

Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Ems-Ästuars

- Anwendung eines Analysekonzeptes für hoch aufgelöste und dauerhaft betriebene Gewässergütemessungen -

Von FRANK SPINGAT u. HOCINE OUMERACI

Z u s a m m e n f a s s u n g

Für zeitlich hochaufgelöste Gewässergütemessungen wurde ein Datenaufbereitungs- und Auswertekonzept zur Erfassung und Quantifizierung der ästuarinen Schwebstoffdynamik entwickelt und auf mehrjährige Messreihen aus dem Ems-Ästuar angewendet. Das Verfahren ermöglicht u. a. die Ermittlung abflussbedingter und jahreszeitlicher Änderungen der ästuarinen Schwebstoffdynamik sowie eine Charakterisierung der Schwebstoffdynamik über die Tidedauer. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die Oberwasserführung eine maßgebende Einflussgröße darstellt.

Die Untersuchungen entlang des Ästuars zeigten, dass der zum lokal höchsten Schwebstoffgehalt zugehörige Abfluss in stromaufwärtiger Richtung abnimmt, woraus eine stromaufwärtige Verlagerung der Trübungszone abgeleitet werden konnte. Als maßgebliche Ursache hierfür wurde ein resultierender stromauf gerichteter Schwebstofftransport in den Bereichen seewärts des Trübungsmaximums ermittelt.

Unter Berücksichtigung der abfluss- und jahreszeitlichen Einflussgrößen wurde die Schwebstoffführung zusammen mit der Salzgehaltsentwicklung für verschiedene Abflusszyklen abgeschätzt. Daraus ergaben sich, je nach Zyklus, Lageänderungen der Trübungszone von mehr als 30 km und signifikante Unterschiede der Schwebstoffkonzentration in der Trübungszone.

Die aus dem bisherigen Wissensstand postulierte Bedeutung der Gezeitenkräfte für die Schwebstoffdynamik in meso- und makrotidalen Ästuarien, die zu zyklischen Sedimentations-, Resuspensions- und Advektionsprozessen über die Tide führt, wurde durch die Untersuchungen im Ems-Ästuar eindeutig bestätigt. Darüber hinaus konnte auch die maßgebliche Wirkung des Oberwasserabflusses auf das Langzeitgeschehen in der Trübungszone quantifiziert werden. Es wurde insbesondere deutlich, dass bei niedriger Oberwasserführung bereits geringe Abflussänderungen zu erheblichen Unterschieden in der Schwebstoffführung führen.

Nennenswerte lokale Unterschiede der Tidewasserstände sowie der Flut- und Ebbdauer durch Abflussänderungen treten nur im Bereich oberhalb der Ledamündung bei mittlerer bis niedriger Oberwasserführung auf.

Maßgebliche Unterschiede konnten in der Salzgehaltsverteilung unterhalb der Ledamündung ermittelt werden, so dass abflussbedingte Änderungen der baroklinen Strömungen auftreten und zu veränderten Transportverhältnissen im Ems-Ästuar führen können.

Die Trübungszone in der Ems wandert, anders als in den meisten anderen Ästuarien, bei niedriger Oberwasserführung weiter stromauf als die Brackwasserzone. Die nur geringen Salzgehaltsschwankungen über die Tide sowie der longitudinal nahezu gleichbleibende Tidehub bei niedrigen Abflüssen weisen auf die stromaufwärts zunehmende Tidesymmetrie als Ursache dieser in den Süßwasserbereich reichenden Verlagerung der Trübungszone im Ems-Ästuar hin.

Mit der entwickelten Auswerte- und Analysemethodik, welche eine erhebliche Datenreduktion ermöglicht, konnte eine vergleichbare Datenbasis quasi-stationärer Zustände der Schwebstoffführung geschaffen werden. Das verwendete Aufbereitungs- und Auswertekonzept ist auf hochaufgelöste, dauerhaft betriebene Gewässergütemessungen in anderen Ästuarien übertragbar, die Ergebnisse sind hingegen ästuarspezifisch und gelten nicht ohne weiteres für andere Tideflüsse.

Summary

A concept for processing and evaluating data obtained from high resolution measurements was developed in order to understand and quantify the dynamics of suspended matter in estuaries. The concept was applied to data series from the Ems estuary covering a period of several years. Among other features, the method permits defining discharge-dependent and seasonal changes in the dynamics of estuarine suspended matter; it also can characterize suspended matter dynamics over the tidal period. River discharge could be shown to be a major factor of influence.

Longitudinal distribution of concentrations of suspended matter shows that the discharge attached to the maximum suspension value decreases in upstream direction. This could indicate a shift of the turbidity zone in upstream direction with decreasing river discharge. A net sediment flux seaward of the turbidity maximum but pointing upstream was found to be the main cause.

Considering seasonal and discharge-dependent factors of influence the suspended load and salinity were assessed for various discharge cycles. Depending on the investigated cycle, this resulted in location changes of the turbidity zone by more than 30 km and significant variations of the suspended matter concentration.

Based on present knowledge, tidal forcing is of significant importance to the suspended sediment dynamics of meso- and macro-tidal estuaries and is the driving force to cyclic sedimentation, resuspension and advection. This was confirmed once again by the investigations in the Ems estuary. Moreover, it was possible to quantify the effect of river discharge on long term behaviour of the turbidity zone. It came to be obvious that during low discharges already minor variations of the discharge can lead to considerable changes of the suspended load. Significant local differences either in water levels or in flood and ebb duration occur only upstream of the Leda mouth during medium to low discharges.

A substantial effect of discharge behaviour on salinity distribution was determined for the reach below the Leda mouth. Consequently, density currents would affect sediment transport capacity in the estuary.

Opposed to the behaviour in most other estuaries, the turbidity zone in the Ems estuary migrates further upstream than the brackish water zone at low river discharge and penetrates even the fresh water region of the Ems. The reason for this phenomenon is likely to be the tidal asymmetry increasing in upstream direction demonstrated by small salinity variations during one tide and an almost constant tidal range along the river axis during low discharges.

The presented analysis method incorporates a substantial data reduction method and results in a data base of comparable quasi-stationary states of suspended matter load. The concept can be transferred and applied to high-resolution water quality data in other estuaries. The results presented here, however, are specific for the Ems estuary and cannot be reliably applied elsewhere.

Inhalt

1. Einleitung	161
2. Schwebstoffdynamik in der Trübungzone; Prozesse und Wissensstand	163
2.1 Grundlegende Prozesse	164
2.1.1 Hydrodynamische Prozesse	164
2.1.2 Chemische und biologische Prozesse	166
2.1.3 Komplexe Wechselwirkungen	168
2.2 Wissensstand	169
2.2.1 Natur- und Laboruntersuchungen	170
2.2.2 Numerische Modelluntersuchungen	173
2.2.3 Zusammenfassung und Bewertung der bisherigen Untersuchungen	174
3. Vorhandene Messstationen und verwendete Messsysteme	175
3.1 Lokationen der Messstationen im Ems-Ästuar	176
3.2 Messgrößen und Messtechnik	176
4. Untersuchungsmethoden und Auswertekonzept	178

4.1 Kalibrierung der indirekten Messgrößen zur Bestimmung des Salz- und Schwebstoffgehaltes	181
4.1.1 Leitfähigkeitsmessungen	181
4.1.2 Trübungsmessungen	181
4.2 Messdatenaufbereitung	183
4.3 Parametrisierung und Klassifizierung des Salz- und Schwebstoffgehaltes	183
4.4 Auswertekonzept zur Erfassung der Schwebstoffdynamik	186
4.4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	186
4.4.2 Beschreibung des Auswertekonzeptes	187
5. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	188
5.1 Hydrographische Messgrößen im Ems-Ästuar	189
5.1.1 Oberwasserführung	189
5.1.2 Tide- und Strömungsverhältnisse	190
5.1.3 Salzgehaltsverteilung	195
5.1.4 Ergebnisdiskussion der hydrographischen Untersuchungen	198
5.2 Schwebstoffdynamik im Trübungsgebiet des Ems-Ästuars	200
5.2.1 Mittlere Schwebstoffführung während der Tide	200
5.2.2 Abflussabhängige Schwankungen der Schwebstoffführung	201
5.2.3 Jahreszeitliche Schwankungen der Schwebstoffführung für ein mittleres Abflussjahr	202
5.2.4 Schlussfolgerungen hinsichtlich ästuariner Transportprozesse für ein mittleres Abflussjahr	206
5.2.5 Quantitative Abschätzung der Schwebstoffakkumulation in der Trübungszone für ein mittleres Abflussjahr	209
5.2.6 Schlussfolgerungen hinsichtlich der räumlichen Variabilität der Brackwasser- und Trübungszone	210
6. Empfehlungen für künftige Untersuchungen	211
7. Symbolverzeichnis	215
8. Schriftenverzeichnis	216

1. Einleitung

In Fließgewässern werden neben gelösten Stoffen erhebliche Feststoffmengen transportiert, die dann in die Meere gelangen. Etwa 85 % des Feststofftransportes in deutschen Tideflüssen entfallen auf Schwebstoffe, der Rest auf Geschiebe und Schwimmstoffe (HINRICH, 1975).

Im Übergangsbereich zwischen Süß- und Meerwasser weisen Flüsse einen Bereich erhöhter Schwebstoffführung auf, der sowohl die Schwebstoffkonzentrationen im Süß- als auch im Meerwasser um ein Vielfaches übersteigt. Dieser Bereich ist nicht nur mit erhöhter Trübung des Wasserkörpers, sondern auch mit vermehrten Schlickablagerungen an der Flusssohle verbunden und unterliegt hohen räumlichen und zeitlichen Änderungen in der Schwebstoffführung (Abb. 1).

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht ist eine ausreichende Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten, denen der ästuarine Schwebstofftransport im Brackwassergebiet unterliegt, von erheblicher Bedeutung. Insbesondere treten u. a. folgende praxisrelevante Fragestellungen auf, die mit der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone verknüpft sind:

- Optimierung von Unterhaltungsmaßnahmen für Häfen und Wasserstraßen
- Beurteilung von Auswirkungen baulicher Eingriffe
- Planung und Durchführung von Baumaßnahmen in Flussabschnitten mit erhöhtem Schlickfall

Detaillierte Kenntnisse über die Dynamik der Schwebstoffführung werden auch für ökologische Fragestellungen benötigt. Schadstoffe lagern sich besonders an den Feinstfraktionen

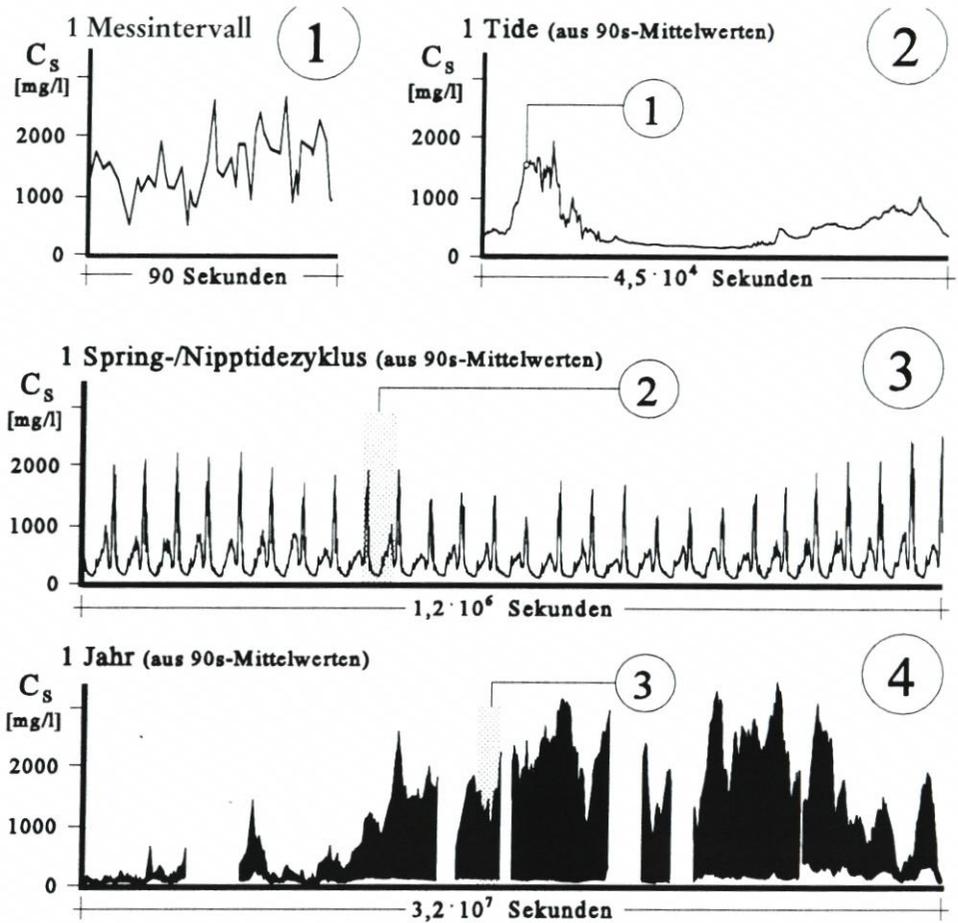


Abb. 1: Kurz- und langfristige Schwankungen der Schwebstoffführung in der Trübungszone

der Schwebstoffe an. Neben der unmittelbaren Belastung der Gewässer gelangen schadstoffhaltige Schwebstoffe auch in die Nahrungskette, wo diese weiter akkumulieren.

Aus einer erhöhten Schadstoffbelastung schlammiger Ablagerungen resultieren auch Anforderungen an deren ordnungsgemäße Entsorgung, was z. B. bei Baggergut zu erheblichen Mehrkosten führen kann.

Die Schwebstoffdynamik in Trübungszone mit ihren komplexen hydrodynamischen, sedimentologischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen kann nach dem jetzigen Kenntnisstand noch nicht vollständig erklärt werden. Während die beteiligten Prozesse weitestgehend bekannt sind, bleiben deren quantitativer Einfluss und Zusammenwirken auf die Schwebstoffdynamik weiterhin umstritten. In diesem Zusammenhang sind Naturmessungen zur Erfassung der Schwebstoffführung in der Trübungszone sowie zum grundlegenden Verständnis der Prozesse in Ästuarien unverzichtbar. Zugleich werden Naturmessungen zur Kalibrierung und Verifikation numerischer Modelle dringend benötigt.

Bisher sind im Rahmen von Naturmessprogrammen hauptsächlich kurzfristige Vorgänge zur Ermittlung und Interpretation der Schwebstoffdynamik untersucht worden

(DYER, 1989). Frühere Messprogramme zur Erfassung der langfristigen Dynamik sind z. T. an unzureichenden Kenntnissen der entsprechenden Gesetzmäßigkeiten gescheitert, wie z. B. FÜHRBÖTER et al. (1989) belegen konnten.

Für dauerhaft betriebene Messungen konnten SCHULZE (1990) und GRABEMANN (1992) nachweisen, dass zeitlich hochaufgelöste und dauerhaft betriebene Punktmessungen wichtige Beiträge zum besseren Verständnis der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone von Ästuaren ermöglichen.

2. Schwebstoffdynamik in der Trübungszone; Prozesse und Wissensstand

Die Trübungszone, im Übergangsbereich zwischen Meer- und Süßwasser gelegen, gilt als wichtigster Indikator des Transportregimes für suspendierbare Feststoffe im Tidegebiet. Der Trübungsverlauf in Abb. 2 reflektiert die Schwebstoffführung in einem Ästuar vom Meerwasser bis in den Süßwasserbereich. Zeitliche und räumliche Änderungen der Trübung hängen von einer Vielzahl hydrodynamischer, sedimentologischer, chemischer und biologischer Faktoren sowie deren Instationarität und ihrer komplexen Wechselwirkungen ab. Die Bedeutung hydrodynamischer Prozesse auf die Schwebstoffführung liegt in der Gestaltung der Transportvorgänge. Chemische und biologische Prozesse hingegen üben Einfluss auf die Eigenschaften der Schwebstoffe, insbesondere auf deren Sink- und Mobilisierungsvermögen aus. Die quantitative Bedeutung einzelner Einflussfaktoren auf die Dynamik suspendierbarer Feststoffe im Trübungsgebiet ist noch weitestgehend ungeklärt.

Nachfolgend werden grundlegende Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik in Tideflüssen erläutert und der bisherige Wissensstand zum Verständnis insbesondere der längerfristigen Schwebstoffdynamik in Trübungsgebieten vorgestellt und bewertet.

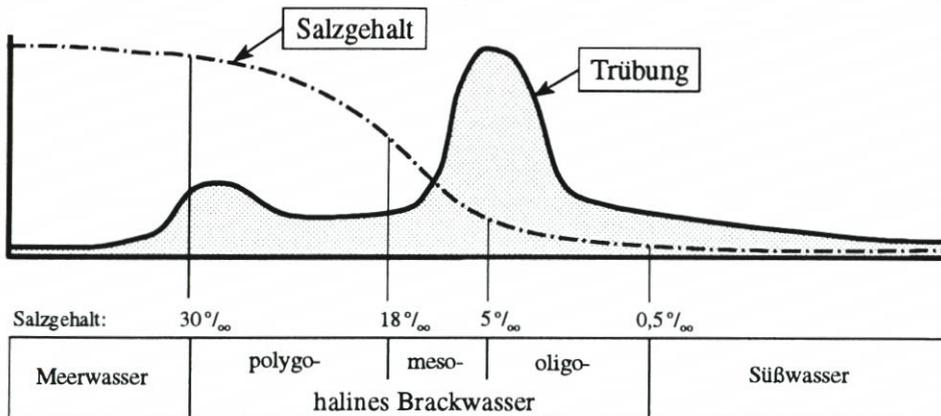


Abb. 2: Schematischer Salzgehalts- und Trübungsverlauf in einem Ästuar

2.1 Grundlegende Prozesse

2.1.1 Hydrodynamische Prozesse

(I) Gezeiten

Im Gegensatz zu tidefreien Flüssen mit eindeutig gerichteter Strömung herrscht in Ästuarien ein im Rhythmus der Gezeiten alternierendes Strömungs- und Transportsystem vor. Die Schwebstoffdynamik wird daher während der Tidedauer durch Resuspensions-, Advektions- und Sedimentationsvorgänge geprägt (vgl. Abb. 3). Dabei wird deutlich, dass der resultierende Schwebstofftransport auch maßgeblich vom Strömungsgeschehen im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich geprägt ist (vgl. Abb. 4).

Die Transportprozesse für Schwebstoffe unterscheiden sich grundlegend von denen des Wasserkörpers. Eine Angleichung der Prozesse erfolgt erst, wenn die Schwebstoffe während der gesamten Tide in Suspension bleiben. Dafür in Frage kommende Schwebstoffe, die sehr geringe Sinkgeschwindigkeiten aufweisen, leisten dann jedoch keinen Beitrag zu den hohen räumlichen und zeitlichen Änderungen der Schwebstoffführung in der Trübungszone.

Neben lokaler Gezeitenwirkung während der Tide treten entlang eines Tidegebietes auch Änderungen im Tidegeschehen infolge Reibung und Reflexion auf. Kennzeichnende Merkmale sind die in Fortschrittsrichtung der Tide zunehmenden Tidewasserstände sowie die abnehmende Flut- und Flutstromdauer mit den entsprechenden Zunahmen der jeweiligen Ebbegrößen.

(II) Barokline Strömungen in der Brackwasserzone

Die Brackwasserzone wandert entsprechend der Fließbewegung des Wasserkörpers im Rhythmus der Gezeiten flussauf- und -abwärts. Die landwärtigste Lage während der Tide nimmt die Brackwasserzone bei Flutstromkenterung, die seewärtigste Lage bei Ebbestromkenterung ein (vgl. Abb. 5).

Neben der longitudinalen Salzgehaltsverteilung muss zur Erfassung dichteinduzierter Strömungen auch die Salzgehaltsverteilung über die Lotrechte berücksichtigt werden. In tidefreien Gewässern bildet sich entlang eines Flusses eine klare Schichtung des Wasserkörpers in der Brackwasserzone aus. Das schwerere Meerwasser dringt bodennah in den Fluss ein, während das leichtere Süßwasser entsprechend oberflächennah ausströmt. Dabei wird an der Grenzschicht der beiden Wasserkörper vom Süßwasser infolge turbulenter Diffusion salzhaltiges Meerwasser aufgenommen. Als Folge davon strömt salzhaltiges Meerwasser an der Sohle stromauf, so dass sich ein Salzkeil ausbildet, dessen sohlennahe Spitze am weitesten stromauf vordringt.

Die turbulente Diffusion kontrolliert somit die Durchmischungsverhältnisse und das dichteinduzierte Strömungssystem. Die Stärke der turbulenten Diffusion wird im Wesentlichen von folgenden Einflussfaktoren geprägt:

- Gezeiten
- Abflussverhältnisse
- Flussgeometrie
- Seegang

Da die Gezeiten die maßgeblichste Einflussgröße darstellen, kann der Durchmischungszustand in erster Näherung durch den Tidehub beschrieben werden. Für makrotidale Ästuarien wird i. Allg. von guter Durchmischung ausgegangen. Mesotidale Ästuarien lassen teilweise durchmischte Verhältnisse erwarten, wohingegen Ästuarien mit geringem Tidehub eine ausgeprägte Schichtung aufweisen.

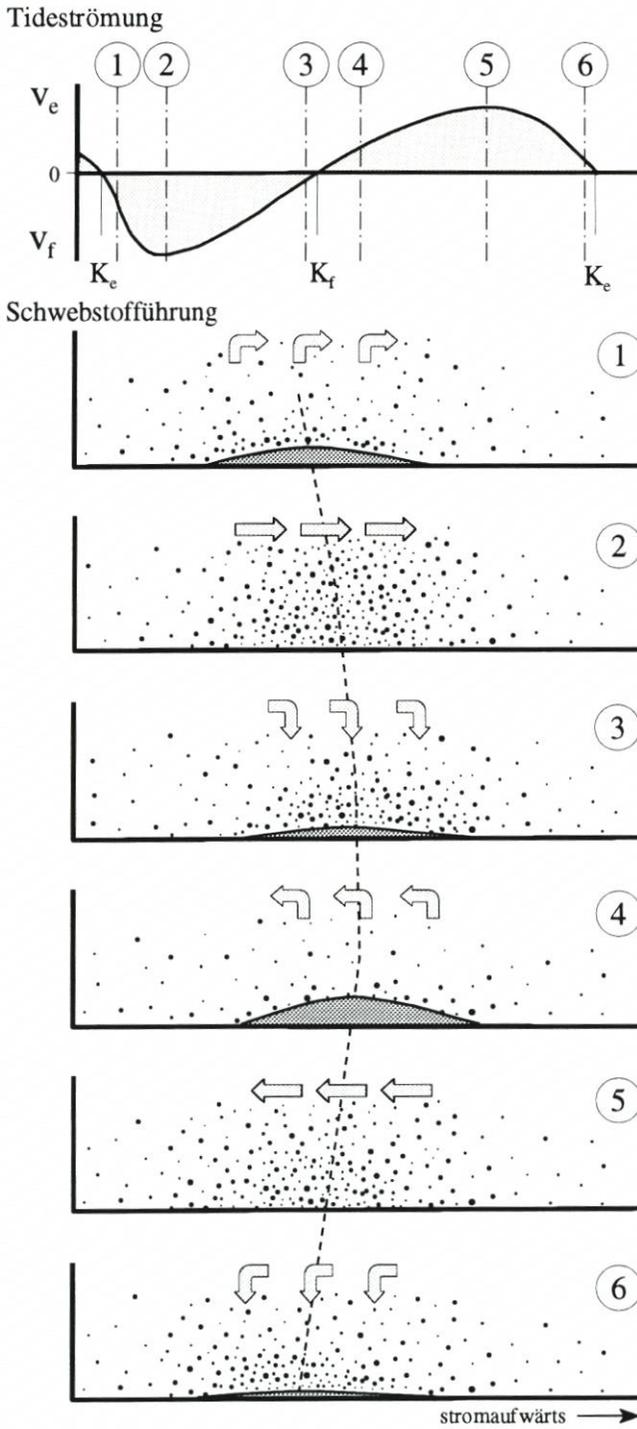


Abb. 3: Schwebstoffdynamik im Bereich der Trübungszone eines Ästuars während einer Tide (schematisch)

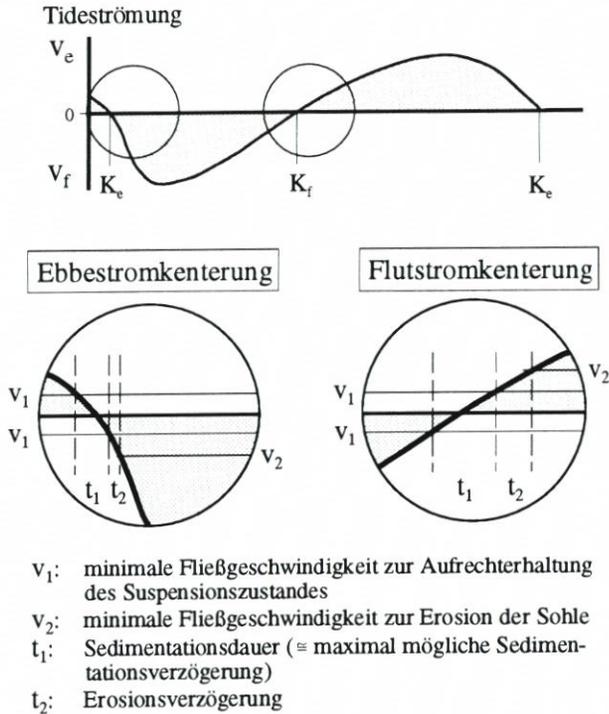


Abb. 4: Sedimentations- und Erosionsverlauf im Bereich der Flut- und Ebbstromkenterung (schematisch)

2.1.2 Chemische und biologische Prozesse

Im ästuarinen Milieu wird die Schwebstoffdynamik ebenso von der sich ständig ändernden chemischen Zusammensetzung des Wassers und den fluktuierenden biologischen Verhältnissen geprägt.

Chemische und biologische Prozesse ermöglichen die Bildung von Schwebstoffflocken¹, -agglomeraten² und -aggregaten³. Die veränderlichen Materialeigenschaften der Feststoffmatrix stehen in Wechselwirkung zu deren Sinkeigenschaften und Erosionsfestigkeiten.

Bildung und Wachstum der Schwebstoffstrukturen werden durch Bindungskräfte einerseits und Scherkräfte andererseits bestimmt. Während Art und Größe der Bindungskräfte im Wesentlichen von der Schwebstoffzusammensetzung und -konzentration geprägt sind, werden die angreifenden Scherkräfte durch die hydrodynamischen Bedingungen reguliert.

¹ Flocken: Zusammenhalt der Partikel durch elektrochemische Bindung

² Agglomerate: Zusammenhalt der Partikel durch relativ schwache Bindungskräfte wie Oberflächenspannungen oder klebrige organische Substanzen

³ Aggregate: Zusammenhalt der Partikel durch starke Bindungskräfte wie Kohäsion oder zwischenmolekulare Kräfte

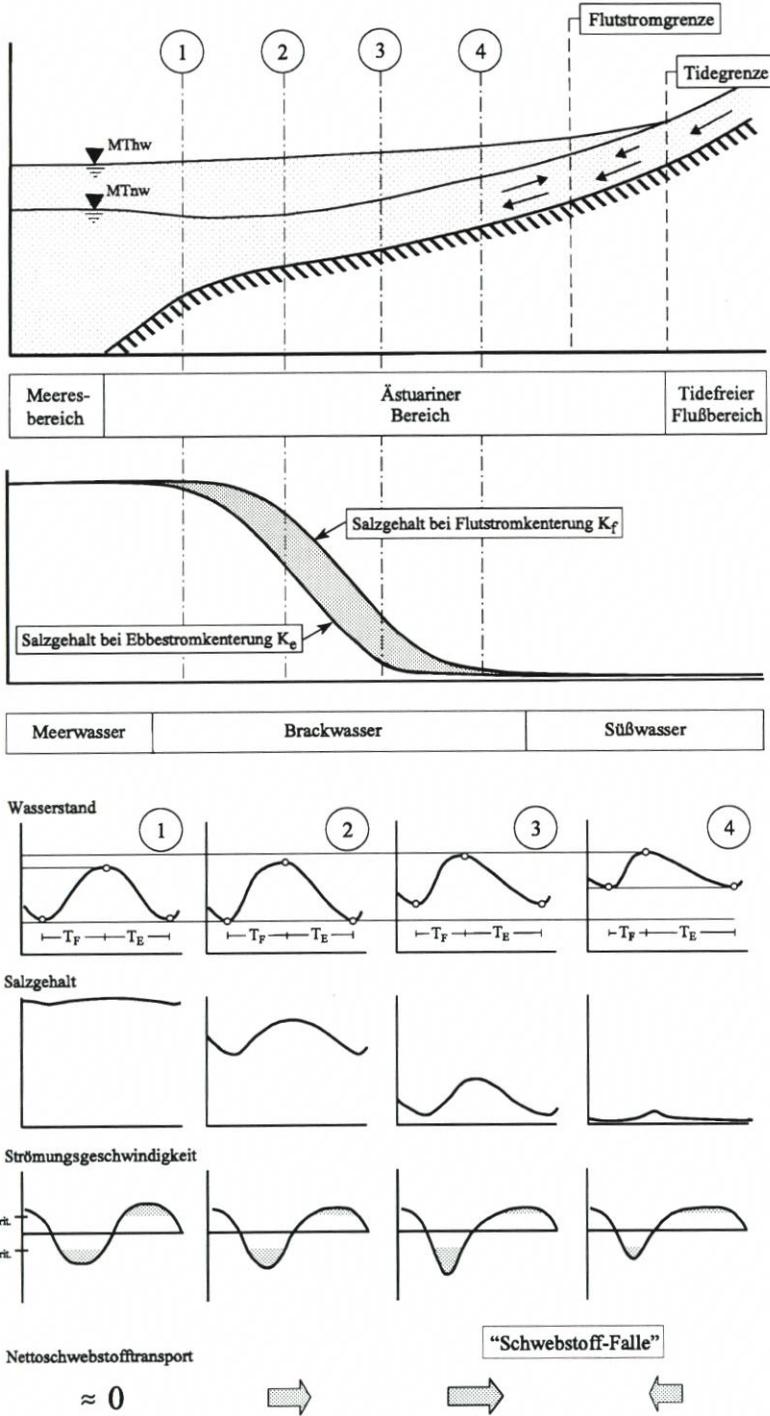


Abb. 5: Longitudinale Änderungen der Salzgehaltsverhältnisse und Transportbedingungen in einem Ästuar (schematisch)

(I) Elektrochemische Einflüsse

Die elektrochemische Bindung sowie die Stabilität grobdispenser Systeme⁴ wird durch Wechselwirkungen von anziehenden und abstoßenden Kräften bestimmt. Als abstoßende Kräfte wirken i. Allg. die elektrischen Doppelschichtkräfte aufgrund ihrer negativen Oberflächenladung. Als anziehende Kräfte kommen die van der Waals-Kräfte in Frage, die aus dem Energiegewinn bei Überlagerung elektromagnetischer Felder zweier sich annähernder Partikel resultieren.

In der Brackwasserzone wird sowohl durch den ansteigenden Salzgehalt das Abstoßungspotential verringert als auch durch folgende Prozesse äußere Energie zugeführt:

- Kollision von Teilchen aufgrund der Turbulenzen im Wasserkörper
- Kollision von Teilchen aufgrund unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten
- Brownsche Molekularbewegung

Diese Prozesse können zu einer Überwindung der Abstoßungskräfte führen und eine Flockenbildung ermöglichen. Der Prozess aus Entstabilisierung der Suspension einerseits und dem Transport der Partikel andererseits wird als Koagulation bezeichnet.

Bei geringer Turbulenz können sich lockerere Flockenstrukturen mit i. Allg. niedrigeren Sinkgeschwindigkeiten („Fallschirmeffekt“) ausbilden, die bei Zunahme der Scherkräfte wieder aufbrechen. Unter hochgradig turbulenten Bedingungen werden hingegen oftmals erhöhte Sinkgeschwindigkeiten kompakter Flockenstrukturen beobachtet.

(II) Biologische Einflussgrößen

Die Bildung komplexer Schwebstoffstrukturen kann auch durch biogene Prozesse beeinflusst werden. Durch die Umhüllung mit organischen Kittsubstanzen, sog. „Coatings“, können mineralische Bestandteile miteinander verkleben, wodurch Koagulationsbedingungen verändert werden.

Bedingt durch klimatische und jahreszeitliche Schwankungen der Bioaktivität unterliegt der organische Anteil der Schwebstoffe ständigen Änderungen. Darüber hinaus wird die Biomasse vom halinen Milieu geprägt, wodurch es in der Brackwasserzone zu einem Artenminimum an Mikroorganismen kommt, welches auf die zumeist unverträglich großen Salzgehaltsschwankungen zurückzuführen ist. In den angrenzenden Bereichen bilden sich Sterbezonen des marinen bzw. limnischen Zooplanktons, dieses führt zu erhöhtem Eintrag organischen Materials.

Trotz der insgesamt nur geringfügigen Änderungen des organischen Anteils am Gesamtschwebstoffgehalt bei massebezogener Betrachtung können signifikante Veränderungen der Sinkeigenschaften aufgrund der erheblichen Volumenzunahme der organischen Anteile auftreten.

2.1.3 Komplexe Wechselwirkungen

Auch wenn schon einzelne Einflussfaktoren die Akkumulation von Schwebstoffen in der Trübungszone ermöglichen, sind in der Natur keine monokausalen Zusammenhänge für die Schwebstoffführung in Ästuarien verantwortlich. Erst die Gesamtheit der Einflussfaktoren, die untereinander in komplexen Wechselbeziehungen stehen, prägen die individuelle Schwebstoffdynamik eines Ästuars.

⁴ Die in Ästuarien suspendierten Feststoffe können als grobdisperse Systeme angesehen werden

Stark vereinfacht können wesentliche Wirkzusammenhänge auf die Schwebstoffführung in Ästuarien entsprechend Abb. 6 zusammengefasst werden.

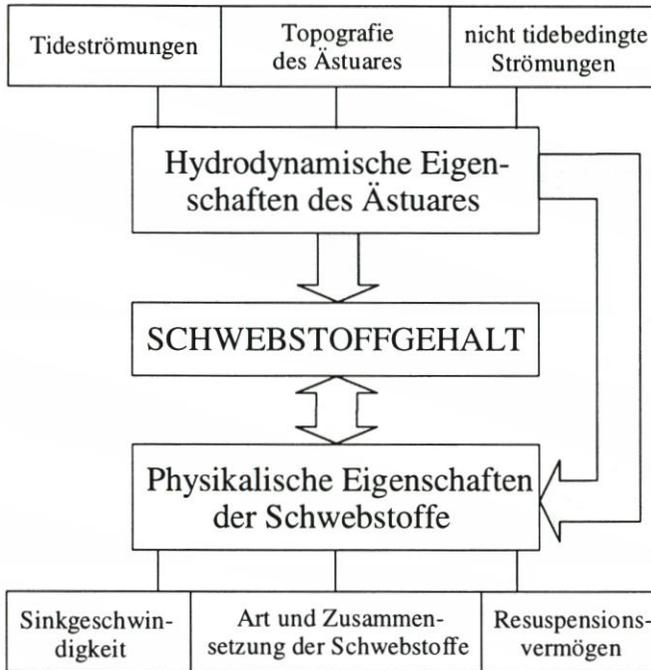


Abb. 6: Wesentliche Mechanismen und Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik in Ästuarien sowie deren Wechselwirkungen

2.2 Wissensstand

Erste, überwiegend deskriptive Untersuchungen zur Schwebstoffführung in Ästuarien wurden bereits Mitte des letzten Jahrhunderts von HAGEN (1856) und HÜBBE (1860) durchgeführt. Weitere Erkenntnisse zur Schwebstoffführung haben die Untersuchungen von SEYFERT (1894) und die Beobachtungen von MAYER (1879) hinsichtlich der beschleunigten Wirkung von Kochsalzlösungen bei Absatzvorgängen „*thoniger Erden*“ geliefert.

Biologische Prozesse wurden auch schon frühzeitig zur Erklärung der Schlickbildung in Ästuarien herangezogen (vgl. BODÉ, 1915). In der Brackwasserzone wurde von REMANE (1934) ein Artenminimum an Mikroorganismen festgestellt, das er auf unverträglich hohe Salzgehaltsschwankungen zurückführte.

LÜDERS (1930) stellte eine Ungleichheit der Transportbedingungen bei Flut- und Ebbestrom fest, die zu erhöhtem stromaufwärtigen Feststofftransport im Bereich niedriger Tidewasserstände führt. Auch HENSEN (1941 u. 1953) sah in den hydrographischen Randbedingungen die Ursache erhöhter Ablagerungen in Ästuarien. POSTMA und KALLE (1955) entwickelten die Vorstellung einer Schwebstofffalle infolge dichteinduzierter Zirkulation in der Brackwasserzone, die eine Akkumulation von Schwebstoffen am süßwasserseitigen Kopf der Brackwasserzone ermöglicht.

In den 70er Jahren entstanden numerische Schwebstofftransportmodelle für Ästuarien. FESTA und HANSEN (1978) konnten erstmals die Akkumulation von Schwebstoffen in der Brackwasserzone infolge dichteinduzierter Strömungen simulieren.

2.2.1 Natur- und Laboruntersuchungen

Zur Erfassung und Interpretation der Schwebstoffdynamik in Ästuarien wurden verschiedene Messkonzepte verfolgt. Maßgebliche Parameter wurden dabei sowohl in Längs- als auch in Querschnittsmessungen mit unterschiedlicher Datendichte ermittelt. Aufgrund laufender geräte- und datenerfassungstechnischer Verbesserungen konnten mit der Zeit sowohl die Datendichte erhöht als auch das Beobachtungsintervall verlängert werden. Mit dem heutigen Stand der Technik sind für verschiedene Parameter punktuelle Dauermessungen im Fließquerschnitt möglich.

Laboruntersuchungen hingegen beschränken sich weitgehend auf die Ermittlung physikalischer Eigenschaften der Schwebstoffe und deren Änderungen unter verschiedenen Randbedingungen. Für die Erfassung und Interpretation der Schwebstoffdynamik in Ästuarien stehen daher Laboruntersuchungen zum Sink- und Erosionsverhalten der Schwebstoffe im Vordergrund.

Bisherige Untersuchungen konnten aufzeigen, dass für die Bildung der Trübungszone in Ästuarien mit geringem Tidehub und schlechter Durchmischung hauptsächlich dichteinduzierte Strömungen verantwortlich sind (vgl. NICHOLS u. POOR, 1967; MEADE, 1972).

Bei guter Durchmischung in makrotidalen Ästuarien werden die Tideverhältnisse bzw. die resultierenden Transportbedingungen als maßgebliche Einflussgröße auf die Trübungszone angesehen (MEADE, 1972; ALLEN u. CASTAING, 1973). Bei starken Unterschieden im Spring-/Nipptidehub können sogar unterschiedliche Transportbedingungen vorherrschen, die bei Springtide zu einem resultierend stromaufwärtigen und bei Nipptide zu einem resultierend stromabwärtigen Schwebstofftransport führen.

ALLEN et al. (1980) erläuterten Änderungen im Schwebstofftransport bei stromaufwärts zunehmender Asymmetrie der Tide einerseits und abnehmendem Tidehub andererseits, wodurch ein bereichsweise stromauf gerichteter Schwebstofftransport ermöglicht wird. UNCLES et al. (1985 und 1986) zeigten auf, dass dichteinduzierte Strömungen im stromabwärtigen Teil eines Ästuars die abflussbedingten Fließgeschwindigkeiten überschreiten können und der daraus resultierende stromaufwärtige Schwebstofftransport auch in makrotidalen Ästuarien einen Beitrag zur Entstehung von Trübungszone liefert.

WELLERSHAUS (1981 u. 1982) geht davon aus, dass nicht einfache Ursache-Wirkung-Systeme die Schwebstoffdynamik in Ästuarien erklären können. Bei den Messungen in der Weser konnte eine Übereinstimmung der Lage des Trübungsmaximums mit dem Punkt im Ästuar beobachtet werden, an dem sohnah gegen null strebende Restströmungen⁵ auftreten.

Nach WELLERSHAUS reicht die dichteinduzierte Zirkulation allein nicht aus, um die hohen Schwebstoffkonzentrationen in der Trübungszone zu erklären. Die grundsätzliche Ansammlung von Partikeln geringer Sinkgeschwindigkeit durch Dichteströmungen im Bereich des Salzkeiles wird jedoch bestätigt. Vielmehr wird in dem unterschiedlichen Resuspensions- und Transportvermögen sowohl über die Tide als auch infolge Spring-/Nipptideschwankungen und instationärer Oberwasserführung der komplexe Mechanismus für die Akkumu-

⁵ vgl. auch „Gleichgewichtspunkt“ nach HENSEN (1941 und 1953)

lation von Schlickablagerungen sowie deren Variabilität im Weser-Ästuar gesehen. Aufgrund der Vorversalzung der Weser treten Koagulationseffekte nicht in Erscheinung.

GRABEMANN und KRAUSE (1989 u. 1991) sowie SCHULZE (1990) haben erstmals dauerhaft betriebene Messungen an jeweils ortsfesten Lokationen zur Beschreibung der Schwebstoffdynamik in Ästuarien ausgewertet.

GRABEMANN und KRAUSE konnten bei Messreihen in der Unterweser (Blexen) eine gleichbleibende Charakteristik der Schwebstoffgehaltsschwankungen über die Tide feststellen. Neben abflussbedingten Unterschieden in der Schwebstoffführung konnten insbesondere Spring-/Nipptideschwankungen der Schwebstoffkonzentration aufgezeigt werden. Darüber hinaus traten signifikante Verschiebungen der Bereiche hoher Schwebstoffgehalte während der Tide in Abhängigkeit der Oberwasserführung auf.

Die Entwicklung der Trübung über die Tide ergibt sich demnach aus den Wechselwirkungen zwischen „*sekundären erschöpfbaren Materialdeponien am Boden*“ und der Aufwirbelung von Partikeln in die Wassersäule. Die Ganglinie des Schwebstoffgehaltes über die Tide an einer ortsfesten Lokation „*ergibt sich aus der Überlagerung der örtlichen Prozesse – Resuspension, Erosion, Erschöpfung der Quelle und Sedimentation – sowie der Advektion*“ (GRABEMANN, 1992). Weiterhin wurde die enge Koppelung der Trübungszone an den Bereich niedriger Salzgehalte bestätigt.

Auswertungen von Langzeitmessungen in Weser und Elbe (GRABEMANN et al., 1996) zeigten vergleichbare Entwicklungen der Schwebstoffführung sowohl über den Spring-/Nipptide- als auch über den saisonalen Zyklus. Im Gegensatz zum Weser-Ästuar wird in der Elbe nur eine geringe zeitliche Verschiebung der maximalen Schwebstoffkonzentration im Flut- bzw. Ebbestrom zwischen landwärtiger und seewärtiger Lage des Trübungsmaximums erkennbar.

SCHULZE (1990) konnte für dauerhaft betriebene Trübungsmessungen im Ems-Ästuar (Gandersum) ebenfalls komplexe Einflüsse aus lokaler Sedimentation und Resuspension sowie advektivem Transport auf die Schwebstoffführung über die Tide nachweisen. Darüber hinaus wurde eine große Variabilität der Schwebstoffführung in Abhängigkeit vom Abfluss und der damit verbundenen Verlagerung der Brackwasserzone sowie über den Messzeitraum festgestellt.

Die insbesondere bei niedrigen Oberwasserabflüssen in Gandersum erkennbare Variabilität in der Schwebstoffführung wurde durch unterschiedliche Transportbedingungen mit resultierendem stromaufwärtigem Schwebstofftransport bei Oberwasserabflüssen unterhalb von $Q_0 = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ erklärt.

Bedingt durch länger andauernde Oberwasserführung unterhalb von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Sommermonaten leitete SCHULZE eine Akkumulation von Schwebstoffen in der Trübungszone ab. Wieder zunehmender Oberwasserabfluss und damit verbundene stromabwärtige Verlagerung der Trübungszone wurden als Ursache für den lokalen Anstieg der Schwebstoffgehalte in den Herbstmonaten angenommen.

Naturmessungen zur Schwebstoffführung in Ästuarien wurden durch umfangreiche Arbeiten zum Resuspensions- und Sedimentationsverhalten ergänzt. Im Rahmen experimenteller Laboruntersuchungen wurden Sinkgeschwindigkeitsänderungen infolge unterschiedlicher Flockendurchmesser, Flockendichte, Feststoffzusammensetzung, Feststoffkonzentration, Salinität und Turbulenz untersucht.

Entsprechende Laboruntersuchungen zur Wirkung des Salzgehaltes auf die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe weisen keine einheitliche Tendenz hinsichtlich des Sinkverhaltens auf (vgl. OWEN u. ENG, 1970; BRANDT, 1985; METHA, 1986; KLÜNDER, 1988; DE VRIES, 1989). Ähnlich uneinheitliche Wirkzusammenhänge ergaben sich zwischen der Sink-

geschwindigkeit und dem Feststoffgehalt (vgl. OWEN u. ENG, 1970; BRANDT, 1985; KLÜNDER, 1988).

Laboruntersuchungen belegen, dass eine generelle Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse auf Naturverhältnisse nicht möglich ist. Die im Labor erzielten Resultate müssen vielmehr als probespezifisch angesehen werden. OWEN u. ENG (1970), PULS et al. (1985) und EISMA (1986) weisen darauf hin, dass Laboruntersuchungen die Sinkgeschwindigkeitsverhältnisse in der Natur nur unvollkommen widerspiegeln. Bedingt durch Entnahme, Sedimentation, Transport und Lagerung bis zur Analyse im Labor treten Veränderungen der Materialstruktur auf. Darüber hinaus werden die Flockenbildung und -größe sowohl durch die Versuchseinrichtung als auch durch die gegenüber der Natur unterschiedlichen Turbulenzverhältnisse beeinflusst, was zu Abweichungen gegenüber In-Situ gemessenen Sinkgeschwindigkeiten bis zu einer Zehnerpotenz (DELO u. BURT, 1986) beiträgt.

Auch bekannte Feldmessverfahren zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit (z. B. „Owen-Tube“; vgl. OWEN, 1971; BURT u. STEVENSON, 1983; PULS u. KÜHL, 1986; SCHULZE et al., 1989) lösen dieses Problem nicht vollständig, da der Sedimentationsprozess zur Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung, im Gegensatz zur Natur, unter ruhigen Bedingungen abläuft (vgl. BURT, 1986).

Sinkgeschwindigkeitsuntersuchungen für das Ems-Ästuar wurden bei DE VRIES (1989), SCHULZE et al. (1989), SCHULZE (1990) und VAN LEUSSEN (1996) ausgewertet. VAN LEUSSEN (1996) wies einen signifikanten Einfluss der Makroflockenbildung auf die Schwebstoffdynamik bei Stromkenterung nach, welcher, bedingt durch die üblichen Methoden zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit, bisher nur unzureichend erfasst wurde.

Als weitere mögliche Ursache der erhöhten Trübe in Flussmündungsbereichen wurden auch biogene Einflüsse diskutiert, wobei NÖTHLICH (1967) jedoch davon ausgeht, dass der Bildungsmechanismus der Trübungszone rein hydrographischer Natur ist (vgl. auch CASPERS, 1968) und Absterbevorgänge innerhalb der Trübungszone derartig hohe Trübungskonzentrationen nicht hervorrufen können.

GREISER (1988) konnte außerhalb der Brackwasser- und Trübungszone der Elbe jahreszeitabhängige Veränderungen der Schwebstoffmatrix nachweisen. Eine Aufkonzentration der Schwebstoffe in der Wassersäule durch Verbesserung der Schwebefähigkeit wurde schon durch geringes mikrobielles Wachstum erreicht, dabei traten Volumenanteile der biogenen Partikelmatrix von über 90 % auf. Eine wesentliche Ursache der Flockenbildung sieht GREISER in der Verklebung von mineralischen und detritischen Partikeln.

SCHUCHARDT (1990) führte Untersuchungen zum Einfluss hydrodynamischer Größen auf die organische Phase der Schwebstoffe im Weser-Ästuar durch. Dabei konnten eine Verdrängung des organischen Schwebstoffanteiles und dessen Zusammensetzung vom tidefreien Bereich über den Süßwasserbereich des Ästuars bis in die Trübungszone nachgewiesen werden. Während Epibakterien eine den anorganischen Anteilen vergleichbare Akkumulation in der Trübungszone aufwiesen, wurden für das lebende Phytoplankton sowie für freie Bakterien keine Akkumulationseffekte festgestellt. Dieses führt SCHUCHARDT darauf zurück, dass letztere zu den permanent suspendierten Fraktionen gehören und keinem Sedimentations- und Resuspensionszyklus unterliegen, wie dieses bei Epibakterien der Fall ist. Der organische Anteil der Schwebstoffe insgesamt wies jedoch eine ähnliche Dynamik wie der Gesamtschwebstoffgehalt auf.

Ähnlich signifikante Abnahmen des organischen Schwebstoffanteils von über 50 % im Süßwasser auf weniger als 15 % in der Trübungszone der Ems hatte auch POSTMA (1960 u. 1961) nachgewiesen.

2.2.2 Numerische Modelluntersuchungen

Abgesehen von einigen Modellen zur Erfassung dichteinduzierter Strömungs- und Austauschvorgänge in Ästuarien haben erstmals FESTA und HANSEN (1978) ein numerisches Modell verwendet, um die Entstehung von Trübungszone in Ästuarien infolge partieller Durchmischung von Süß- und Meerwasser zu erklären. Mit dem Modell konnte eine prinzipielle Abhängigkeit der Schwebstoffführung vom Frischwassereintrag an der Süßwassergrenze, von der Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe und den süß- und meerwasserseitigen Schwebstoffkonzentrationen nachgewiesen werden.

Zahlreiche Untersuchungen und Fallstudien zur Schwebstoffdynamik in Ästuarien wurden insbesondere in den 80er Jahren mit dem 3-D-Strömungs- und Transportmodell TISWAT bzw. TISAT-S durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass

- die Dynamik kohäsiver Sedimente eine wesentliche Einflussgröße auf die Trübung in Ästuarien darstellt und die Modellierung entsprechender physikalischer und chemischer Einflussfaktoren von Bedeutung ist (vgl. MARKOFKY et al., 1985).
- die Trübungszone mesotidaler Ästuarien signifikant durch den Schwebstofftransport infolge „Tidal Pumping“ geprägt ist (vgl. LANG et al., 1987).
- die Trübungszone infolge vergrößertem Tidehub stromaufwärts verlagert wird (vgl. LANG et al., 1987).

LANG (1990) hat die Schwebstoffdynamik im Weser-Ästuar simuliert und mit Daten aus der Messkampagne MASEX '85 verglichen. Für die Parameter Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Bei der Simulation der Schwebstoffführung traten jedoch noch unbefriedigende Abweichungen der Modellergebnisse von den Naturmessungen im Bereich der Stromkenterung sowie ein zu hoher seewärtig gerichteter Schwebstofftransport bei Ebbestrom auf. Der daraus bedingte hohe Schwebstoffaustrag aus der Trübungszone widerspricht der messtechnisch belegten Stabilität dieses Bereiches und konnte im Modell nur durch hohe resuspensionsfähige Materialquellen ausgeglichen werden.

Folgende Punkte können als wesentliche Ergebnisse der von LANG (1990) durchgeführten numerischen Untersuchungen der Schwebstoffdynamik im Weser-Ästuar angesehen werden:

- Stromauf gerichteter Schwebstofftransport kann auch bei stromab gerichtetem Transport des Wasserkörpers erfolgen.
- Resuspendierbare Quellen sind grundsätzlich zur Bildung und Aufrechterhaltung der Trübungszone notwendig.
- Der vertikale Austausch hat einen größeren Einfluss auf die Schwebstoffdynamik als die residuelle Zirkulation.
- Die Dynamik und Akkumulation der Schwebstoffe in der Trübungszone ist, bedingt durch unterschiedliche Gewichtung verschiedener Akkumulationsmechanismen, in erheblichem Maße von der Stärke der Gezeiten (Tidehub) abhängig.

LENORMAND et al. (1993) und MALCHEREK (1995) haben zur Simulation der Schwebstoffdynamik in Ästuarien das Modell TELEMAC-3D verwendet, welches einen Ansatz zur Erfassung der Flokkulation/Deflokkulation in Abhängigkeit der Turbulenz beinhaltet.

Die Simulation der Messkampagne MASEX '85 von MALCHEREK (1995) zeigte gegenüber der Modellierung von LANG (1990) eine verbesserte Erfassung der Schwebstoffdynamik im Bereich der Stromkenterung. Trotzdem konnte auch MALCHEREK (1995) keine Betrachtungen zum Langzeitgeschehen durchführen, da die Modellergebnisse auf einen erheblichen Austausch von Schwebstoffen über die gewählten Modellgrenzen hinaus hindeuteten.

Der Kenntnisstand zur Schwebstoffdynamik im Weser-Ästuar konnte um folgende Zusammenhänge erweitert werden:

- Die Dynamik der Makroflocken ist für die Schwebstoffdynamik insbesondere im Bereich der Stromkenterung von erheblicher Bedeutung.
- Akkumulationseffekte in der Trübungszone werden von den in Suspension befindlichen Schwebstoffen nur unterproportional wiedergegeben.
- Verschiebungen der Trübungszone z. B. infolge instationären Oberwasserabflusses treten mit einiger Zeitverzögerung auf, da temporäre Schlickablagerungen an der Sohle innerhalb einer Tide nicht vollständig verlagert werden können.

Die Entwicklung der numerischen Modelltechnik geht in Richtung hochauflösender zwei- bis dreidimensionaler Modelle (ZIELKE et al., 1996). Tidegemittelte Modelle sind zur Erfassung der Schwebstoffdynamik ungeeignet, weil keine Sedimentations- und Erosionsvorgänge erfasst werden können (LANG, 1990). Augenblicklich werden hochauflösende Modelle hauptsächlich für Kurzzeitstudien eingesetzt. ZIELKE et al. (1996) sehen zukünftig jedoch erweiterte Anwendungsmöglichkeiten, die von der Verfügbarkeit geeigneter Messdaten als Rand- und Anfangswerte sowie zur Kalibrierung abhängen.

2.2.3 Zusammenfassung und Bewertung der bisherigen Untersuchungen

Naturmessungen haben gezeigt, dass eine Vielzahl möglicher Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik sowie deren räumliche Variabilität bislang nicht bzw. nicht hinreichend erkannt werden konnten. Dabei wurde deutlich, dass eine über die zyklischen Prozesse während der Tide hinausgehende Dynamik der Trübungszone vorhanden ist, die nicht hinreichend beschreibbar ist.

Kurzzeitige Messungen über eine oder mehrere Tiden können die Dynamik der Trübungszone nur unzureichend erfassen. Ohne nähere Kenntnisse der „Vorgeschichte“ führen Kurzzeitmessungen zu Fehlinterpretationen der Schwebstoffdynamik und sind nicht in der Lage, unterschiedliche Schwebstoffführungen bei wiederholten Messungen unter vergleichbaren Randbedingungen zu erklären. Daher wird die Variabilität der Schwebstoffführung in der Trübungszone erst durch dauerhaft betriebene Messungen ausreichend erfassbar.

Erste Auswertungen dauerhaft betriebener Feldmessungen konnten die Dynamik der Schwebstoffe auf der Zeitachse aufzeigen. Durch begleitende Messungen weiterer Parameter, insbesondere zur Erfassung hydrologischer Änderungen wurden kausale Zusammenhänge beschrieben sowie deren Wirkungen auf die Schwebstoffdynamik erfasst.

Laboruntersuchungen zeigten hingegen deutlich, dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur nur bei Berücksichtigung naturnaher Randbedingungen Erfolg versprechend ist und daher auf erhebliche Schwierigkeiten stößt.

Bei der numerischen Modellierung der Schwebstoffdynamik in Ästuarien sind von der Anwendung als Prinzipmodell zur Simulation natürlicher Ästuarien große Fortschritte erzielt worden. Die numerische Simulation der Schwebstoffführung über die Tide zeigt z. T. beachtliche Übereinstimmung mit Naturmessungen. Dennoch haben die zuvor diskutierten numerischen Modelle gezeigt, dass diese ebenfalls nicht in der Lage sind, die langfristige Dynamik der Trübungszone zufriedenstellend zu simulieren.

Folgende generelle Tendenzen der Schwebstoffführung wurden, trotz individueller Charakteristik der verschiedenen Ästuarien, aus den vorangegangenen Betrachtungen erkennbar:

- Die Mechanismen zur Akkumulation von Schwebstoffen in der Trübungszone sind vorwiegend hydrographischer Natur. Elektrochemische und biogene Prozesse werden als Initialgrößen für erhöhte Schwebstoffgehalte weitestgehend ausgeschlossen, deren Einfluss auf die Schwebstoffdynamik insgesamt jedoch nicht in Frage gestellt.
- In mikrotidalen Ästuarien dominiert die Wirkung dichteinduzierter Strömungen auf die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone, während bei zunehmendem Tidehub die Gezeitenkräfte an Bedeutung gewinnen. Barokline und tidebedingte Einflüsse variieren entlang des Ästuars und liefern unterschiedliche Beiträge zur Gesamtdynamik der Schwebstoffe. Das Zentrum der Trübungszone liegt im Bereich sohnlah gegen null strebender Restströmungen.
- Die Verlagerung der Trübungszone ist auf Änderungen in den Transportprozessen der Schwebstoffe zurückzuführen, die durch Sedimentations-, Resuspensions- und Advektionszyklen während der Tide geprägt sind. Dabei sind Schwebstoffe, die durch temporäre Ablagerungen dem Transportprozess zeitweise entzogen werden und nicht mit jeder Tide resuspendiert werden können, von erheblicher Bedeutung.

Für die weitere Verbesserung des Kenntnisstandes soll nachfolgend ein Auswertekonzept zur Quantifizierung der Variabilität in der Schwebstoffführung im Bereich der Trübungszone infolge längerfristig wirkender Einflüsse aus mehrjährigen, zeitlich hochaufgelösten Messreihen formuliert werden. Diese ästuarunabhängige Methodik wird beispielhaft an Messreihen aus dem Ems-Ästuar vorgestellt.

Ausgehend von diesen mehrjährigen Messreihen werden charakteristische Merkmale der Schwebstoffführung über die Tidedauer parametrisiert. Diese Vorgehensweise ermöglicht „quasi-stationäre“ Zustandsbetrachtungen und führt zu einer erheblichen Datenreduktion. Durch die Verwendung hydrologischer Randbedingungen und zyklischer Hilfsgrößen erfolgt eine quantitative Bewertung wesentlicher Wirkmechanismen auf die Schwebstoffdynamik.

Bedingt durch die Analyse von Datenkollektiven ermöglicht die Methodik keinen Einblick in die veränderte Schwebstoffführung bei singulären Ereignissen (z. B. Sturmfluten). Darüber hinaus werden klimatische Wechselwirkungen und anthropogene Einflüsse ebenfalls ausgeklammert.

Das Vorgehen zur Erfassung der Schwebstoffdynamik stellt insgesamt eine „Makro-Betrachtung“ dar. Das Untersuchungsziel ist daher nicht die Analyse einzelner hydrodynamischer, sedimentologischer, chemischer oder biologischer Prozesse, sondern die Ermittlung der Variabilität in der Schwebstoffführung infolge erfassbarer Änderungen signifikanter Einflussgrößen. Dadurch sollen Aufbau, Akkumulation und Verlagerung der Trübungszone sowie Austrag von Schwebstoffen aus diesem Bereich näher erfasst werden.

Die gezielte Erweiterung des bestehenden Kenntnisstandes soll daher die notwendige Transparenz in der langfristigen Dynamik der Trübungszone schaffen und der Verbesserung von numerischen Modellen bzw. einer Verifikation von Langzeitsimulationen dienen.

3. Vorhandene Messstationen und verwendete Messsysteme

Im Ems-Ästuar werden verschiedene Gewässergütemessstationen betrieben, die, zusammen mit den maßgeblichen Messgrößen, der Messdurchführung und der Datenerfassung, nachfolgend näher vorgestellt werden.

Der Zugang zu den Gewässergütemessungen wurde von der Bundesanstalt für Gewäs-

serkunde (BfG), Koblenz (Stationen: Terborg und Knock) und dem ehemaligen StAWA Aurich (jetzt NLWK; Stationen: Gandersum und Leer) sowie dem Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ) Hildesheim ermöglicht. Ergänzende Abflussmessungen wurden vom WSA Meppen, Fließquerschnitts- und Pegeldaten vom WSA Emden zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurde der Datenfundus durch Leitfähigkeitsmessungen der EWE Oldenburg an der Jann-Berghaus-Brücke erweitert. Für die umfangreiche Unterstützung sei allen Beteiligten an dieser Stelle nochmals gedankt.

3.1 Lokationen der Messstationen im Ems-Ästuar

Die Ems entspringt im Sennegebiet südlich des Teutoburger Waldes und durchfließt das Münster- und Emsland. Nach einer Lauflänge von rd. 370 km mündet dieser norddeutsche Flachlandfluss bei Borkum in die Nordsee. Südlich von Emden liegt eine durch Sturmflut-einwirkung geschaffene rd. 100 km² große Meeresbucht, der Dollart. Das Einzugsgebiet der Ems bis zum Dollart umfasst rd. 13 150 km².

Hase und Leda sind die wichtigsten Nebenflüsse, die auf der östlichen Seite bei Meppen bzw. Leer in die Ems einmünden. Die Tidegrenze ist seit 1899 durch ein Wehr bei Herbrum festgelegt. Der tidebeeinflusste Teil der Ems erstreckt sich somit über eine Länge von rd. 100 km. Der Lageplan (Abb. 7) zeigt die Lokationen der Gewässergütemessstationen und der Abflussmessstelle in Versen. Tab. 1 fasst wesentliche Kenngrößen der verwendeten Stationen zusammen, die in Abb. 7 dargestellt sind.

Tab. 1: Verwendete Zeitreihen der Gewässergütemessungen im Ems-Ästuar

Gewässergütemessungen im Ems-Ästuar				
Station	Zeitraum	Ems-km	Abstand von der Tidegrenze	Stationsbetreiber
Terborg	03.90–12.95	24,7	38 km	BFG Koblenz/WSA Emden
Gandersum	05.88–12.95	31,75	45 km	NLÖ Hildesheim/ehem. StAWA Aurich
Knock	12.91–12.95	50,7	64 km	BFG Koblenz/WSA Emden

3.2 Messgrößen und Messtechnik

An den Gewässergütestationen im Ems-Ästuar werden u. a. Wasserstand, elektrische Leitfähigkeit und Trübung erfasst. Die dazu verwendeten Geräte sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Während Wasserstandsmessungen mit Schwimmerpegeln durchgeführt wurden, erfolgte die Bestimmung der Gewässergüteparameter durch Suspensionentnahme mit einer Pumpe und Analyse in einem kontinuierlich arbeitenden Kreislauf (vgl. auch SCHULZE u. RUPERT, 1989). Die Entnahmehorizonte der Suspension liegen auf folgenden Höhen:

- Terborg NN – 3,48 m
- Gandersum jeweils rd. 1m unter Wasserspiegeloberfläche
- Knock NN – 4,20 m

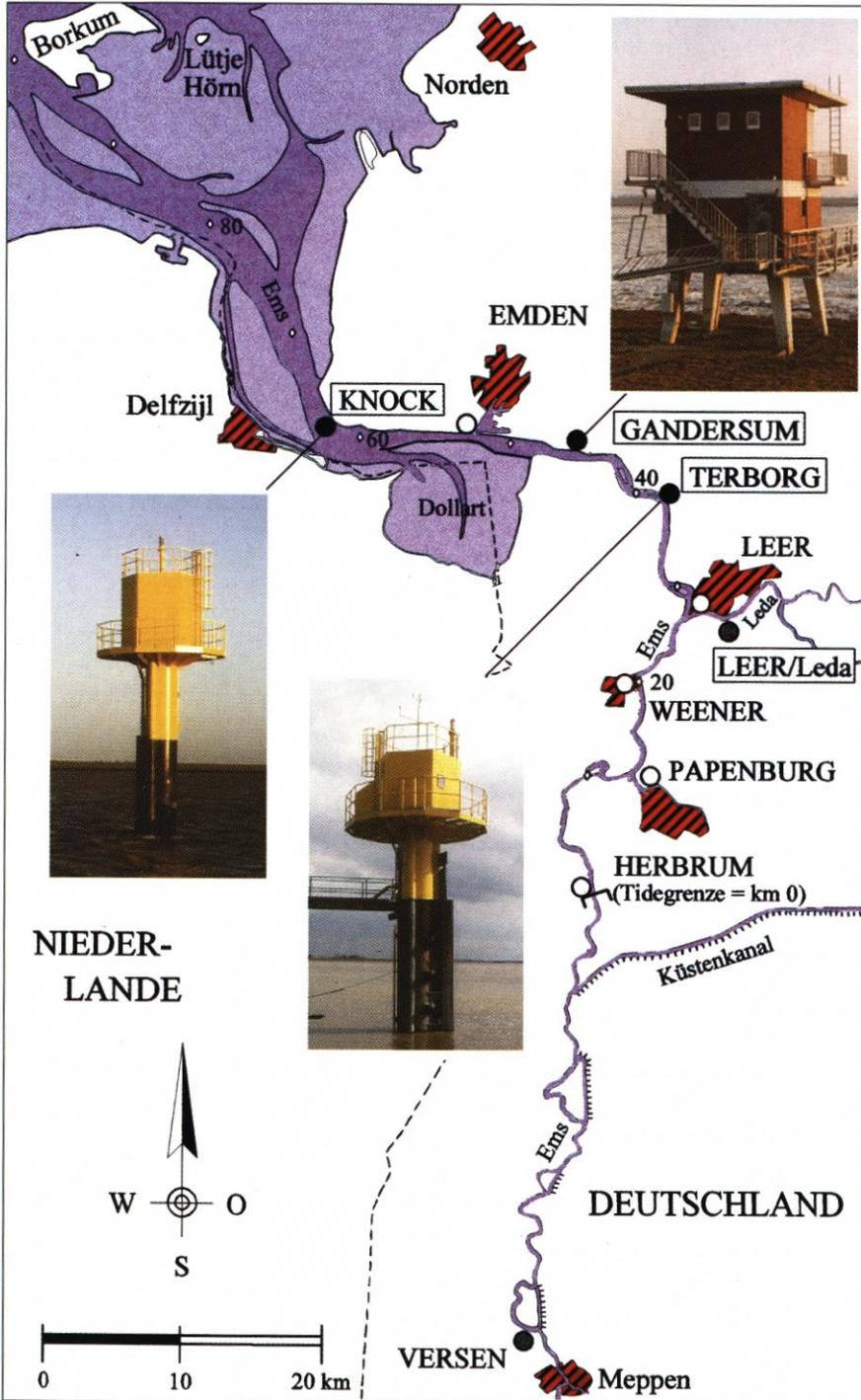


Abb. 7: Lageplan der Ems zwischen Versen und Borkum mit den Lokationen der Abflussmessstelle Versen sowie den Messstationen Terborg, Gandersum, Knock und Leer/Leda

Die Messungen werden als arithmetische Mittel über 1600 Einzelwerte in einem Zeitintervall von 90 s durchgeführt und alle 2 Minuten auf Personalcomputern automatisch abgespeichert.

Tab. 2: Messgeräte und Messbereiche (Stand: Dez. 1995)

Messgröße	Terborg		Gandersum		Knock	
	Gerätetyp	Messbereich	Gerätetyp	Messbereich	Gerätetyp	Messbereich
Wasserstand	Fa. Hagenuk GA03	2,5-7,5 [PNP+m]	Fa. Läufer/ Hagenuk	2,0-11,0 [PNP+m]	Fa. Hagenuk GA03	2,5-7,5 [PNP+m]
Elektr. Leitfähigkeit	Fa. Knick Typ 65	0-50 ¹⁾ [mS/cm]	Fa. Knick ²⁾ Typ 65	0-30 [mS/cm]	Fa. Knick Typ 65	0 - 50 [mS/cm]
Trübung ³⁾	Fa. BTG ⁴⁾ MEX-3000	0-100 [%]	Fa. Gimat GTU 702	0-100 [%]	Fa. BTG ⁵⁾ MEX-3000	0-100 [%]

¹⁾ bis September 1991: 0-20 [mS/cm]

²⁾ bis März 1994: Fa. WTW LF 750

³⁾ Die Messbereiche für die Trübung wurden mehrfach verändert, aufgrund der prozentbezogenen Angabe der Messwerte werden Messbereichsänderungen hier nicht erkennbar.

⁴⁾ bis Juli 1995: Fa. BTG MEX-3

⁵⁾ bis Oktober 1995: Fa. BTG MEX-3

Wartungsarbeiten, Störungen und Ausfälle (z. B. Eisgang, Geräteschäden etc.) führten während des mehrjährigen Betriebs zu partiellen Unterbrechungen, durchgehende Zeitreihen liegen somit nicht vor.

4. Untersuchungsmethoden und Auswertekonzept

Gewässergütemessungen mit hoher zeitlicher Auflösung ermöglichen, wie in Abschn. 2 dargelegt, die Erfassung, Interpretation und Quantifizierung der Schwebstoffführung infolge verschiedener Einflussgrößen. Bei dauerhafter Erfassung kann die ästuarine Schwebstoffdynamik auch über den halbtägigen, tidebedingten Zyklus hinaus ermittelt werden. Kriterien und Vorgehensweise der dazu notwendigen Datenaufbereitung sowie eines entsprechenden Auswertekonzeptes werden nachfolgend vorgestellt.

Die aus einer entsprechenden Konzeption resultierenden Anforderungen an eine rechnergestützte Datenaufbereitung und -auswertung können wie folgt formuliert werden:

- Auswahl notwendiger Messgrößen zur Erfassung der Schwebstoffführung und der hydrographischen Verhältnisse
- Kalibrierungsmöglichkeit indirekter Messgrößen auf die erforderlichen Parameter
- Reduktion der Messdaten im Zeitbereich auf kennzeichnende Größen für quasi-stationäre Zustandsbetrachtungen innerhalb der Tide
- Schaffung einer vergleichbaren Datenbasis über die gesamte Untersuchungsdauer.

Beispielhaft für den Verlauf wesentlicher Messgrößen zur Erfassung und Interpretation der Schwebstoffdynamik sind in Abb. 8 die Oberwasserführung am Pegel Versen sowie der Wasserstand, der Salzgehalt und der Schwebstoffgehalt an der Station Gandersum für den Juni 1994 dargestellt. In höherer Auflösung ist der Verlauf o.g. Parameter für einen Tag (17. Juni 1994) in Abb. 9 aufgetragen.

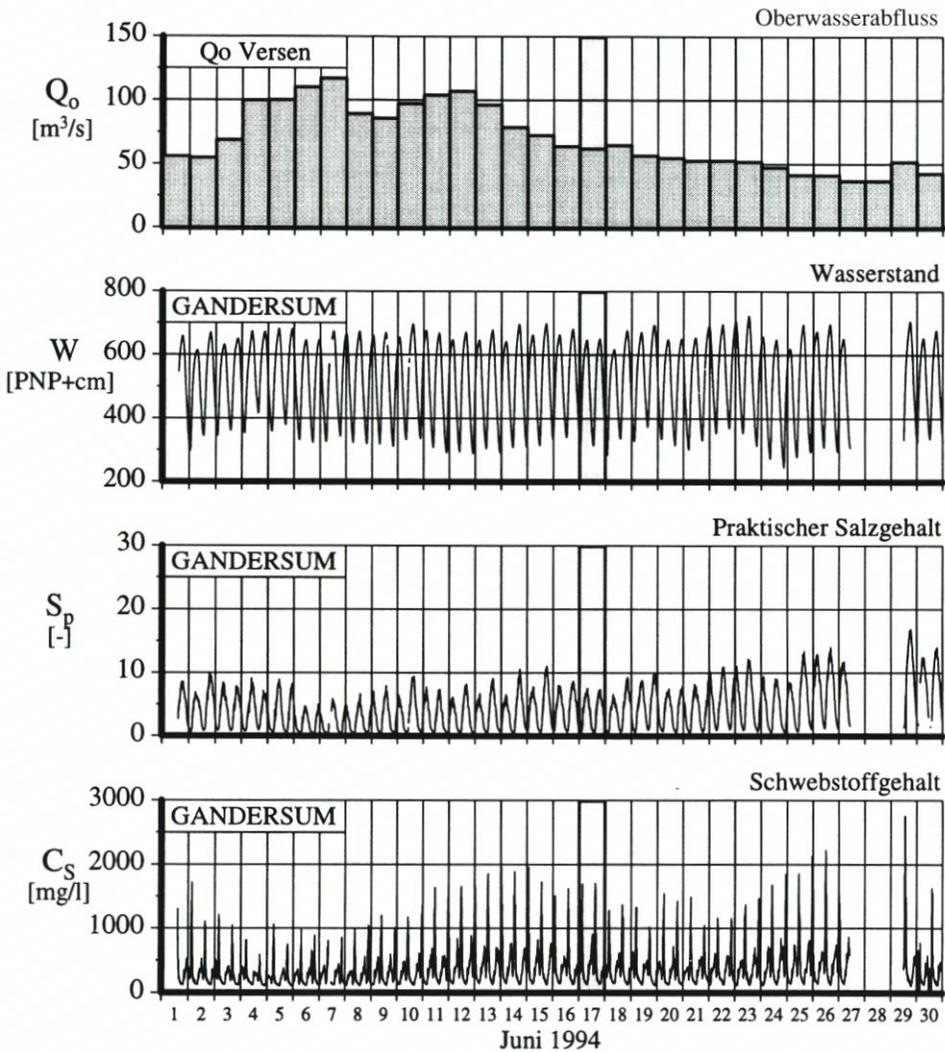


Abb. 8: Monatsdarstellung des täglichen Oberwasserabflusses am Pegel Versen sowie dem Wasserstand, Prakt. Salzgehalt und Schwebstoffgehalt an der Gewässergütemessstation Gandersum; beispielhaft für Juni 1994

Zur Erfassung und Interpretation der Schwebstoffführung wurde ein Datenaufbereitungs- und Auswertekonzept für dauerhaft betriebene Messungen in Abhängigkeit

- des halbtägigen Tidegeschehens
- der Oberwasserführung
- der 14-tägigen Ungleichheit der Tide sowie
- jahreszeitlicher Zyklen

entwickelt, welches in Abschn. 4.2 vorgestellt wird.

Oberwasserabfluss am Pegel Versen: $61,9 \text{ m}^3/\text{s}$

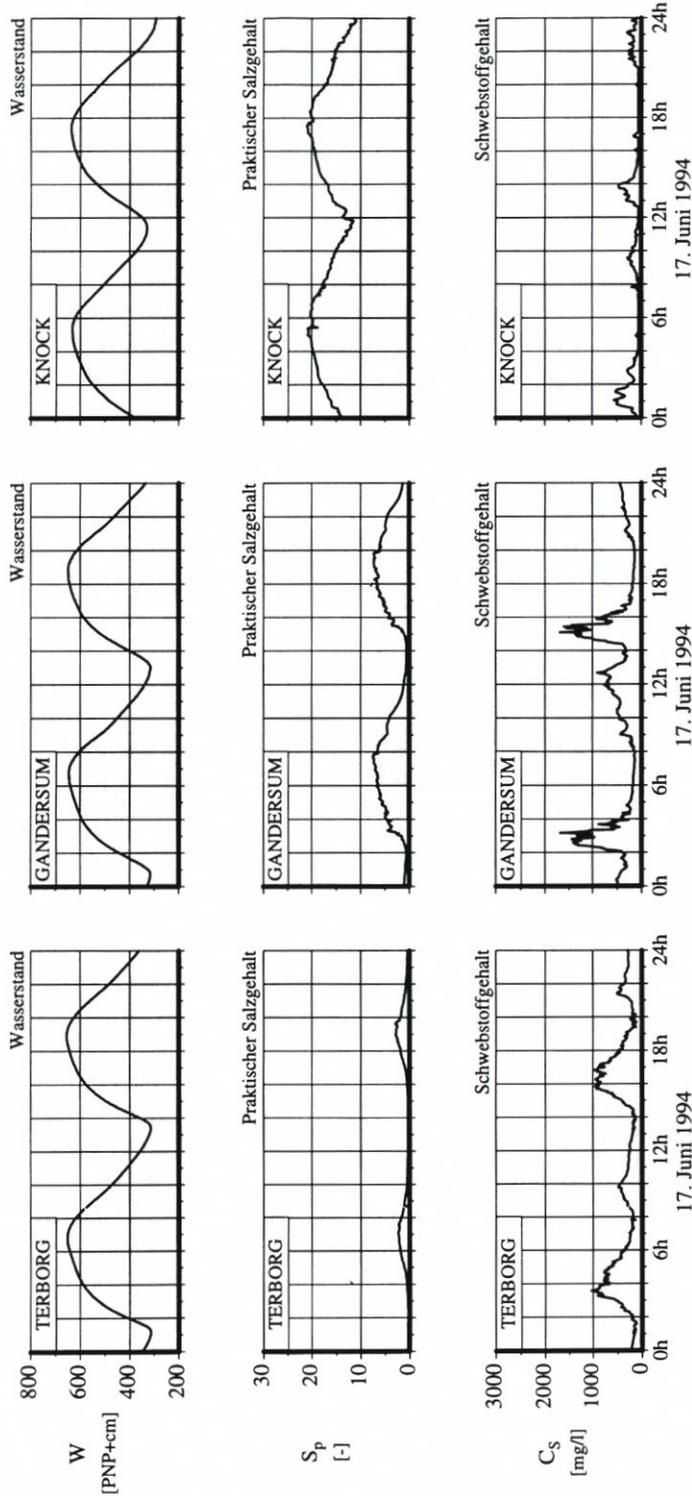


Abb. 9: Verlauf der Parameter Wasserstand, Prakt. Salzgehalt und Schwebstoffgehalt über einen Tag an den Stationen Terborg, Gandersum und Knock; beispielhaft für den 17. Juni 1994

4.1 Kalibrierung der indirekten Messgrößen zur Bestimmung des Salz- und Schwebstoffgehaltes

Die elektrische Leitfähigkeit und die Trübung stellen nur Hilfsgrößen dar, da die direkte automatische Dauermessung der für ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen erforderlichen Parameter Salzgehalt und Schwebstoffgehalt nicht möglich ist. Der verwendete Ansatz zur Ermittlung des Praktischen Salzgehaltes aus der elektrischen Leitfähigkeit sowie die In-Situ-Kalibrierung der Trübung auf den Schwebstoffgehalt werden nachfolgend beschrieben.

4.1.1 Leitfähigkeitsmessungen

Die gemessene elektrische Leitfähigkeit κ kann über eine empirisch ermittelte Funktion unmittelbar auf den dimensionslosen, international definierten Praktischen Salzgehalt S_p [-] umgerechnet werden. Die Anwendbarkeit dieser empirischen Beziehung auf das Ems-Ästuar konnte SCHULZE (1988) nachweisen. Der Praktische Salzgehalt ist als eine Funktion des Verhältnisses der elektrischen Leitfähigkeit κ einer Wasserprobe zur Leitfähigkeit einer Kaliumchloridlösung (KCL) mit einem Gewichtsanteil von 32,4356 g KCL/kg definiert (UNESCO, 1981). Diese KCL-Lösung entspricht mit $S_p = 35$ dem Standard-Meerwasser.

Entsprechend seiner Definition gilt der Prakt. Salzgehalt nur für Werte $S_p \geq 2$. SCHULZE (1988) konnte jedoch nachweisen, dass dieser für ingenieurpraktische Anwendungen auch bis in den Süßwasserbereich verwendet werden kann.

4.1.2 Trübungsmessungen

Als Trübung wird die optische Eigenschaft des Wassers bezeichnet, eingestrahktes Licht zu streuen. Bei der Trübungsmessung kann einerseits die Schwächung eines ausgesendeten Lichtstrahles nach einer definierte Messstrecke (Attenuationsmessung), andererseits auch die Intensität der Streuung einer Lichtquelle unter einem bestimmten Winkel (Streulichtmessung) gemessen werden. Darüber hinaus sind auch Kombinationsmessungen möglich.

Die Stärke der Trübung eines eingestrahkten Lichtes hängt von der Menge, Größe, Form und Zusammensetzung der suspendierten Teilchen ab. Darüber hinaus wird der Messwert noch durch die Art der Messung, die Geometrie des Messaufnehmers und durch die Wahl der Lichtquelle beeinflusst. Trübungsmessgeräte werden auf der Grundlage von sogenannten Standardsuspensionen kalibriert. Der Messbereich wird in Trübungseinheiten (TE) der gewählten Standardsuspension angegeben (z. B. TE/F für Formazin-Suspension). Für wasserbauliche Fragestellungen wird jedoch der Bezug zu den in der Wassersäule suspendierten Feststoffen, hier generell als Schwebstoffe bezeichnet, benötigt. Schwebstoffe besitzen andere optische Eigenschaften als die verwendeten Standardsuspensionen, daher sind gerätespezifische Kalibrierungen auf den Schwebstoffgehalt unumgänglich.

Zur Ermittlung des Schwebstoffgehaltes aus Trübungsmessungen wurden z.T. mehrfach In-Situ-Kalibrationen für jede Messstation durchgeführt. Abb. 10 (oben) zeigt schematisch die verwendete Kalibrationseinrichtung. Diese Einrichtung wurde mit schwebstoffhaltigem Wasser in verschiedenen Konzentrationen beschickt. Für jede Konzentration wurde die vorhandene Trübung abgelesen und eine repräsentative Wasserprobe zur gravimetrischen Bestimmung des Schwebstoffgehaltes entnommen. Die gravimetrische Bestimmung des Schwebstoffgehaltes konnte aufzeigen, dass definierte geräte- und lokationsspezifische Ab-

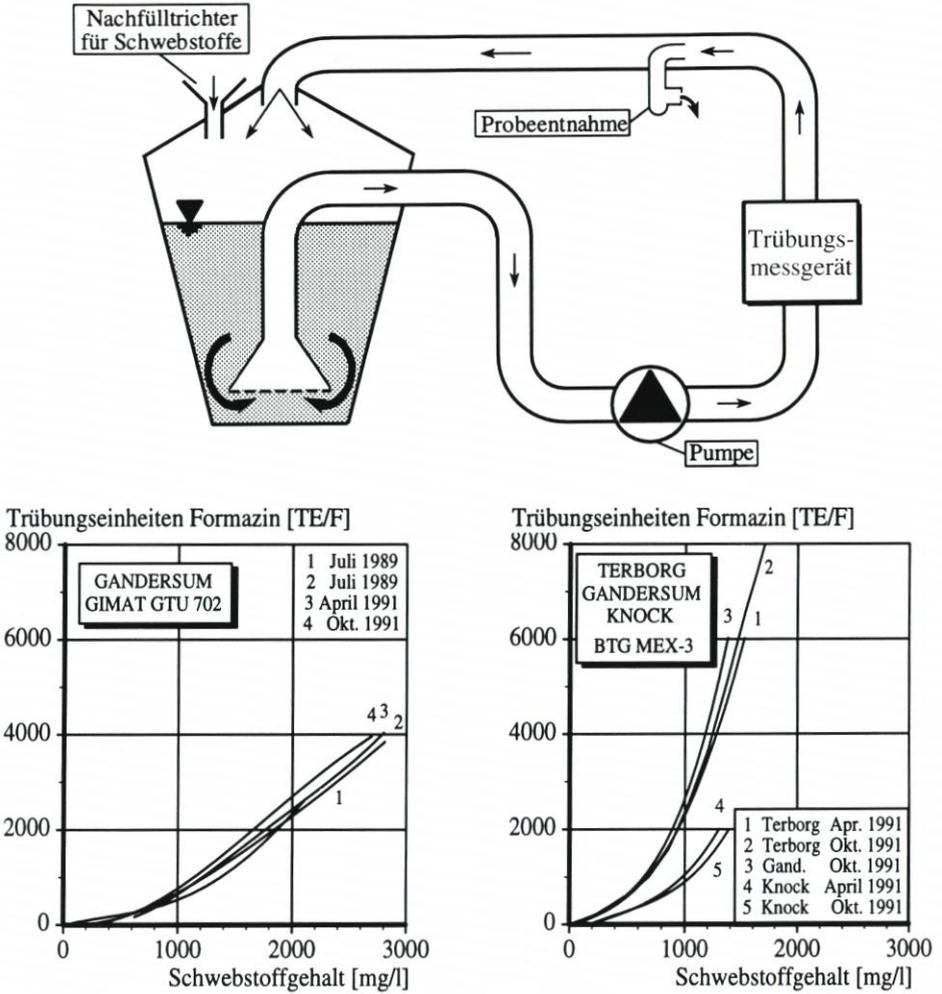


Abb. 10: Kalibrierung der Trübungsmessungen; oben: verwendete Kalibriereinrichtung, unten: lokale Beziehungen zwischen Formazin-Suspension und Schwebstoffgehalt

hängigkeiten zwischen Formazin-Suspension und Schwebstoffgehalt bestehen. Diese Abhängigkeiten wurden im Rahmen der Langzeitüberwachung der Messgeräte sowie bei Messbereichsänderungen ausgenutzt.

Für die Ingenieurpraxis konnten gute Übereinstimmungen bei wiederholten Kalibrierungen festgestellt werden (vgl. Abb. 10, unten). Nach lokationsspezifischen Anpassungsphasen konnten in Terborg Schwebstoffgehalte bis rd. 3,5 g/l, in Gandersum bis rd. 2,9 g/l und an der Knock bis rd. 2,3 g/l erfasst werden.

4.2 Messdatenaufbereitung

Nach Sichtung und Plausibilisierung der Rohdaten erfolgt die Aufbereitung der Messungen hinsichtlich einer äquidistanten Datenreduktion jeder einzelnen von Tideniedrigwasser bis zum nachfolgenden Tideniedrigwasser reichenden Tide für die Parameter Prakt. Salzgehalt und Schwebstoffgehalt mit n Werten (Stützstellen).

Zur Festlegung der erforderlichen Randbedingungen wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Die Änderungen der minimalen, mittleren und maximalen Schwebstoffgehalte über die Tide in Abhängigkeit der Stützstellenanzahl n zeigt Abb. 11 beispielhaft für Oktober 1994 an der Station Gandersum. Auf der linken Bildhälfte ist jeweils der Verlauf der Monatsmittelwerte aufgetragen während die rechte Bildhälfte den bezogenen Schwebstoffgehalt

$$\frac{\text{Schwebstoffgehalt bei } n \text{ Stützstellen}}{\text{Schwebstoffgehalt bei 100 Stützstellen}}$$

für jede einzelne Tide zeigt. Daraus wird ersichtlich, dass zur Erfassung der Schwebstoffgehalte über die Tide eine Diskretisierung mit weniger als 30 Werten pro Tide aufgrund der verbleibenden Schwankungen der Maximalgröße nicht ausreichend ist.

Für die nachfolgende Auswertung wurde die Anzahl der Diskretisierungspunkte auf $n = 50$ festgelegt und jeder Diskretisierungspunkt aus dem arithmetischen Mittel von 5 Messwerten gebildet.

4.3 Parametrisierung und Klassifizierung des Salz- und Schwebstoffgehaltes

Aus den Tideganglinien der verschiedenen Messgrößen wurden für eine quasi-stationäre Analyse der Schwebstoffdynamik und der hydrologischen Randbedingungen nachfolgende kennzeichnende Größen parametrisiert:

1. Schwebstoffgehalt
 - Minimaler Schwebstoffgehalt nach Tideniedrigwasser im Bereich der Ebbestromkenterung (min. $C_{S, f}$)
 - Minimaler Schwebstoffgehalt nach Tidehochwasser im Bereich der Flutstromkenterung (min. $C_{S, e}$)
 - Maximaler Schwebstoffgehalt bei Flut (max. $C_{S, f}$)
 - Maximaler Schwebstoffgehalt bei Ebbe (max. $C_{S, e}$)
 - Mittlerer Schwebstoffgehalt bei Flut (mittl. $C_{S, f}$)
 - Mittlerer Schwebstoffgehalt bei Ebbe (mittl. $C_{S, e}$)
 - Mittlerer Schwebstoffgehalt über die Tide (mittl. $C_{S, Tide}$)
2. Praktischer Salzgehalt
 - Minimaler Praktischer Salzgehalt über die Tide (min. S_p)
 - Maximaler Praktischer Salzgehalt über die Tide (max. S_p)
 - Mittlerer Praktischer Salzgehalt über die Tide (mittl. S_p)

In Voruntersuchungen wurden nur sehr geringe Änderungen in der zeitlichen Entwicklung der Schwebstoffführung während der Tide festgestellt. Im Gegensatz zu der parametrisier-

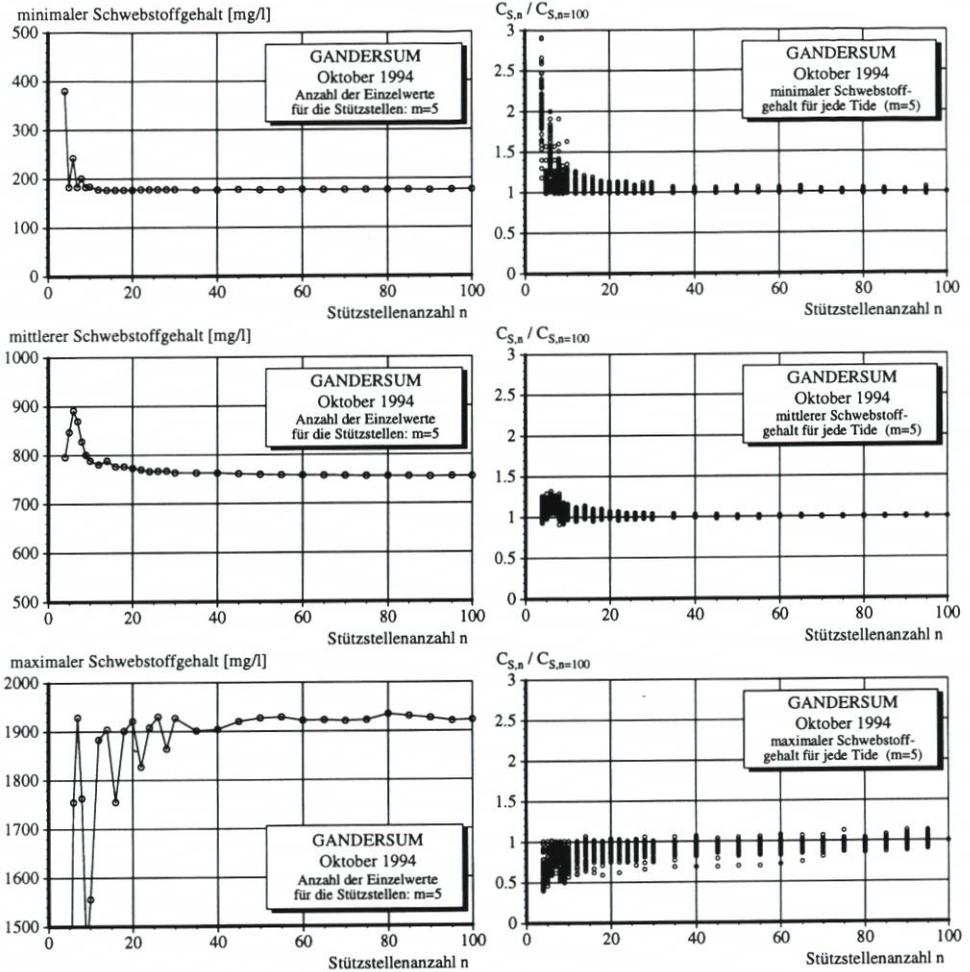


Abb. 11: Erfasste minimale, mittlere und maximale Schwebstoffgehalte in Abhängigkeit der Stützstellenanzahl für die Tide, beispielhaft für die Station Gandersum / Oktober 1994; links: monatlicher Mittelwert, rechts: Bezogener Schwebstoffgehalt für jede einzelne Tide

ten quantitativen Schwebstoffführung ist somit die phasenabhängige Betrachtung der Schwebstoffdynamik nicht erforderlich.

Abb. 12 zeigt beispielhaft die im 2-Minuten-Messtakt gewonnen Messdaten des Wasserstandes, des Prakt. Salzgehaltes und des Schwebstoffgehaltes, die jeweils daraus ermittelten 50 Stützstellen und die Parametrisierung der Messgrößen über die Tide für die o.g. charakteristischen Merkmale.

Die Daten bildeten, zusammen mit den ermittelten Tidehauptwerten und dem Oberwasserabfluss, die Grundlage aller nachfolgenden Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Ems-Ästuar.

Durch eine Klassifizierung der Datenkollektive können unter statistischen Gesichtspunkten sowohl hydrologische Einflüsse als auch signifikante Merkmale der Schwebstoff-

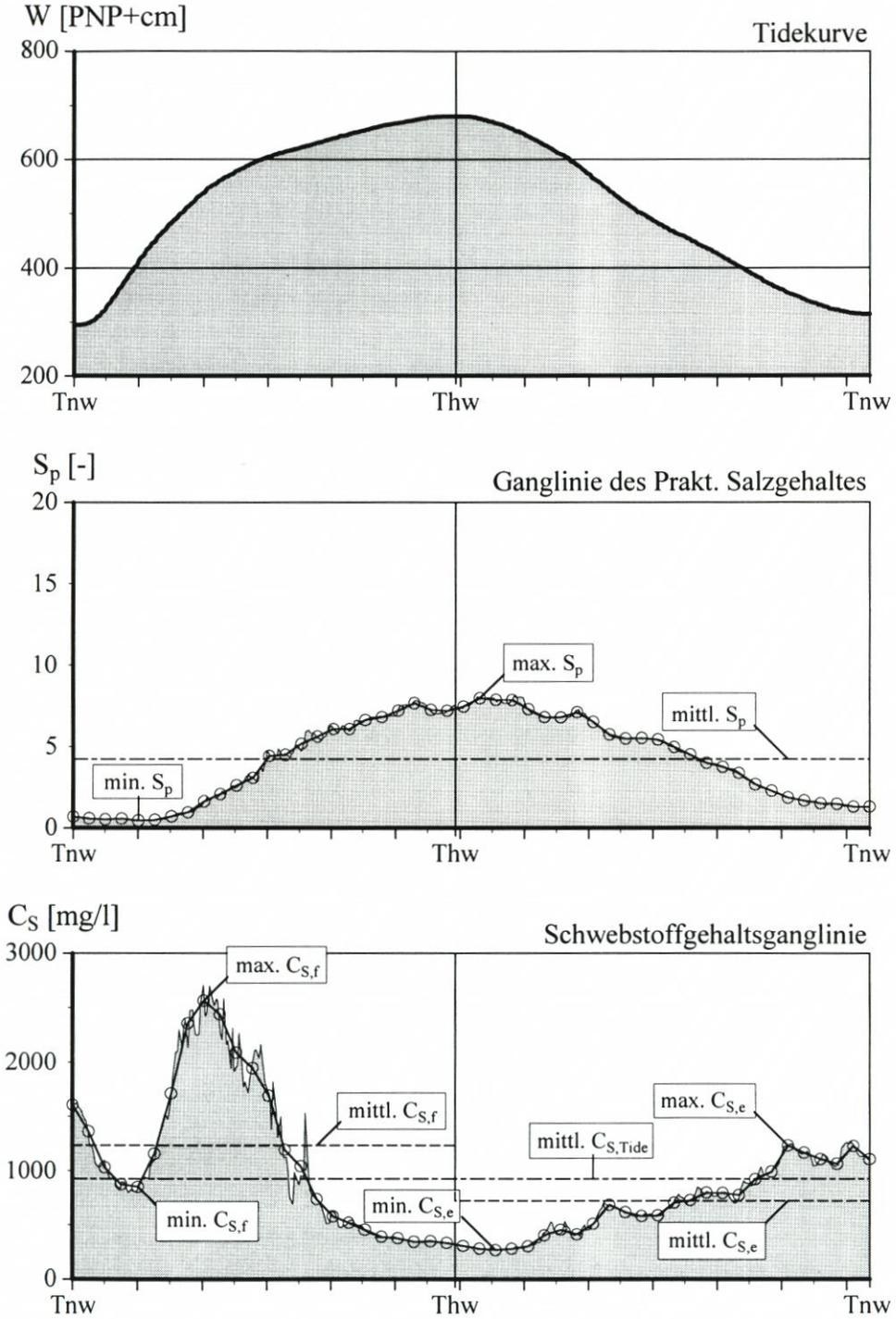


Abb. 12: Parametrisierung der Schwebstoffgehaltsmessungen am Beispiel einer Tide

führung selbst näher untersucht werden. Dazu wurden zwei verschiedene Klassifizierungssysteme mit folgenden Klassenbreiten gewählt:

1. Mittlerer Praktischer Salzgehalt (mittl. S_p)

$0 < \text{mittl. } S_p \leq 5$	in Klassenbreiten von mittl. $S_p = 0,5$
$\text{mittl. } S_p > 5$	in Klassenbreiten von mittl. $S_p = 1,0$
2. Mittlerer Schwebstoffgehalt über die Tide (mittl. $C_{S,Tide}$)

$\text{mittl. } C_{S,Tide}$	in Klassenbreiten von mittl. $C_{S,Tide} = 100 \text{ mg/l}$
-----------------------------	--

Die gewählten Klassenbreiten stellen einen Kompromiss zwischen ausreichender Datengrundlage in den einzelnen Klassen und größtmöglicher Auflösung dar und wurden nach Voruntersuchungen festgelegt.

4.4 Auswertekonzept zur Erfassung der Schwebstoffdynamik

4.4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Schwebstoffführung im Bereich der Brackwasserzone von Ästuarien weist erhebliche räumliche und zeitliche Schwankungen auf, die auf komplexe Wechselbeziehungen verschiedenster Wirkmechanismen zurückzuführen sind (vgl. Abschn. 2). Eine Quantifizierung einzelner Wirkmechanismen auf die Schwebstoffdynamik durch Naturmessungen ist noch nicht zufriedenstellend gelungen, zumal die messtechnische Erfassung zahlreicher Einflussgrößen bislang nicht möglich ist. Daher muss bei einer auf Naturmessungen basierenden Analyse der Schwebstoffdynamik von ganzheitlichen Betrachtungen ausgegangen werden. In diesem Sinne sind Schwebstoffgehaltsmessungen, die als dynamische Summengröße ästuariner Prozesse angesehen werden können, zur Interpretation der Dynamik in der Trübungszone von Ästuarien einsetzbar.

Die nachfolgend entwickelte Auswertemethodik unterscheidet verschiedene Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik und erlaubt damit deren quantitative Erfassung. Darüber hinaus ermöglicht die Quantifizierung der Schwebstoffführung in Abhängigkeit einzelner Einflussgrößen Rückschlüsse auf entsprechende Änderungen in der Schwebstoffdynamik sowie der damit verbundenen Transportprozesse in der Trübungszone.

Neben den Änderungen der Schwebstoffdynamik durch das halbtägige Tidegeschehen sind grundsätzlich folgende Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik isolierbar:

- Abflussverhältnisse
- 14-tägige Ungleichheit des Tidegeschehens (Spring-/Nipptidezyklus)
- Jahreszeitliche Einflüsse

Darüber hinaus wäre auch eine quantitative Trendermittlung über den jeweiligen Untersuchungszeitraum möglich, worauf nachfolgend jedoch verzichtet wurde.

Abb. 13 zeigt beispielhaft die verschiedenen Anteile der Schwebstoffführung für den maximalen Schwebstoffgehalt bei Ebbe und stationärer Oberwasserführung.

gleiche Oberwasserführung

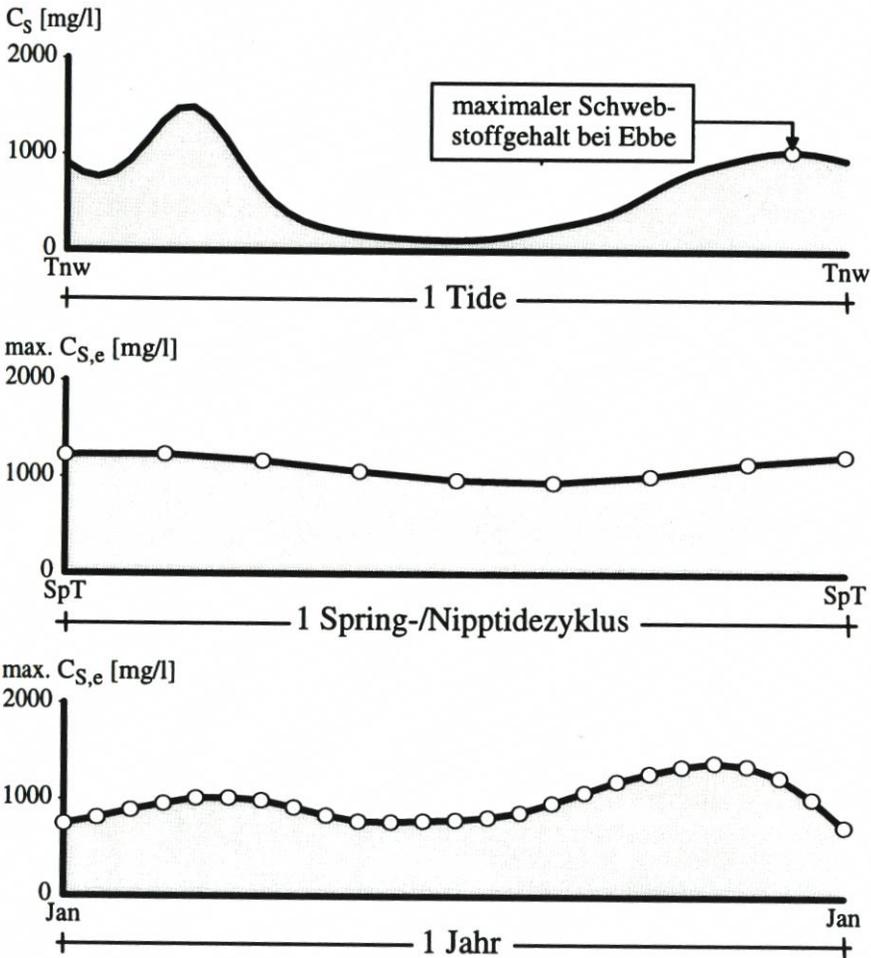


Abb. 13: Änderungen der Schwebstoffführung während der Tide sowie des maximalen Schwebstoffgehaltes bei Ebbe über den Spring-/Nipptide- und Jahreszyklus (schematisch)

4.4.2 Beschreibung des Auswertekonzeptes

In dem entwickelten Auswerteverfahren wird die Variabilität in der Schwebstoffführung infolge zuvor genannter Einflussgrößen schrittweise ermittelt. Grundlage der quantitativen Berücksichtigung der Abflussverhältnisse bilden die parametrisierten Größen des mittleren Prakt. Salzgehaltes. Zur Ermittlung der Variabilität in der Schwebstoffführung infolge 14-tägiger Ungleichheit der Tide bzw. saisonaler Einflüsse können phasengleiche Betrachtungen der parametrisierten Messgrößen mit unterschiedlichen Fensterbreiten entsprechend der Mondphase bzw. der Jahreszeit (vgl. Abb. 14) dienen.

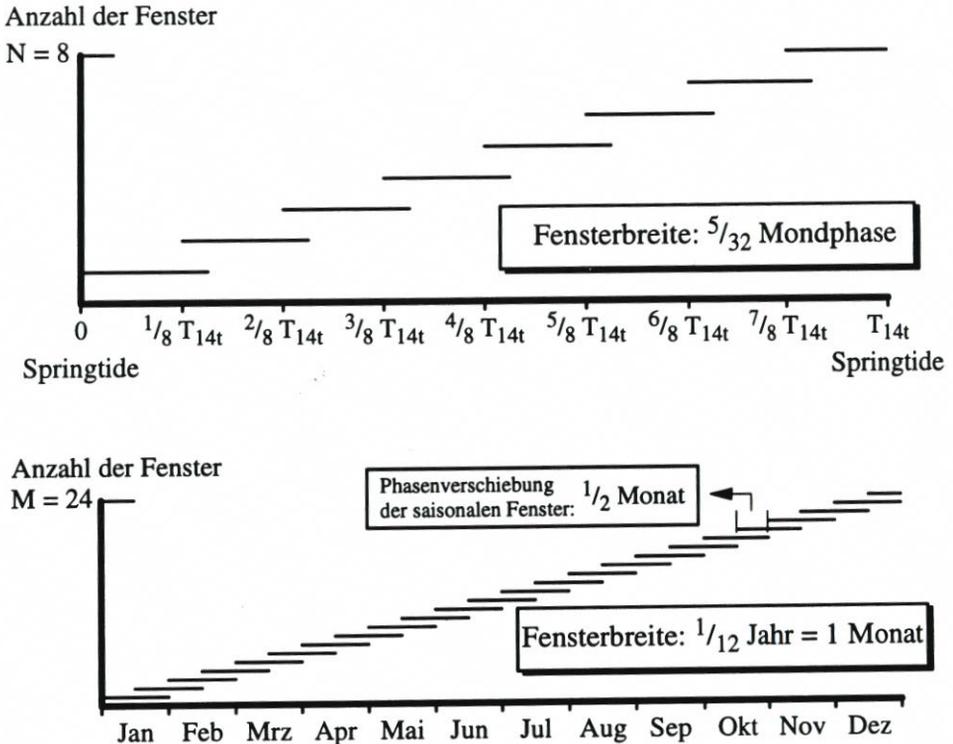


Abb. 14: Lage der Analysefenster über den Spring-/Nipptidezyklus (oben) und den Jahreszyklus (unten)

Im ersten Auswerteschritt werden arithmetische Klassenmittelwerte der parametrisierten Größen nach einer Klassifizierung über den mittleren Prakt. Salzgehalt bestimmt. In den anschließenden Auswerteschritten werden arithmetische Klassenmittelwerte entsprechend einer zweidimensionalen Klassifizierung nach dem mittleren Prakt. Salzgehalt und der Mondphase bzw. dem mittleren Prakt. Salzgehalt und der Jahreszeit gebildet.

Nach jedem Auswerteschritt wird die Differenzgröße zwischen den Eingangsdaten und dem zugehörigen Mittelwert bestimmt. Diese Differenzgrößen bilden die Eingangsdaten für den nachfolgenden Auswerteschritt.

Für die umfangreiche Dokumentation des Auswertekonzeptes mit den zugehörigen Randbedingungen sei auf SPINGAT (1997) verwiesen.

5. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Kenntnis der hydrographischen Verhältnisse entlang des Ems-Ästuars stellt eine wesentliche Grundlage für die Interpretation der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone sowie der dafür maßgebenden Prozesse dar. Deshalb gliedern sich die Auswertungen zur ästuarinen Schwebstoffführung in zwei Teile:

1. Erfassung der hydrographischen Verhältnisse entlang der Ems
2. Herleitung der Schwebstoffdynamik im Trübungsgebiet des Ems-Ästuars

Im ersten Teil steht die Erfassbarkeit der Abflussverhältnisse und der abflussbedingten Änderungen der Tidedynamik sowie die Mobilität der Brackwasserzone im Vordergrund. Schwierigkeiten bei der Erfassung der Abflusssituation ergeben sich aus der rd. 70 bis 100 km entfernten Lage der Abflussmessstelle von den Gewässergütemessstationen sowie dem Zufluss der Leda innerhalb des Tidegebietes.

Im zweiten Teil wird das in Abschn. 4 vorgestellte Auswertekonzept zur Quantifizierung längerfristiger Einflussgrößen auf die Schwebstoffdynamik für dauerhaft betriebene Messungen auf die Stationen Terborg, Gandersum und Knock angewendet, sowie durch entsprechende Aufbereitung vorliegender Daten der Station Leer/Leda ergänzt. Ziel dieser Auswertung ist es, kausale Zusammenhänge hinsichtlich der Mobilität der Trübungszone zu erfassen.

5.1 Hydrographische Messgrößen im Ems-Ästuar

Zur Charakterisierung der hydrographischen Verhältnisse im Ems-Ästuar werden die Abfluss-, Tide- und Salzgehaltsverhältnisse und deren natürliche Variabilität eingehender betrachtet.

5.1.1 Oberwasserführung

Zur Erfassung der Abflussverhältnisse werden im Emsgebiet verschiedene Abflussmessstellen betrieben. In Tab. 3 sind die Abflusshauptwerte für Dalum/Ems (oberhalb der Hasemündung bei Meppen), Bokeloh/Hase, Versen/Ems (unterhalb der Hasemündung) und Leer/Leda zusammengestellt.

Tab. 3: Hauptwerte des Abflusses im Emsgebiet (NLÖ, 1993 und NLÖ, 1995), ergänzt nach Daten des WSA Meppen und des ehem. StAWA Aurich

Hauptwerte des Abflusses für ausgewählte Pegel im Einzugsgebiet der Ems				
Ort:	Dalum/Ems	Bokeloh/Hase	Versen/Ems	Leer/Leda
Bezugszeitraum:	1965/91	1957/89	1941/95	1984/95
NQ [m ³ /s]	3,00 (1973)	3,78 (1959)	5,2 (1947)	NMQ [m ³ /s] = 14,6 (1990)
MNQ [m ³ /s]	8,70	8,51	15,5	
MQ [m ³ /s]	48,4	29,0	80,6	24,2
MHQ [m ³ /s]	195	104	376	HMQ [m ³ /s] = 35,0 (1995)
HQ [m ³ /s]	461 (1987)	162 (1981)	1200 (1946)	

Für die detaillierte Auswertung der Abflussverhältnisse standen Tagesmittelwerte des Pegels Versen von 1988 bis 1995 zur Verfügung. Die monatliche Bandbreite der zugehörigen Tagesmittelwerte sowie die minimalen und maximalen Monatsmittelwerte sind, zusammen mit der mittleren Abflusssituation über den 8-jährigen Untersuchungszeitraum, in Abb. 15 zusammengefasst.

Im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit wurde davon ausgegangen, dass bei niedrigen Abflüssen durch den Zufluss der Leda bei Leer keine signifikanten Veränderungen in der Ab-

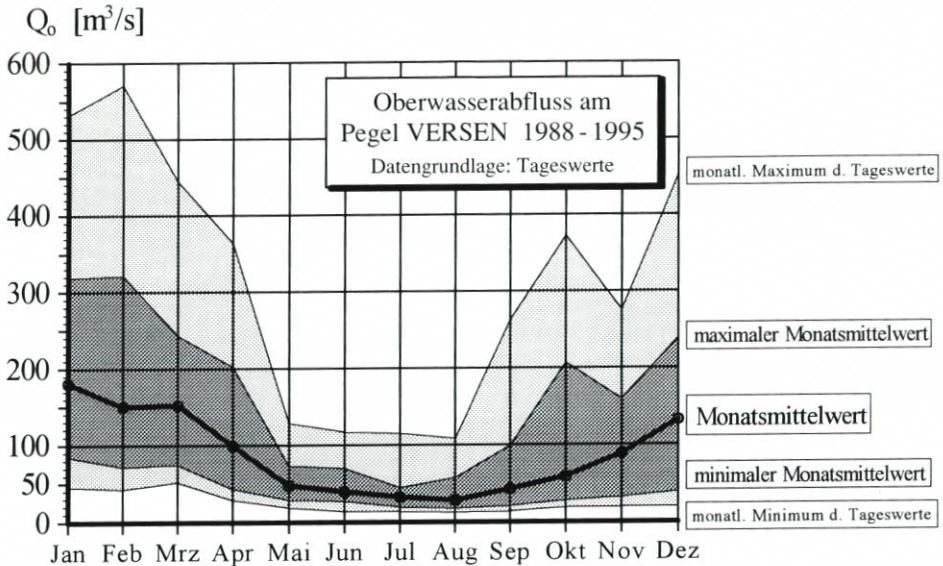


Abb. 15: Bandbreite der Abflussverhältnisse am Pegel Versen im Untersuchungszeitraum 1988–1995

flusscharakteristik auftreten und daher eine ausschließliche Verwendung der Messreihe am Pegel Versen/Ems möglich ist.

5.1.2. Tide- und Strömungsverhältnisse

a.) Allgemeines

Die Betrachtung mittlerer jährlicher oder mehrjähriger Tidewasserstände, wie im Küstenbereich üblich, sagt wenig über die Tidedynamik in einem Ästuar aus. Bedingt durch den stromaufwärts zunehmenden Einfluss der Oberwasserführung auf die Tideverhältnisse (vgl. Abschn. 2.1) ist eine entsprechende Berücksichtigung der Abflusssituation zur Erfassung der Tidedynamik von erheblicher Bedeutung.

Nachfolgend werden die Tideverhältnisse im Ems-Ästuar unter Verwendung der monatlichen Tidehauptwerte an ausgewählten Pegeln zusammen mit den monatlichen Abflusswerten am Pegel Versen untersucht. Darauf basierend wird die abflussabhängige Tideentwicklung entlang des Ems-Ästuars beispielhaft für drei Abflusszustände betrachtet:

- niedriger Oberwasserabfluss $Q_o = 20 \text{ m}^3/\text{s}$
- mittlerer Oberwasserabfluss $Q_o = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
- hoher Oberwasserabfluss $Q_o = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Unter Verwendung vereinfachter Ansätze wird für die o.g. Abflusszustände auch eine übersichtliche Tidekubizierung vorgenommen, die insbesondere zur Beschreibung abflussabhängiger Änderungen im Tidegeschehen dient.

Die Strömungsverhältnisse sind zur Erfassung des Schwebstofftransportes in einem Ästuar von hoher Bedeutung. Wie in Abschn. 2.1 aufgezeigt wurde, stellt gerade die Instationarität der ästuarinen Strömung, die sich maßgeblich aus tideinduzierter Strömung, Oberwasserabfluss und Dichteströmung zusammensetzt, eine entscheidende Einflussgröße auf

das Schwebstoffregime dar. Eine Trennung dieser zeitgleich wirkenden Strömungskomponenten zur Interpretation von Fließgeschwindigkeitsmessungen stößt jedoch meistens auf erhebliche Schwierigkeiten.

Die in diesem Abschnitt vorgenommene Abschätzung der Fließgeschwindigkeiten basiert auf den vereinfachenden Betrachtungen der Tidekubizierung und berücksichtigt die zuvor genannten Abflusszustände. Dichteinduzierte Geschwindigkeitsanteile konnten hingegen nicht berücksichtigt werden.

b.) Abflussbedingte Änderungen der Tidehauptwerte

Der erwartete stromaufwärtige Anstieg der Tidehochwasserstände ist im Ems-Ästuar gut erkennbar; für hohe Oberwasserabflüsse wird eine insgesamt zunehmende Gradiente festgestellt (vgl. Abb. 16).

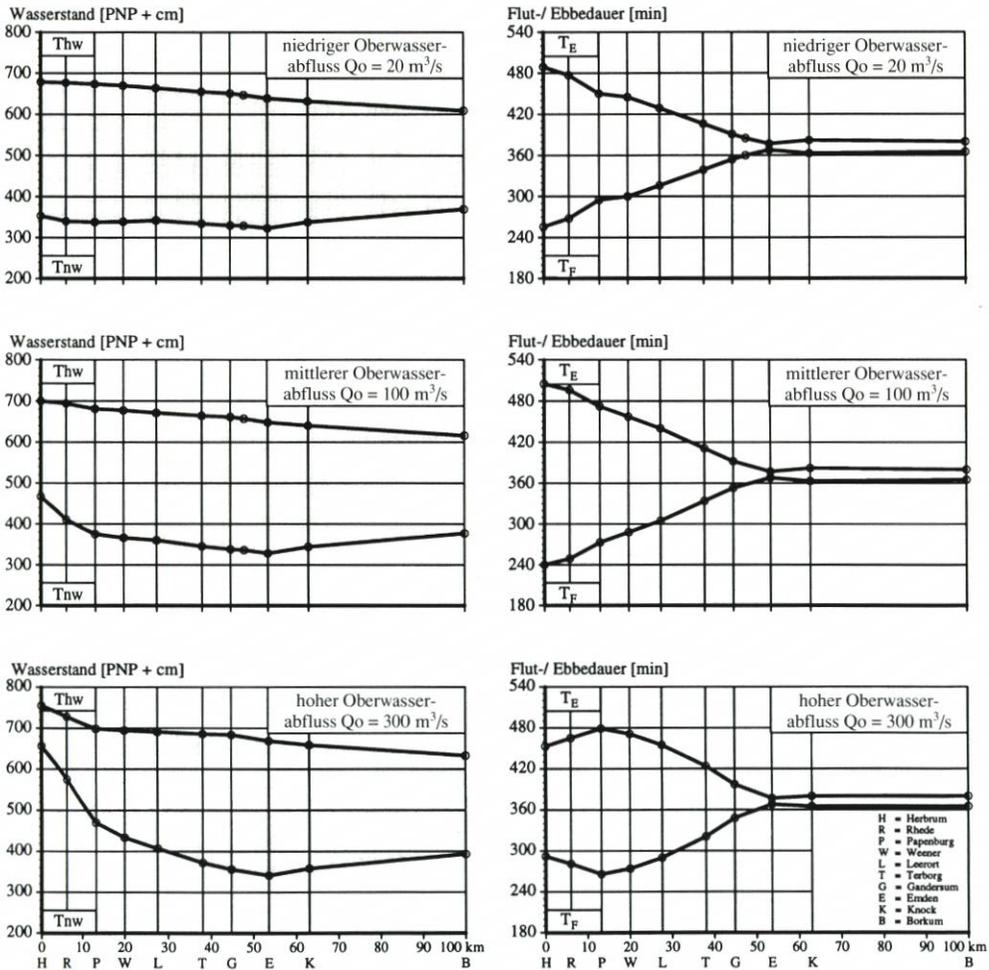


Abb. 16: Tidewasserstände sowie Flut- und Ebbedauer entlang des Ems-Ästuars für verschiedene Abflussbedingungen

Die Tideniedrigwasserstände nehmen von See kommend bis Emden ab, danach tritt in allen Abflusszuständen ein Anstieg der Tideniedrigwasserstände bis zur Tidegrenze ein (vgl. Abb. 16, links).

Die größten abflussabhängigen Unterschiede in den Tidehoch- und -niedrigwasserständen treten an der Tidegrenze bei Herbrum auf und nehmen in stromabwärtiger Richtung ab. Unterhalb der Ledamündung sind diese nur noch gering.

Bei niedriger Oberwasserführung wird in dem Teilabschnitt zwischen Emden und Herbrum etwa gleichbleibender Tidehub beobachtet. Aus den Ergebnissen ergibt sich auch eine signifikante Reduktion des Tidehubes im stromaufwärtigen Flussabschnitt bei hohem Oberwasserabfluss.

Flut- und Ebbedauer weisen unterhalb der Emsmündung in den Dollart keinerlei Änderungen auf und können auch für unterschiedliche Abflussverhältnisse als konstant angenommen werden (vgl. Abb. 16 rechts). Stromauf des Dollarts hingegen nimmt die Flutdauer in stromaufwärtiger Richtung kontinuierlich ab, entsprechend umgekehrte Verhältnisse gelten für die Ebbedauer.

Entlang des Ästuars treten Änderungen in der Flut- und Ebbedauer von bis zu 2 Stunden auf (Emden – Herbrum bei $Q_o = 100 \text{ m}^3/\text{s}$), wohingegen maximale abflussbedingte Änderungen der lokalen Flut- und Ebbedauer nur bis zu 45 Minuten (Herbrum) betragen.

Im stromaufwärtigsten Teil des Tidegebietes oberhalb von Papenburg kommt es bei Abflüssen $> 100 \text{ m}^3/\text{s}$ zu einer Verlängerung der Flutdauer. Diese steht im Zusammenhang mit der Überströmung des Tidewehres in Herbrum, wodurch am Wehr nur noch eine Teilreflexion der Tide erfolgt.

c.) Abflussbedingte Änderungen der Tidevolumina

Für eine überschlägliche Tidekubizierung standen rd. 80 Querprofile aus dem Flussabschnitt von Herbrum bis Gandersum zur Verfügung (Querprofile: WSA Emden, Stand: Juni 1989). Das Gesamtvolumen der Leda (4 Mio. m^3) sowie die Volumina unterhalb von Gandersum wurden nach FRANZIUS (1986) ergänzt (vgl. Abb. 17).

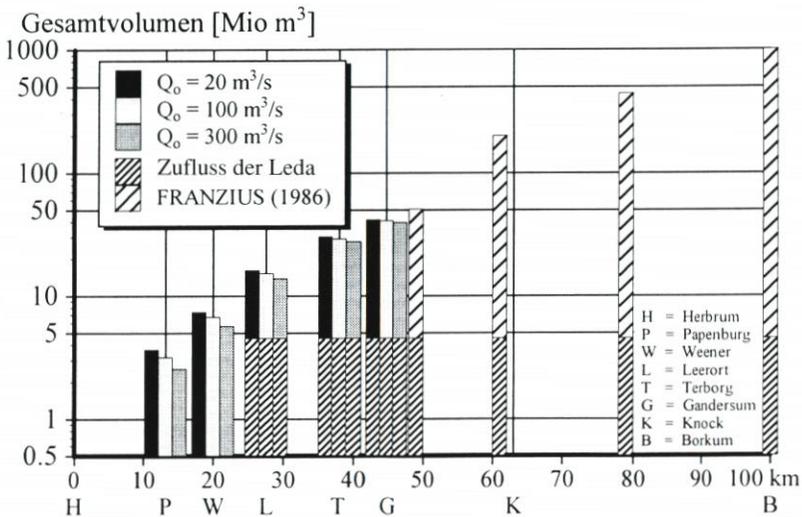


Abb. 17: Gesamtvolumenentwicklung entlang des Ems-Ästuars für ausgewählte Abflüsse

Weiterhin kann an den einzelnen Lokationen entlang des Ems-Ästuars das Verhältnis zwischen Abfluss- und Gesamtvolumen während einer Tide für verschiedene Abflusssituationen bestimmt werden (vgl. Abb. 18). Daraus wird ersichtlich, dass der Oberwasserabfluss im stromabwärtigen Teil des Ästuars im Vergleich mit den tidebewegten Wassermassen von untergeordneter Bedeutung ist.

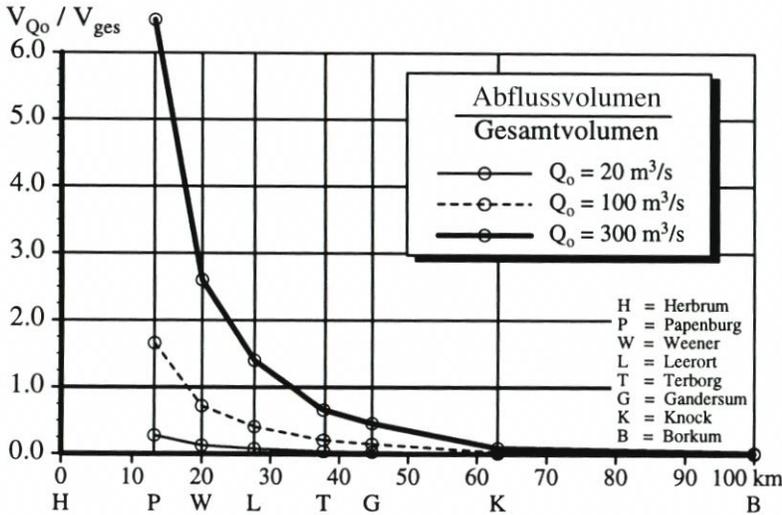


Abb. 18: Verhältnis des Oberwasservolumens zum Gesamtvolumen entlang des Ems-Ästuars für ausgewählte Abflusszustände

Eine Abschätzung des Flut- und Ebbevolumens für die betrachteten Abflusszustände zeigt eine signifikante Abnahme des Flutvolumens bei gleichzeitiger (aber geringerer) Zunahme des Ebbevolumens mit ansteigendem Abfluss (vgl. Abb. 19).

d.) Abschätzung abflussbedingter Fließgeschwindigkeitsänderungen aus der Tidekubizierung

Entlang des Ems-Ästuars wird aufgrund zunehmender Fließquerschnitte eine Reduktion der abflussbedingten Strömungsgeschwindigkeit erkennbar, wobei die insgesamt sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten im unteren Abschnitt besonders beachtet werden sollten (vgl. Abb. 20, links). Darüber hinaus ist der Beginn der seeschifftiefen Ausbaustrecke ab Papenburg durch die signifikante Abnahme der mittleren Fließgeschwindigkeit dokumentiert.

Die mittleren Flut- und Ebbeströmungen entlang des Ems-Ästuars weisen auf erhebliche abflussbedingte Fließgeschwindigkeitsänderungen oberhalb der Ledamündung hin (vgl. Abb. 20, rechts). Oberhalb von Weener wurden bei hohem Oberwasserabfluss im Mittel stromab gerichtete Fließgeschwindigkeiten während der Flutdauer ermittelt.

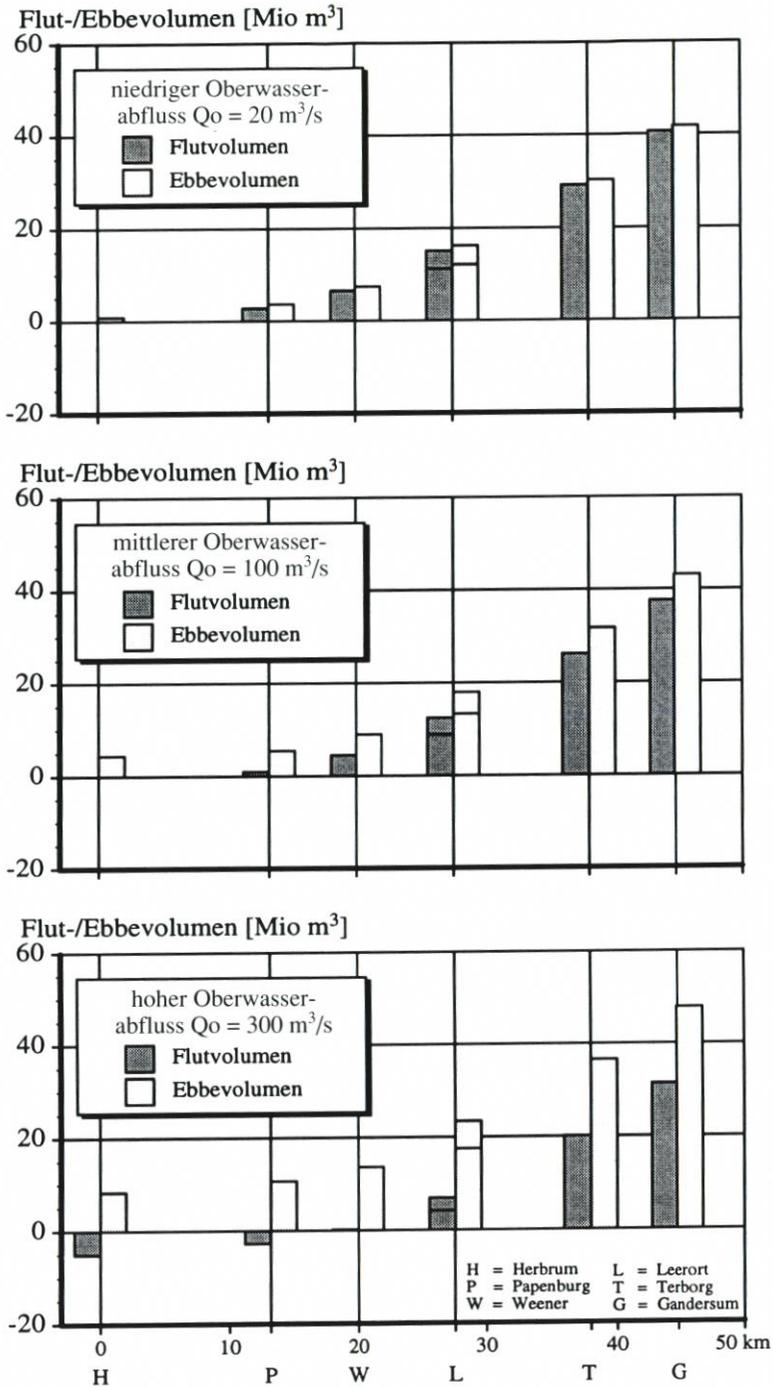


Abb. 19: Flut- und Ebbevolumen an ausgewählten Lokationen in Ems-Ästuar bei verschiedenen Abflussverhältnissen

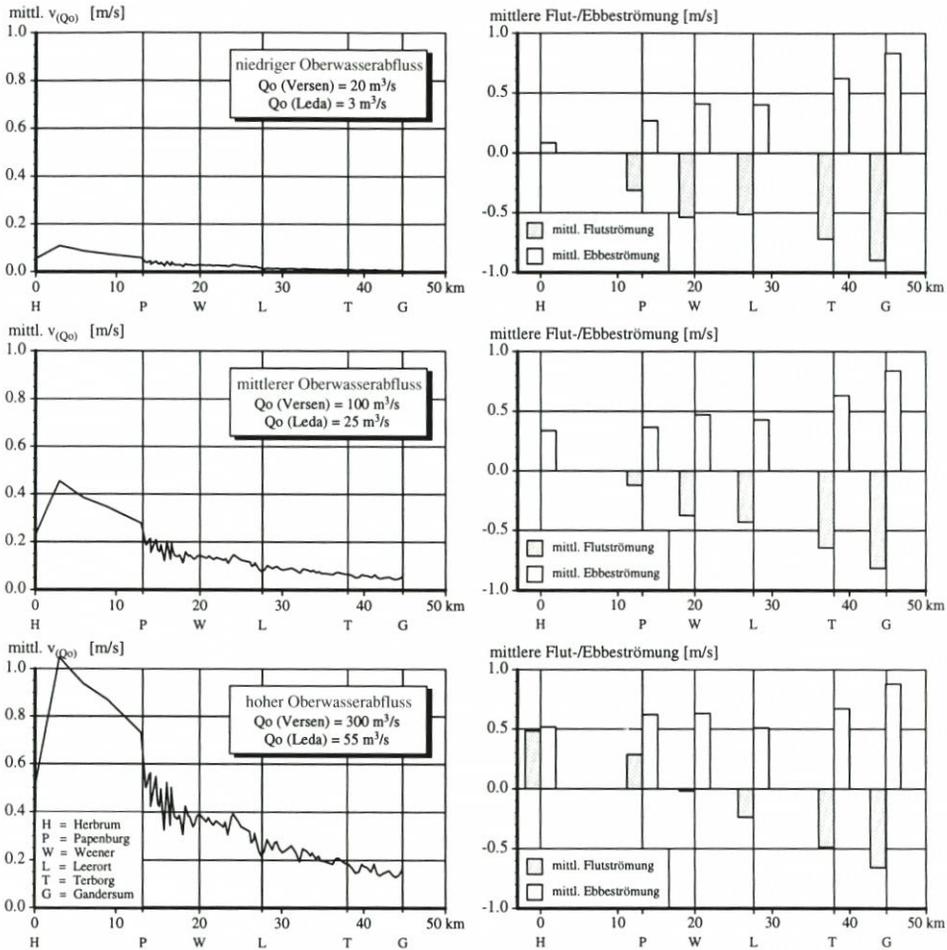


Abb. 20: Mittlere abflussbedingte Strömungsgeschwindigkeiten sowie mittlere Flut- und Ebbebeströmungen entlang des Ems-Ästuars bei unterschiedlicher Oberwasserführung

5.1.3 Salzgehaltsverteilung

a.) Problemstellung und Schwierigkeiten

Die Ergebnisse der dauerhaft betriebenen, lokalen Salzgehaltmessungen werden zur Erfassung der Mobilität der Brackwasserzone im Ems-Ästuar verwendet. Durch den engen Zusammenhang zwischen der Salzgehaltsverteilung und der Oberwasserführung wird aber auch eine tidebezogene Erfassung der Abflussverhältnisse möglich, so dass bestehende Schwierigkeiten bei der lokalen Abflussermittlung umgangen werden können.

Diese Schwierigkeiten bestehen insbesondere in der Berücksichtigung der Laufzeit zwischen der Abflussmessstelle Versen, die rd. 39 km oberhalb der Tidegrenze liegt, und den Gewässergütemessstationen im Ems-Ästuar. Eine genaue Erfassung der Laufzeit des Oberwasserabflusses ist nur mit aufwendigen numerischen Modelluntersuchungen möglich, i. d. R.

wird auf Näherungslösungen zurückgegriffen (vgl. HENSEN, 1954; SCHULZE, 1990; SCHULZE u. SPINGAT, 1991).

Die im Rahmen dieser Untersuchungen verwendete näherungsweise Abschätzung der Laufzeit zur Bestimmung des maßgebenden lokalen Oberwasserabflusses in Leer, Terborg und Gandersum ist in Abb. 21 dargestellt. Für die Knock wurde der maßgebende Abfluss, aufgrund der seewärtigen Position im Ems-Ästuar, vereinfachend als arithmetisches Mittel der acht vorangegangenen Tage bestimmt (vgl. auch SPINGAT, 1997).

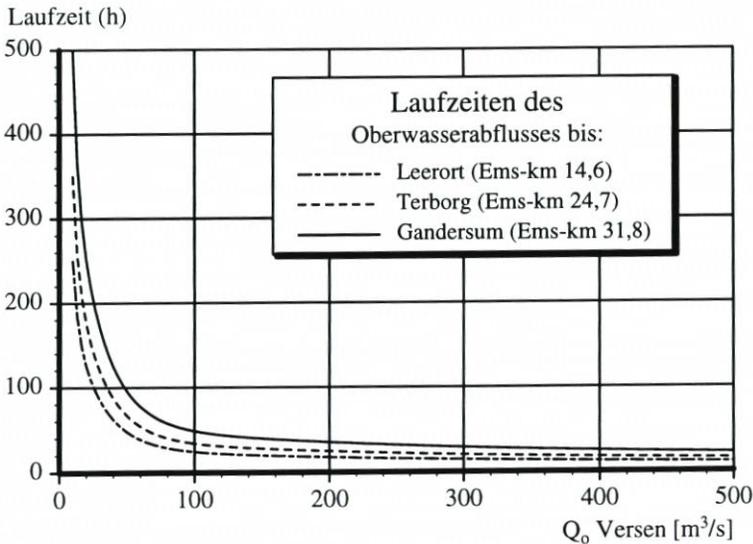


Abb. 21: Abschätzung der Laufzeit des Oberwasserabflusses für ausgewählte Lokationen im Ems-Ästuar

b.) Beziehung zwischen Oberwasserabfluss und Salzgehalt

An einer ortsfesten Position treten über die Tide Salzgehaltsschwankungen auf, minimale und maximale Größen werden jeweils zur Stromkenterung erreicht und stehen mit der Bewegung des Wasserkörpers im Zusammenhang (vgl. Abb. 5). Die Bestimmung des mittleren Prakt. Salzgehaltes über die Tide stellt daher eine geeignete, auf die Tidedauer bezogene Erfassung der Abflussverhältnisse dar.

Der daraus ableitbare Zusammenhang zwischen dem Oberwasserabfluss und den parametrisierten Salzgehaltskenngrößen sowie die Amplitude der Salzgehaltsschwankungen ist in Abb. 22 dargestellt.

Neben den seewärts ansteigenden Salzgehalten ist insgesamt ein ortsspezifischer Zusammenhang zwischen dem Prakt. Salzgehalt und dem maßgebenden Abfluss erkennbar. Die Brackwasserzone kann bei sehr niedriger Oberwasserführung ($Q_0 < 30 \text{ m}^3/\text{s}$) zum Zeitpunkt der Flutstromkenterung bis an die Messstation Leer/Leda reichen. Bei Ebbestromkenterung liegt die Süßwassergrenze hingegen immer unterhalb von Leer. In seewärtiger Richtung steigt der zugehörige Abfluss zum Erreichen der Brackwasserzone an. An der Knock wird fast ausschließlich Brackwasser angetroffen, erst bei Oberwasserabflüssen $> 500 \text{ m}^3/\text{s}$ reicht die Süßwassergrenze bei Ebbestromkenterung bis in diesen Flussabschnitt.

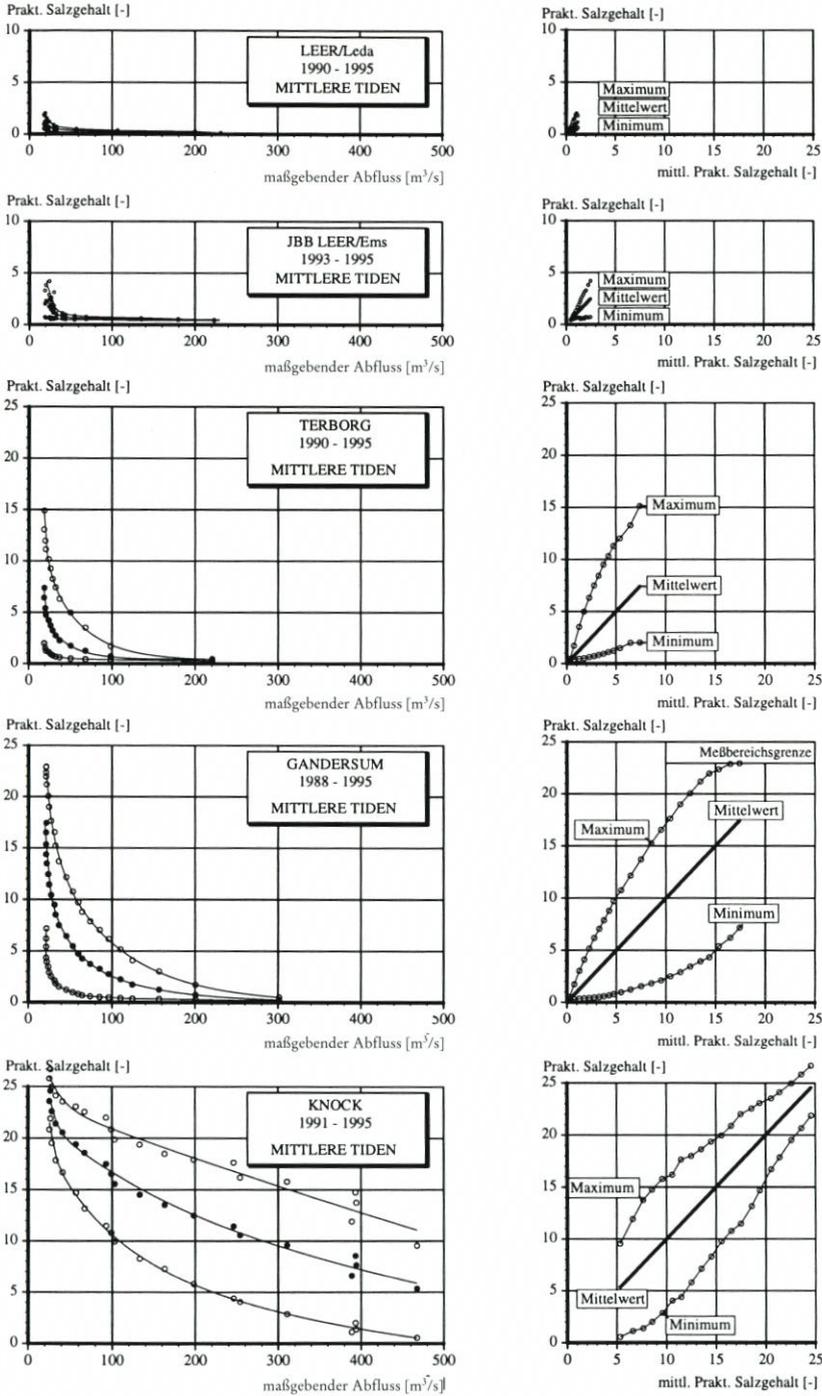


Abb. 22: Salzgehaltsverteilung in Abhängigkeit der Oberwasserführung entlang des Ems-Ästuars; links: Salzgehalt in Abhängigkeit des maßgebenden Abflusses, rechts: Amplitude der Salzgehaltsschwankungen während der Tide

c.) Abflussbedingte Mobilität der Brackwasserzone

Zur Charakterisierung der Salzgehaltsverhältnisse entlang des Ems-Ästuars wurden Längsprofile bei Flut- und Ebbestromkenterung (vgl. Abb. 23) für die zuvor betrachteten Abflussbedingungen bestimmt und durch zusätzliche Leitfähigkeitsmessungen des ehem. StAWA Aurich und WSA Emden ergänzt.

Die Ergebnisse bestätigen die abflussbedingte Mobilität der Brackwasserzone im Ems-Ästuar. Die Süßwassergrenze bei Flutstromkenterung liegt für niedrige Abflüsse rd. 15 km unterhalb des Tidewehres bei Herbrum, bei hoher Oberwasserführung beträgt der Abstand rd. 43 km. Vergleichbare Verlagerungen der Süßwassergrenze sind bei Ebbestromkenterung nachweisbar.

d.) Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zur Salzgehaltsverteilung im Ems-Ästuar konnten ortsspezifische Zusammenhänge zwischen der Oberwasserführung und den Salzgehaltskenngrößen aufzeigen. Dadurch ergibt sich eine gute Eignung der Salzgehaltsmessungen zur Erfassung der Abflussverhältnisse, wodurch die mit Unsicherheiten behaftete lokale, tidebezogene Abflussermittlung umgangen werden kann.

Zur Erfassung und Interpretation der Schwebstoffdynamik wird eine Parametrisierung mit hoher Auflösung benötigt. Maximale Schwebstoffgehalte treten am süßwasserseitigen Kopf der Brackwasserzone auf (vgl. Abschn. 2), der für den überwiegenden Teil des Jahres stromauf des Dollarts liegt; dabei herrschen mittlere bis niedrige Abflussverhältnisse vor. Die Salzgehaltsmessung ist daher insgesamt am besten geeignet, um abflussabhängige Schwebstoffgehaltsschwankungen zu beschreiben.

5.1.4 Ergebnisdiskussion der hydrographischen Untersuchungen

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass auch für das Ems-Ästuar die Abflussverhältnisse eine wesentliche Einflussgröße auf das Tide- und Strömungsgeschehen sowie auf die Salzgehaltsverhältnisse darstellen. Die Wirkung der Oberwasserführung muss jedoch innerhalb der Ästuars differenziert betrachtet werden.

Im *süßwasserseitigen Bereich des Ästuars* treten die größten abflussbedingten Änderungen im Tidegeschehen auf. Neben Unterschieden in den Tidewasserständen und der Flut- und Ebbedauer sind Volumina- und Strömungsgeschwindigkeitsänderungen von besonderer Bedeutung. Diese weisen auf signifikante abflussbedingte Einflüsse auf die Transportverhältnisse von suspendierten Feststoffen im stromaufwärtigen Teil des Ästuars hin.

Der *mittlere Teil des Ems-Ästuars*, etwa ab der Ledamündung beginnend, ist durch wechselnde Salzgehalte geprägt, welche eine starke Abhängigkeit von der Oberwasserführung aufweisen. Auf das Tide- und Strömungsgeschehen hat die Oberwasserführung aber einen geringeren Einfluss als im stromaufwärtigsten Abschnitt des Ästuars. Bedingt durch die inhomogene Salzgehaltsverteilung ist von einer Beeinflussung des Transportgeschehens durch barokline Strömungen auszugehen.

In der *Außenems* sind weiterhin abflussbedingte Salzgehaltsänderungen erkennbar. Die längerfristige Entwicklung der Oberwasserführung gewinnt jedoch in diesem Abschnitt an Bedeutung. Kurzzeitige Schwankungen in der Oberwasserführung außerhalb von Hochwasserereignissen treten nicht mehr in Erscheinung. Das Tidegeschehen bleibt von der Ober-

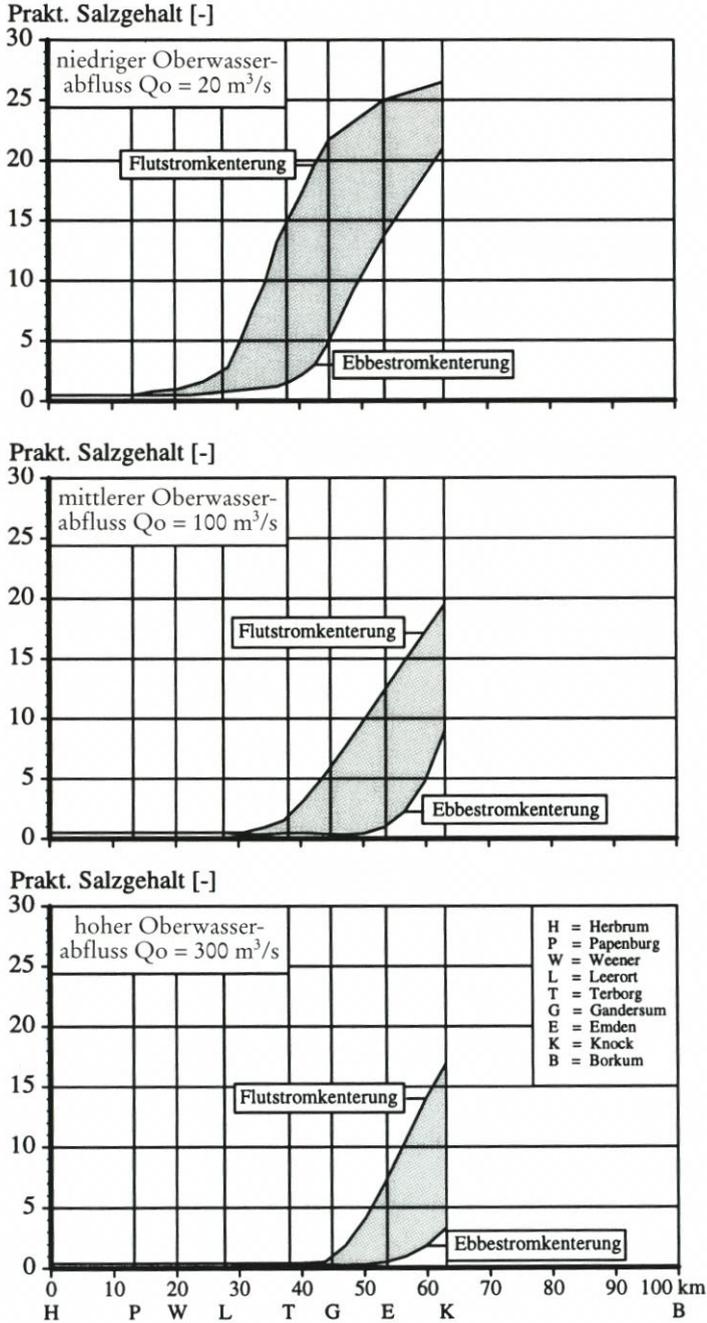


Abb. 23: Salzgehaltslängsprofile im Ems-Ästuar bei Flut- bzw. Ebbestromkenterung für ausgewählte Abflussverhältnisse

wasserführung weitgehend unbeeinflusst, so dass die hydrographischen Verhältnisse der Außenems eher denen einer Küste als eines Flusses gleichen.

5.2 Schwebstoffdynamik im Trübungsgebiet des Ems-Ästuars

Für die Charakterisierung der längerfristigen Schwebstoffdynamik im Ems-Ästuar sind die in Abschn. 4 vorgestellten, quantifizierbaren Anteile von unterschiedlicher Bedeutung.

SPINGAT (1997) konnte aufzeigen, dass die Schwebstoffführung infolge 14-tägiger Ungleichheit der Tide für die längerfristige Dynamik der Schwebstoffe von untergeordneter Bedeutung ist; nachfolgend wird diese Einflussgröße, wie auch die langfristige Trendentwicklung, nicht weiter betrachtet.

Die Interpretation der ästuarinen Schwebstoffdynamik basiert somit auf folgenden Analyseschritten:

1. Vergleichende Betrachtung der parametrisierten Schwebstoffgehaltskenngrößen zur Interpretation der Schwebstoffdynamik während der Tide.
2. Ermittlung der längerfristigen Schwebstoffdynamik unter Berücksichtigung des Oberwasserabflusses und jahreszeitlicher Änderungen der Schwebstoffführung.

Die Ergebnisse der Auswertung sollen, zusammen mit den zuvor ermittelten hydrographischen Randbedingungen in der Ems, Rückschlüsse auf das Feststoffregime und die Transportvorgänge innerhalb des Ästuars ermöglichen.

5.2.1 Mittlere Schwebstoffführung während der Tide

Die generelle Entwicklung der Schwebstoffführung an den verschiedenen Stationen im Ems-Ästuar wird nachfolgend anhand der parametrisierten Schwebstoffgehaltskenngrößen gegenübergestellt.

Gemäß der in Abschn. 4.3 gewählten Klassifizierung nach dem mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide sind in Abb. 24 die lokalen Schwebstoffgehaltskenngrößen dargestellt. Neben einer stationsweisen Trennung der Kenngrößen nach Flut- und Ebephase (Abb. 24 links und mitte) zeigt Abb. 24 (rechts) den Zusammenhang zwischen den parametrisierten Flut- und Ebbgrößen.

Die Ergebnisse weisen jeweils höhere Flut- als Ebbgrößen aus, insbesondere ergeben sich signifikante Unterschiede bei den parametrisierten Minimalwerten. Diese Unterschiede stehen im Zusammenhang mit unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen bei Flut- und Ebbstromkenterung. Unter Berücksichtigung der Wasserüberdeckung kann eine Mindestsinkgeschwindigkeit für nur noch unterhalb des Messhorizontes befindliche Schwebstoffe in Abhängigkeit der Kenterdauer (hier: $v < 0,2$ m/s) abgeschätzt werden.

Für Gandersum ergibt sich dieser Wert beispielsweise zu rd. 0,2 mm/s bei Flutstromkenterung und rd. 1,0 mm/s bei Ebbstromkenterung. An den übrigen Stationen fehlen geeignete Strömungsmessungen, es ist jedoch von ähnlichen Sedimentationsbedingungen bei Stromkenterung auszugehen.

Die minimale Schwebstoffführung bei Ebbe zeigt insbesondere in Gandersum einen nahezu konstanten Verlauf in Abhängigkeit vom mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide.

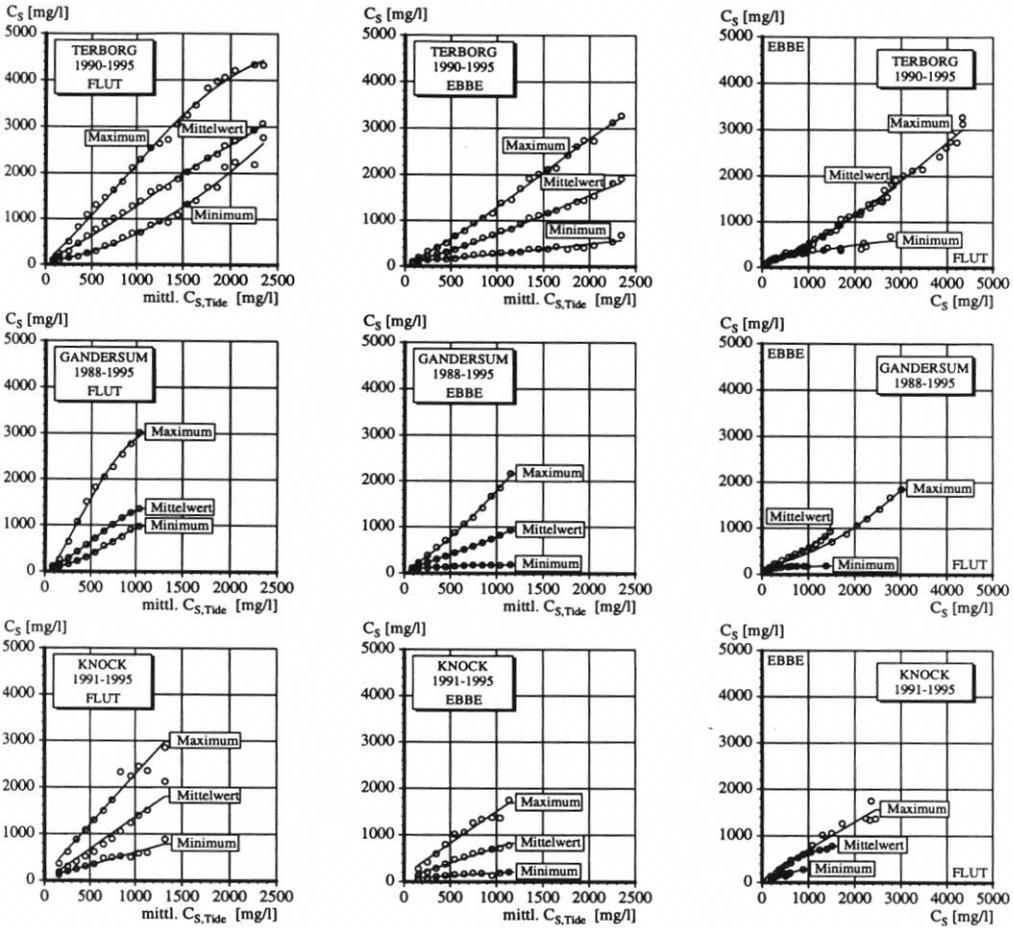


Abb. 24: Verlauf der parametrisierten Größen des Schwebstoffgehaltes bei Flut und Ebbe in Abhängigkeit vom mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide an den Stationen Terborg, Gandersum und Knock

Aus vorheriger Sinkgeschwindigkeitsabschätzung folgt, dass der Schwebstoffanteil mit Sinkgeschwindigkeiten $< 0,2$ mm/s nur gering variiert und unwesentlich an der dynamischen Entwicklung der Schwebstoffe im Trübungsgebiet beteiligt ist.

Die nachfolgenden Auswerteschritte werden aufgrund der engen Zusammenhänge zwischen den parametrisierten Größen für den mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide vorgestellt und erläutert.

5.2.2 Abflussabhängige Schwankungen der Schwebstoffführung

Zur Bestimmung abflussbedingter Schwankungen der Schwebstoffführung erfolgt eine Klassifizierung der Schwebstoffgehaltsgrößen nach dem mittleren Prakt. Salzgehalt gemäß dem in Abschn. 4 vorgestellten Analysekonzept. Die Ergebnisse für den mittleren Schweb-

stoffgehalt über die Tide an den Stationen Leer/Leda⁶, Terborg, Gandersum und Knock sind in Abb. 25 dargestellt. Die jeweils höchsten Schwebstoffgehalte wurden mit dem maßgebenden Abfluss (vgl. Abschn. 5.1.3) gekennzeichnet, ein Bereich hoher Schwebstoffführung (> 75 % des lokalen Maximalwertes) zusätzlich schraffiert.

Abb. 25 lässt erkennen, dass der Zusammenhang zwischen mittlerem Prakt. Salzgehalt und der Schwebstoffführung lokationsspezifischen Bedingungen unterliegt. Werden die Ergebnisse der Oberwasserführung zugeordnet, ergibt sich für die lokal höchste Schwebstoffführung ein stetiger Anstieg des zugehörigen maßgebenden Abflusses in stromabwärtiger Richtung des Ästuars (vgl. auch Tab. 4).

Die insgesamt höchste Schwebstoffführung wurde an der Station Terborg ermittelt. Sowohl an der Station Leer/Leda als auch an der Knock liegen die höchsten Schwebstoffgehalte jeweils im Grenzbereich der aufgetretenen Abflussverhältnisse. Daher kann bei Unterschreitung (Leer/Leda) bzw. Überschreitung (Knock) der bisher eingetretenen Oberwasserführung ein weiterer Anstieg der Schwebstoffführung erwartet werden. Die niedrigsten Schwebstoffkonzentrationen mit rd. 30 bis 150 mg/l treten im Süßwasserbereich auf.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikant abflussabhängige Schwebstoffführung in der Unterems mit hoher Sensitivität bei niedrigen Abflüssen.

Tab. 4: Abflussverhältnisse bei lokal höchster Schwebstoffführung

Abflussverhältnisse bei lokal höchster Schwebstoffführung		
Station	Maßg. Abfluss Q ₀ [m ³ /s]	Mittl. Prakt. Salzgehalt S _p [-]
Leer/Leda	< 22	> 1,25
Terborg	rd. 33	2,25
Gandersum	rd. 50	6,0
Knock	> 500	< 5,25

Die aufgezeigte Entwicklung der Schwebstoffführung kann für alle mittleren und maximalen Größen nachgewiesen werden. Für die minimalen Größen gilt dieses hingegen nur eingeschränkt, da diese eher als Indikatoren für die Sinkeigenschaften der Schwebstoffe zu verstehen sind (vgl. Abschn. 5.2.1).

5.2.3 Jahreszeitliche Schwankungen der Schwebstoffführung für ein mittleres Abflussjahr

Zur Quantifizierung jahreszeitlicher Schwankungen der Schwebstoffführung gemäß dem Auswertekonzept in Abschn. 4 wird eine zweidimensionale Betrachtung der Datenkollektive erforderlich. Die Klassifizierung der parametrisierten Messgrößen des Schwebstoffgehaltes erfolgt sowohl in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses als auch in äquidistanter Unterteilung des Kalenderjahres.

⁶ Vom ehem. StAWA Aurich wurden parametrisierte Zeitreihen des mittleren Schwebstoffgehaltes bei Flut und Ebbe zur Verfügung gestellt; die Datendichte und -aufbereitung weicht etwas von dem vorgestellten Auswertekonzept ab, dennoch sollen die Ergebnisse für vergleichende Betrachtungen herangezogen werden.

mittl. Schwebstoffgehalt über die Tide [mg/l]

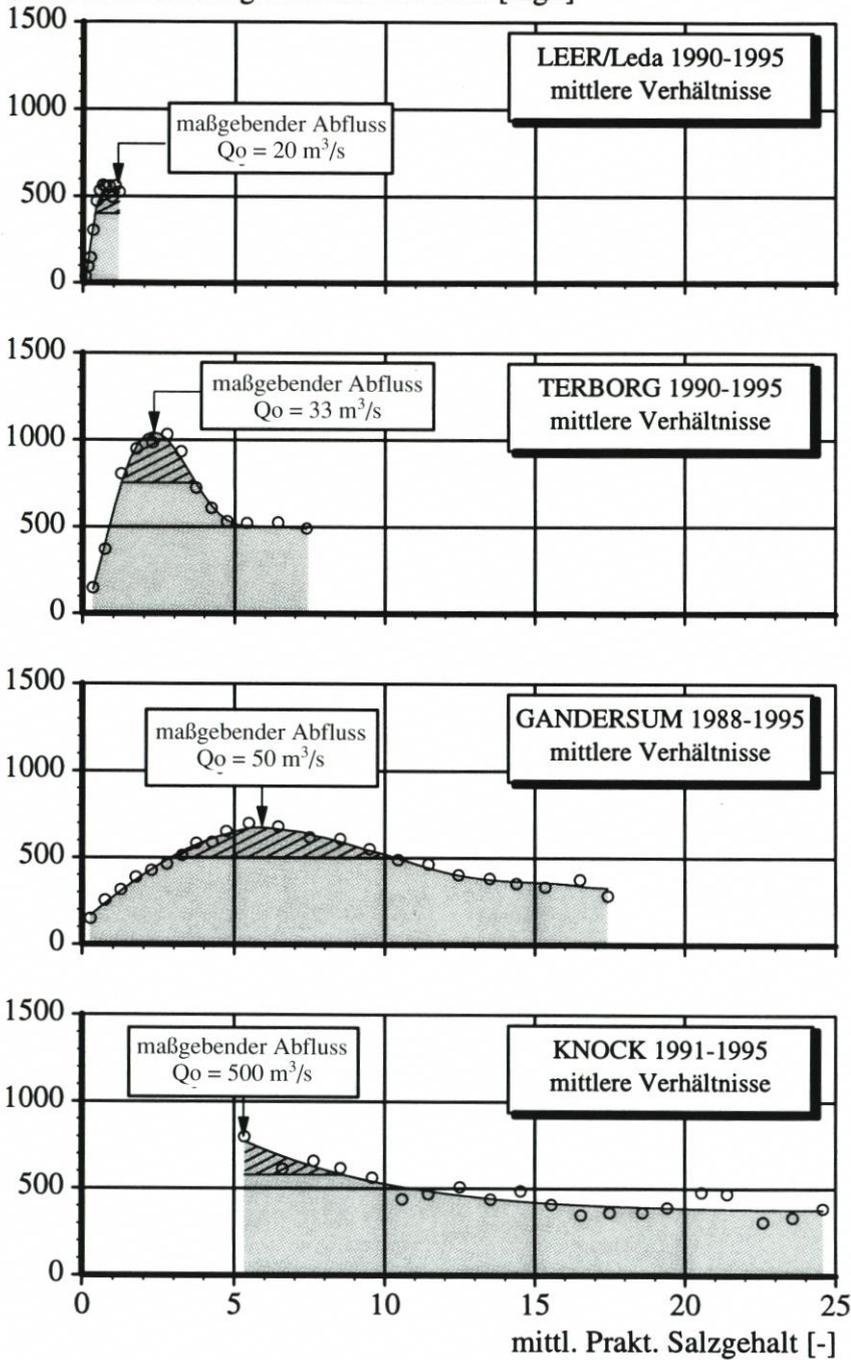


Abb. 25: Mittlerer Schwebstoffgehalt über die Tide in Abhängigkeit des mittleren Prakt. Salzgehaltes an den Stationen Leer/Leda, Terborg, Gandersum und Knock

Für einen generellen Überblick und zur vereinfachten Darstellung der Untersuchungsergebnisse werden die Resultate zusammenfassend für alle Stationen am Beispiel des mittleren Schwebstoffgehaltes über die Tide in monatlichen Schritten für ein mittleres Abflussjahr in Abb. 26 wiedergegeben. Der Jahresgang des mittleren monatlichen Abflusses am Pegel Versen (vgl. auch Abb. 15) ist, mit besonderer Kennzeichnung des jeweils betrachteten Monats, gesondert ausgewiesen.

Die Schwebstoffführung unter Berücksichtigung jahreszeitlicher Einflüsse stellt sich demnach für ein mittleres Abflussjahr wie folgt dar:

Bei hoher Oberwasserführung ($Q_o > 100 \text{ m}^3/\text{s}$) in den Monaten Januar bis März ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Schwebstoffführung in seewärtiger Richtung. An den ganz bzw. weitgehend im Süßwasserbereich der Ems liegenden Stationen stromauf des Dollarts werden in diesem Zeitraum – über den Jahreszyklus gesehen – die niedrigsten Schwebstoffgehalte beobachtet, während die Lokation Knock in der Außenems hohe Werte aufweist.

Mit geringer werdendem Abfluss im April steigen die Schwebstoffgehalte an den Lokationen Terborg und Gandersum an, während die Werte an der Knock abnehmen und im Jahreszyklus den niedrigsten Stand erreichen. Im Mai steigt der Schwebstoffgehalt erstmals auch in der Leda an. Zu diesem Zeitpunkt werden in Terborg und Gandersum vorläufig maximale Werte erreicht.

Die Schwebstoffführung im Juni ist durch ansteigende Werte in der Leda und an der Knock sowie fallende Werte in Terborg und Gandersum gekennzeichnet.

Während in Gandersum noch bis August abnehmende Schwebstoffgehalte auftreten, steigen die entsprechenden Größen in Leer/Leda und Terborg stetig an und erreichen an den Stationen Leer/Leda, Terborg und Gandersum im Oktober maximale Werte. An der Knock wird dagegen nach relativ hohen Werten im Juli eine geringe Reduktion der Schwebstoffführung ermittelt.

Mit signifikanter Zunahme des Oberwasserabflusses im November tritt eine Reduktion der Schwebstoffführung oberhalb des Dollarts ein, wobei insbesondere in Leer und Terborg eine erhebliche Abnahme dokumentiert wird. An der Knock steigt der Schwebstoffgehalt hingegen wieder an und erreicht im Dezember bei hoher Oberwasserführung maximale Werte. Die Schwebstoffverteilung im Ems-Ästuar weist für Dezember seewärts ansteigende Werte aus und unterscheidet sich nur geringfügig von der Situation in den ersten drei Monaten des Jahreszyklusses.

Aus dem Jahreszyklus wird insgesamt eine signifikante Verlagerung der Trübungszone erkennbar. Die jeweils höchsten Schwebstoffgehalte entlang des Ästuars treten in den Monaten Dezember bis März an der Knock, im April in Gandersum und von Mai bis November in Terborg auf.

Die hohen Schwebstoffgehalte an der Knock bei niedriger Oberwasserführung in den Monaten Juli und August bei gleichzeitig niedriger Oberwasserführung weisen auf ein zweites, seeseitiges Trübungsmaximum im Bereich hoher Salzgehalte hin; dieses ist auch aus anderen Ästuarien bekannt (vgl. KÜHL u. MANN, 1961).

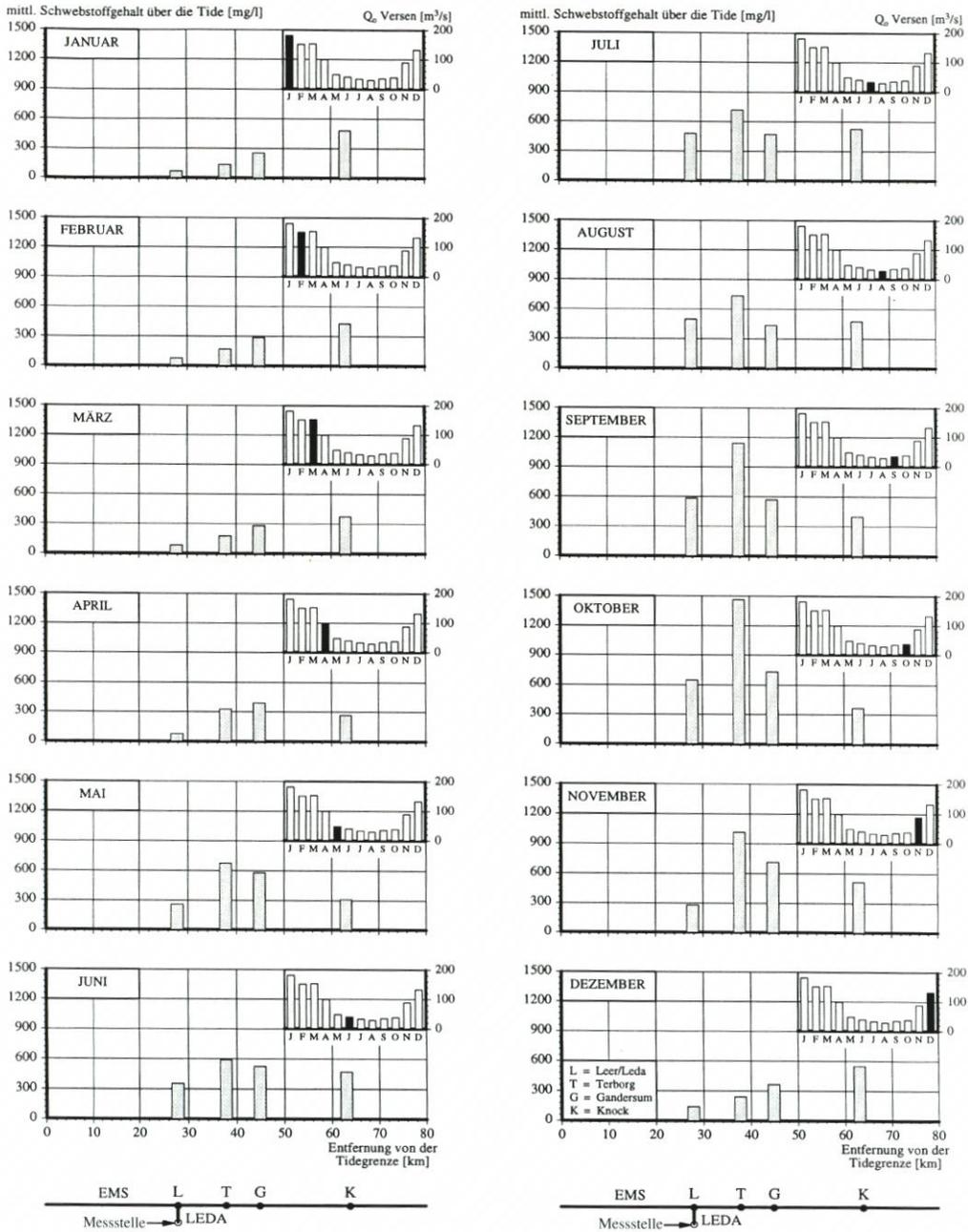


Abb. 26: Monatliche Schwebstoffführung entlang des Ems-Ästuars für ein mittleres Abflussjahr (Lokationen vgl. Abb. 7)

5.2.4 Schlussfolgerungen hinsichtlich ästuariner Transportprozesse für ein mittleres Abflussjahr

a.) Ermittlung charakteristischer Transportverhältnisse

Zur Abschätzung der Feststofffrachten wurde der mittlere jährliche Eintrag in das Tidegebiet aus den täglichen Abfluss- und Schwebstoffgehaltsmessungen am Pegel Versen bestimmt (vgl. Tab. 5).

Tab. 5: Mittlere jährliche Feststofffracht an der Tidegrenze und minimale jährliche Feststofffrachten im Tidegebiet der Ems

Jährliche Feststofffrachten der Ems			
tidefreier Bereich (Mittlere Feststofffracht)		Tidegebiet (Minimale Feststofffracht)	
Versen	60 000 t/Jahr	Terborg	530 000 t/Jahr
		Gandersum	490 000 t/Jahr
		Knock	550 000 t/Jahr

Die Abschätzung der minimalen Feststofffrachten im Ems-Ästuar basiert auf folgenden Annahmen:

- Die minimale querschnittsgemittelte Schwebstoffkonzentration während der Tide ist durch den parametrisierten Minimalwert an den Messstationen beschreibbar.
- Die minimale Schwebstoffkonzentration wird zur Abschätzung der geringsten Schwebstofffrachten während der gesamten Tidedauer angesetzt.
- Der Abfluss im Tidegebiet wird vereinfachend als stetig angesetzt und durch die Messungen am Pegel Versen erfasst.

Die Ergebnisse weisen signifikant höhere Schwebstofffrachten innerhalb des Tidegebietes aus und sind mit einem erhöhten Schwebstoffaustrag gleichbedeutend. Dieser gegenüber dem tidefreien Abschnitt höhere Schwebstoffaustrag ist nur möglich, wenn dem ein seeseitiger Eintrag gegenübersteht, so dass zumindest zeitweise ein resultierend stromauf gerichteter Schwebstofftransport erfolgen muss.

Zur näheren Erfassung der ästuarinen Transportdynamik wird das Gesamtdatenkollektiv in mehrjährige Monatskollektive aufgeteilt und entsprechend der Klassifizierung nach dem mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide das Verhältnis der mittleren und maximalen Flut- zu den entsprechenden Ebbegrößen betrachtet. Durch die zuvor beschriebene Notwendigkeit eines zumindest zeitweise resultierend stromaufwärtig wirkenden Schwebstofftransportes sind Unterschiede im Verhältnis der parametrisierten Flut- und Ebbegrößen zu erwarten.

Die Ergebnisse weisen für die Stationen Terborg und Gandersum jahreszeitliche Unterschiede zwischen den Flut- und Ebbegrößen aus; die ermittelte Bandbreite ist in Abb. 27 dargestellt. Danach tritt in jedem Fall resultierend stromaufwärtiger Schwebstofftransport in Gandersum im Mai/Juni und in Terborg im Juli/August auf.

Die Messreihen an der Station Knock wiesen hingegen keinen Zeitraum mit überproportional hohen Flutgrößen auf. Im Unterschied zu den Messreihen in der Unterems wird an der Knock die höchste Schwebstoffführung bei maximaler Oberwasserführung

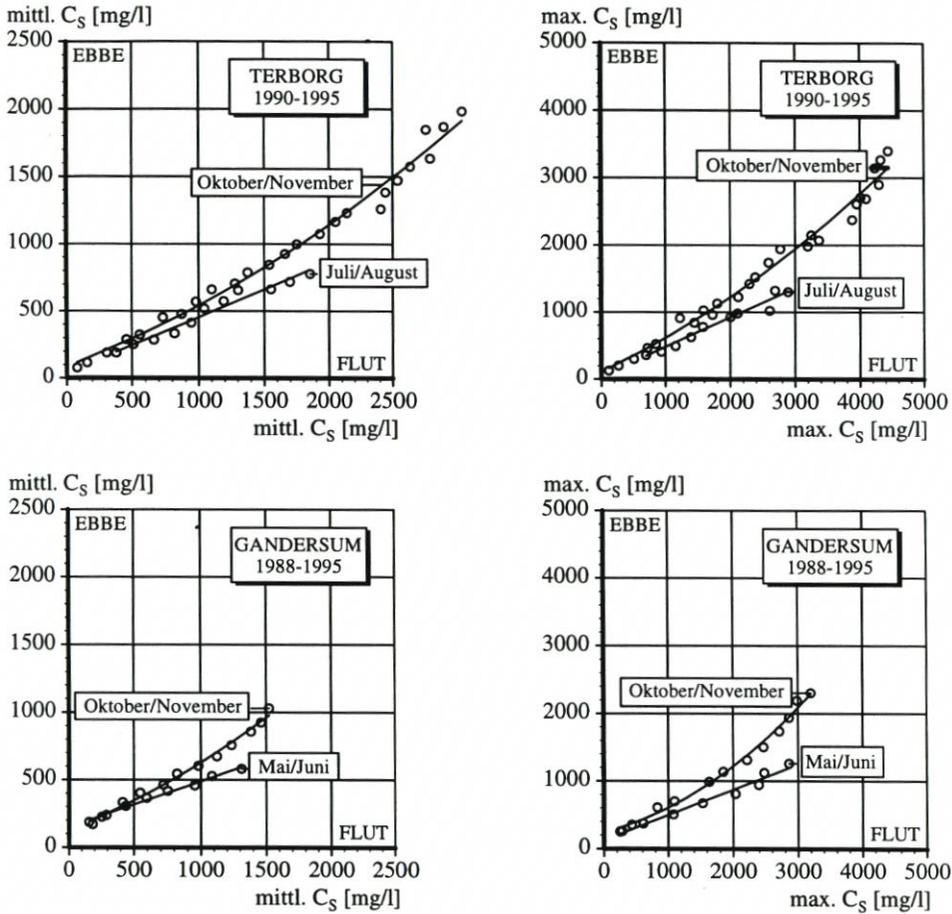


Abb. 27: Bandbreite der Schwankungen im Verhältnis der mittleren und maximalen Flut- und Ebbe-
größen an den Stationen Terborg und Gandersum

in den Wintermonaten beobachtet. Bedingt durch den episodischen Charakter der Hochwasserereignisse können entsprechende Schwebstoffgehaltsschwankungen mit der zuvor gewählten Vorgehensweise nicht immer hinreichend erfasst werden. Daher wurden die parametrisierten Schwebstoffgehalte der Monate November bis März in Datenkollektive mit zunehmendem bzw. abnehmendem Oberwasserabfluss aufgeteilt und, wie zuvor für Terborg und Gandersum, nach dem mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide klassifiziert. Die Ergebnisse für die Flut- und Ebbegrößen sind in Abb. 28 zusammengefasst.

Für die Flutgrößen konnte eine überproportionale Zunahme der Schwebstoffführung mit abnehmendem Oberwasserabfluss festgestellt werden. Überproportional hohe Schwebstoffgehalte bei Ebbe wurden hingegen mit zunehmendem Abfluss erreicht. Resultierend stromaufwärtiger Schwebstofftransport tritt somit bei abklingendem Oberwasserabfluss nach einem Hochwasserereignis auf, während der ansteigende Ast eines Hochwasserereignisses zu resultierend stromabwärtigen Schwebstofftransport führt.

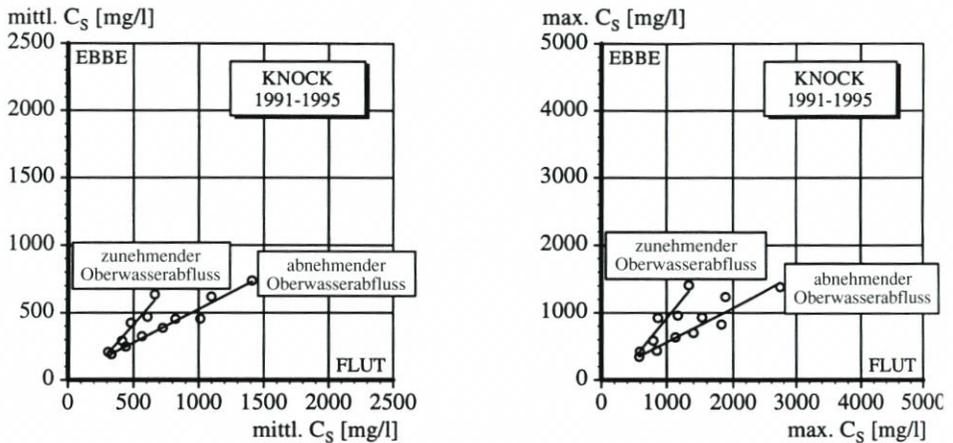


Abb. 28: Schwankungen im Verhältnis der mittleren und maximalen Flut- und Ebbegrößen an der Station Knock infolge zu- bzw. abnehmender Oberwasserführung

b.) Schlussfolgerungen

Hohe Schwebstoffgehalte treten in der Unterems erst bei mittlerem bzw. niedrigem Abfluss auf (vgl. Abschn. 5.2.2). Die zugehörige Schwebstoffführung wird in diesem Flussabschnitt, im Gegensatz zur Außenems, nicht durch einzelne Ereignisse, sondern durch den längerfristigen Verlauf der Oberwasserführung geprägt.

Die Ermittlung der Abfluss- und Jahreszeit abhängigen Schwebstoffführung in diesem Abschnitt hat gezeigt, dass ein lokales Maximum der Schwebstoffführung den Übergang von resultierend stromauf- zu stromabwärtigen Schwebstofftransport beschreibt (vgl. Tab. 6). Eine weitere Reduktion des Abflusses hat für die betrachtete Lokation auf jeden Fall resultierend stromauf gerichteten Schwebstofftransport zur Folge.

Jahreszeitliche Schwankungen der Schwebstoffführung spiegeln somit neben dem Oberwasserabfluss auch veränderte Transportbedingungen im Ästuar wieder und führen u. a. zu gegenüber dem Oberwasserabfluss zeitverschobenen Akkumulations- und Ausstrageeffekten in der Trübungszone. Dieser Zeitversatz variiert mit der Abflussdifferenz zum zugehörigen Abfluss bei lokal höchster Schwebstoffführung. Hohe Abflussdifferenzen zu diesem im Längsschnitt variierenden Abfluss haben geringe Reaktionszeiten der Schwebstoffführung in der Trübungszone zur Folge. Derartige Unterschiede treten im Ems-Ästuar jedoch nur bei Hochwasserereignissen auf.

Der zentrale Bereich der Trübungszone liegt erst bei hohen Abflüssen im Bereich der Außenems. Da hohe Abflüsse zumeist episodischen Charakter aufweisen, wurde an der Knock eine ereignisbezogene Schwebstoffführung mit resultierend stromabwärtigen Schwebstofftransport bei ansteigendem Abfluss und resultierend stromaufwärtiger Schwebstofftransport bei abklingenden Hochwasserereignissen festgestellt.

Unklarheiten hinsichtlich der ästuarinen Schwebstoffdynamik in der Ems bestehen weiterhin im Bereich stromauf der Ledamündung, da die bei niedriger Oberwasserführung ermittelten Ergebnisse wegen der zunehmenden Tideasymmetrie und der Abfluss abhängigen Salzgehaltentwicklung nicht ohne weiteres übertragbar sind. Darüber hinaus bleibt auch unklar, ob die Schwebstoffdynamik der Ems oberhalb von Terborg durch die Station Leer/Leda hinreichend erfasst werden konnte.

Tab. 6: Abflussverhältnisse und Schwebstoffführung im Ems-Ästuar zwischen Ledamündung und Dollart

Abflussverhältnisse und Schwebstoffführung im Ems-Ästuar Zwischen Ledamündung und Dollart			
	Leer/Leda	Terborg	Gandersum
maßgebender Abfluss bei lokal höchster Schwebstoffführung	$Q_o \leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_o \approx 33 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_o \approx 50 \text{ m}^3/\text{s}$
maximaler resultierend stromauf- wärtiger Schwebstofftransport	–	Juli/August	Mai/Juni
maximaler resultierend stromab- wärtiger Schwebstofftransport	–	Oktober/ November	Oktober/ November
Unterschreitung	$50 \text{ m}^3/\text{s}$	Mai	
mittl. monatl.	$33 \text{ m}^3/\text{s}$	Juli	
Abflüsse	$20 \text{ m}^3/\text{s}$	niemals	
Überschreitung	$20 \text{ m}^3/\text{s}$	immer	
mittl. monatl.	$33 \text{ m}^3/\text{s}$	September/Oktober ⁷	
Abflüsse	$50 \text{ m}^3/\text{s}$	Oktober/November ⁷	

5.2.5 Quantitative Abschätzung der Schwebstoff- akkumulation in der Trübungszone für ein mittleres Abflussjahr

Die nachfolgende Abschätzung der Schwebstoffakkumulation geht von zahlreichen Vereinfachungen aus und kann daher nur als erste Näherung angesehen werden. Insbesondere die wenigen Messlokationen im Längsprofil sowie die nur einzelnen Messpunkte im Querschnitt weisen auf Unsicherheiten für quantitative Betrachtungen hin. Darüber hinaus ermöglichen die vorhandenen Messpunkte keine vollständige Erfassung der Trübungszone, so dass nur der Abschnitt zwischen der Ledamündung und Gandersum betrachtet werden kann.

Dennoch soll, ausgehend von etwa gleicher Oberwasserführung im Mai und Oktober, eine Bilanzierung für diesen rd. 5-monatigen Zeitraum vorgenommen werden⁸. Neben dem mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide wurde die Bilanzierung auch für die minimalen und maximalen Kennwerte während der Tide zur Erfassung tidebedingter Änderungen sowie der insgesamt mobilisierungsfähigen Schwebstoffe durchgeführt (vgl. Tab. 7).

Die Bilanzierung weist nahezu eine Verdoppelung der Schwebstoffmasse für den mittleren Schwebstoffgehalt über die Tide in dem betrachteten Teilabschnitt aus. Bei der Bilanzierung der maximal suspendierfähigen Schwebstoffe wird weiterhin deutlich, dass der land-

⁷ Ohne Berücksichtigung des Hochwasserereignisses vom Sept./Okt. 1993 wird ein mittlerer monatlicher Oberwasserabfluss von $33 \text{ m}^3/\text{s}$ erst im Oktober und von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ erst im November überschritten

⁸ Für die Bilanzierung wurde vereinfachend das Wasservolumen bei Tidemittelwasser zu Grunde gelegt

seitige Schwebstoffeintrag nicht ausreicht, um die Akkumulation in der Trübungszone zu erklären. Diese Abschätzung, die den Bereich oberhalb der Ledamündung gleichfalls nicht berücksichtigt, weist ebenso auf die Notwendigkeit von resultierend stromauf wirkendem Schwebstofftransport in dem Zeitfenster von Mai bis Oktober hin.

Tab. 7: Schwebstoffbilanzierung in der Trübungszone während niedriger Sommerabflüsse

Schwebstoffe in der Trübungszone des Ems-Ästuars				Landseitiger Schwebstoff- eintrag in das Tidegebiet (Mai bis Oktober): 15 000 t
Abschnitt: Ledamündung bis Gandersum		Zeitraum: Mai bis Oktober		
	Mai	Oktober	Differenz	
Mittlerer Schwebstoffgehalt	19 100 t	36 600 t	17 500 t	
Minimaler Schwebstoffgehalt	6 100 t	9 400 t	3 300 t	
Maximaler Schwebstoffgehalt	49 200 t	81 000 t	31 800 t	
Differenz	43 100 t	71 600 t	28 500 t	

5.2.6. Schlussfolgerungen hinsichtlich der räumlichen Variabilität der Brackwasser- und Trübungszone

Aus den in Abschn. 5.2.3 vorgestellten Untersuchungsergebnissen kann die Verlagerung der Brackwasser- und Trübungszone über den Jahreszyklus sowohl in Abhängigkeit eines mittleren Abflussjahres ($MQ_{(1988/95)} = 88 \text{ m}^3/\text{s}$; vgl. Abb. 26) ermittelt als auch für die Bandbreite der niedrigsten und höchsten mittleren monatlichen Abflüsse (vgl. Abb. 15) abgeschätzt werden. Die damit erfassbare Bandbreite reicht von einem mittleren Jahresabfluss von rd. $41 \text{ m}^3/\text{s}$ bis zu $167 \text{ m}^3/\text{s}$. Diese Werte werden von der vorliegenden Zeitreihe des mittleren Jahresabflusses 1957/95 lediglich einmal unterschritten ($MQ_{(1960)} = 34,1 \text{ m}^3/\text{s}$), der Höchstwert liegt mit $MQ_{(1994)} = 130,7 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb der o.g. Bandbreite.

Die Abfluss- und Jahreszeit abhängige Entwicklung der Schwebstoffführung sowie der Brackwasserzone für ein mittleres Abflussjahr ist in Abb. 29 dargestellt, aus der wiederum die stromaufwärtige Verlagerung der Brackwasser- und Trübungszone bei abnehmender Oberwasserführung deutlich sichtbar wird. Die stromaufwärtigste Lage der Brackwasserzone wird im August erreicht, mit zunehmendem Abfluss wandert diese wieder stromab. Außerdem ist die bereits ausführlich beschriebene enge Kopplung zwischen Abfluss und Salzgehalt ganzjährig erkennbar.

Die stromaufwärtigste Position der Trübungszone tritt zwischen August und Oktober auf. Die Trübungszone konnte jedoch nicht vollständig erfasst werden, insbesondere unter der Maßgabe, dass die am weitesten stromauf gelegene Messstelle in der Leda liegt. Bei wieder stromab wandernder Trübungszone treten im Oktober die höchsten Schwebstoffkonzentrationen auf.

Ausgehend von dem gleichen Gewässerabschnitt zeigt Abb. 30 die Schwebstoff- und Salzgehaltsentwicklung für den niedrigsten und höchsten mittleren monatlichen Abfluss (vgl. Abb. 15).

Für den erstgenannten Abflusszyklus liegt die oberstromseitige Brackwassergrenze (mittl. $S_p = 0,5$) mehr als ein halbes Jahr oberhalb der Messstelle Leer/Leda. An der Station Terborg wird unter diesen Bedingungen für mehr als 2 Monate mesohalines Brackwasser angetroffen. Das Maximum der Trübungszone wird hier in den Sommermonaten nur unzureichend erfasst und liegt stromauf der Ledamündung. Die Schwebstoffkonzentrationen ent-

Mittlere Abflussverhältnisse 1988/95

MQ = 80 m³/s

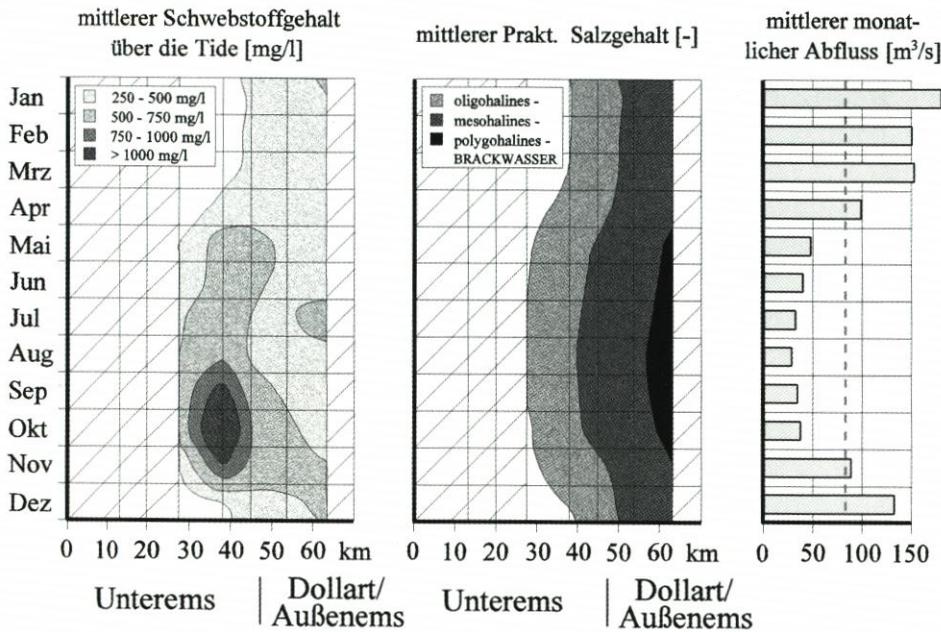


Abb. 29: Trübungs- und Brackwasserzone bei mittleren Abflussverhältnissen über den Jahreszyklus zwischen Ledamündung und Knock

lang des Ästuars übersteigen während des gesamten Jahres die entsprechenden Werte bei mittleren Verhältnissen, wobei die Maximalwerte gegenüber dem mittleren Verlauf rd. 1 Monat später eintreten.

Im Jahreszyklus mit höchstem monatlichem Abfluss treten dagegen wesentlich geringere Schwebstoffkonzentrationen auf. Maximale Werte werden zudem bereits im August/September erreicht. Die Trübungszone kann unter diesen Bedingungen am oberstromseitigen Ende fast vollständig erfasst werden, da das Trübungsmaximum zwischen Terborg und Gandersum liegt.

Insgesamt ergibt sich aus den vergleichenden Betrachtungen, dass die Trübungszone zu gleicher Jahreszeit in Abhängigkeit der Oberwasserführung um mehr als 20 km variieren kann und damit die Lageänderungen der Brackwasserzone (rd. 8–12 km) übersteigt.

6. Empfehlungen für künftige Untersuchungen

Zur Erweiterung des Kenntnisstandes hinsichtlich der längerfristigen Schwebstoffdynamik im Ems-Ästuar werden weitere, dauerhaft betriebene Messungen im Bereich oberhalb der Ledamündung benötigt, die auch zur verbesserten Bilanzierung der Schwebstoffakkumulation in der Trübungszone herangezogen werden können.

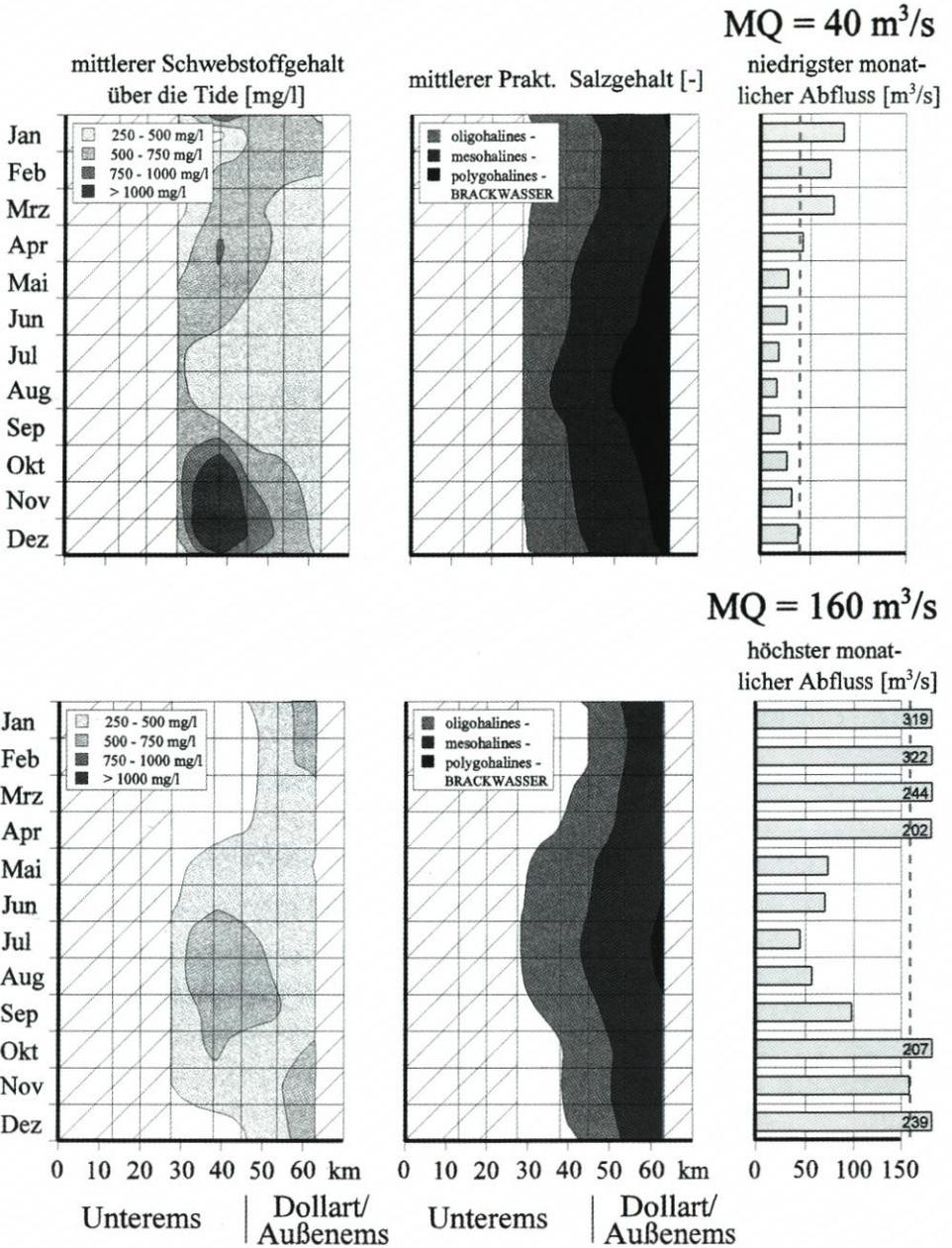


Abb. 30: Trübungs- und Brackwasserzone in Abhängigkeit der Oberwasserführung über den Jahreszyklus (oben: bei niedrigstem monatlichem Abfluss; unten: bei höchstem monatlichem Abfluss; vgl. Abb. 15) zwischen Ledamündung und Knock

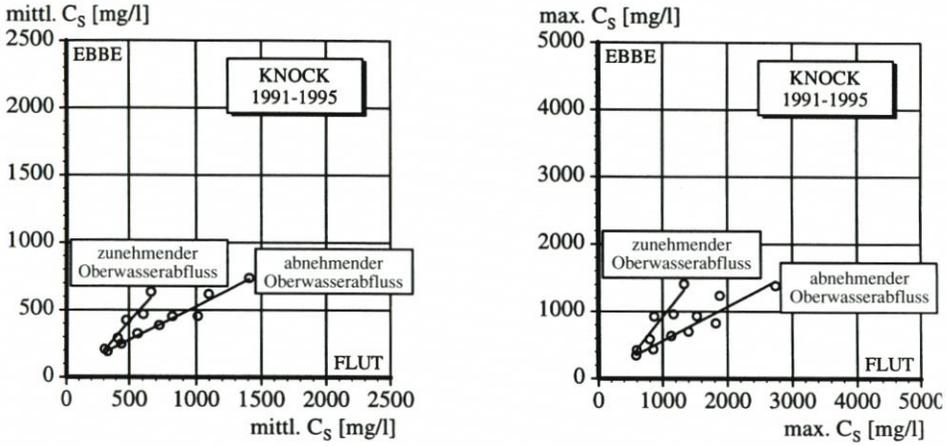


Abb. 31: Schwankungen im Verhältnis der mittleren und maximalen Flut- und Ebbegrößen an der Station Knock infolge zu- bzw. abnehmender Oberwasserführung

Die dauerhaft betriebenen Wasserstands-, Leitfähigkeits- und Trübungsmessungen sollten auf jeden Fall weitergeführt werden, wobei eine vollständige Erfassung hoher Schwebstoffkonzentrationen in den Herbstmonaten sicherzustellen ist. Für die verbesserte Erfassung transportrelevanter Änderungen der Schwebstoffdynamik sollten auch Strömungsmessungen integriert werden.

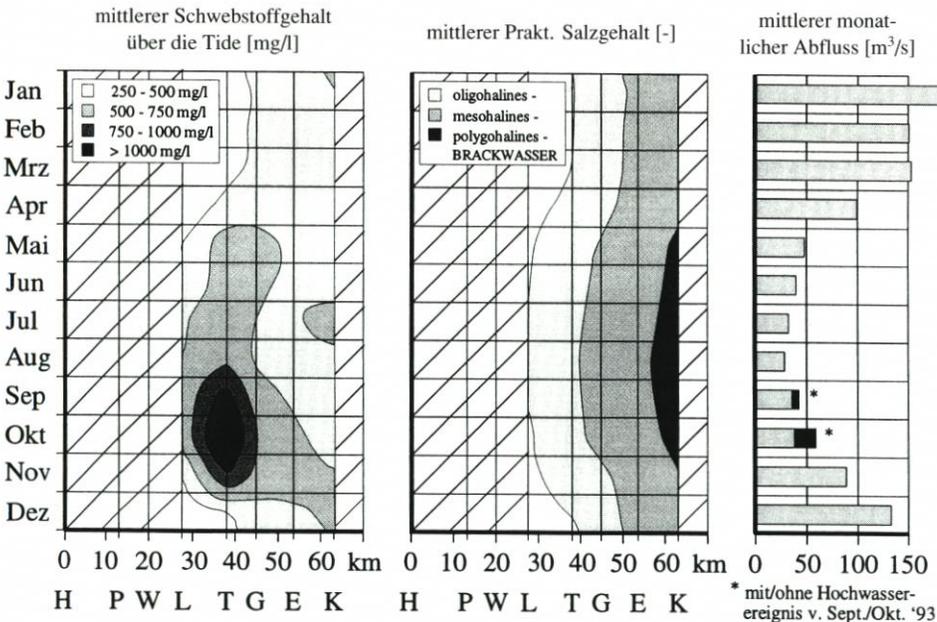


Abb. 32: Trübungs- und Brackwasserzone bei mittleren Abflussverhältnissen über den Jahreszyklus zwischen Ledamündung und Knock (H = Herbrum, P = Papenburg, W = Weener, L = Leer/Leda, T = Terborg, G = Gandersum, E = Emden, K = Knock; vgl. Abb. 7)

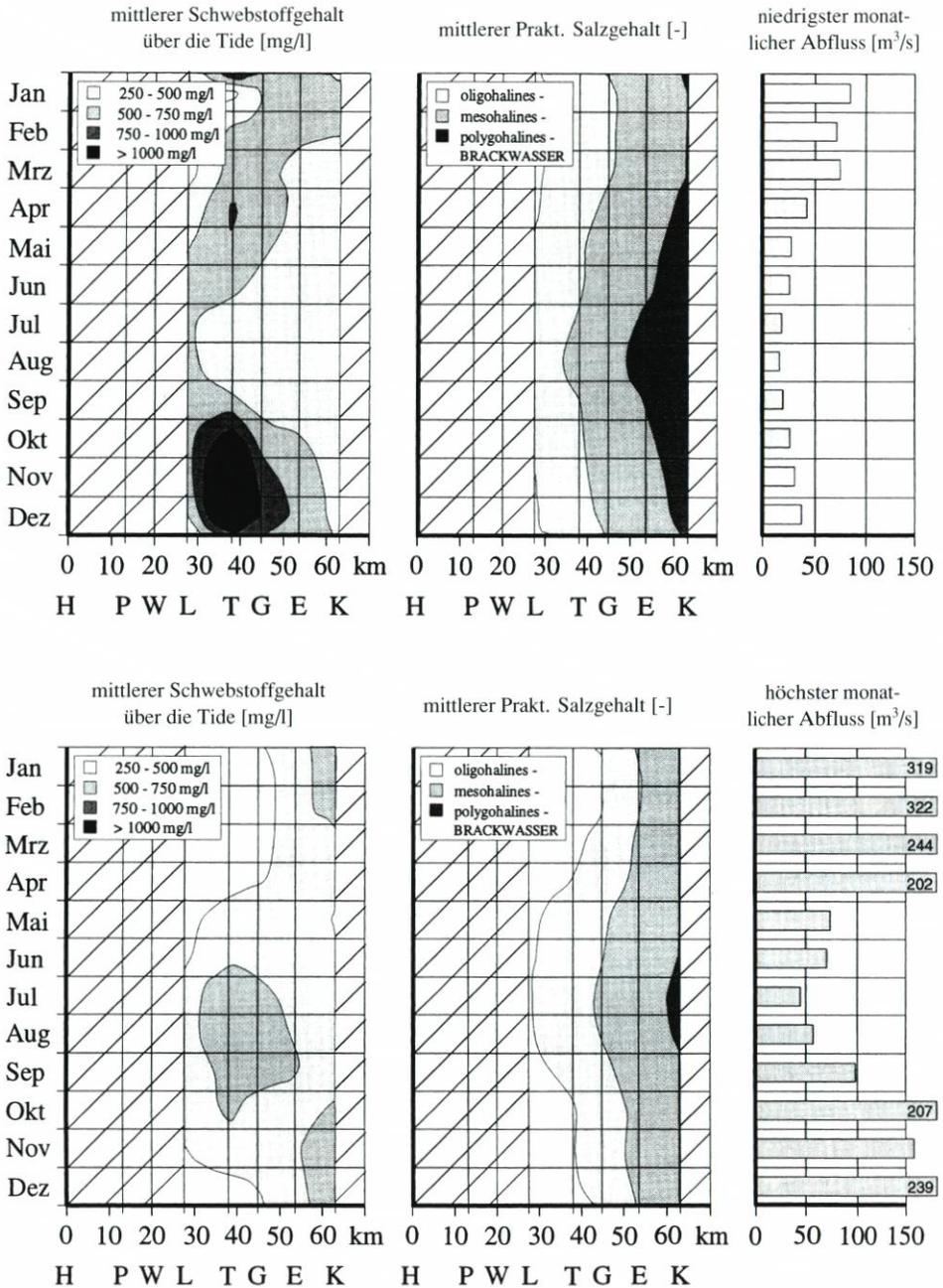


Abb. 33: Trübungs- und Brackwasserzone in Abhängigkeit der Oberwasserführung über den Jahreszyklus (oben: bei niedrigstem monatlichem Abfluss; unten: bei höchstem monatlichem Abfluss; vgl. Abb. 16) zwischen Ledamündung und Knock (H = Herbrum, P = Papenburg, W = Weener, L = Leer/Leda, T = Terborg, G = Gandersum, E = Emden, K = Knock; vgl. Abb. 7)

Durch die gezielte Verdichtung des vorhandenen Messnetzes ist eine substantielle Verbesserung der Schwebstoffbilanzierung in der Trübungszone des Ems-Ästuars zu erwarten. An Dauermessungen gekoppelte, kürzere Messreihen im Querschnitt zur gezielten Erweiterung des Kenntnisstandes innerhalb der Fließquerschnitte wären ebenfalls wünschenswert.

Darüber hinaus sollte der Wissensstand über die Dynamik von Schlickablagerungen an der Gewässersohle erweitert werden. Neuartige Geräte mit hoher zeitlicher und lotrechter Auflösung (vgl. MANZENRIEDER u. SNIPPE, 1991) erlauben beispielsweise entsprechende punktuelle Beobachtungen.

Die Anwendung des vorgestellten Konzeptes auf weitere Messstellen im stromaufwärtigen Teil des Brackwassergebietes oberhalb der Ledamündung wird hinsichtlich der indirekten Abflussermittlung aus Salzgehaltsmessungen auf Schwierigkeiten stoßen. Bedingt durch die geringere Entfernung von der Abflussmessstelle in Versen wird eine Übertragung dieser Messwerte auf Lokationen im stromaufwärtigen Teil des Ästuars jedoch erleichtert. Darüber hinaus sollte die Verwendung von Messdaten der Abflussmessstelle Herbrum geprüft werden.

Numerische Modelle werden z. Zt. hauptsächlich zur Simulation der aus dem halbtägigen Tidegeschehen resultierenden Schwebstoffdynamik verwendet. Zur Langzeitsimulation der ästuarinen Schwebstoffdynamik sind Weiterentwicklungen der vorhandenen Modelle hinsichtlich des resultierenden Transportgeschehens erforderlich. Dazu werden neben einer höheren Datendichte transportrelevanter Größen im Fließquerschnitt auch Messdaten hinsichtlich der Dynamik temporärer Schlickablagerungen im Bereich der Trübungszone benötigt.

In zukünftigen Modelluntersuchungen sollte, insbesondere für die längerfristige Simulation der Schwebstoffführung, die veränderliche Wirkung des Oberwasserabflusses stärker berücksichtigt werden. Für eine entsprechende Modellierung der ästuarinen Schwebstoffdynamik sind über die Modellgrenzen hinausgehende Austauschvorgänge besonders kritisch, dieses sollte bei der Festlegung des Simulationsgebietes berücksichtigt werden.

7. Symbolverzeichnis

Zeichen	Begriff	Einheit
A	Querschnittsfläche	m ²
C _S	Schwebstoffgehalt	mg/l
HMQ	Höchster mittlerer Abfluss	m ³ /s
HQ	Höchster eingetretener Abfluss	m ³ /s
K _e	Ebbestromkenterpunkt	–
K _f	Flutstromkenterpunkt	–
MHQ	Mittlerer höchster Abfluss	m ³ /s
MNQ	Mittlerer niedrigster Abfluss	m ³ /s
MQ	Mittlerer Abfluss	m ³ /s
MThw	Mittleres Tidehochwasser	PNP + m
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser	PNP + m
max. C _{S,e}	Maximaler Schwebstoffgehalt bei Ebbe	mg/l
max. C _{S,f}	Maximaler Schwebstoffgehalt bei Flut	mg/l
max. S _p	Maximaler Praktischer Salzgehalt	–
min. C _{S,e}	Minimaler Schwebstoffgehalt bei Ebbe	mg/l

Min. $C_{S,f}$	Minimaler Schwebstoffgehalt bei Flut	mg/l
Min. S_p	Minimaler Praktischer Salzgehalt	–
Mittl. $C_{S,e}$	Mittlerer Schwebstoffgehalt bei Ebbe	mg/l
Mittl. $C_{S,f}$	Mittlerer Schwebstoffgehalt bei Flut	mg/l
Mittl. $C_{S,Tide}$	Mittlerer Schwebstoffgehalt über die Tide	mg/l
Mittl. S_p	Mittlerer Praktischer Salzgehalt	–
NMQ	Niedrigster mittlerer Abfluss	m ³ /s
NQ	Niedrigster eingetretener Abfluss	m ³ /s
PN	Pegelnul	M
Q_o	Oberwasserabfluss	m ³ /s
S	Salzgehalt	‰
S_p	Praktischer Salzgehalt	–
T	Wassertemperatur	°C
T_E	Ebbedauer	S
T_F	Flutdauer	S
T_T	Tidedauer	S
T_e	Ebbestromdauer	S
T_f	Flutstromdauer	S
Thb	Tidehub	M
Thw	Tidehochwasser	PNP + m
Tmw	Tidemittelwasser	PNP + m
Tnw	Tideniedrigwasser	PNP + m
Tr	Trübung	%
V_{Q_o}	Volumen des Oberwasserabflusses	m ³
V_{ges}	Gesamtvolumen	m ³
v_e	Ebbeströmung	m/s
v_f	Flutströmung	m/s
v_{krit}	Kritische Strömungsgeschwindigkeit	m/s
W	Wasserstand	PNP + m
κ	Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm

8. Schriftenverzeichnis

- ALLEN, G. P.; CASTING, P.: Suspended sediment transport from the Gironde estuary (France) onto the adjacent continental shelf. *Marine Geology* 14 S. M47-M53, 1973.
- ALLEN, G. P.; SALOMON, J. C.; BASSOULLET, P.; PENHOAT, Y. DU u. GRANDPRÉ, C. DE: Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sediment Geology* 26, S. 69–90, 1980.
- BODÉ, C.: Diatomen und Schlick. Festschrift der Naturforschenden Gesellschaft zu Emden, S. 3–105, 1915.
- BRANDT, H.: Experimentelle Untersuchungen des Sinkverhaltens von Elbeschwebstoffen in Abhängigkeit von der Schwebstoffkonzentration und des Wassersalzgehaltes. Diplomarbeit im Studiengang „Verfahrenstechnik“, Fachhochschule Hamburg, 1985.
- BURT, T. N.: Field settling velocities of estuary muds. Metha, A.J. (ed.) *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, Springer-Verlag 14 S. 126–150, 1986.
- BURT, T. N. u. STEVENSON, J. R.: Field settling velocity of Thames mud. *Hydraulics Research Station Wallingford No. IT 251, S. 1–10*, 1983.
- CASPERS, H.: Der Einfluss der Elbe auf die Verunreinigung der Nordsee. *Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* 17, S. 422–434, 1968.

- DELO, E. A. u. BURT, T. N.: The hydraulic engineering characteristics of estuarine muds. Hydraulic Research Station Wallingford No. SR 77, 1986.
- DYER, K. R.: Sediment processes in estuaries: future research requirements. *Journal of Geophysical Research* Vol. 94 (C10) S. 14327–14339, 1989.
- EISMA, D.: Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research* 20(2/3), S. 183–199, 1986.
- FANGER, H.-U.; NEUMANN, L.; OHM, K. u. RIETMÜLLER, R.: MASEX'83, Eine Untersuchung über die Trübungszone der Unterweser. *Die Küste* Heft 42, S. 171–187, 1985.
- FESTA, J. F. u. HANSEN, D. V.: Turbidity maxima in partially mixed estuaries: A two dimensional numerical model. *Estuarine and Coastal Marine Science* 7, S. 347–359, 1978.
- FRANZIUS, O.: Brackwasserprobleme im Tidebereich der Ems. *Informationsschrift der WSD-Nordwest „Zwischen Weser und Ems“* 17, S. 43–91, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H.; SCHULZE, M. u. VRIES, J. M. DE: Zur EDV-Auswertung von Salzgehalts- und Schwebstoffmessungen in der Ems bei Pogum in den Jahren 1959 bis 1961. Bericht aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, (unveröffentlicht) Nr. 677, 1989.
- GRABEMANN, I.: Die Trübungszone im Weser-Ästuar: Messungen und Interpretationen. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH 92/E/15, 1992.
- GRABEMANN, I. u. KRAUSE, G.: Transport processes of suspended matter derived from time series in a tidal estuary. *Journal of Geophysical Research* 94 (C10), S. 14/373–14/379, 1989.
- GRABEMANN, I. u. KRAUSE, G.: Suspended matter transports in a tidal estuary on time scales from minutes to month. *International Symposium on the Transport of Suspended Sediments and its Mathematical Modelling*, Florence, S. 349–362, 1991.
- GRABEMANN, I.; KAPPENBERG, J. u. KRAUSE, G.: Comparison of the dynamics of the turbidity maxima in two coastal plain estuaries. Kausch, H.; Michaelis, W. (ed.) *Archiv für Hydrobiologie, Special issues Advances in limnology*, Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 47 S. 195–205, 1996.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihren biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. *Hamburger Küstenforschung* 45, 1988.
- HAGEN: Über die Flut- und Bodenverhältnisse des preußischen Jade-Gebietes. *Monatsberichte der königlichen preussischen Akademie der Wissenschaften*, Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse 16. Juni, Berlin, 1856.
- HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe. *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG)* 18, S. 91–110, 1941.
- HENSEN, W.: Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in See-kanäle und Häfen. *Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der TH Hannover* Heft 3, S. 20–49, 1953.
- HENSEN, W.: Modellversuche für die untere Ems. *Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der TH Hannover* Heft 6a und b, 1954.
- HINRICH, H.: Die Schwebstoffbelastung der Weser und der Vergleich mit Elbe und Ems. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Sonderheft, S. 113–120, 1975.
- HÜBBE, H.: Über die Eigenschaften und das Verhalten von Schlick. *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 10, S. 1–19, 1860.
- KLÜNDER, A.: Laborversuche zur Flockenbildung und Sinkgeschwindigkeit von Elbschwebstoff. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH 88/E/64, 1988.
- KÜHL, H. u. MANN, H.: Vergleichende hydrochemische Untersuchungen an den Mündungen deutscher Flüsse. *Verhandlungen der internationalen Vereinigungen theoretisch angewandte Limnologie* 14, S. 451–458, 1961.
- LANG, G.: Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszone in Ästuarien. *Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen*, Universität Hannover 26, 1990.
- LANG, G.; SCHUBERT, R. u. MARKOFKY, M.: Numerical simulation of a turbidity maximum under stratified conditions. *Symposium of Stratified Flow*, Pasadena, S. 1–10, 1987.
- LENORMAND, C.; LEPEINTRE, F.; TEISSON, C.; MALCHEREK, A.; MARKOFKY, M. u. ZIELKE, W.: Three-dimensional numerical modelling of estuarine processes. *Mast Days and Euromar Market*, Project Reports 1, S. 222–236, 1993.
- LEUSSEN, W. VAN: Erosion/deposition cycles in the Ems estuary. Kausch, H.; Michaelis, W. (ed.) *Archiv für Hydrobiologie, Special issues Advances in limnology*, Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 47, S. 179–193, 1996.

- LÜDERS, K.: Entstehung der Gezeitenschichtung auf den Watten im Jadebusen. *Senckenbergiana, Wissenschaftliche Mitteilungen* Bd. 12, S. 229–254, 1930.
- MALCHERER, A.: Mathematische Modellierung von Strömungen und Stofftransportprozessen in Ästuaren. Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover Nr. 44, S. 200, 1995.
- MANZENRIEDER, H. u. SNIPPE, B.: Kontinuierliche Beobachtungen der Gewässersohle mit einem Sandstandpegel. *Die Küste* Heft 52, S. 255–263, 1991.
- MARKOFSKY, M.; LANG, G. u. SCHUBERT, R.: Numerical simulation of unsteady suspended sediment transport. *Euromech* 192, S. 1–8, 1985.
- MAYER, A.: Über die Einwirkung von Salzlösungen auf die Absetzverhältnisse toniger Erden. Wollny, E. (ed.), *Forschung auf dem Gebiet „Agrikulturphysik“* 2 (3), S. 251–273, 1879.
- MEADE, R. H.: Transport and disposition of sediments in estuaries. Nelson, B.W. (ed.), *Environmental Framework of Coastal Plain Estuaries*, The Geological Society of America, Inc. Memoir 133, S. 91–120, 1972.
- METHA, A. J.: Characterisation of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries. Metha, A.J. (ed.) *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, Springer-Verlag, S. 290–325, 1986.
- NICHOLS, M. N. u. POOR, G.: Sediment transport in a coastal plain estuary. *Journal of the Waterways and Harbours Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 93 (WW4), S. 83–95, 1967.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (NLÖ) HILDESHEIM: Weser- und Emsgebiet Abflussjahr 1989. *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch*, 1993.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (NLÖ) HILDESHEIM: Weser- und Emsgebiet Abflussjahr 1991. *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch*, 1995.
- NÖTHLICH, I.: Untersuchungen über den Schlickhaushalt in der Unterelbe mit besonderer Berücksichtigung der biologischen Komponenten. *Mitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg* 17, 1967.
- OWEN, M. W. u. ENG, C.: A detailed study of settling velocities of an estuary mud. *Hydraulics Research Station Wallingford INT* 78, 1978.
- OWEN, M. W.: The effect of the settling velocities of cohesive muds. *Proceedings of the 14th Congress of International Association for Hydraulic Research (I.A.H.R.)*, Paris S. d4/1-d4/6, 1971.
- POSTMA, H.: Einige Bemerkungen über den Sinkstofftransport im Ems-Dollart Gebiet. *Verhandlungen Koninklijk Nederlandsch Geologisch-Mijnbouwkundig Genootschap, Geologische Serie* 19, S. 103–110, 1960.
- POSTMA, H.: Suspended matter and secchi disc visibility in coastal waters. *Netherlands Journal of Sea Research* 1, S. 359–390, 1961.
- POSTMA, H. u. KALLE, K.: Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf von Flüssen, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 3, S. 137–144, 1955.
- PULS, W. u. KÜHL, H.: Field measurements of the settling velocities of estuarine flocs. *Proceedings of the 3rd International Symposium on River Sedimentation*, Mississippi 3, S. 525–536, 1986.
- PULS, W.; KÜHL, H. u. KRAAS, D.: Settling velocity of mud flocs: Measurement in the field and laboratory. *Proceedings of Euromech* 192, S. 29–32, 1985.
- REMANE, A.: Die Brackwasserfauna. *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* 36, S. 34–74, 1934.
- SCHUCHARDT, B.: Zur Bedeutung physikalischer Prozesse für die Dynamik organischer Seston-Komponenten im inneren Weser-Ästuar. *Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.rer.nat. des Fachbereiches 2, Biologie/Chemie der Universität Bremen*, S. 1–111, 1990.
- SCHULZE, M.: Über die Abhängigkeit zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Salzgehalt am Beispiel von Untersuchungen im Ems-Ästuar. *Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig* Heft 102, S. 229–251, 1988.
- SCHULZE, M.: Zur Dynamik des Schwebstoffhaushaltes in Brackwassergebieten am Beispiel des Ems-Ästuars. *Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig* Heft 108, S. 1–153, 1990.
- SCHULZE, M. u. RUPERT, D.: Über Aufgaben und Ziele von Messungen in der Unterelbe an der

- Radioaktivitäts- und Gewässergütemeßstation Gandersum. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig Heft 105, S. 319–344, 1989.
- SCHULZE, M. u. SPINGAT, F.: Untersuchung zum Salzgehaltsregime in der Tide-Ems zwischen Terborg und Gandersum. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig Heft 111, S. 411–446, 1991.
- SCHULZE, M. u. VRIES, J. M. DE: Analyse der Schwebstoffe und Sedimente im Brackwassergebiet der Ems. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig Heft 111, S. 447–488, 1991.
- SCHULZE, M.; PULS, W. u. KÜHL, H.: Schwebstoff-Sinkgeschwindigkeitsmessungen in der Ems, Vergleich mit Messungen in der Elbe. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH 89/E/60, 1989.
- SEYFERT, F.: Das Wasser im Flutgebiet der Weser. Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen 13 Heft 1, S. 1–56, 1894.
- SPINGAT, F.: Analyse der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone eines Tideflusses. Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig Heft 139, S. 1–187, 1997.
- UNCLES, R. J.; ELLIOTT, R. C. A. u. WESTON, S. A.: Observed fluxes of water, salt and suspended sediment in a partly mixed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 20, S. 147–167, 1985.
- UNCLES, R. J.; ELLIOTT, R. C. A.; WESTON, S. A.; PILGRIM, D. A.; ACKROYD, D. R.; MCMILLIAN, D. J. u. LYNN, N. M.: Synoptic observations of salinity, suspended sediment and vertical current structure in a partly mixed estuary. Kreeke, J. van de (ed.) *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Physics of Shallow Estuaries and Bays*, Springer-Verlag 16, S. 58–70, 1986.
- UNESCO: Background papers and supporting data on the practical salinity scale. *UNESCO Technical Papers in Marine Science* 36, 1981.
- VRIES, J. M. DE: Über die Koagulation in der Brackwasserzone von Tideflüssen. Diplomarbeit aus dem Lehrgebiet „Hydromechanik und Küstenwasserbau“, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, 1989.
- WELLERSHAUS, S.: Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser estuary. *Archiv für Hydrobiologie* 92, S. 161–198, 1981.
- WELLERSHAUS, S.: Die Trübungswolke im Weser-Ästuar. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 26 (1/2), S. 2–6, 1982.
- ZIELKE, W.; MARKOFKY, M. u. BLASE, T.: Numerische Modelle zur Simulation des Stoffhaushaltes von Ästuarien. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* Jg. 40 (3), S. 115–124, 1996.