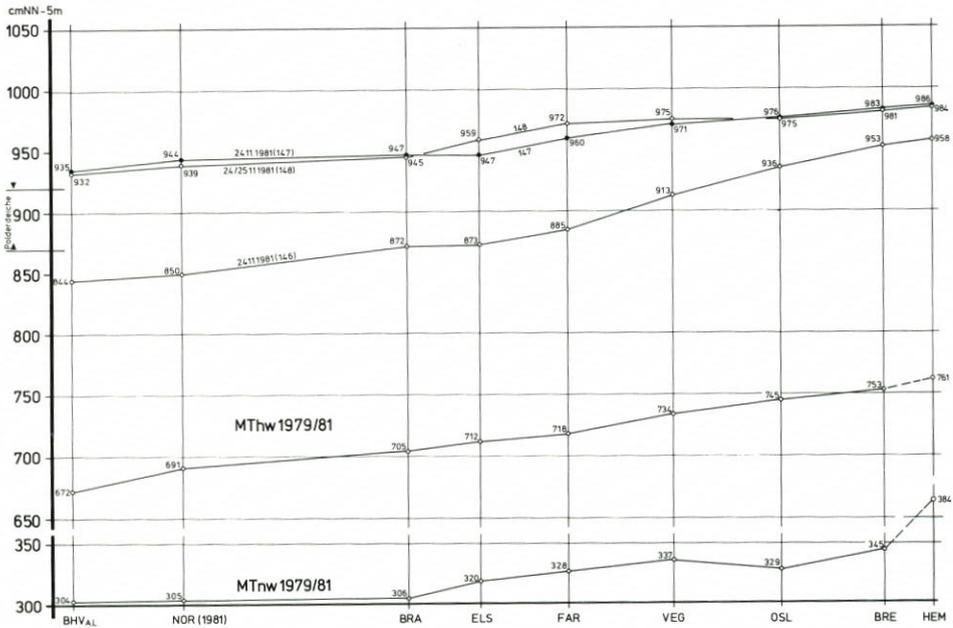


Abb. 11. Sturmfluten von 1981 in der Weser

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen

- in BHV K_e etwa 50 min nach T_{nw} und K_f rd. 40 min nach Thw
- in BRA K_e etwa 40 min nach T_{nw} und K_f rd. 35 min nach Thw
- in VEG K_e etwa 20 min nach T_{nw} und K_f z. Z. Thw
- in OSL K_e etwa 10 min nach T_{nw} und K_f etwa 15 min vor Thw

In BRE ist die Flutstromgrenze erreicht.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß 1975/77 wie 1979/81 die MT_{nw} von BHV bis OSL tiefer als diejenigen an der Mündung (AW mit 345 cm NN -5 m) abfielen. Im übrigen sind die Höhen der M_{Thw} wie der MT_{nw} durch das Oberwasser beeinflusst, wie der Vergleich auf Tab. 18 zeigt. Während die M_{Thw} von BHV bis HEM gleichmäßig (um 70 bzw. 90 cm) ansteigen, liegen die MT_{nw} von BHV bis BRA in beiden Jahrgängen auf einer Höhe; von VEG nach OSL fallen sie sogar leicht ab.

Die Entwicklung bei Sturmfluten muß im Zusammenhang mit der Wirkung der Nebenarme und Vorländer, vor allem aber der Polder, gesehen werden. Dafür gelten folgende Daten für das Beispiel der Sturmflut vom 3. 1. 76:

1. Schweißburg mit Vorländern und Polder, Strohauser Plate (zwischen NOR und BRA)

Gesamtüberflutungsfläche nach WWA Braake	1280 ha
davon bedeckt (auf 3,75 m NN)	170 ha
mit mittl. Geländehöhe	2,1 m NN
Speicherraum bis Deichkrone	$2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Gesamtspeicherraum bis HHThw	$31,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

2. Harrier Sand, Hammelwarder Sand (bei BRA)

		Harrier Sand	Hammelw. Sand
Gesamtüberflutungsfläche	ha	550	680
Deichhöhe	m NN	4,3 (Westdeich) 3,7 (Ostdeich)	4,3
Gesamtspeicherraum	m^3	$9,3 \cdot 10^6$ ¹⁾	$15,6 \cdot 10^6$ ²⁾
Gesamtspeicherraum bis HHThw	m^3	$17,0 \cdot 10^6$	$21,0 \cdot 10^6$

¹⁾ bis 3,7 m NN; ²⁾ bis 4,3 m NN

3. Polder Neuenkirchen-Rade (bei ELS)

Gesamtüberflutungsfläche, bedeckt auf 3,95 m NN	470 ha
mittl. Geländehöhe	2,0 m NN
Speicherraum bis Deichkrone	$9,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Gesamtspeicherraum bis HHThw	$14,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

4. Hunte, Elsflether Sand (zwischen ELS und FAR)

Die Hunte wird von der Eisenbahnbrücke (km 21.383) bis zum Sperrwerk (km 24.550) berücksichtigt, der Elsflether Sand bis zur neuen Deichlinie:

Gesamtüberflutungsfläche	190 ha
davon bedeckt (auf 3,75 m NN)	40 ha
mit mittl. Geländehöhe	2,2 m NN

Gesamtspeicherraum bis HHThw

 $6,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

1981 war das Gebiet abgesperrt.

Nach Berechnungen des WWA Brake betrug die gesamte Flutwassermenge der Hunte bis Oldenburg am 3. 1. 76 rd. $13,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, am 21./22. 1. 76 sogar $15,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Tabelle 18. Scheitelwasserstände in der Weser

Tide	Wasserstand in cm NN - 5 m im Querschnitt									Q _o m ³ /s
	BHV	NOR	BRA	ELS	FAR	VEG	OSL	BRE	HEM	
mittl. Tide 75/77										
MThw	672	679	695	700	708	719	731	738	742	
MTnw	304	302	304	320	337	347	342	343	355	289
3. 1. 76 (125)	<u>1019</u>	<u>1014</u>	<u>1012</u>	<u>1017</u>	<u>1030</u>	<u>1013</u>	<u>1023</u>	<u>1033</u>	<u>1031</u>	269
4. 1. 76 (126)	892	902	912	916	931	927	935	949	953	354
20. 1. 76	840	848	860	851	867	886	894	905	(935)	702
21. 1. 76 (127)	988	984	987	983	994	994	999	1011	1012	704
21. 1. 76 (127a)	857	870	885	886	897	907	914	925	916	704
22. 1. 76 (128)	918	929	937	931	943	955	957	968	976	761
mittl. Tide 79/81										
MThw	672	691	705	712	718	734	745	753	761	
MTnw	304	305	306	320	328	337	329	345	384	381
24. 11. 81 (146)	844	850	872	873	885	913	936	953	958	486
24. 11. 81 (147)	<u>935</u>	<u>944</u>	<u>947</u>	<u>947</u>	<u>960</u>	<u>971</u>	<u>976</u>	<u>983</u>	<u>986</u>	530
25. 11. 81 (148)	932	939	945	<u>959</u>	<u>972</u>	<u>975</u>	975	981	984	529

Tabelle 19. Thw-Eintrittszeit-Differenzen zwischen Brake und Nordenham

	Thw-Eintrittszeit-Differenzen			
	BRA-NOR min	ELS-BRA min	FAR-ELS min	FAR-NOR min
40 Junitiden 1976, 1981	42	11	15	68
Sturmfluten 1976 und 1981				
a) Harrier Sand trocken	37	16	15	68
b) Harrier Sand geflutet	47	18	23	88
c) alle Polder geflutet	79	7	6	92

5. Köttersand, Weserdeicher Sände und Groden, Juliusplate, Warflether Sand; Westergate, Rekumer Loch, Woltjen Loch (bei FAR)
- Gesamtüberflutungsfläche 410 ha
 davon bedeckt (auf 3,75 m NN) 240 ha
 mit mittl. Geländehöhe 2,1 m NN
Gesamtspeicherraum bis HHThw $13,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Bei der Beurteilung des Poldereinflusses ist von entscheidender Bedeutung, ob eine Flut auf einen leeren oder schon durch die Vortide gefüllten Polder trifft. So waren z. B. am 3. 1. 1976 alle Polder gefüllt worden und bei der nächsten Tide (4. 1. 1976) noch nicht wieder leer.

Deutliches Anzeichen für eine Einflußnahme der Füllung der Polder auf den Sturmflutablauf in der Weser sind die Differenzen der HThw-Eintrittszeiten (Tab. 19):

Die Füllung der Polder verzögert den HThw-Eintritt in BRA erheblich, was sich

stromauf jedoch nur noch in abgeschwächter Form bemerkbar macht, da dort die ΔT abnehmen.

Der Harrier Sand wird zunächst von Osten gefüllt, also durch den rechten Nebenarm. Wenn dort ein Pegel stehen würde, könnte er wertvolle Daten liefern hinsichtlich Überströmungshöhe und -dauer. So müssen Aufzeichnungen des Pegels Brake herangezogen werden, die dazu weniger aussagekräftig sind, wie die Beispiele auf Abb. 12 zeigen. So kann der Beginn der Überströmung nur geschätzt werden. Die Tidekurven vom 3. 1. und 21. 1. 1976 zeigen etwa in Höhe 980 cm NN -5 m mögliche Einflüsse.

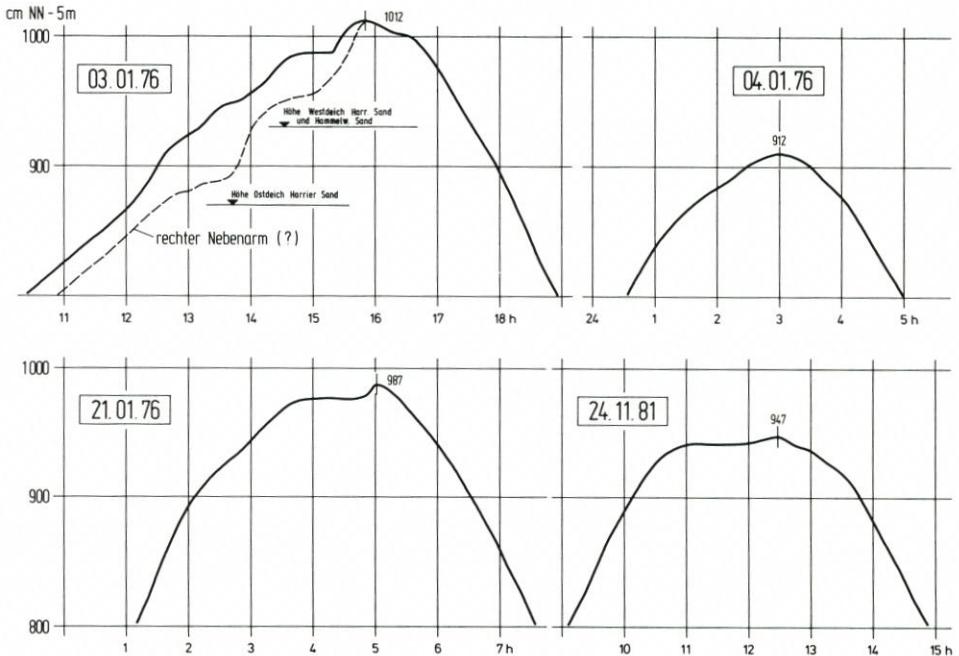


Abb. 12. Sturmfluten am Pegel Brake mit Einflüssen durch Polderfüllungen

6. Zum Vergleich: Hafen Bremen

Der Hafen Bremen enthält bis MThw eine Flutwassermenge von $5,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, darüber bis zum HThw am 3. 1. 1976 von $4,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (berechnet nach Angaben des WWA Bremen). Unberücksichtigt blieben bei den Berechnungen die bis zum 1. 10. 1979 tideoffenen Nebenflüsse Lesum und Ochtum. Das Füllvolumen der letzteren wurde vom WWA Brake zu $11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ für den 3. 1. 1976 bestimmt.

Der Vergleich der HThw auf Tab. 18 und Abb. 10 und 11 für Sturmfluten in 1976 und in 1981 zeigt u. a. folgendes:

Am 24. 11. 1981 lagen die HThw um 0,5 bis 0,2 m unter denen vom 21. 1. 1976. Besonders deutlich wird der 1981 geringere Energiebedarf für das Füllen der Nebenarme, Vorländer und Polder unterhalb von Farge. Damit geht ein stärkerer HThw-Anstieg von BHV nach HEM einher.

Die niedrige Sturmflut vom 24. 11. 1981 zeigt die weiter abnehmende Bedeutung der Nebenarme und Vorländer für den Sturmflutablauf. Die Polder wurden nicht mehr geflutet; entsprechend steiler ist der HThw-Anstieg. Er ist auch größer als bei der vergleichbaren Flut vom 20. 1. 1976, obwohl damals das Q_0 erheblich höher lag.

4.3 Elbe

Um einen eindeutig definierten Querschnitt als untere Begrenzung zu haben, wurde die seeseitige Grenze für die Elbe nach Brunsbüttel gelegt.

Die bearbeiteten Tiden erreichten die Scheitelwasserstände von Tab. 20, Abb. 13 und 14. Für mittlere Tideverhältnisse (1. Junihälfte 1975/81) gelten

T_F in	BRU	5.21 h	SEE	5.10 h
	BRO	5.19 h	BUN	4.45 h
	KRA	5.20 h	ZOL	4.19 h
	STA	5.18 h		

Die Kenterpunkte (Abb. 6) liegen etwa

- in BRU K_e 1 h nach T_{nw} und K_f 1.30 h nach Thw
 - in STA K_e rd. 35 min nach T_{nw} und K_f rd. 45 min nach Thw
 - in HBG K_e rd. 30 min nach T_{nw} und K_f rd. 20 min nach Thw
- Die Flutstromgrenze ist etwa bei Zollenspieker erreicht.

Tabelle 20. Scheitelwasserstände in der Elbe

Tide	Wasserstand in cm NN - 5 m im Querschnitt ¹⁾							Q_o m ³ /s
	BRU	BRO	KRA	STA	km 632 ²⁾	BUN	ZOL	
mittl. Tide 1975/77								
MThw	644	643	649	659	690 ³⁾	718 ⁴⁾	740 ⁴⁾	720
MTnw	369	370	370	376	375 ³⁾	433 ⁴⁾	534 ⁴⁾	
3. 1. 76 (125)	1042	1067	1086	1107	1138	1143	1135	460
4. 1. 76 (126)	854	861	862	882	921	933	946	460
20. 1. 76	824	827	833	855	895	923	941	1400
21. 1. 76 (127)	986	988	998	1014	1048	1067	1077	1400
21. 1. 76 (127a)	846	848	846	864	905	934	952	1400
22. 1. 76 (128)	895	896	911	934	973	996	1015	1400
mittl. Tide 1980/82								
MThw	653	654	661	677	690 ³⁾	718 ⁴⁾	740 ⁴⁾	990
MTnw	369	376	376	379	375 ³⁾	433 ⁴⁾	534 ⁴⁾	
24. 11. 81 (146)	828	838	857	870	905	939	960	1340
24. 11. 81 (147)	986	1000	1015	1037	1065	1086	1100	1340
25. 11. 81 (148)	926	933	943	965	995	1025	1042	1340

¹⁾ vgl. Abb. 5

²⁾ interpoliert zwischen Blankenese und Seemannshöft

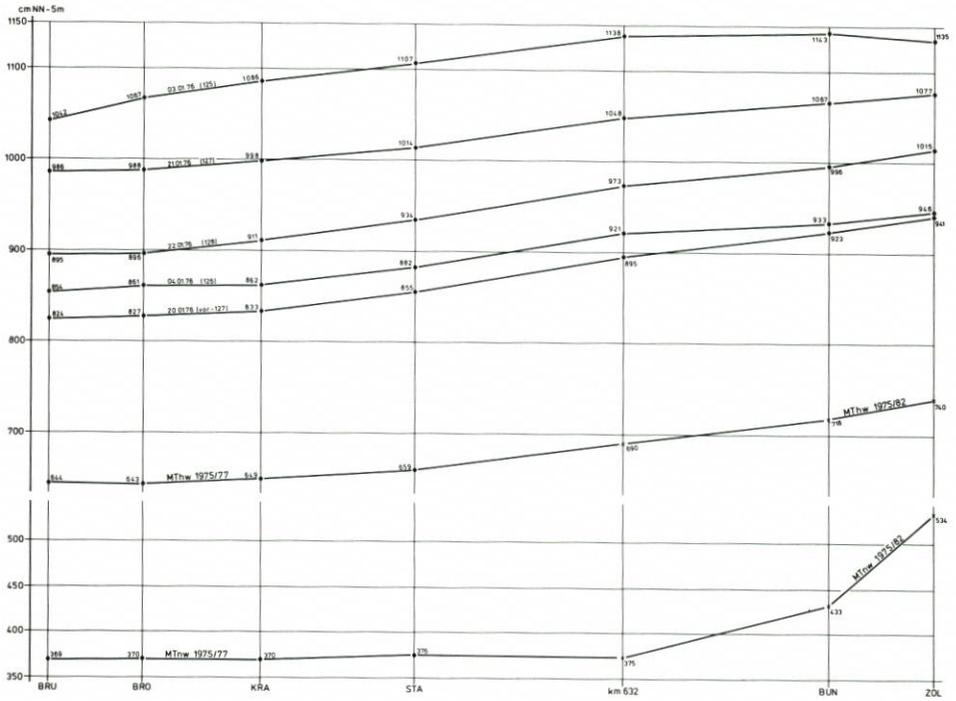
³⁾ mittl. Tide 1976/81, um den Q_o -Einfluß auszuschalten

⁴⁾ mittl. Tide 1975/82

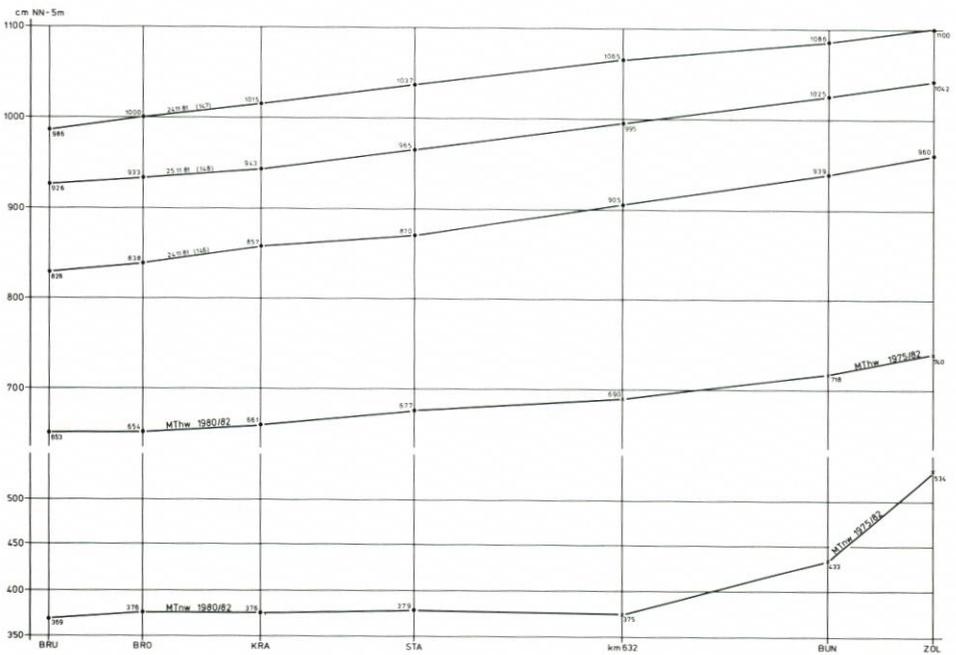
Während die MThw von BRU etwa gleichmäßig ansteigen, haben die MTnw in den letzten Jahrzehnten zwischen BRU und km 632*) etwa gleiche Höhen erreicht. Dennoch ist eine MThb-Zunahme unterhalb km 632 erkennbar.

Die HThw-Entwicklung der ausgewählten Sturmfluten aus 1976 und 1981 von in BRU etwa gleich hohen Ereignissen zeigt weitgehend Konstanz, obwohl mehrere Eindeichungen an Einfluß gewonnen haben könnten. Als Stauräume waren bzw. sind vorhanden:

*) km 632 wurde als fiktiver Pegelstandort gewählt, weil sich dort der Querschnitt von 1200 bis 1500 m Breite auf 600 m Breite verändert



13. Sturmfluten von 1976 in der Elbe



14. Sturmfluten von 1981 in der Elbe

- | | |
|---|--|
| 1. Nordkehdingen (Oste bis Altendorf) | |
| Gesamtüberflutungsfläche (Außendeich und Polder) 1976 | 6580 ha |
| davon 1976 bedeckt (auf 4,2 m NN) | 3175 ha |
| mittl. Geländehöhe | 2,2 m NN |
| Gesamtspeicherraum bis Deichkrone | $63,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (5,5 m NN) | $217,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 1981 war Nordkehdingen eingedeicht. | |
| 2. Krautsand | |
| Gesamtüberflutungsfläche 1976 | 3440 ha |
| davon waren 1981 eingedeicht | 3020 ha |
| mittl. Geländehöhe | 2,3 m NN |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (5,8 m NN) | $121,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 3. Pagensander Nebelbe (mit Vorland und Pagensand) (zwischen KRA und STA) | |
| bei MTnw benetzte Fläche | 300 ha |
| Fläche über MThw | 1500 ha |
| mittl. Höhe der Gesamtfläche | 1,7 m NN |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,0 m NN) | $72,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 4. Drommel und Twielenflether Sand (bei STA) | |
| Gesamtüberflutungsfläche | 680 ha |
| mittl. Geländehöhe | 1,7 m NN |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,1 m NN) | $29,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 5. Haseldorfer Marsch (unterhalb km 632) | |
| Gesamtüberflutungsfläche | 2030 ha |
| mittl. Geländehöhe | 2,25 m NN |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,1 m NN) | $79,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 1981 war die Marsch eingedeicht. | |
| 6. Neßsand, Hahnöfer Nebelbe und Mühlenberger Loch (unterhalb km 632) | |
| Gesamtüberflutungsfläche | 1700 ha |
| davon Mühlenberger Loch | 730 ha |
| Gesamtspeicherraum bis HHThw (6,25 m NN) | $116,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ |
| 7. Hamburger Stromspaltungsgebiet | |
| Die Elbe zwischen Bunthaus (km 609) und Nienstedten (km 632) wurde zur Berechnung in 5 Abschnitte unterteilt: östliche und westliche Norderelbe, Süderelbe, Köhlbrand und Unterelbe (Abb. 15). Die topographischen und mittleren Tidedaten enthält Tab. 21. Zunächst wurden die Daten für die Elbe selbst ermittelt, dann die Hafengebiete getrennt zugeordnet. So ergeben sich für die Elbarme selbst wie für die Häfen je 1230 ha Wasserfläche. | |
| Landflächen im Hafen: | Überflutet bei 5,5 m NN wurden 1976: 2000 ha
und 1981: 300 ha |

als Folge der Bauten von Hochwasserschutzpoldern.

1976 waren erstmals alle Nebenflüsse abgesperrt. Die Fahrwasservertiefungen waren damals bereits beendet.

Von 1976 bis 1981 wurde die Fläche der hier erwähnten Stauräume auf rd. ein Drittel reduziert; dabei nahm der Gesamtspeicherraum bis HHThw auf knapp die Hälfte ab. Dennoch entwickelten sich die HThw-Höhen in der Elbe oberhalb von BRU bei vergleichbaren Sturmfluten auf Abb. 13 und 14 fast identisch. Da (außer am 3./4. 1. 76) der Oberwasser-

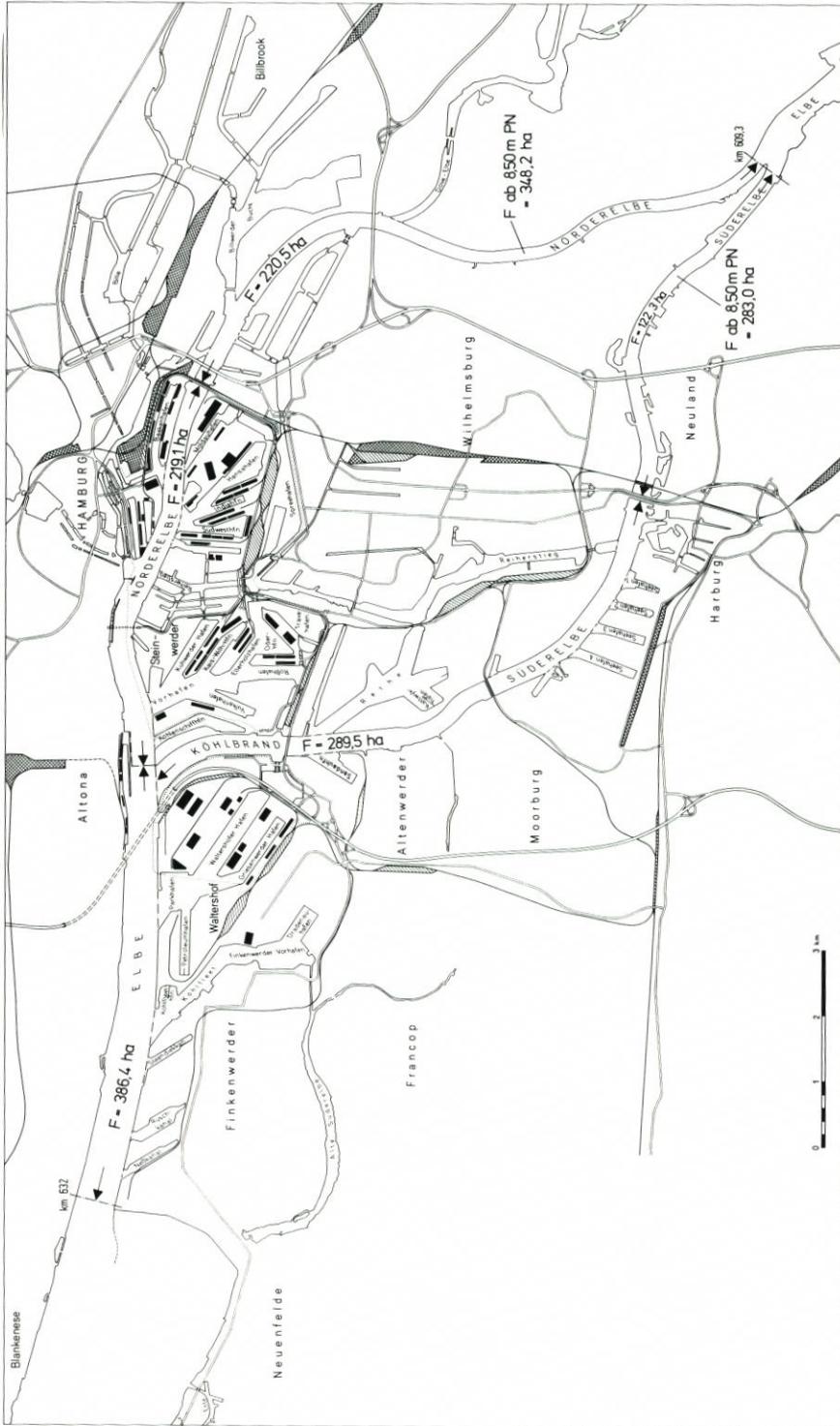


Abb. 15. Lageplan des Hamburger Stromspaltungsgebietes

Tabelle 21. Topographische Angaben und mittlere Tidedaten im Hamburger Stromspaltungsgebiet (Abb. 15)

		östl. Norder- elbe	westl. Norder- elbe	Süder- elbe	Köhl- brand	Unter- elbe	Sum- men
Flußlänge	km	10,0	6,0	5,6	9,7	6,7	
Elbe-Wasserfläche bei MThw	ha	220	220	120	280	390	1230
Hafen-Wasserfläche bei MThw	ha	250*)	520	-	170	290	1230
	Summe ha	470	740	120	450	680	2460

*) einschl. Billwerder Bucht (90 ha), die bei 3,5 m NN abgesperrt wird

	3 westl. Abschnitte		2 östl. Abschnitte	
	1976	1981	1976	1981
MThw cm NN - 5 m	690	715	696	734
MTnw cm NN - 5 m	375	375	409	439
MThb cm	315	340	287	295
T _F h		5.05		4.52
T _E h		7.20		7.33

abfluß etwa gleich war, ist dies ein Hinweis auf die relativ geringe Wirkung der Baumaßnahmen nach 1976 auf die HThw-Entwicklung. Dabei muß aber angemerkt werden, daß die Scheitelhöhen den eigentlichen Sturmflutablauf nur mangelhaft repräsentieren.

5. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H., SAARE, H.-O. u. SIEFERT, W.: Sturmflut-Scheitelhöhen in Cuxhaven und Hamburg von 1661 bis 1984. Ref. Hydrol. Unterelbe, Studie 59, Cuxhaven 1985 (unveröff.).
- DIETZE, W.: Die Veränderung der Wasserstände in den großen deutschen Tideflüssen seit 100 Jahren. Dt. Gew. Mitt., H. 1, 1983.
- DUENSING, G., HÖFLICH, O., KAUFELD, L., SCHMIDT, H., OLBRÜCK, G. und BRANDT, B.: Meteorologische Untersuchungen über Stürme an der deutschen Nordseeküste. Dt. Wetterd., Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 108, Hamburg 1985.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- LIETZ, U.: Zum Nullpunkt der Pegel Roter Sand und Alte Weser. Dt. Gew. Mitt., H. 2, 1986.
- SAARE, H.-O. u. SIEFERT, W.: Die Sturmflutentwicklung in der Elbe von 1950 bis 1980 als Mittelwerte über 5 und 10 Jahre. Ref. Hydrol. Unterelbe, Studie 62, Cuxhaven 1985 (unveröff.).
- SIEFERT, W. u. CHRISTIANSEN, H.: Entwicklung und Stand der Sturmflutvorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes. Hamb. Küstenforschung, H. 42, 1983.
- SIEFERT, W.: Energiebetrachtungen zum Tideablauf in Flüssen mit einigen Anwendungsbeispielen. Mitt. des Franzius-Inst. der Univ. Hannover, H. 58, 1984.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- O. V.: Sturmfluten von 1901 bis 1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg. Hamb. Küstenforschung, H. 44, 1985.

Symbolverzeichnis

b_m	mittlere Flußbreite zwischen MTnw und MThw bzw. HThw	m
HThw	Sturmflut-Scheitelhöhe	cm NN - 5 m
K_e	Ebbestrom-Kenterzeitpunkt	h
K_f	Flutstrom-Kenterzeitpunkt	h
MThb	mittl. Tidehub	m
MThw	mittl. Tidehochwasser	cm NN - 5 m
MTnw	mittl. Tideniedrigwasser	cm NN - 5 m
Q_o	Oberwasserabfluß	m^3/s
T_E	Ebbedauer	s
T_F	Flutdauer	s
Thb	Differenz Thw - Tnw	m
V_e	Ebbestromgeschwindigkeit	m/s
V_f	Flutstromgeschwindigkeit	m/s
$\eta(t)$	Tidewasserstand	mKN, mNN
ΔH	Differenz der Höhen der Tidescheitel zweier Pegel	m
ΔT	Differenz der Eintrittszeiten der Tidescheitel zweier Pegel	s

Pegelverzeichnis

Küstengebiet:	BOR	Borkum-Südstrand
	NOR	Norderney
	WHV	Wilhelmshaven - Alter Vorhafen
	AW	Alte Weser
	RS	Roter Sand
	CUX	Cuxhaven
	BÜS	Büsum
	WIT	Wittdün
	LIS	List
	Ems:	HER
PAP		Papenburg
LEE		Leerort
POG		Pogum
EMD		Emden
OTE		Oterdum
NST		Nieuwe Staatenzijl
Weser:	HEM	Weserwehr UW
	BRE	Bremen - Gr. Weserbrücke
	OSL	Oslebshausen
	VEG	Vege sack
	FAR	Farge

	ELS	Elsfleth
	HUN	Huntesperrwerk
	BRA	Brake
	NOR	Nordenham
	BHV	Bremerhaven – Alter Leuchtturm
Elbe:	GEE	Geesthacht UW
	ZOL	Zollenspieker
	BUN	Bunthaus
	SEE	Seemannshöft
	BLA	Blankenese
	SUL	Schulau
	STA	Stadersand
	KRA	Krautsand
	BRO	Brokdorf
	BRU	Brunsbüttel

Numerische Simulation des Schwebstofftransportes auf der Basis der Meßkampagne MASEX '83

Von Mark MARKOFFSKY, Günther LANG und Reiner SCHUBERT

Zusammenfassung

Im Herbst 1983 wurde in der Unterweser im Bereich der Trübungswolke und der Schlickzone die Meßkampagne MASEX '83 (Mud And Suspended Sediment Experiment) zur Beobachtung des Sediment- und Schwebstoffverhaltens durchgeführt. Parallel zur empirischen Datenauswertung (FANGER et al., 1985) wurden mit Hilfe eines numerischen Modells die Daten auf Konsistenz überprüft. Es konnte eine erste Eichung des Modells durchgeführt werden, obwohl die Daten lückenhaft sind und das Gebiet mit 4,45 km Länge sehr kurz war. Die Schlußfolgerungen aus der Modellierung spielten in der Planung des im Jahre 1985 durchgeführten Nachfolgemeßprogramms eine zentrale Rolle.

Summary

A field survey was undertaken in the fall of 1983 in order to measure bottom and suspended sediment transport in the vicinity of the turbidity maximum and mud zone of the lower Weser Estuary. The data from this "MASEX '83" survey (Mud And Suspended Sediment Experiment) were both empirically evaluated (FANGER et al., 1985) and tested for consistency using a two-dimensional numerical transport model. A first model calibration could be made, although the data set was incomplete and the survey reach short, i.e. 4.45 km. The conclusions drawn from the modelling effort played a central role in the planning of the MASEX '85 field survey.

Inhalt

1. Einleitung	171
2. Das numerische Modell	172
2.1 Stationäres Konzentrationsprofil	177
2.2 Sedimentation ohne Erosion	177
2.3 Sedimentation mit zeitweiliger (periodischer) Erosion	178
2.4 Stationäres Trübungsmaximum	179
3. Der Einsatz der Messungen von MASEX '83 im numerischen Modell.	181
3.1 Datenlücken	181
3.2 Pegelmessungen	181
3.3 Attenuationsmessung	181
4. Die numerischen Ergebnisse.	184
5. Schlußfolgerung	189
6. Schriftenverzeichnis	189

1. Einleitung

Der Schwebstofftransport in Tidegewässern wird im wesentlichen durch die folgenden Parameter bestimmt:

- Oberwasserzufluß,
- Morphologie,
- Salz- und Temperaturgradienten,

- Erosion und Sedimentation am Boden,
- effektive Sinkgeschwindigkeit des Schwebstoffes unter Berücksichtigung der Turbulenz,
- physikochemische Prozesse (Flockung),
- biologische Vorgänge.

In vielen Ästuaren (z. B. Themse [OWEN u. ODD, 1981], Seine [SALOMON, 1982], Weser [WELLERSHAUS, 1981]) führt die Wechselwirkung der o. g. Parameter zu einem Trübungsmaximum, d. h. einer Anhäufung von Schwebstoffpartikeln innerhalb eines bestimmten Gebietes, was eine erhöhte Absetzung mit hohen Baggerungskosten zur Folge hat. Hinzu kommt die Umweltbelastung durch die Beseitigung des mit Schwermetallen belasteten Baggerguts.

Im Jahre 1983 wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes „Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren“ eine 5tägige intensive Meßaktion in einem 4,5 km langen Weserabschnitt in der Nähe von Nordenham durchgeführt*). Eine detaillierte Beschreibung des Meßprogramms und der Ergebnisse ist aus FANGER et al. (1985) zu entnehmen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Sonderforschungsbereiches 205 der Universität Hannover ist ein dreidimensionales, vertikal strukturiertes numerisches Modell zur Simulation der Entstehung und Ausbreitung von Schlick in der Brackwasserzone eines Ästuars in Entwicklung. Die Leistungsfähigkeit des Modelles ist an vielen zweidimensionalen Prinzipbeispielen gezeigt worden (s. MARKOFSKY, LANG, SCHUBERT, 1985, 1986). Vorhandene Naturmessungen der Meßkampagne MASEX '83 der KFKI-Projektgruppe wurden herangezogen, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Strömung, Salzgehalt, Temperatur und Schwebstoff am Naturfall zu untersuchen und damit einen Beitrag zur Interpretation der Meßergebnisse zu leisten.

Vorteile mathematischer Modelle bestehen darin, daß mit verhältnismäßig einfachen Mitteln Prognoserechnungen für geänderte Anfangs- und Randbedingungen und für eine geänderte Topographie bei Baumaßnahmen durchgeführt werden können. Die Massen- und Volumenströme können bilanziert werden. Durch Testrechnungen können Aussagen getroffen werden für die Planung eines Meßprogramms, z. B. welche Daten sinnvollerweise an welchen Stellen und mit welcher zeitlichen Auflösung gemessen werden sollen.

In diesem Aufsatz wird das Modell kurz beschrieben; seine Eigenschaften werden anhand von Prinzipbeispielen dargestellt, die Anwendbarkeit der Naturdaten zur Steuerung, Eichung und Verifikation des Modells wird erläutert und die Modellergebnisse ausgewertet. Physikochemische und biologische Prozesse werden nicht behandelt.

2. Das numerische Modell

In den vergangenen Jahren wurde am Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover die Modellfamilie TISAT zur Simulation der Tidedynamik sowie der Salzgehalts- und Temperaturverteilungen in Ästuaren erstellt. Die Entwicklung der Grundversion dieses Programmsystems erfolgte im Rahmen von Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs 79 „Wasserforschung im Küstenbereich“ unter Projektleitung von K. FISCHER (1978). TISAT umfaßt vier Finite-Differenzen-Programme, die in Tab. 1 aufgeführt sind.

*) An der Meßaktion waren die folgenden Institutionen beteiligt: GKSS, Geesthacht; Institut für Meeresforschung, Bremerhaven; Strom- und Hafengebäudeamt, Hamburg; Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven.

Tabelle 1. Modellfamilie TISAT

P1	Eindimensional	Gut durchmischte Ästuarien mit regelmäßiger Geometrie
P2H	Zweidimensional (vert.integr.)	Gut durchmischte Ästuarien, unregelmäßige Geometrie, Wattgebiete
P2V	Zweidimensional (horiz.integr.)	Geschichtete Ästuarien mit regelmäßiger Geometrie
P3	Dreidimensional	allgemein

Für eine ausführliche Beschreibung der unterschiedlichen Modelltypen einschließlich der Gleichungen siehe BLOSS et al. (1982). Die laufenden Forschungsaktivitäten sehen eine Erweiterung der Modellfamilie, insbesondere des Modells P3 auf die Simulation von Schwebstofftransporten vor.

Die MASEX '83 Daten zeigen sowohl starke Längs- als auch Vertikalgradienten von Salzgehalt und Schwebstoff. Quermessungen lagen nicht vor. Daher wurde das zweidimensionale, vertikal strukturierte Modell zur Simulation der tideabhängigen Strömungs-, Salzgehalts-, Temperatur- und Schwebstofffelder gewählt (P2V).

Im einzelnen lauten die verbleibenden Gleichungen:

1. Kontinuitätsgleichung

$$(bu)_{,x} + (bw)_{,z} - q = 0 \quad (1)$$

2. Bewegungsgleichung

$$u_{,t} + uu_{,x} + wu_{,z} + (uq)/b - A_x u_{,xx} - A_z u_{,zz} + p_{,x}/\rho = 0 \quad (2)$$

3. Hydrostatische Druckverteilung

$$\frac{1}{\rho} p_{,x} = gZ_{,x} \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{g}{\rho} \int_z^Z \rho_{,x} d\zeta \quad (3)$$

4. Transportgleichung für Salz ($\Phi = s$), Temperatur ($\Phi = T$) und Schwebstoff ($\Phi = c$)

$$\Phi_{,t} + (ub\Phi)_{,x} + b((w - w_s)\Phi)_{,z} = K_x(b\Phi_{,xx})_{,x} + K_z b\Phi_{,zz} + q_{zu}\Phi_{,zu} - q_{ab}\Phi_{,ab} \quad (4)$$

Für s und T ist $w_s = 0$

5. Zustandsgleichung

$$\rho = \rho_0 \{1 - [7(T - T_0)^2 - 750s] \cdot 10^{-6}\} \quad (5)$$

mit $\rho_0 = 999.972 \text{ kg/m}^3$, $T_0 = 3.98 \text{ }^\circ\text{C}$ und ρ in kg/m^3 , T in $^\circ\text{C}$ und s in $\%$

Die Zeit ist mit t bezeichnet, die horizontale bzw. vertikale Koordinate mit x bzw. z . Die abhängigen Variablen sind die Horizontalgeschwindigkeit u , die Vertikalgeschwindigkeit w , der aktuelle Wasserstand Z , der hydrostatische Druck p , die Dichte ρ , der Salzgehalt s , die Temperatur T und die Schwebstoffkonzentration c . Die mit Kommata versehenen Indizes x, z

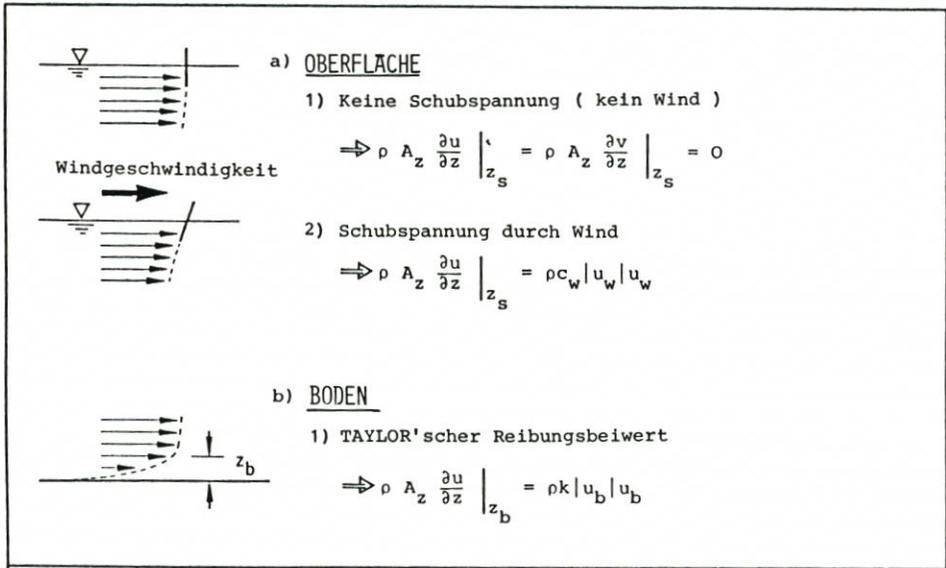


Abb. 1. Die Randbedingungen zur Lösung der NAVIER-STOKES-Gleichungen

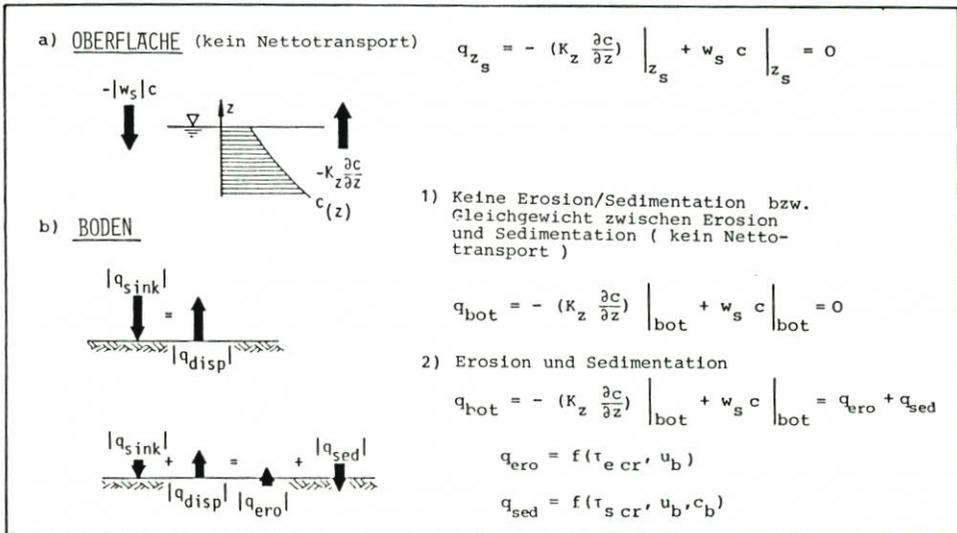


Abb. 2. Die Randbedingungen zur Lösung der Transportgleichung

und t an diesen Variablen bezeichnen die (ggf. mehrfache) Ableitung nach der jeweiligen Größe. Als Eichparameter sind die turbulenten Zähigkeiten A_x und A_z sowie die Dispersionskoeffizienten K_x und K_z eingeführt. Die lokale Breite des Ästuars ist mit b , mit q sind die seitlich eingeleiteten (Index zu) oder entnommenen (Index ab) Volumenströme pro Flächeneinheit bezeichnet. Die Erdbeschleunigung ist g , die Sinkgeschwindigkeit w_s .

Die Turbulenz der Strömung ist durch sogenannte „Dispersionskoeffizienten“ parametrisiert. Die Koeffizienten sind im allgemeinen Funktionen der Geschwindigkeit, der Zeit und der Dichte (RICHARDSON-Zahl).

Das Geschwindigkeitsfeld ist über den Druckterm mit dem Temperatur- und dem Salzgehaltsfeld gekoppelt.

Zur Lösung der Gleichungen sind an allen Rändern des Lösungsgebietes Randbedingungen vorzugeben. Abb. 1 zeigt die Randbedingungen an der Oberfläche und am Boden des Gewässers zur Lösung der Bewegungsgleichungen, Abb. 2 dasselbe zur Lösung der Transportgleichung. Die hydrodynamische Randbedingung an der Oberfläche ist bei Windstille durch einen vertikalen Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichnet, d. h., es ist keine Scherspannung vorhanden. Diese tritt erst bei der Simulation von Wind auf, so daß ein Gradient in den Geschwindigkeiten auch an der Oberfläche vorhanden ist. Am Boden wird der Geschwindigkeitsgradient als proportional zum Quadrat der 1,0 m über Grund vorhandenen Geschwindigkeit angenommen.

Die Oberflächenrandbedingung für die Transportgleichung wird beschrieben durch ein Gleichgewicht zwischen dem nach unten gerichteten Transport infolge der Sinkgeschwindigkeit und dem nach oben gerichteten Transport durch die Turbulenz, d. h., es findet kein Materialtransport durch die Oberfläche statt. Die Randbedingung am Boden wird in gleicher Weise beschrieben, wenn keine Erosion oder Sedimentation stattfindet. Sonst werden zwei weitere Terme zur Beschreibung dieser Effekte in die Randbedingung eingeführt (s. Abb. 2). Zur mathematischen Beschreibung von Erosion und Sedimentation gibt es viele Ansätze. Für die hier betrachteten Teilchen mit einer Größe von $< 100 \mu\text{m}$, und damit geringen Sinkgeschwindigkeiten, bietet sich der Ansatz von PARTHENIADES (1962) und KRONE (1962) an (Abb. 3). Dieser Ansatz beinhaltet eine kritische Scherspannung für den Beginn der Erosion und eine kritische Scherspannung, bei der die Sedimentation aufhört. Wenn diese Scherspannungen erreicht werden, sind beide Phänomene direkt proportional dem Quadrat der Bodengeschwindigkeit (1,0 m über Grund).

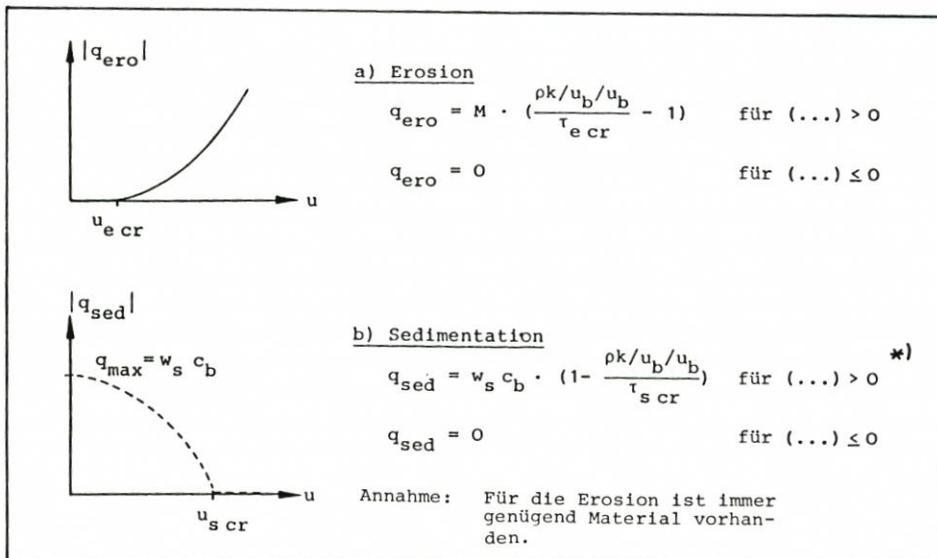


Abb. 3. Die Parametrisierung von Erosion und Sedimentation (nach PARTHENIADES, 1962, und KRONE, 1962)

*) In der Literatur wird bei der Sedimentation ein zusätzlicher Faktor eingeführt, um die Verkleinerung der Sinkgeschwindigkeit in Bodennähe zu erfassen (s. SHENG, 1983). Dies ist auch im Modell berücksichtigt

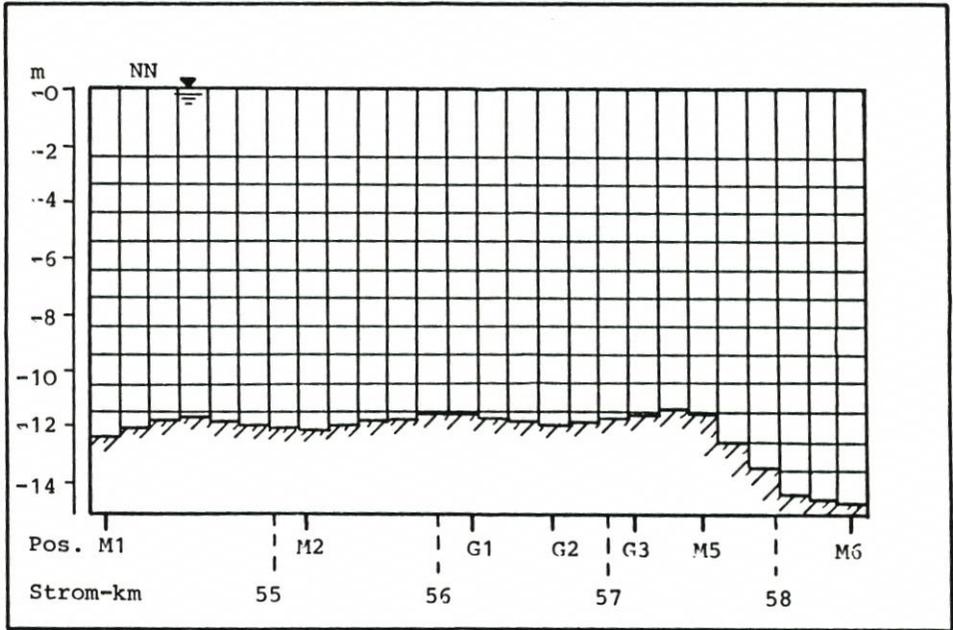


Abb. 4. Schematisierung des Weserästuars zwischen Strom-km 54,00 und 58,45

An den geschlossenen Rändern des Gebietes wird die Geschwindigkeit = 0 gesetzt.

An den offenen Rändern ist immer der Wasserstand oder das vertikale Geschwindigkeitsfeld sowie die Temperatur, der Salzgehalt und die Schwebstoffkonzentration vorzugeben.

Die Schematisierung des Gebietes ist in Abb. 4 dargestellt. Der Abstand der Tiefenschritte und deren Anzahl (bis zu 14) über die Tiefe ist variabel (zwischen 1,0 und 2,5 m). Der Längsschritt beträgt 178,0 m. Die Oberflächenelementdicke ist mit den Wasserstandsänderungen variabel. Die Bodenelementdicke wird nach der vorgegebenen Gesamttiefe der Wassersäule berechnet. Es wird ein versetztes numerisches Gitternetz (staggered grid) eingesetzt. Dieses besagt, daß die vom Volumen abhängigen Größen (Dichte, Temperatur, Salzgehalt und Konzentrationen) in der Mitte der Elemente berechnet werden, aber die Geschwindigkeiten an den Rändern. Die horizontalen advektiven und diffusiven Terme werden explizit berechnet, während die vertikalen konvektiven Terme implizit berechnet werden. Durch einen Wichtungsfaktor kann das Maß der Impliztheit bestimmt werden. Durch diese gemischte explizit-implizite Vorgehensweise erhält man eine befriedigende numerische Genauigkeit und Stabilität auf ökonomischem Weg (vgl. PERRELS u. KARELSE, 1981). Näheres ist aus MARKOFSKY (1984) zu entnehmen.

Für die Eichung des Geschwindigkeitsfeldes stehen die Reibungs- und Austauschkoefizienten zur Verfügung. Die Berechnung des Temperatur- und Salztransportes wird durch die Wahl der Austauschkoefizienten beeinflusst. Bei der Berechnung des Schwebstofftransportes sind zusätzlich die Sinkgeschwindigkeit und die kritische Bodenschubspannungen für Erosion und Sedimentation anzugeben.

Vier Prinzipbeispiele zeigen die Eigenschaften des Modells:

2.1 Stationäres Konzentrationsprofil

Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen den durch die Gleichung 6 (ROUSE, 1937)

$$\frac{c}{c_a} = \exp\left(\frac{-w_s}{K_z}(z - a)\right) \quad (6)$$

gegebenen und numerisch berechneten stationären Konzentrationsprofilen, wie sie z. B. in einem Fluß zu erwarten sind. Der Schwebstoff ist gekennzeichnet durch seine Sinkgeschwindigkeit w_s , die vertikale Turbulenz durch den vertikalen Dispersionskoeffizienten K_z . Es

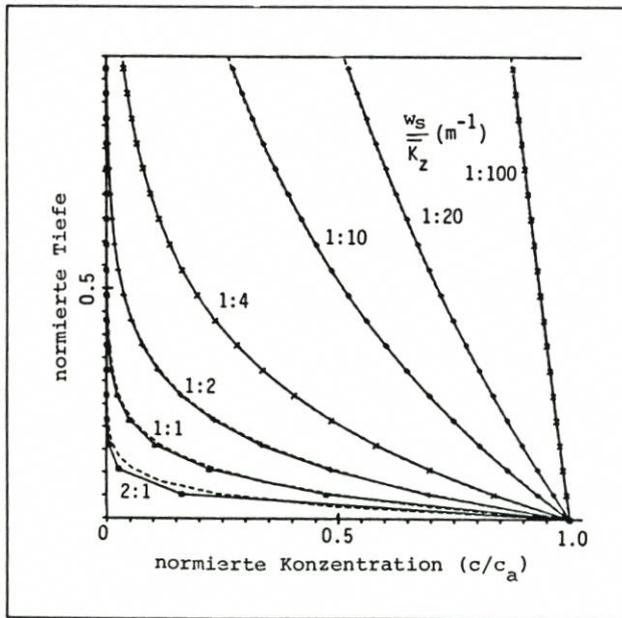


Abb. 5. Stationäres Konzentrationsprofil

Anm.: Turbulente Diffusivität K_z konstant über die Tiefe Sinkgeschwindigkeit w_s konstant über die Tiefe keine Sedimentation/Erosion am Boden

entsteht eine Kurvenschar nach dem Parameterverhältnis w_s/K_z (m^{-1}). Mit zunehmendem Verhältnis (von rechts nach links in Abb. 5) nimmt die bodennahe Konzentration zu. Bei kleinem Verhältnis, z. B. 1:20, d. h. kleine Sinkgeschwindigkeit (kleine Partikel), ist die Verteilung über die Tiefe weitgehend homogen.

2.2 Sedimentation ohne Erosion

Zum Zeitpunkt $t = 0 \cdot s$ ist ein exponentieller Verlauf der Konzentration über die Tiefe vorhanden. Danach wird Sedimentation am Boden simuliert. Der Fluß durch die Wasseroberfläche ist gleich 0. In diesem Fall stellt sich zu Zeiten $t > 0 \cdot s$ ein Nullgradient in der Konzentration am Boden ein. Abb. 6 zeigt vertikale Konzentrationsprofile zu sechs unterschiedlichen Zeiten nach dem Einsetzen der Sedimentation (numerische, analytische [nach DOBBINS, 1943] und experimentelle Ergebnisse).

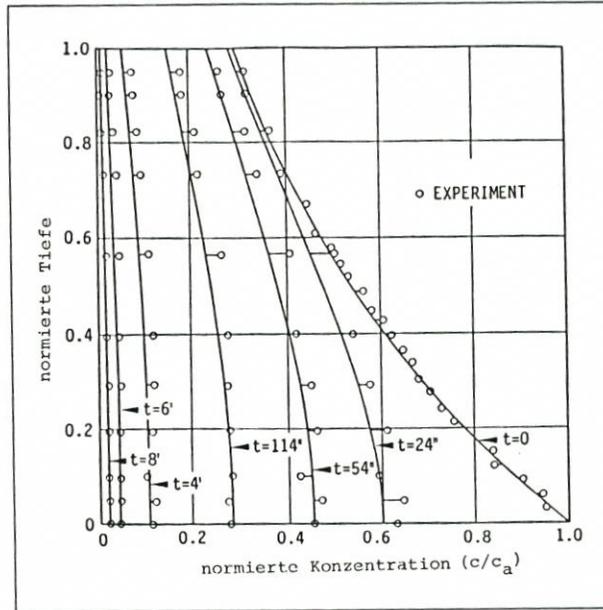


Abb. 6. Vertikales Konzentrationsprofil für Sedimentation ohne Erosion. Vergleich zwischen numerischer (—), analytischer (---) Lösung und experimentellen Daten (o) (s. DOBBINS, 1943) 11 Elemente in der Vertikalen

2.3 Sedimentation mit zeitweiliger (periodischer) Erosion

Den Einfluß einer kritischen Scherspannung τ_{ecr} auf die Zeitabhängigkeit der Konzentration am Boden zeigt Abb. 7. Die Bodenschubspannung wird, wie in Abb. 3 dargestellt, beschrieben. Hier wird die Geschwindigkeit u durch eine Sinusfunktion vorgegeben. Dies wird mit zwei verschiedenen Verhältnissen für τ_{ecr}/τ_{bmax} (τ_{bmax} – maximal auftretende Bodenschubspannung) durchgeführt und zwar 1:6 (hoher Erosionsanteil) und 5:6 (geringer Erosionsanteil). Während der durch eine Schraffur auf der Zeitachse gekennzeichneten Zeiten findet Erosion statt. Die Sedimentationsrate wird durch den Massentransport $\tau_{sed} = w_s \cdot c_b$ beschrieben.

Man erhält folgende Ergebnisse:

- Je größer der Wert τ_{ecr}/τ_{bmax} (5:6) ist, desto größer ist die Asymmetrie des zeitlichen Verlaufes der Konzentration. Obwohl der Zeitraum der Erosion kurz ist, wird schlagartig eine Menge Material in Suspension gebracht. Danach setzt eine lange Phase der Sedimentation ein (exponentieller Verlauf).
- In größerem Abstand vom Boden zeigen die Kurven immer mehr einen sinusförmigen Verlauf, da die höheren Frequenzanteile durch Diffusion gedämpft werden.
- Wenn τ_{ecr}/τ_{bmax} kleiner wird (1:6), zeigen auch die Konzentrationen am Boden einen sinusförmigen Verlauf.

In Abb. 8 werden die Ergebnisse von Messungen in der Trübungswolke im Weserästuar gezeigt. Der Verlauf der Trübung zeigt den aus dem vorherigen Beispiel typischen Verlauf der Konzentration; den schnellen und heftigen Einsatz der Erosion bei Beginn der Flut und die allmähliche Sedimentation.

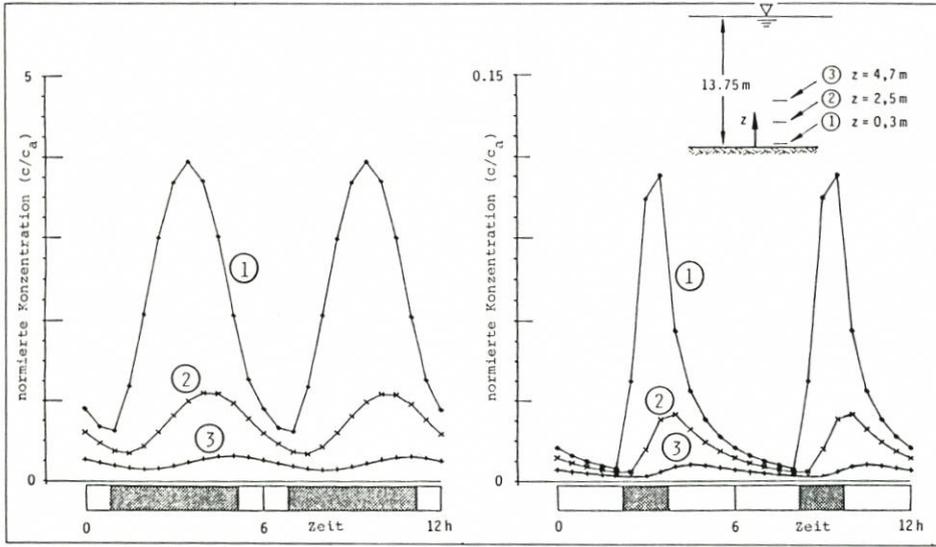


Abb. 7. Zeitabhängige Konzentration in verschiedenen Tiefen bei periodischer Erosion. Konstante Dispersion. Die Konzentrationen sind normiert, linkes Bild: $\tau_{bmax}/\tau_{ecr} = 6,0$; rechtes Bild: $\tau_{bmax}/\tau_{ecr} = 1,2$; 25 Elemente in der Vertikalen

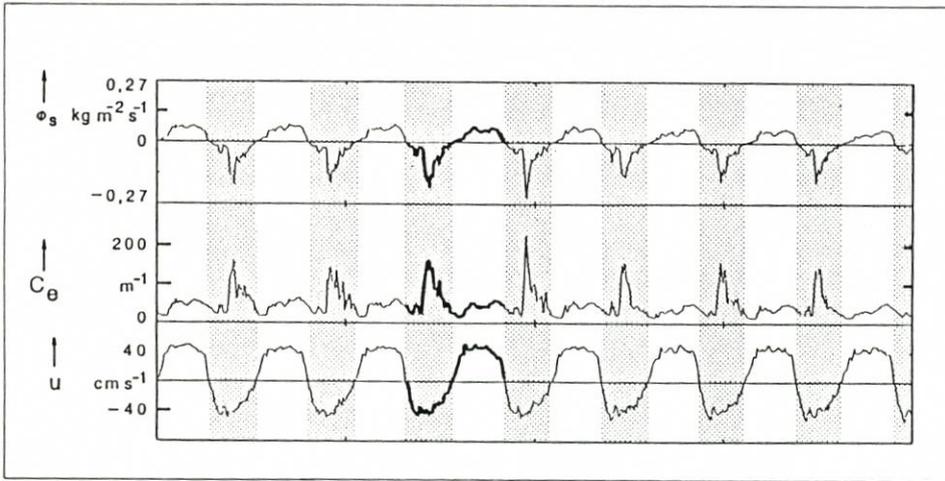


Abb. 8. Die Messungen im Weserästuar bei Blexen. Gezeigt sind Suspensionsfluß, Konzentrationen und die Geschwindigkeit

2.4 Stationäres Trübungsmaximum

Abb. 9 zeigt den Einfluß des Oberwassers auf ein berechnetes Trübungsmaximum für ein Ästuar. Das Rechenbeispiel ist an die Weser angepaßt. Es wurde ein 120 km langer, 800 m breiter Kanal simuliert. Am linken Rand wurden ein Salzgehalt s von 24 ‰ an der Oberfläche und 30 ‰ am Boden, eine Schwebstoffkonzentration $c = 0$ und ein konstanter Wasserstand vorgegeben. Am rechten Rand wurden der Salzgehalt mit $s = 0$ und ein Gleichgewichtsprofil für c nach Gl. 6 vorgegeben, wobei $w_s/K_z = 1:10$ angenommen wurde. Zwei Oberwasserzu-

flüsse, $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 9.a) und $300 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abb. 9.b), wurden simuliert. Abb. 9 zeigt, daß mit zunehmendem Oberwasser sowohl der Salzkeil als auch das Trübungsmaximum stromab transportiert werden (hier fast 30 km). Andere, hier nicht dargestellte Ergebnisse (s. MARKOVSKY et al. 1984, 1985) zeigen eine Abschwächung des Trübungsmaximums für kleinere Sinkgeschwindigkeit oder zunehmende vertikale Dispersion (beides führt zu kleineren w_s/K_z -Werten).

Überlagert sind im Naturfall die Bodenerosion, das Absetzverhalten zu den Kenterzeiten, instationäre und ungleichmäßige Geschwindigkeiten und zeitlich variable Randbedingungen, was den Naturfall stark von dem idealisierten Fall unterscheidet. Um das Modell auf den Naturfall anwenden zu können, sind Naturmessungen erforderlich. Damit soll eine Eichung durchgeführt, d. h. die wesentlichen Parameterwerte durch einen Vergleich Messung/Rechnung bestimmt werden. Auf die Frage, inwieweit die MASEX '83 Daten dazu geeignet sind, wird im folgenden eingegangen.

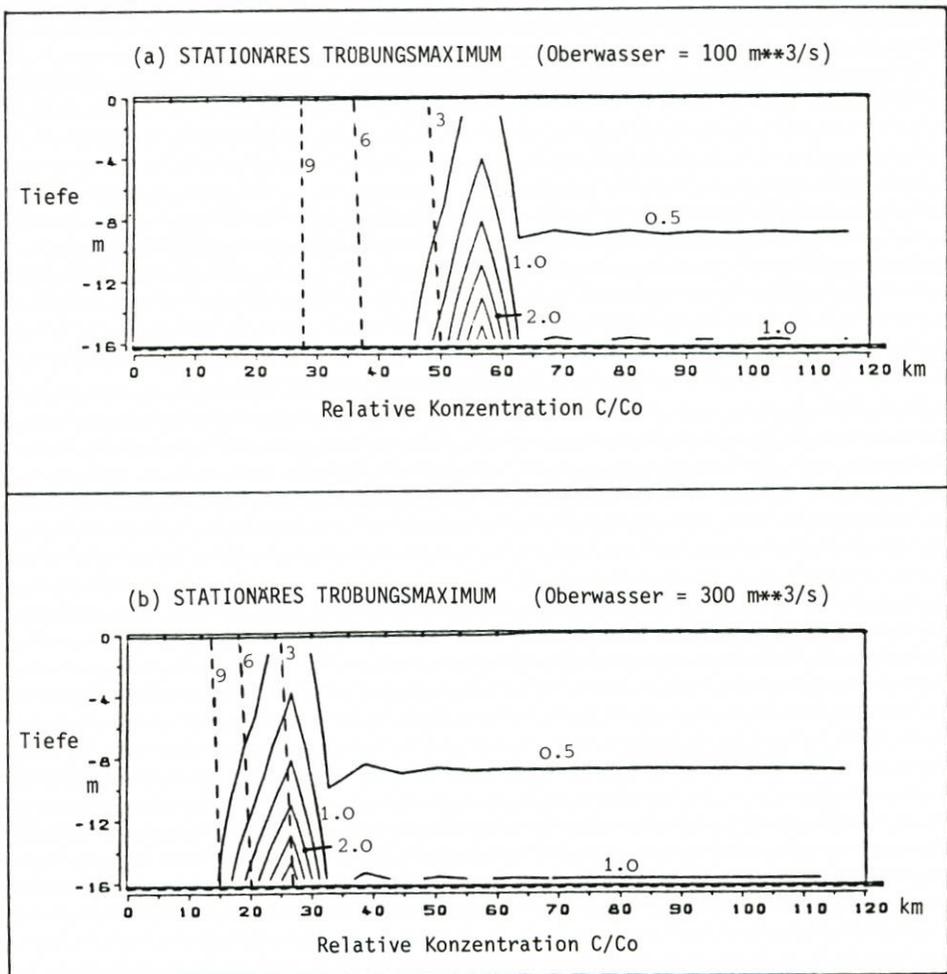


Abb. 9. Stationäres Trübungsmaximum bei unterschiedlichen Oberwasserzuflüssen
 Randbedingungen: rechts: Salzgehalt = 0, vertikales Gleichgewichtsprofil für die Trübung; links:
 Salzgehalt = 24 ‰ oben, 30 ‰ am Boden, Trübung = 0; $w_s/K_z = 1:10 \text{ m}^{-1}$;
 (—) C/C_0 , (----) Salzgehalt ‰

3. Der Einsatz der Messungen von MASEX '83 im numerischen Modell

Das Untersuchungsgebiet bei Nordenham hat eine Länge von 4,45 km und eine mittlere Tiefe von NN -12 m. Es wurden die Parameter Salzgehalt, Temperatur und Attenuation an den sieben Stationen M1, M2, G1, G2, G3, M5 und M6 (Abb. 10) ca. alle zwei Stunden über fünf Tage in den Tiefen NN -2 m bis NN -10 m gemessen. An den Positionen 1 bis 9 (Abb. 10) wurden Dauermeßstationen eingerichtet, die in einer Tiefe von 1,0 m über Grund die Parameter Salzgehalt, Temperatur und Geschwindigkeit in Richtung und Betrag gemessen haben.

Während des Zeitraumes herrschte ein mittlerer Tidehub von 3,80 m und ein Oberwasserzufluß von 180,0 m³/s.

3.1 Datenlücken

Für den Einsatz der Meßwerte im numerischen Modell ergeben sich etliche Schwierigkeiten, da folgende wichtige Größen nicht gemessen wurden:

1. Wasserstand am oberen Rand des Untersuchungsgebietes (s. Abs. 3.2)
2. Geschwindigkeitsverteilung in der Wassersäule
3. Sinkgeschwindigkeit des vorhandenen Schwebstoffes
4. Bodennahe Schwebstoff- und Salzkonzentrationen

Diese vorhandenen Datenlücken zu schließen, bedurfte es einiger Anstrengungen.

Da wesentliche Daten für die Steuerung des numerischen Modells fehlen und das Untersuchungsgebiet mit seiner Länge von 4,45 km sehr kurz für eine Modellrechnung ist, wurde beschlossen, nur die Fahrwasserrinne zu simulieren. Damit ergibt sich für das numerische Modell ein Gitternetz mit 26 Elementen mit je 178,0 m in Längsrichtung (alle 200,0 m breit) und bis zu (maximal) 14 Elementen mit je 1,0 m Höhe über die Tiefe.

3.2 Pegelmessungen

Der einzige innerhalb des Gebietes vorhandene Pegel war der bei Nordenham (Strom-km 58,00). Dieser Pegel wurde zur Steuerung des Wasserstandes am seeseitigen Rand benutzt. Der Pegel für den oberwasserseitigen Rand wurde durch eine lineare Interpolation zum Pegel Strohauser-Plate (Strom-km 49,00) berechnet. Ein Vergleich der mit diesen Randbedingungen berechneten Geschwindigkeiten mit den gemessenen zeigt eine Differenz im Verlauf und eine besonders deutliche Verschiebung der Kenterzeitpunkte. Der Verlauf des gemessenen Salzgehaltes (der zugleich ein Indikator für das Geschwindigkeitsfeld ist) deutet ebenfalls darauf hin, daß diese durch Interpolation gewonnene obere Randbedingung fehlerhaft ist. Daher wurde der Pegel am oberen Rand so lange korrigiert, bis eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Salztransport erreicht war (s. Abb. 11 und 14).

3.3 Attenuationsmessung

Die vom Schiff aus eingesetzte Meßanordnung konnte Attenuationskoeffizienten nur bis 172 m⁻¹ erfassen. Gerade in Bodennähe wurde dieser Wert bei weitem überschritten. Dieses zeigt Abb. 12, in der die vom Schiff aus gemessenen Attenuationskoeffizienten bei Pos. M6

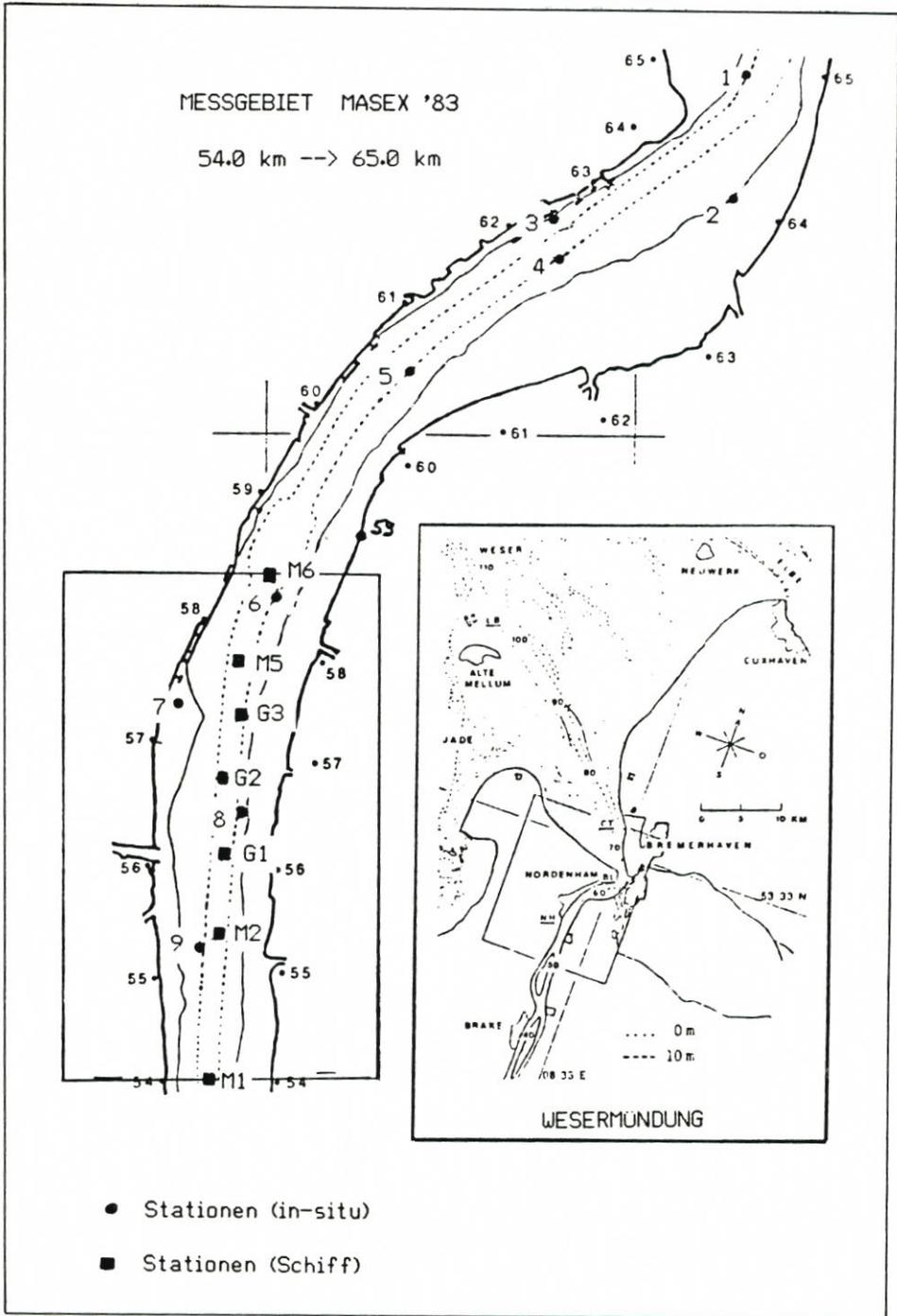


Abb. 10. Die Lage des Untersuchungsgebietes der Meßkampagne MASEX '83

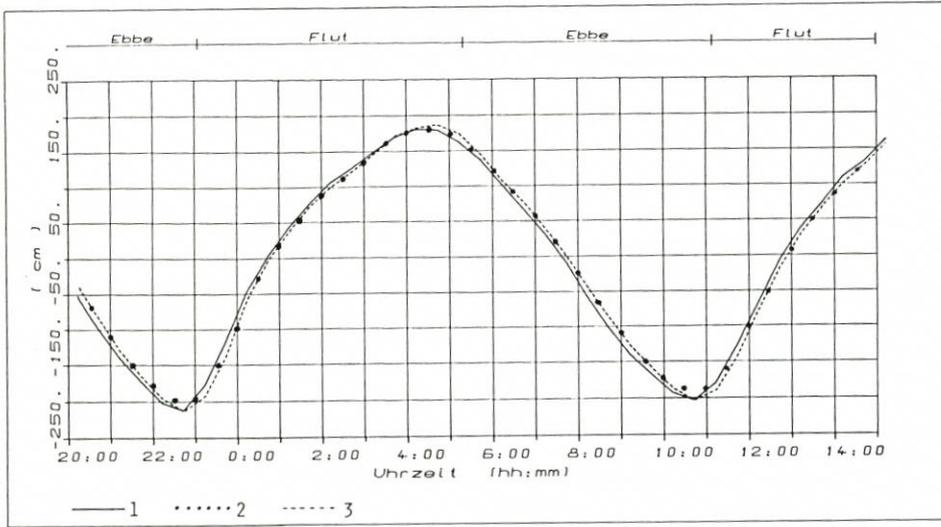


Abb. 11. Verlauf des gemessenen (1), des interpolierten (2) und des zusätzlich korrigierten (3) Pegels

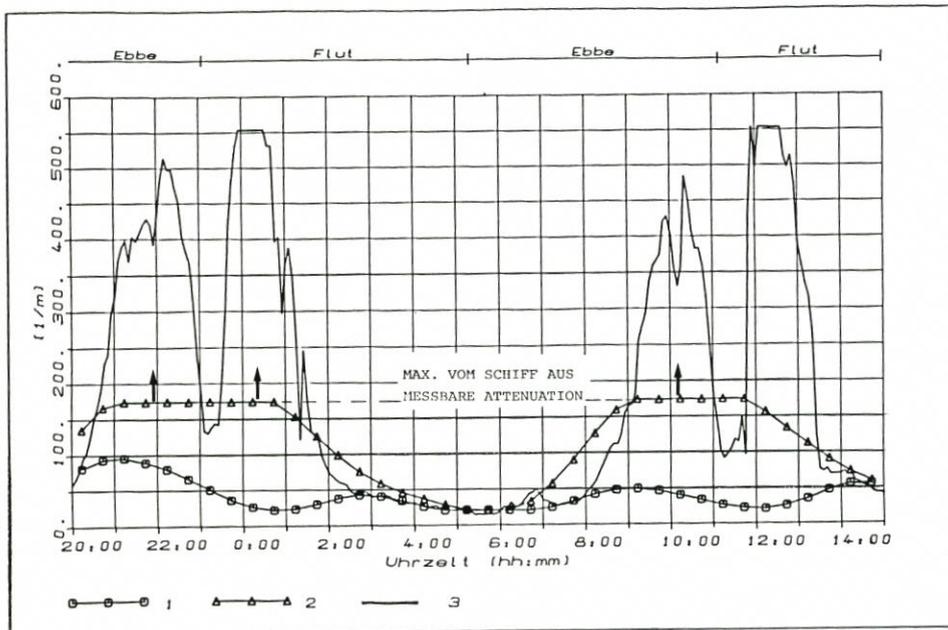


Abb. 12. Vergleich der bei Position M6 (1) NN -3 m, (2) NN -10 m gemessenen Attenuationswerte mit den Dauermessungen bei Station 5 (3)

mit denen der Station 5 der Dauermessungen gegenübergestellt sind. Die in den Tiefen größer NN -10 m nicht vorhandenen Werte der Attenuation und der durch die Kappung der Werte unvollständig wiedergegebene Verlauf erschwert eine Analyse der berechneten Werte.

Das Meßintervall von ca. 2 h ist außerdem unzureichend, wenn der zeitliche Verlauf der Attenuation (s. Abb. 12) mit seinen großen zeitlichen Gradienten genau verfolgt werden soll.

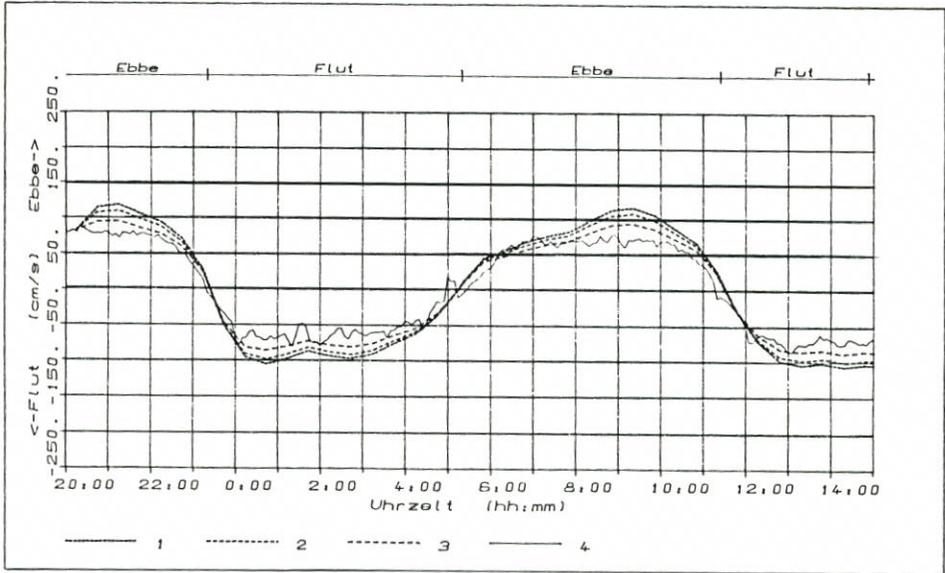


Abb. 13. Vergleich der an der Station G1 berechneten Geschwindigkeiten in (1) NN -2.m, (2) NN -6 m und (3) NN-10 m Tiefe mit denen der bei der Position 8 1 m über Grund gemessenen

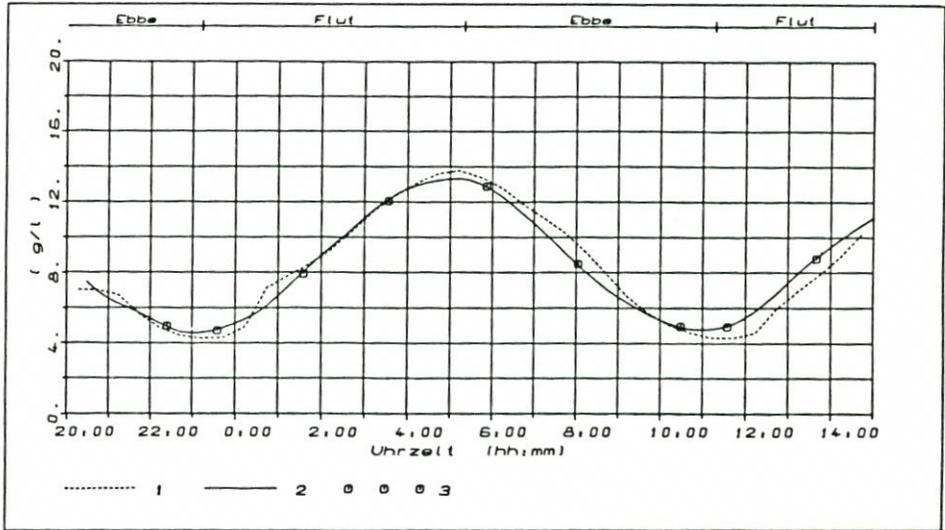


Abb. 14. Verlauf des berechneten (1) und des gemessenen (2) Salzgehaltes an der Station G1 in NN-6 m Tiefe

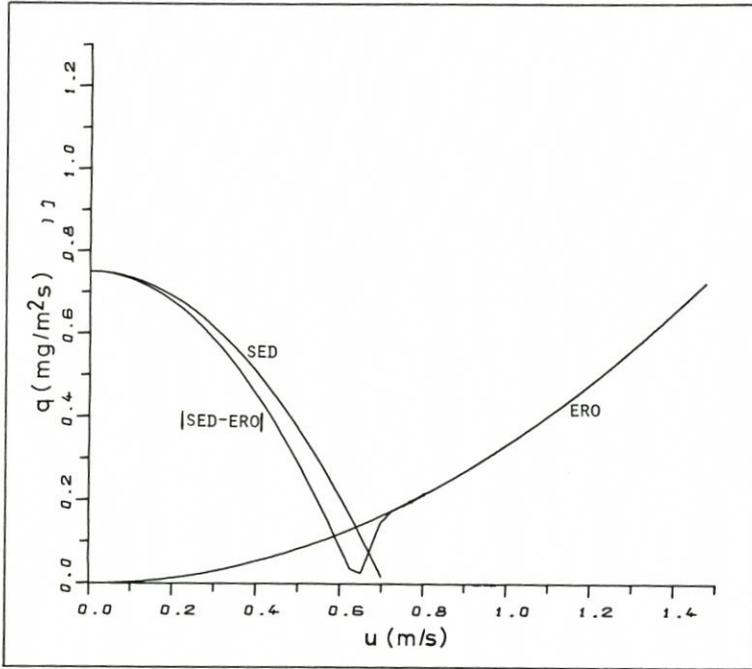


Abb. 15. Abhängigkeit der erodierten und sedimentierten Schlickmenge von der momentanen Geschwindigkeit

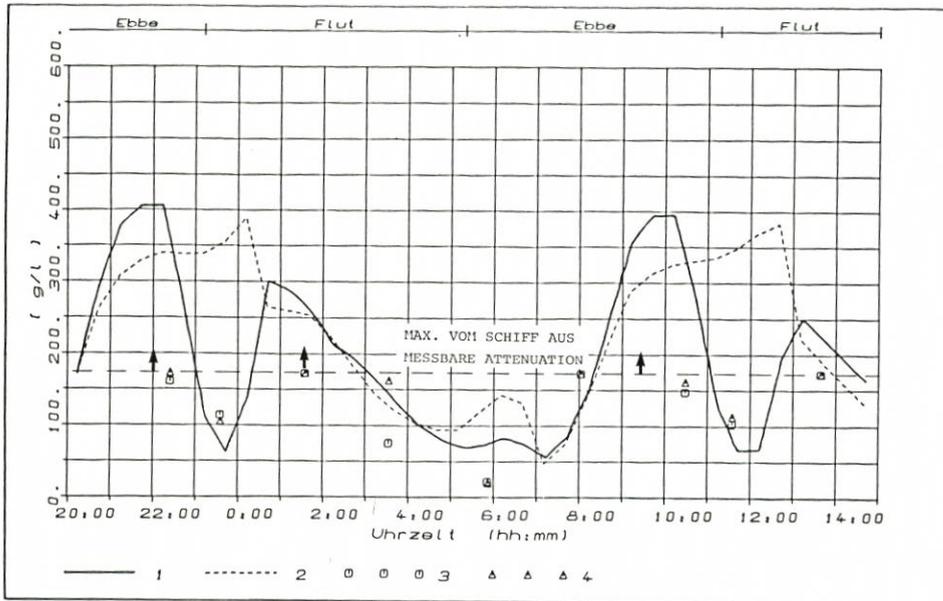


Abb. 16. Der Verlauf der bei Station G1 mit (1) und ohne (2) Erosion und Sedimentation in $\text{NN} - 10\text{m}$ berechneten Attenuation mit der in $\text{NN} - 9,5\text{m}$ (3) und $\text{NN} - 10,5\text{m}$ (4) gemessenen

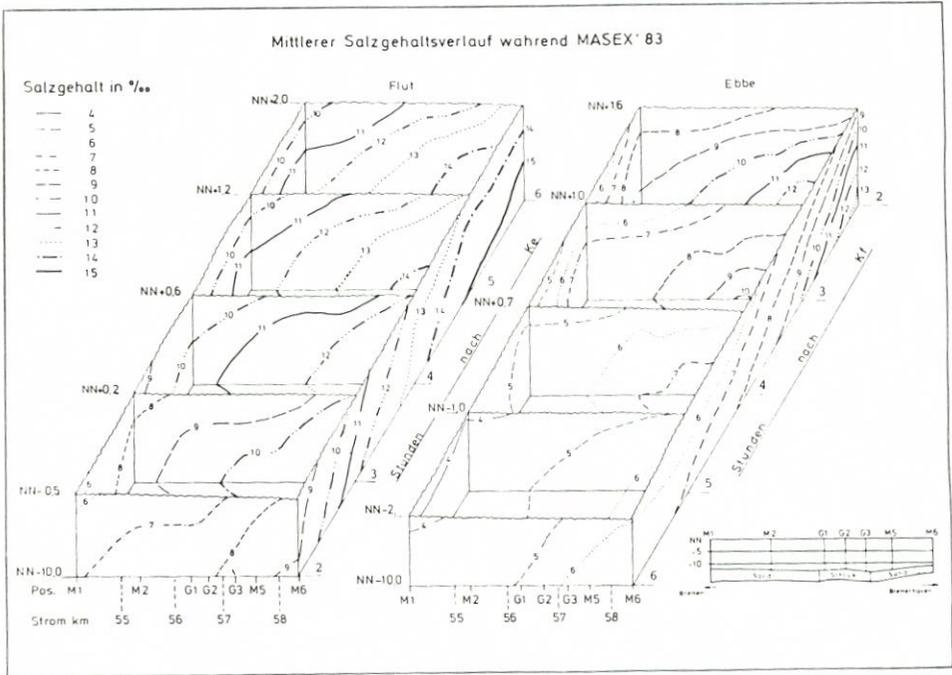


Abb. 17a. Mittlerer Verlauf des Salzgehaltes während der Meßkampagne MASEX '83 (bearb. von der MASEX-Arbeitsgruppe)

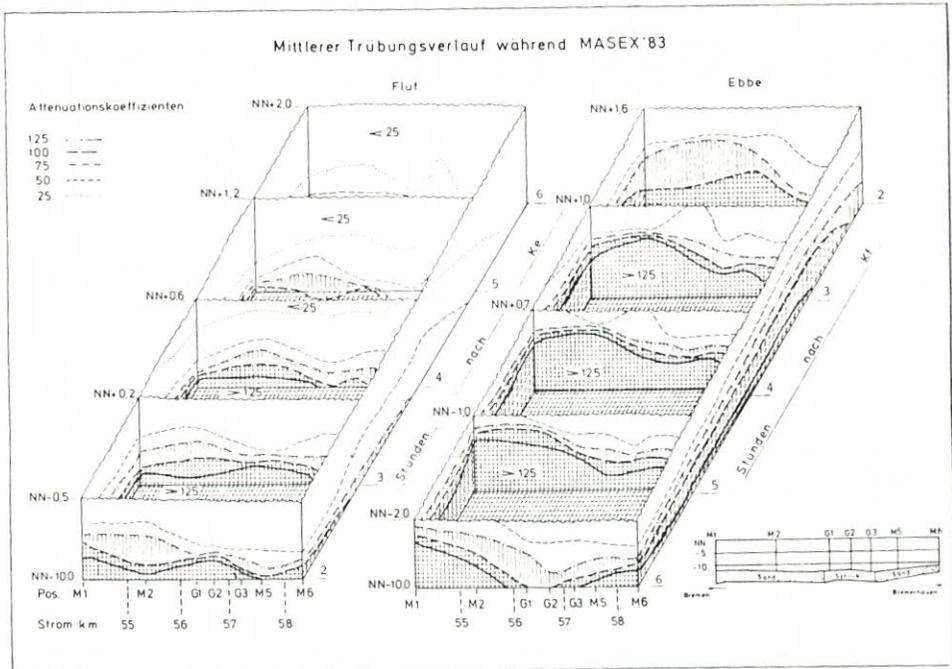


Abb. 17b. Mittlerer Verlauf der Attenuation während der Meßkampagne MASEX '83 (bearb. von der MASEX-Arbeitsgruppe)

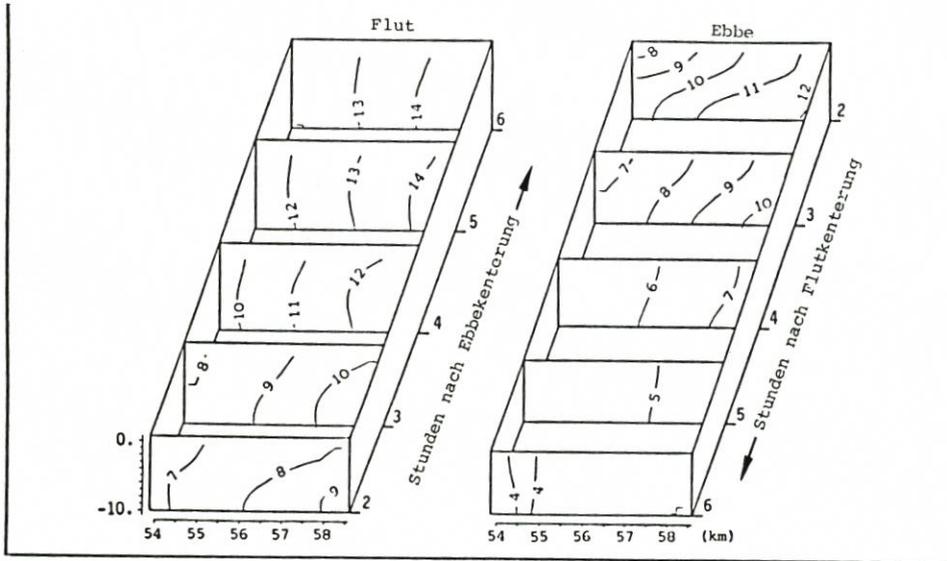


Abb. 18a. Berechneter Verlauf des Salzgehaltes für die Tide vom 26. und 27. Sept. 1983

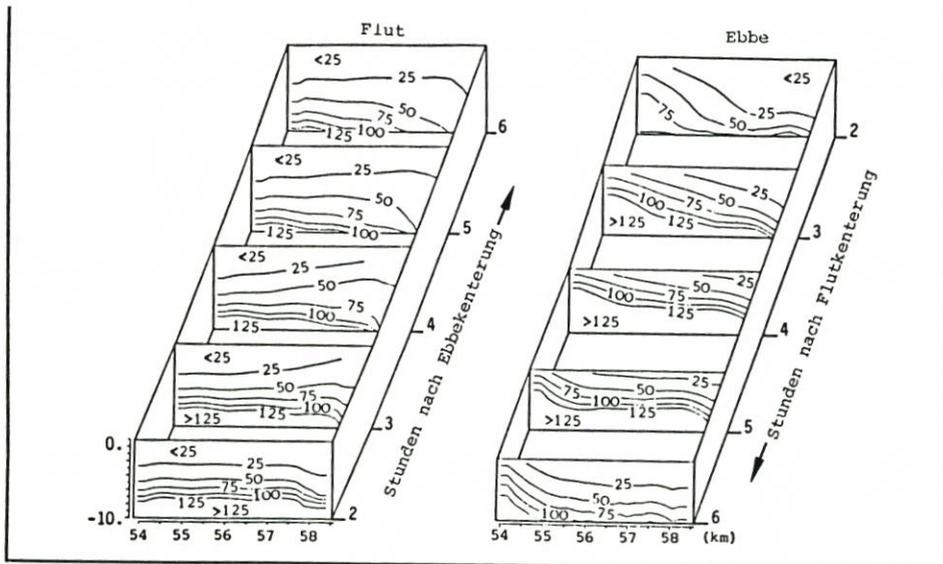


Abb. 18b. Berechneter Verlauf der Attenuation für die Tide vom 26. und 27. Sept. 1983

Bei der Interpretation der numerischen Ergebnisse muß daher berücksichtigt werden, daß die Aussagefähigkeit der berechneten Werte sehr stark von der Qualität der Randwerte abhängt.

4. Die numerischen Ergebnisse

Mit den vorhandenen Daten wurde als erstes eine Parameterstudie zur Reproduzierung des Geschwindigkeitsfeldes und des Salzgehalttransportes durchgeführt. Als die sich ergebenden Parameter wurden ermittelt:

TAYLOR'scher Reibungsbeiwert	$R_T = 0,004$
turbulente Zähigkeit	$A_z = 0,050 \text{ m}^2/\text{s}$
turbulente Dispersionskoeffizienten	$K_z = 0,005 \text{ m}^2/\text{s}$

Typische erzielte Ergebnisse für die Geschwindigkeitsverteilung und den Salztransport zeigen Abb. 13 und 14.

Für die Berechnung des Schlicktransportes sind außerdem die Parameter

- Sinkgeschwindigkeit
- kritische Spannung für Sedimentation
- Sedimentationsfaktor
- kritische Spannung für Erosion
- Erosionsfaktor

zu bestimmen.

Auch hier wurde eine Parameterstudie durch Variation dieser Werte durchgeführt. Als erstes wurde der Einfluß der Sinkgeschwindigkeit untersucht. Abb. 15 zeigt typische Ergebnisse bei nicht vorhandener Erosion und Sedimentation. Man sieht deutlich, daß ohne die Berücksichtigung von Erosion und Sedimentation der typische Verlauf der Trübung besonders in der Zeit 3 h vor bis 3 h nach Ebbekenterung nicht reproduziert werden kann.

Abbildung 16 zeigt die Menge von erodiertem und sedimentiertem Material für die gefundene Parameterkombination in Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit.

Die Parameter betragen:

Sinkgeschwindigkeit	$w_s = 0,002 \text{ m/s}$
Sedimentationsspannung	$\tau_{scr} = 2,0 \text{ N/m}^2$
Sedimentationsfaktor	$f_{sed} = 75 \text{ \%}$
Erosionsspannung	$\tau_{ecr} = 0,003 \text{ N/m}^2$
Erosionskonstante	$M = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$

Diese Werte liegen in der Größenordnung von im Labor gemessenen Werten (s. PARCHURE, 1984).

Der berechnete Trübungsverlauf unter Berücksichtigung von Erosion und Sedimentation ist auch in Abb. 15 dargestellt. Der typische Verlauf wird jetzt wesentlich besser wiedergegeben. Dabei ist noch einmal zu betonen, daß ein Attenuationskoeffizient $> 172 \cdot \text{m}^{-1}$ außerhalb des Meßbereichs des vom Schiff aus eingesetzten Attenuationsmeßgerätes lag.

Einen Vergleich der aus den Messungen bestimmten Verläufe des Salzgehaltes und der Attenuation zeigen Abb. 17 und 18. Die qualitative Übereinstimmung ist als gut zu bezeichnen. Man kann sich die Probleme der Vorgabe der Randwerte im Modell vorstellen, wenn man den Bereich $> 125 \cdot \text{m}^{-1}$ für den Attenuationskoeffizienten betrachtet. Im Modell wurde der Wert von höchstens $172 \cdot \text{m}^{-1}$ vorgegeben, was zwangsläufig zu einer Unterschätzung der Attenuation führt.

5. Schlußfolgerung

Die Meßergebnisse MASEX '83 sind nur bedingt für die Simulation in einem numerischen Modell einsetzbar. Trotzdem kann mit ihnen schon eine Studie der vorhandenen Einflüsse (Erosion und Sedimentation) und eine annähernde Abschätzung der maßgebenden Parameter für den Schlicktransport erzielt werden. Die Erfahrungen mit den vorhandenen Daten sind in die Planung der Meßaktion MASEX '85 eingeflossen. Beim Vorliegen dieser Meßwerte kann mit Hilfe des Modells eine umfassendere und besser fundierte Studie des Schlicktransportes und dessen Kausalitäten durchgeführt werden.

6. Schriftenverzeichnis

- BLOSS, S., MARKOFSKY, M. u. ZIELKE, W.: Numerische Simulation von Ausbreitungsvorgängen in Ästuarien: Fallstudie „Untere Trave“, DGM, 26, H. 1/2, 1982.
- DOBBINS, W. E.: Effect of Turbulence on Sedimentation. American Society of Civil Engineers, Transactions, 109, 1943.
- FANGER, H.-U., NEUMANN, L. J. R., OHM, K. u. RIETHMÜLLER, R.: MASEX '83, eine Untersuchung in der Trübungszone der Unterweser. Die Küste, H. 42, 1985.
- FISCHER, K.: Numerical Tidal-Salinity Models of the Ems-Estuary. Proc. 16th Coast. Engr. Conf., Hamburg, 1978.
- KRONE, R. B.: Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, 1962.
- MARKOFSKY, M.: A Technique for Reducing the Computation Time of Two-Dimensional Thermal and Water Quality Explicit Finite Difference and Finite Element Numerical Models. Proc. 4th Congr. Asian and Pacific Regional Division International Association for Hydraulic Research. Chiang Mai, Thailand, 1984.
- MARKOFSKY, M., LANG, G. u. SCHUBERT, R.: Numerical Simulation of Unsteady Suspended Sediment Transport. Proc. of Euromech 192: Transport of Suspended Solids in Open Channels. München, FRG, 1985, Verlag Balkema, Rotterdam, 1986.
- MARKOFSKY, M., LANG, G. u. SCHUBERT, R.: Suspended Sediment Transport in Tidal Waters: Turbidity Maximum, Numerical Simulation, Physical Aspects. Proc. 21th Congress of the IAHR, Vol. 4, Melbourne, 1985.
- OWEN, M. W. u. ODD, N. V. M.: A Mathematical Model of the Effect of a Tidal Barrier on Siltation in an Estuary. Tidal Power (Ed. Gray, I. J. and Gashaus, O.K.), Plenum Press, 1972.
- PARCHURE, T. M.: Deposited Cohesive Sediments. Coastal & Oceanographic Engineering Department. University of Florida, 1984.
- PARTHENIADES, E.: A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water, Thesis, University of California, Berkeley, 1962.
- PERRELS, P. A. J. u. KARELSE, M.: A Two-Dimensional Laterally Averaged Model for Salt Intrusion, in Transport Models for Inland and Coastal Waters (Ed. by Fischer, H. B.) Academic Press, New York, 1981. Experiments on the Mechanics of Sediment Suspension. Proc. 5th Int. Congr. for Applied Mechanics, Cambridge, Mass.
- ROUSE, H.: Modern Concepts of the Mechanics of Sediment Suspension. Proc. 5th Int. Congr. for Applied Mechanics, Cambridge, Mass., 1938.
- SALOMON, J. C.: Modelling the Turbidity Maximum. Ecohydrodynamics, Proc. 12th Int. Liege Cooloq. Ocean Hydrod. 1982.
- SHENG, Y. P.: Mathematical Modelling of Three-Dimensional Coastal Currents and Sediment Dispersion: Model Development and Application. Aeronautical Research Associates of Princeton, Inc., 1983.
- WELLERSHAUS, S.: Turbidity Maximum and Mud Shoaling in the Weser Estuary. Arch. Hydrobiol., 92, 2, 1981.