

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Ricklefs, Klaus

Die Verteilung von Schwebstoffen im Hörnum-Tief

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101407>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ricklefs, Klaus (1998): Die Verteilung von Schwebstoffen im Hörnum-Tief. In: Die Küste 60. Heide, Holstein: Boyens. S. 141-160.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Die Verteilung von Schwebstoffen im Hörnum-Tief

Von KLAUS RICKLEFS

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit faßt die Ergebnisse einer Studie zusammen, die im Rahmen des KFKI-Forschungsprojekts „Der Wasseraustausch im Hörnum-Tief“ durchgeführt wurde. Ziel der Untersuchung war die Erfassung der Verteilung feinkörniger, suspendierter Sedimente. Gemessen wurde die zeitliche Entwicklung der Schwebstoffgehalte an einigen Dauermeßstellen im Bereich des Hörnum-Tiefs östlich der Insel Sylt. Zusätzlich wurde die räumliche Verteilung entlang je eines Längs- und eines Querschnitts durch die Gezeitenrinne bestimmt.

Das generelle Verteilungsmuster der Schwebstoffe ist geprägt durch eine graduelle Zunahme der Konzentration in Richtung auf die buchtinneren Abschnitte des Tidebeckens. Abhängig von dieser räumlichen Verteilung ist der Schwebstofftransport in starkem Maße durch advective Komponenten geprägt. Auf der Basis von Zeitreihenanalysen konnte gezeigt werden, daß advective Transporte besonders bei ruhigen Wetterlagen und bei Ostwindsituationen vorherrschend sind. Bei stärkeren westlichen Winden und damit verbundenen höheren Wasserständen und stärkerem Seegang gewinnen eine ganze Reihe kürzer- oder längerperiodischer Prozesse Einfluß auf den Schwebstofftransport. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür stellt die bei stärkeren westlichen Winden auf den südlich von Sylt gelegenen Theeknopssänden erfolgende Aufwirbelung von Schwebstoffen dar. Diese brandungsbedingte Mobilisierung führt bei entsprechenden Wasserständen im Bereich des Gewässerschnitts Sylt-Amrum zu einer signifikanten Erhöhung der Gehalte suspendierter Sedimente.

Summary

The paper presented summarises the results of a study which was performed within the scope of the KFKI research project „Der Wasseraustausch im Hörnum-Tief“. The focus of the investigation was to measure and identify the distribution of fine grained suspended sediments. The time depending evolution of suspended matter concentration was measured at long period sample sites in the area of the Hörnum-Deep east of the island of Sylt. In addition the spatial distribution was determined along a cross and a longitudinal section of the tidal channel.

The general distribution pattern is determined by a gradual concentration increase in the direction towards the inner parts of the tidal basin. Depending on this spatial distribution the transport of suspended matter is dominated by advective components. On the basis of time series analysis it could be shown, that advective transports are predominant during calm weather conditions and during situations with easterly winds. At stronger westerly winds and related higher water levels and increasing wave height quite a number of shorter and longer periodical effects gain influence on the transport of suspended solids. A very clear example for this is the resuspension of sediment, which happens at stronger westerly winds on the Theeknops shoals just south of the island of Sylt. At corresponding water levels this wave induced mobilisation leads to an significant increase of the suspended matter concentration in the cross-sectional area between the island of Sylt and the island of Amrum.

Inhalt

1. Einleitung	142
2. Das Meßprogramm und die Meßmethoden	142
3. Ergebnisse und Diskussion	145
3.1 Langzeitmessungen	145
3.2 Längs- und Querschnittsmessungen	152
3.3 Schlußfolgerungen	158
4. Danksagung	159
5. Schriftenverzeichnis	159

1. Einleitung

In einer Zusammenarbeit zwischen dem Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum (ALW), dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste in Biusum entstand die Initiative für das Forschungsvorhaben „Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief“. Das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie übernahm auf Antrag des ALW vom 15. 6. 95 die finanzielle Förderung des Projekts für den Zeitraum vom 1. August 1995 bis zum 31. März 1998.

Das übergeordnete Ziel des Projekts war es, auf der Basis längerfristiger Zeitreihen hydrologischer Parameter die Füll- und Entleerungsvorgänge des Tidebeckens Hörnum-Tief und angrenzender Wattgebiete in Abhängigkeit von Tidegeschehen und Wetter zu untersuchen. Da in Küstengewässern oft enge Wechselbeziehungen zwischen der Topographie des Seegrundes und den Bewegungsformen des Wassers bestehen, sollten darüber hinaus die hydrographischen Verhältnisse im Bereich des Hörnum-Tiefs nicht allein durch Angaben zu den vorkommenden Strömungen und zum Seegang beschrieben werden, sondern auch durch die Resultate von Schwebstoffmessungen. Die Bedeutung dieser Ergebnisse liegt darin, daß sie Aufschluß darüber geben können, in welchem Ausmaß Sedimente transportiert werden bzw. wie intensiv die Wechselbeziehungen zwischen Wasserbewegung und Sediment bzw. Morphologie sind.

Die Konzeption der hier vorgestellten, vom Umfang und von der finanziellen Förderung her vergleichsweise klein angelegten Untersuchung sieht vor, daß im Mittelpunkt der Analyse nicht die statistische oder bilanzierende Auswertung tabellierbarer Meßwerte steht. Das Ziel ist vielmehr die Erfassung und Beschreibung der Phänomenologie der Schwebstoffverteilung im Hörnum-Tief. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse von ortsfesten Langzeitmessungen sowie die Resultate von Längs- und Querschnittsmessungen diskutiert.

2. Das Meßprogramm und die Meßmethoden

Zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Verteilung suspendierter Sedimente wurden im Frühjahr und im Herbst 1996 zwei Meßkampagnen im Bereich des Hörnum-Tiefs durchgeführt.

Die raumzeitliche Erfassung der Schwebstoffe erfolgte während zweier jeweils einwöchiger Meßkampagnen mit dem Forschungsschiff „Südfall“ und dem Forschungsboot „Seston“ des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste. Die „Südfall“ wurde auf dem Profil Amrum-Hörnum eingesetzt, während zeitgleich die Messungen auf dem Längsprofil durch das Hörnum-Tief von der „Seston“ aus erfolgten (Abb. 1).

Von beiden Schiffen aus wurden baugleiche ECO-Sonden der Herstellerfirma Meerestechnik Elektronik, Trappenkamp eingesetzt. Diese Fiersonden sind mit Sensoren für elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Druck und optische Transmission ausgerüstet. Der Durchlichttrübungssensor hat eine Streckenlänge von 50 mm und deckt damit in Wattgewässern einen ausreichend weiten Meßbereich hinreichend genau ab. Da es sich bei der optischen Trübungsmessung um ein indirektes Meßverfahren handelt, ist es notwendig zur Umrechnung der optischen Werte in Konzentrationswerte Referenzproben zu entnehmen (OHM, 1985). Dies geschieht mit Hilfe eines hinsichtlich Bodenauslösung modifizierten Niskin-Wasserschöpfers, der zusammen mit der Fiersonde in ein spezielles Gestell eingebaut ist. Die Bestimmung des Feststoffgehalts der Suspensionsproben erfolgt durch Vakuumfiltration der

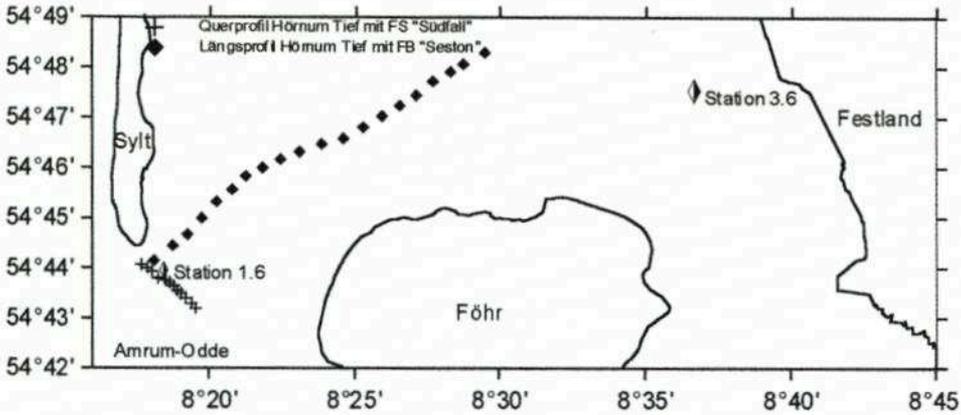


Abb. 1: Meßpositionen im Bereich Hörnum-Tief und Föhrer Schulter

Probe unter Verwendung von Glasfaserfiltern mit einem Rückhaltevermögen von $0,45 \mu\text{m}$. Die entsalzten Filter werden bei 60°C getrocknet und die Feststoffmasse gravimetrisch bestimmt.

Die angewandte Meßstrategie war die, daß an verschiedenen Positionen entlang der Profilstrecken (Abb. 1) Vertikalprofile der Größen optische Transmission, Temperatur und Salzgehalt aufgenommen werden. Die vertikale Auflösung einer derartigen Messung liegt bei etwa 30 cm. Alle Meßwerte sowie Zeit- und Positionsdaten (Diff. GPS) werden an Bord auf Datenträgern gespeichert. Zu bestimmten Zeiten oder an bestimmten Orten wurden zusätzlich zur Kalibrierung der optischen Meßwerte Suspensionsproben in einem Meter Höhe über Grund entnommen.

Nach der gravimetrischen Bestimmung des Feststoffgehalts dieser Proben wurden durch Gegenüberstellung von Konzentrationswerten und zugehörigen Transmissionswerten Kalibrierbeziehungen ermittelt. Mit Hilfe der aufgestellten Gleichungen erfolgte anschließend die Umrechnung aller Transmissionswerte in Konzentrationswerte (Abb. 2). Die Konzentrationsprofile eines Quer- oder Längsschnittes wurden schließlich in einem letzten Schritt mit Hilfe des digitalen Geländemodells SURFER (Golden Software) zu Isolinien-darstellungen zusammengefaßt.

Die Verteilung der Meßwerte in den Diagrammen von Abb. 2 sowie die dort angegebene

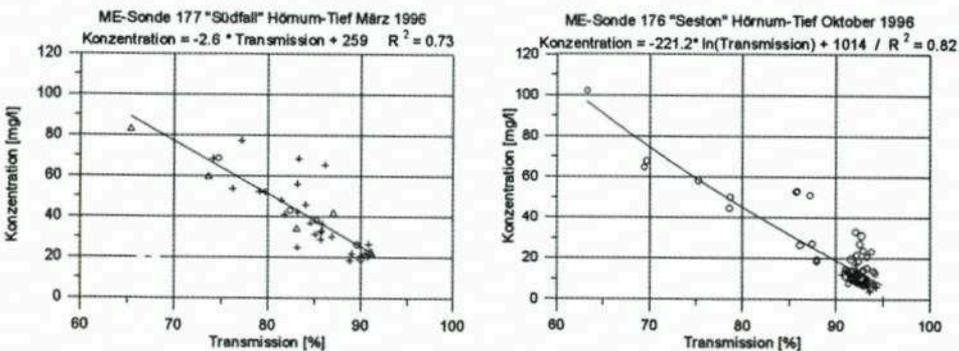


Abb. 2: Kalibrierbeziehungen zur Umrechnung von optischer Transmission in Konzentration

nen Korrelationskoeffizienten zeigen, daß der Zusammenhang zwischen den ermittelten Konzentrationswerten und der indirekten Meßgröße optische Transmission statistisch betrachtet nicht streng signifikant ist. Die vorkommende Streuung der Werte läßt sich zum einen durch methodische Fehler bei der Feststoffbestimmung, der Probenentnahme, der zeitlichen und räumlichen Zuordnung von Konzentrationswerten und Transmissionswerten und durch Ungenauigkeiten der Sonde erklären. Zum anderen entstehen die Abweichungen aber auch durch unterschiedliche Mengen an planktisch lebenden Organismen. Diese Zellen verhalten sich optisch ähnlich wie suspendierte Sedimente. Ihre nach Filtration bestimmbare Trockenmasse ist aber im Vergleich zu mineralischem Material entscheidend geringer, ein Umstand der zwangsläufig zu Unschärfen bei der Gegenüberstellung von Transmissions- und Konzentrationswerten führen muß. Die Erfahrungen mit optischen Schwebstoffmessungen in anderen Gewässern sowie die insgesamt relativ niedrigen Sestonkonzentrationen bei gleichzeitig recht hohen Glühverlustwerten (Abb. 3) lassen vermuten, daß die sich im speziellen Fall weniger gut darstellenden Zusammenhänge zwischen Schwebstoffkonzentration und Transmission in erster Linie auf unterschiedliche Planktongehalte zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigen die Korrelationskoeffizienten aber, daß die Beziehungen eindeutig genug sind, um qualitative Vorgänge anschaulich zu erfassen. Quantitative Betrachtungen können dagegen mit so großen Fehlern behaftet sein, daß sie nur eine sehr eingeschränkte Gültigkeit haben würden. Aus diesem Grunde werden bei der Deutung der erarbeiteten Ergebnisse qualitative Aspekte im Vordergrund stehen müssen.

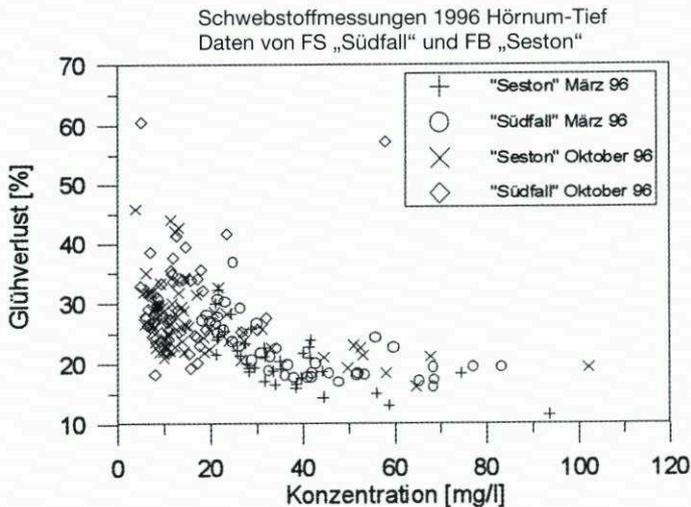


Abb. 3: Verhältnis von Schwebstoffkonzentration zu Glühverlust

Anmerkung: Die stark variierenden Gehalte an organischen Komponenten können besonders bei niedrigen Konzentrationen eine starke Einschränkung der Güte der optischen Konzentrationsbestimmung nach sich ziehen.

Neben den schiffsgestützten Schwebstoffmengenbestimmungen wurden auf den Profilen Amrum-Hörnum und Föhr-Festland zusätzlich ortsfeste Langzeitmessungen der optischen Transmission durchgeführt. Diese Messungen erfolgten mit Sonden der Firma Hydrobios, Kiel, die an Aanderaa-Strömungsmesser angeschlossen wurden. Die Installation der Sonden und der Strömungsmesser in spezielle, den jeweiligen Einsatzort angepaßte Geräte-

träger, ist bei ROSS (1998) beschrieben. Der optische Aufbau der Trübungssonden entspricht dem bei OHM (1985) beschriebenen Strahlengang. Die Streckenlänge betrug bei den Geräten im Hörnum-Tief 100 mm und bei den Sensoren auf dem Profil Föhr-Festland 50 mm.

Die aufgenommenen Meßreihen erlauben ausschließlich qualitative Angaben hinsichtlich der zeitlichen Variabilität der Schwebstoffführung an einem Meßort. Quantitative Aussagen sind mit diesem Meßsystem nicht möglich, da besonders die Verschmutzung der Sensoren durch Bewuchs, aber auch Probleme bei der Energieversorgung und die elektronische Drift einiger Bauteile bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen nur sehr schwer zu kalkulierende Störgrößen darstellen. Zudem würde bereits die zweifelsfreie räumliche und zeitliche Zuordnung etwaiger Kalibrierproben, unter den Bedingungen (Strömung, Wassertiefe, Seegang), wie sie im Hörnum-Tief herrschen, ein kaum zu lösendes Problem darstellen.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Langzeitmessungen

Einleitend muß leider erwähnt werden, daß die Ausbeute an verwertbaren Ergebnissen der Langzeittransmissionsmessungen gering war. Dies ist einerseits auf technische Schwierigkeiten, wie umgekippte Geräte u. ä. zurückzuführen oder andererseits einfach darauf, daß komplette Meßsysteme während einer Sturmserie im Herbst 1996 vollständig verloren gingen. Bei allen aufgenommenen Zeitreihen waren überdies nur die ersten zwei Meßwochen auswertbar, da bei allen weiteren Messungen das Wertespektrum als Folge zunehmender Verschmutzung des Sensors zu stark eingengt war. Hier vorgestellt und diskutiert werden letztlich die Ergebnisse der Meßstation 3.6 auf dem Profil Föhr-Festland und die der Dauermeßstation 1.6 auf dem Profil Sylt-Amrum (Positionen siehe Abb. 1).

Die Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der ersten zwölf Meßtage der Station 3.6 auf dem Profil Föhr-Festland. Das Meßgerät lag hier in einem relativ tief gelegenen Teil der trockenfallenden Wattflächen, so daß es um Tideniedrigwasser herum für kurze Zeit nicht von Wasser bedeckt war. In der Graphik sind die Ganglinien der optischen Transmission und zur Kennzeichnung der Tidephase die der Strömungsrichtung aufgetragen.

Der Verlauf der Transmissionskurve zeigt bei fast allen gemessenen Tiden einige typische Eigenarten, die am Beispiel der zweiten Tide vom 23. 3. 1996 (Abb. 4) erläutert werden sollen. Danach ist das Wasser, das mit einsetzender Flut die Wattflächen überspült und an das Meßgerät gelangt, am stärksten mit Schwebstoffen beladen (erste gestrichelte Linie in Abb. 4). Im weiteren Verlauf der Tide nimmt die Schwebstoffkonzentration meist ab, um um das Tidehochwasser herum ein Minimum zu erreichen.

Mit einsetzender Ebbeströmung steigen die Gehalte an suspendierten Sedimenten mit Annäherung an Tideniedrigwasser wieder an (zweite gestrichelte Linie in Abb. 4). Generalisierend betrachtet ergibt sich so das Bild einer über eine Tide u- oder v-förmig verlaufenden Ganglinie der Sestonkonzentration. In dieser Kurvenform spiegelt sich der für Wattgebiete typische horizontale Gradient der Schwebstoffverteilung wider (POSTMA, 1980; PEJRUP, 1988). Charakteristikum dieses Gradienten sind höchste Schwebstoffgehalte in den inneren Teilen des Wattgebiets nahe der Hochwasserlinie und niedrigere Feststoffanteile im Wasser der seewärtigeren Bereiche. Die tideinduzierte Bewegung eines so beschriebenen Wasserkörpers führt, wenn Wechselwirkungen zwischen fließendem Wasser und Sediment am Meßort ausbleiben, zu dem beschriebenen Gang der Schwebstoffkonzentration. Niedrigste Konzentrationen treten danach um Tidehochwasser herum auf, wenn schwebstoffarmes

„Nordseewasser“ den Meßpunkt erreicht, und höchste Gehalte dann, wenn um Tideniedrigwasser herum gegen Ende der Ebbe das letzte, reich mit Schwebstoffen beladene Wasser von den hohen Wattflächen abfließt bzw. zu Beginn der Flut erneut am Meßpunkt vorbei in Richtung Buchtinneres strömt.

Diese Entwicklung der Schwebstoffführung kann zudem Überprägungen dadurch erfahren, daß z. B. die Konzentrationen zu Beginn oder zum Ende einer Tide unterschiedlich hoch ausfallen (Flutmaximum meist höher als Folge des schnellen Strömungsgeschwindigkeitsanstiegs bei Flut), oder auch dadurch, daß das Ebbemaximum bereits einige Stunden vor Tideniedrigwasser eintritt (z. B. dritte gestrichelte Linie in Abb. 4). Im Fall der hier diskutierten Messung tritt der letzte Fall deutlich am 24. 3. und am 30. 3. 1996 auf. Erklärungen hierfür können derzeit nicht gegeben werden. Einflüsse des Windes sind allerdings mit gewisser Berechtigung auszuschließen, da am 24. 3. 1996 diese Situation bei schwachem, umlaufenden Wind und am 30. 3. 1996 bei mittlerem Wind aus NW auftrat (Abb. 5).

Übergreifend betrachtet üben aber der Wind bzw. die dadurch in Gang gebrachten Wellen und Strömungen sowie das Zusammenspiel zwischen Wind und Wasserstand einen Einfluß auf die Schwebstoffführung des Wattenwassers an Station 3.6 aus. Ein Vergleich der Transmissionswerte (Abb. 4) mit den Wind- und Pegeldata (Abb. 5) zeigt, daß während der ersten Meßtage (21.–25. 3. 1996) bei nachlassenden zuletzt wieder leicht zunehmenden Winden aus östlicher Richtung eine Abnahme der mittleren Schwebstoffgehalte erfolgt. An der Wende vom 25. zum 26. 3. 1996 dreht der Wind auf nordwestliche Richtung. Dies hat zunächst keine nennenswerten Auswirkungen auf den Gehalt an transportierten Feststoffen. Erst als es bei westlicheren Winden und höheren Windgeschwindigkeiten zu einer Stauwassersituation kommt, zeigen sich Auswirkungen im Gang der Trübungskurve. Dies gilt be-

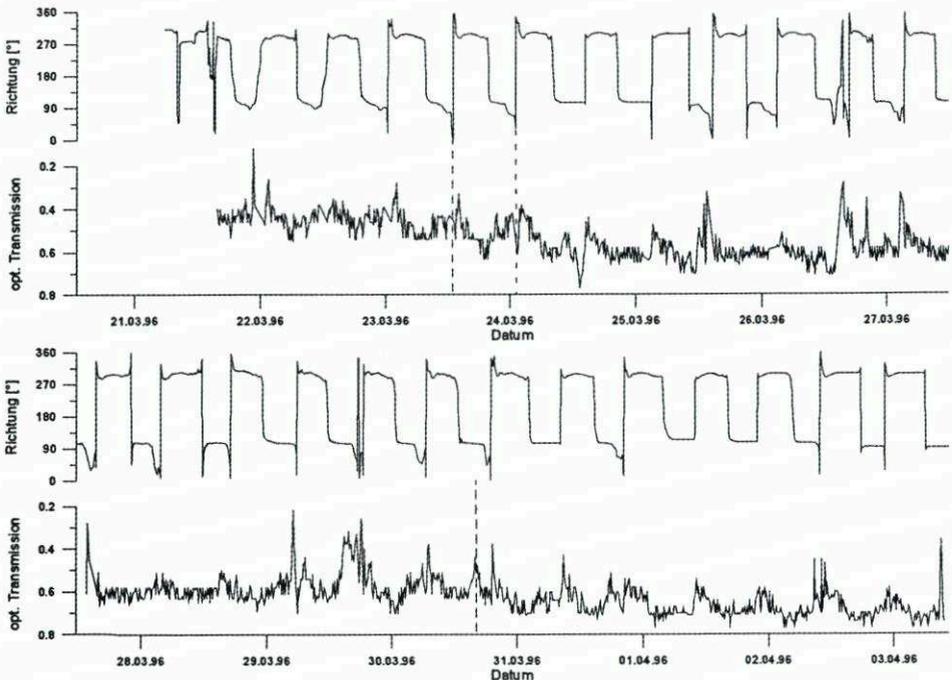


Abb. 4: Zeitreihe der Strömungsrichtung und der optischen Transmission, Meßpunkt 3.6. Strömung in nordwestliche Richtung entspricht Flutphase, in südöstliche Richtung Ebbephase

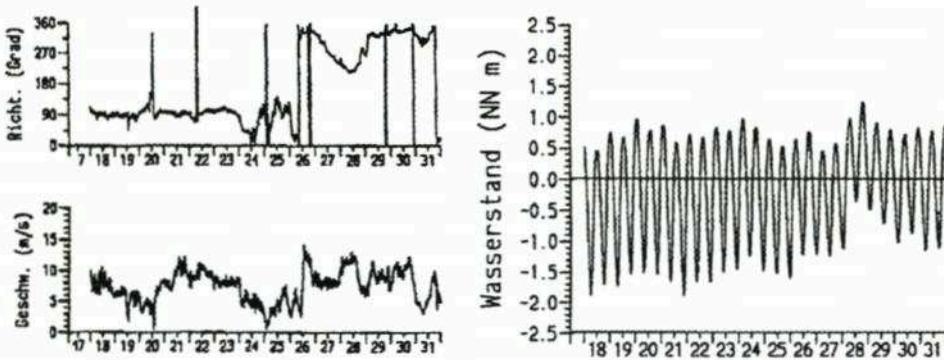


Abb. 5: Wind März 1996 am Meßfahl Westerland – Wasserstand März 1996 am Pegel Hörnum

sonders für den 27. und 28.3.1996. Hier ist die Variabilität der Transmissionswerte vergleichsweise gering, wodurch der typische Tidegang nur sehr schwach ausgebildet ist. Die zeitlich zugehörigen hohen Wasserstände können als ein Indiz dafür gelten, daß schwebstoffärmeres Wasser der äußeren Seegatten oder der offenen Nordsee weiter als gewöhnlich in die inneren Teile des Watts vorgedrungen ist, wodurch das Transportgeschehen am Meßort durch die Bewegungen dieser homogeneren Wassermassen geprägt wird.

Weiterhin zeigen die Meßergebnisse trotz erhöhter Windgeschwindigkeiten und damit verbundenem höheren Seegang keinen Anstieg der mittleren Schwebstoffkonzentrationen. Dies legt den Schluß nahe, daß der Seegang aufgrund der erhöhten Wasserstände zumindest im Bereich des Meßortes keine Mobilisierung von Schwebmaterialien bewirkt hat. Eine Erosion erfolgte vielmehr in den höher gelegenen, schlickigeren Teilen des Watts, in Gebieten, wo bereits eine geringe Zunahme der Wellenenergie zu einer Aufwirbelung und zu einem verstärkten Transport von feinkörnigen Sedimenten führen kann (RICKLEFS, 1997). Die Auswirkungen dieser andernorts durch Wellenbewegungen in Gang gebrachten Mobilisierung von Schwebmaterialien sind bei nachlassendem Windstau und wieder tiefer ablaufender Ebbe (zweite Tide 29. 3. 1996) als gut ausgebildetes aber phasenversetztes Maximum der Schwebstoffkonzentration zu erkennen. Vergleichbare Phasenverschiebungen zwischen dem Auftreten der höchsten Schwebstoffkonzentration und der maximalen Windgeschwindigkeit bzw. der vorausgegangenen Windstausituation sind in ähnlicher Ausprägung auch aus anderen Wattgebieten bekannt (POSTMA, 1980; PEJRUP, 1988 und AUSTEN et al., 1998).

Nicht allein das zuletzt diskutierte Ergebnis zeigt, daß der Feststofftransport am Meßort 3.6 in starkem Maße durch advective Prozesse bestimmt ist. Lokale Resuspension von feinkörnigen Sedimenten findet hier nur untergeordnet statt. Die Menge der in Bewegung befindlichen Schwebstoffe hängt im wesentlichen von der hydrodynamischen Krafteinwirkung ab, wie sie durch das Ausmaß quasi stationärer Strömungen (Tide- und Triftströme) aber besonders durch die Intensität instationärer Strömungen (Orbitalströmungen der Wellen) bestimmt wird. Weiterhin sind das Verhältnis von Wassertiefe zu Wellenhöhe über den Gebieten mit mobilisierbaren Sedimenten und natürlich die Verbreitung ebensolcher Ablagerungen von Bedeutung.

Auf der Basis der vorhandenen Daten ergibt sich damit für den Bereich der Station 3.6 eine Modellvorstellung, wonach bei stärkeren Ostwinden aufgrund der dann geringeren Wassertiefen über den höher gelegenen Wattbereichen die Resuspension von feinkörnigem Sediment am intensivsten ist. Dieses Material gelangt mit den Tideströmungen an den Meßpunkt und führt dort um Tideniedrigwasser herum zu anhaltend hohen Schwebstoffgehal-

ten. Bei Starkwinden, die zu Erhöhungen des Wasserstandes führen, ist dagegen die Mobilisierung geringer, da bedingt durch die größeren Wassertiefen die Krafteinwirkung der Wellen in weiten Bereichen gering bleibt. Erst wenn bei nachlassendem Windstau die von den hoch gelegenen Wattarealen zurückströmenden und mit Feststoffen beladenen Wassermassen den Meßpunkt erreichen, tritt ein phasenverschobenes Schwebstoffmaximum auf.

Ausgeprägte Phasenverschiebungen sind auch bei den bodennahen Messungen an den Stationen 1.3 und 1.6 (Profil Hörnum-Amrum) im tieferen Wasser des Hörnum-Tiefs zu beobachten (Abb. 6). Allerdings sind die am deutlichsten ausgebildeten zeitlichen Verschiebungen zwischen hydrodynamischer Krafteinwirkung und Schwebstoffführung hier nicht auf windinduzierte Vorgänge, sondern auf tidebedingte Prozesse zu beziehen. So zeigt Abb. 6, daß die maximale Schwebstoffführung des Gewässers regelmäßig etwa 1–1,5 Stunden nach der stärksten Ebbeströmung auftritt. Diese hohen Konzentrationen halten dann für etwa zwei Stunden an, um erst wenig vor Tideniedrigwasser etwas abzunehmen. Das kurzzeitige Schwebstoffmaximum, das sich anschließt und überdies in seiner wechselnden Ausbildung sehr anschaulich die tägliche Ungleichheit der Tide widerspiegelt (Abb. 6), ist dagegen das spontane Resultat lokaler Resuspensionsvorgänge. Ausschlaggebend dafür ist die einsetzende Flutströmung, die, bedingt durch den damit verbundenen radikalen Richtungswechsel, sehr effektiv die während der vorausgegangenen Stauwasserphase abgesunkenen Schwebteilchen wieder vom Boden aufnimmt.

Eine genetisch vergleichbare und wiederum nur etwa 30 Minuten meßbare Aufwirbelung von Schwebstoffen findet ebenfalls zu Beginn der Ebbe statt. Im Fall der in Abb. 6 dargestellten Messungen allerdings auf einem Konzentrationsniveau, das um das Tidehochwasser herum typischerweise die niedrigsten Werte aufweist.

Insgesamt ergibt sich für die durch anhaltende Ostwinde bestimmte Meßphase von Abb. 6 ein Bild, das durch ein gleichmäßiges Ansteigen der Schwebstoffkonzentrationen während der Ebbe und ein Abfallen im Verlauf der Flutphase geprägt ist. Eine weitergehende Analyse des Datensatzes auf der Basis von Fast Fourier Transformationen (SWAN u. SANDI-

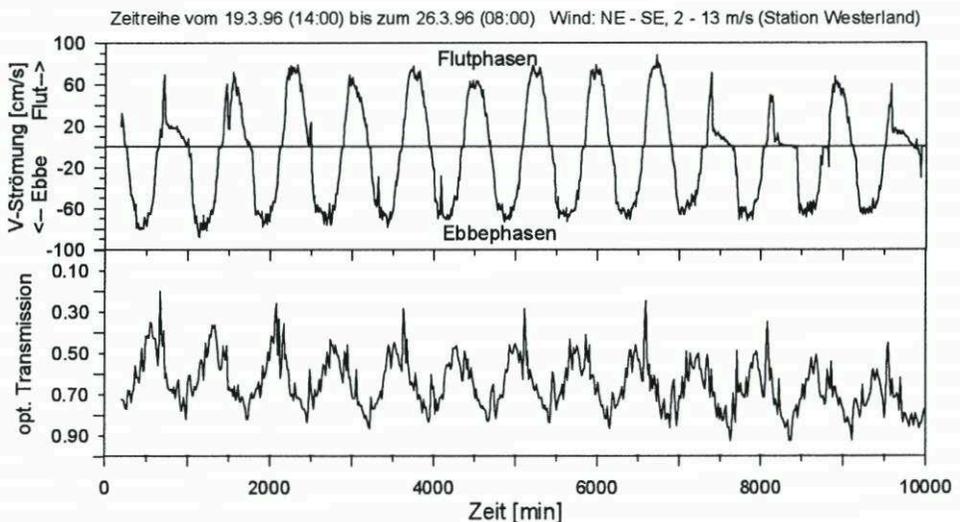


Abb. 6: Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und der optischen Transmission vom 19. 3. 1996, 14:00 Uhr, bis zum 26. 3. 1996, 8:00 Uhr, Station 1.6

LANDS, 1995) zeigt denn auch, daß die zeitlichen Entwicklungen sowohl der Strömungsgeschwindigkeiten als auch der Schwebstoffkonzentrationen überwiegend durch Perioden von ungefähr 730 Minuten bestimmt werden. Diese Schwingungsdauer entspricht recht genau der Dauer einer Tide. Längerperiodische Schwingungen treten bei beiden Größen nicht auf (Abb.7). Perioden mit einer geringeren Dauer als der einer Tide kommen bei der optischen Transmission zwar vor, sie sind aber wenig ausgeprägt und daher nicht eindeutig zuzuordnen.

Eine sehr viel bessere Interpretation erlaubt hingegen die bestimmende Periode von 730 Minuten. Ihre Dauer sowie ihre Zuordnung zum Verlauf der Tide weisen eindeutig darauf hin, daß der Transport von suspendierten Sedimenten unter den vorherrschenden Wetterbedingungen (Ostwindlage) in erster Linie durch die systematische Überlagerung von tideabhängigen Abläufen (z. B. maximale Ebbestromgeschwindigkeit) mit advektiven Transportprozessen geprägt wird. Der advektive Anteil entsteht wiederum dadurch, daß schwebstoffreicheres Wasser aus den inneren Teilen des Wattenmeeres mit dem ablaufenden Wasser an den Meßpunkt gelangt.

Die bei östlichen Winden ausgeprägte Periodizität der Transportvorgänge am Meßpunkt 1.6 wird durch stärkere, westliche Winde entscheidend gestört. Eine derartige Wettersitua-

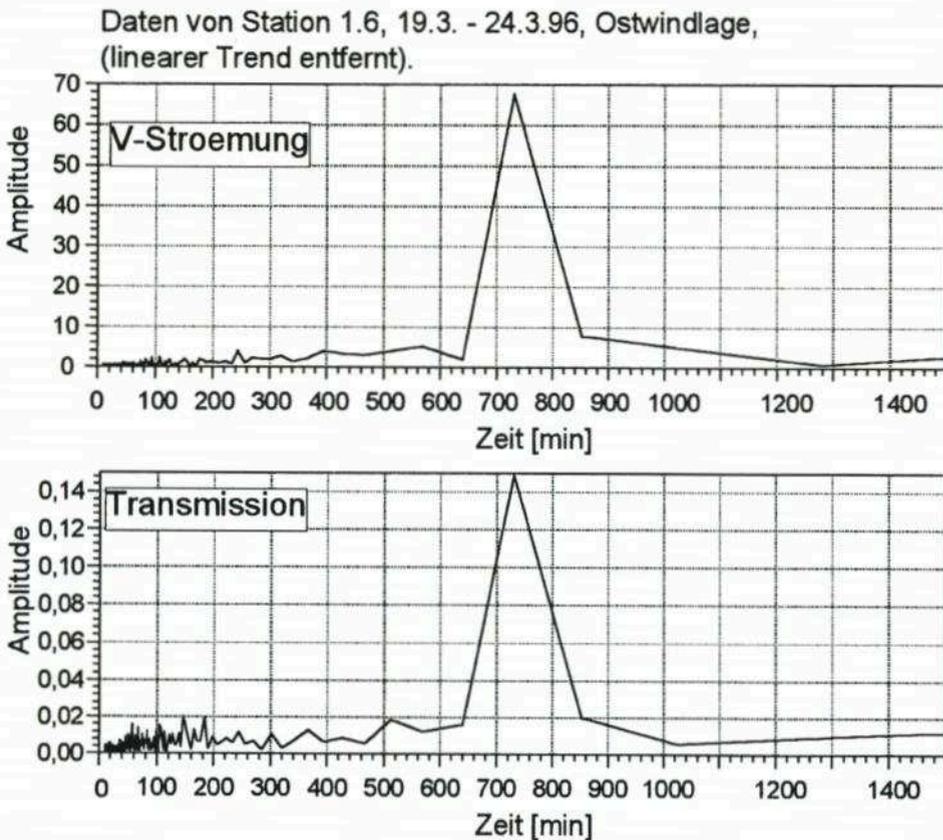


Abb. 7: Periodogramme der Strömungsgeschwindigkeit und der optischen Transmission für Daten der Station 1.6 vom 19.-24. 3. 1996 (Ostwindlage)

tion schließt sich ab dem 26. 3. 1996 an die bereits beschriebene Ostwindphase an. Die dabei auftretenden Windrichtungen und -geschwindigkeiten sowie Wasserstände sind der Abb. 5 zu entnehmen. Die Auswirkungen auf das Strömungsgeschehen und den Schwebstofftransport zeigt die Abb. 8.

Bereits eine flüchtige Betrachtung des Verlaufs der Ganglinie der optischen Transmission (Abb. 8) läßt erkennen, wie stark die im Watt ablaufenden Transportprozesse vom Wind beeinflusst werden. Im Vergleich zur Ganglinie von Abb. 6 zeigt diese Kurve eine viel weniger gut ausgebildete Periodizität, eine größere Anzahl ausgeprägter Spitzen und wirkt insgesamt deutlich „verrauschter“. Dieser Verlauf weist darauf hin, daß für die Schwebstoffführung des Gewässers deutlich andere Prozesse verantwortlich gewesen sein müssen, als es bei der durch östliche Winde geprägten Situation (Abb. 6) der Fall war.

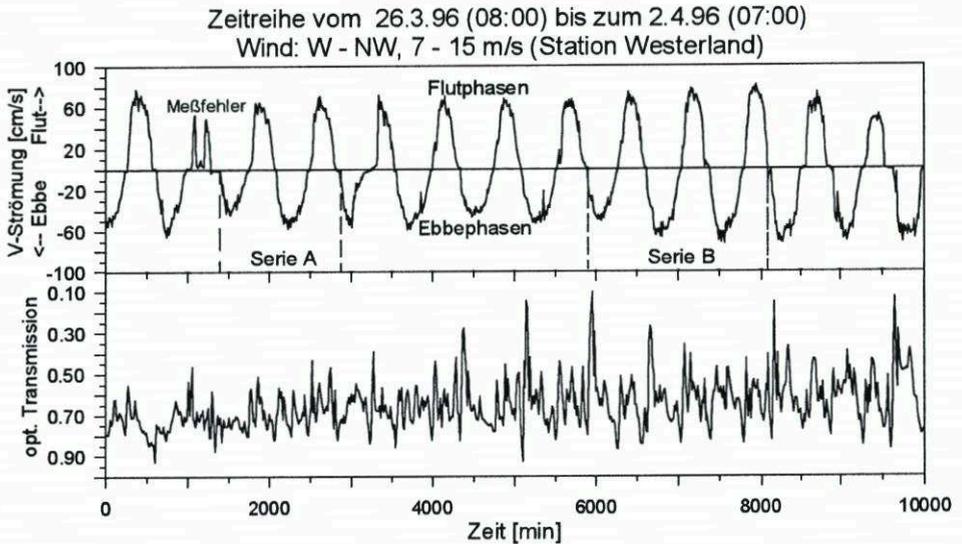


Abb. 8: Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und der optischen Transmission vom 26. 3. 1996 14:00 Uhr bis zum 2. 4. 96, 8:00 Uhr, Station 1.6

Bei der weiteren Analyse des Datensatzes wurde zwischen einer ersten Phase mit Winden aus westlicher (NW-W-SW) Richtung (26.–29. 3. 1996, Serie A in Abb.8) und einer zweiten mit Wind aus nahezu konstanter NNW-Richtung (29. 3.–2. 4. 1996, Serie B in Abb. 8) unterschieden. Besonders deutlich werden dabei die Unterschiede zwischen Serie A und Serie B durch die Ergebnisse der durchgeführten Zeitreihenanalysen wiedergegeben. Waren die Wassermassen- und Schwebstofftransporte bei Ostwind eindeutig durch Perioden von der Dauer einer Tide bestimmt (Abb. 7), so ist von dieser Dominanz bei der nachfolgenden Phase mit eher auflandigen Winden nichts mehr festzustellen. Besonders für die Meßreihe vom 26. bis 29. 3. 1996 (Serie A), die durch starke um West drehende Winde gekennzeichnet gewesen ist, wurden Periodizitäten berechnet, die nicht sinnvoll nachvollziehbar waren. Dies wird einerseits methodisch bedingt gewesen sein, da die Zeitreihe mit etwa 48 Stunden (entspricht 576 bzw. 514 Werten) sehr kurz war. Die „verrauschte“ Ganglinie läßt jedoch erkennen, daß bei stärkeren westlichen Winden offenbar aber auch eine größere Anzahl lokaler, kürzerperiodischer Prozesse bestimmend für den Schwebstofftransport sein müssen. Einige dieser Abläufe können ihre Ursache wiederum im Tidegeschehen haben. Beispielfhaft zu nennen sind

wiederkehrende Schwebstoffmaxima im Bereich der Kenterpunkte bei Flut und Ebbe oder auch solche, die auf die Phasen stärkster Tideströmungen zurückzuführen sind (Abb. 8).

Überlagert werden diese Vorgänge zusätzlich durch Mobilisierungsprozesse, die auf stärkeren Seegang zurückzuführen sind, wie er bei starken westlichen Winden im Hörnum-Tief auftritt und dort bei vergleichbaren Bedingungen im Rahmen des Projekts auch gemessen worden ist. Diese Effekte können einerseits extrem kurzperiodisch sein, wenn es zur Aufwirbelung von Sediment durch eine einzelne Welle kommt. Andererseits sind aber auch längerperiodische Auswirkungen des Seegangs denkbar, z. B. wenn es bei entsprechendem Wasserstand durch Brandung auf den Theeknopssänden zur Erosion und zur Verfrachtung von Feststoffen kommt. Weiterhin sind Materialunterschiede der suspendierten Stoffe mit in Betracht zu ziehen, da es beispielsweise durch unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten ebenfalls zur Maskierung bzw. Herausbildung periodischer Effekte kommen kann. Insgesamt führen also die bei stärkeren westlichen Winden eintretenden höheren Wasserstände und turbulenteren Bedingungen zu einer Vielzahl von kürzerperiodischen oder semiperiodischen Vorgängen, die sich bei der Auswertung in der Form einer „verrauschten Ganglinie“ bzw. eines wenig aussagekräftigen Periodogramms wiederfinden.

Mit abnehmendem Einfluß des Windes (Abb. 5) und des Seegangs gewinnen längerperiodische, deutlich tideabhängige Vorgänge erneut an Bedeutung (Abb. 9). Dies gilt beson-

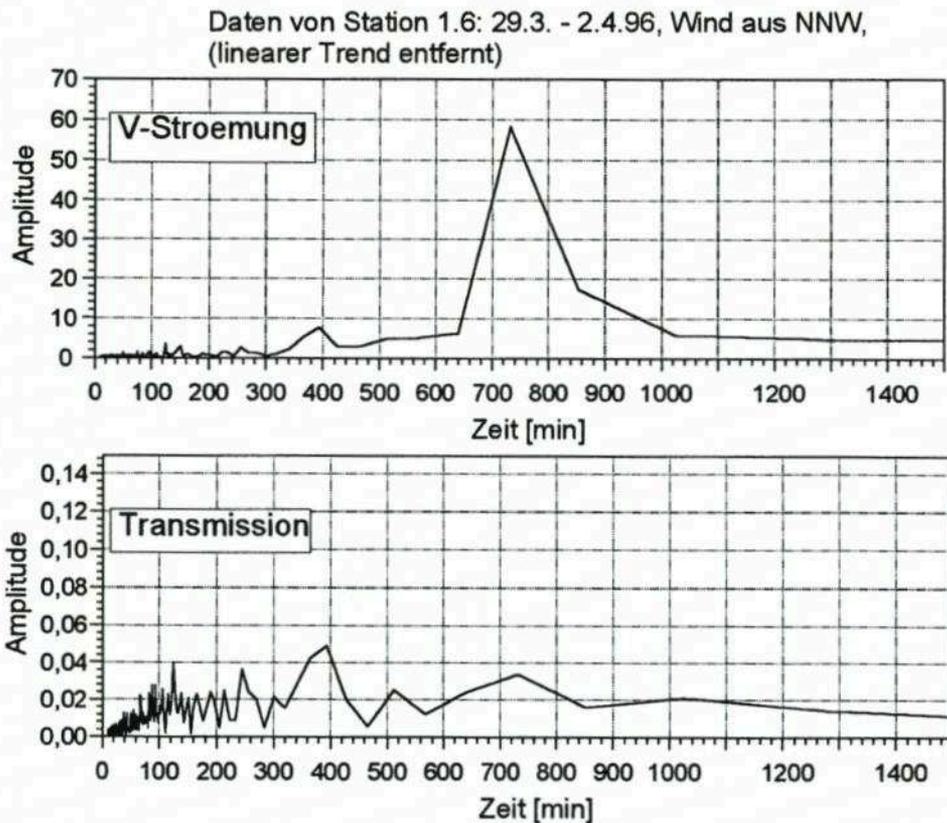


Abb. 9: Periodogramme der Strömungsgeschwindigkeit und der optischen Transmission für Daten der Station 1.6 vom 29. 3., 16:00–2. 4. 96, 7:40; NNW-liche Winde.

ders für die Strömungsgeschwindigkeit, deren zeitabhängige Variabilität wieder durch Perioden von der Dauer einer Tide bestimmt wird. Bei der Transmission ist dieser Einfluß ebenfalls erkennbar, allerdings deutlich schwächer ausgebildet. Die Veränderlichkeit der Schwebstoffführung des Gewässers wird vielmehr durch Periodenlängen in der Größenordnung einer Halbtide dominiert. Weiterhin ist im Periodogramm ein signifikantes Maximum zu erkennen, das auf Schwingungen mit einer typischen Dauer von etwa 240 Minuten hinweist. Periodenlängen dieser Größenordnung werden auf den Einfluß der M6-Gezeit zurückgeführt.

Obgleich viele der mit Hilfe der Fast Fourier Transformation berechneten Periodizitäten sich nicht ohne weiteres in den Zeitreihen wiederfinden lassen, ermöglicht es diese Methode dennoch, klarere Vorstellungen von den unter verschiedenen Turbulenzbedingungen in Tidegewässern (VAN DE KREEKE, DAY u. MULDER, 1997) ablaufenden Transportprozessen zu erlangen. Im speziellen Fall hat sich gezeigt, daß bei Ostwindlagen und entsprechend niedrigen Wasserständen der Schwebstofftransport im Hörnum-Tief durch advektive Transportvorgänge bestimmt wird, wobei entweder mit der Flut schwebstoffärmeres Nordseewasser oder mit der Ebbe schwebstoffreicherer Wasser aus den inneren Abschnitten des Tidebeckens an den Meßpunkt gelangt. Bei westlichen Starkwinden und besonders wenn es zu Stauwassersituationen kommt, gewinnen zunehmend andere Kräfte, im besonderen Maße der Seegang, Einfluß auf den Sedimenttransport. Die Ganglinien von Abb. 8 verdeutlichen die ganze Komplexität der dann ablaufenden Vorgänge. Die Kurven sind leider aber auch Sinnbild dafür, daß eine Entschlüsselung der Zusammenhänge mit den zur Verfügung stehenden Daten und analytischen Hilfsmitteln bislang nur ansatzweise möglich war.

3.2 Längs- und Querschnittsmessungen

Die Lage der Meßprofile sowie der einzelnen Meßpunkte ist schematisch in Abb. 1 wiedergegeben. Die tatsächliche Position der Meßpunkte kann davon allerdings um einige Zehnermeter bis maximal 100 m abweichen. Diese räumliche Unschärfe bei der Positionierung der Schiffe und damit bei der Lage der Profilmessungen ist ganz bewußt zu Gunsten einer möglichst kurzen Zeitspanne zwischen den einzelnen Messungen in Kauf genommen worden, weil davon ausgegangen wurde, daß bei der Erstellung eines Gewässerschnitts durch das Hörnum-Tief zeitlichen Abweichungen eine sehr viel größere Bedeutung zukommt, als solchen räumlichen Diskrepanzen von der Sollposition, die selten größer als einige Zehnermeter sind. Die Vorgehensweise der „ungefähren Positionierung“ ist somit auch der Grund dafür, daß die schematischen Bodenprofile der Schnitte, die auf der Basis der an den Orten der jeweiligen Trübungsmessung ermittelten Wassertiefen erstellt wurden, von Abb. zu Abb. etwas unterschiedlich ausfallen.

Das Wertespektrum der bei den Untersuchungen gemessenen Schwebstoffkonzentrationen reicht von wenigen Milligramm pro Liter bis zu etwa 100 mg/l. Insgesamt war die Frühjahrsmeßkampagne durch höhere Gehalte an suspendierten Sedimenten geprägt als die im Oktober durchgeführte. Dies gilt ganz besonders für den Querschnitt Hörnum-Amrum. Hier wurden im Herbst Konzentrationen im Bereich von etwa 3 bis 25 mg/l mit einem Schwerpunkt bei ungefähr 7–8 mg/l gemessen. Im Vergleich dazu betragen die Feststoffgehalte im März über weite Abschnitte des Querschnitts rund 30 mg/l, mit Minimalwerten von 10 mg/l und höchsten Konzentrationen von über 100 mg/l.

Im Bereich des Längsschnitts wurden während der Frühjahrsmessungen geringfügig niedrigere Gehalte als auf dem Querschnitt gemessen. Die niedrigsten Konzentrationen be-

trugen knapp 10 mg/l und vereinzelt wurden Höchstwerte von etwa 80 mg/l erreicht. Die Gehalte sind damit deutlich höher als zur Zeit der Herbstkampagne. Für diesen Zeitabschnitt waren Konzentrationen von kaum mehr als 10 mg/l bestimmend. Eine Ausnahme bildete lediglich eine Situation am 22. 10. 1996, als um Tideniedrigwasser herum der innere Teil des Hörnum-Tiefs von stark mit Schwebstoffen beladenem Wasser eingenommen wurde (über 100 mg/l).

Zusammenfassend betrachtet, entsprechen die niedrigsten der im Verlauf der Untersuchungen gemessenen Schwebstoffkonzentrationen den Gehalten, wie sie in der offenen Nordsee vorkommen (EISMA u. KALF, 1987). Die höheren Konzentrationen liegen in der Größenordnung, wie sie von RICKLEFS u. AUSTEN (1994) im Hörnum-Tief oder von PAFENHÖFER (1978), NOMMENSEN (1982) oder AUSTEN (1996) in anderen Bereichen des Nordfriesischen Wattenmeers gemessen worden sind.

Die vertikale Verteilung der Schwebstoffe unterliegt vielerlei situationsbedingten Schwankungen. Fast alle Messungen haben aber gezeigt, daß die tiefen Bereiche der Wattstromrinne eher durch geringere Konzentrationen und eine bessere Durchmischung gekennzeichnet sind. In den Abschnitten mit geringeren Wassertiefen kommen dagegen häufiger höhere Konzentrationen vor, und vertikale Gradienten sind stärker ausgebildet.

Die räumlichen und bezogen auf den Verlauf der Tide zeitlichen Verteilungen der Schwebstoffe zeigen einige oft wiederkehrende Eigenarten. Dazu gehört beispielsweise die unter durchschnittlichen Wetterbedingungen gut erkennbare Zerteilung des Querschnittes Amrum-Hörnum in einen westlichen, tieferen Teil mit geringeren Schwebstoffgehalten und einen östlichen Abschnitt mit geringeren Wassertiefen, der durch höhere Schwebstoffgehalte gekennzeichnet ist (Abb. 10).

Im Verlauf der Tide bleibt dieses Muster häufig erhalten, das gesamte Konzentrationsniveau erfährt aber Veränderungen in der Form, daß wenig vor und wenig nach Tideniedrigwasser die höchsten Gehalte an suspendierten Sedimenten vorkommen. Im Gegensatz dazu sind bei Tidehochwasser die Konzentrationen am geringsten. Die Entwicklungen der Schwebstoffgehalte zwischen beiden Extremen sind durch mehr oder minder graduelle Zu- bzw. Abnahmen der Konzentrationswerte geprägt, wobei kurzfristige Aufwirbelungen zu Zeiten stärkster Tideströmungen oder Sedimentationsprozesse am Kenterpunkt bei Ebbe zu geringen Variationen des generellen Verteilungsmusters führen. In diesem Muster spiegeln sich die schon weiter oben im Text erörterte großräumige Verteilung der suspendierten Sedimente mit geringen Konzentrationen in den seewärtigeren Bereichen und höheren Gehalten im inneren Teil der Wattenbucht wider. Tidebedingte, advektive Transportprozesse führen dann dazu, daß entweder klares Nordseewasser oder schwebstoffbeladenes Wattenmeerwasser durch den Querschnitt strömt.

Wie sich eine solche Situation im Längsschnitt darstellt, zeigt Abb. 11. Diese Messungen wurden bei schon wieder ruhigen Wetterbedingungen im Anschluß an eine Starkwindphase durchgeführt (Abb. 12).

Die ersten beiden Schnitte lassen erkennen, daß durch den Einfluß des Windes schwebstoffarmes Wasser weit in das Hörnum-Tief vorgedrungen ist. Im Verlauf der Ebbe erreichte dann über die Zuflüsse aus dem inneren Hörnum-Tief sowie über Westerley und Eidumtief (zweites Schwebstoffmaximum von Abb. 11D) stark mit Schwebstoffen beladenes Wasser die Rinne. Quelle dieser Sedimente waren die höheren Wattflächen, wo das Material in der vorangegangenen, windreichen Nacht erodiert worden ist. In der Rinne angekommen verblieben die Feststoffe allerdings nicht lange in Suspension, sondern sanken zum Teil dort bereits wieder zu Boden. Die am darauffolgenden Tag gemessenen Konzentrationen wiesen daher kaum höhere Gehalte als 30 mg/l auf.

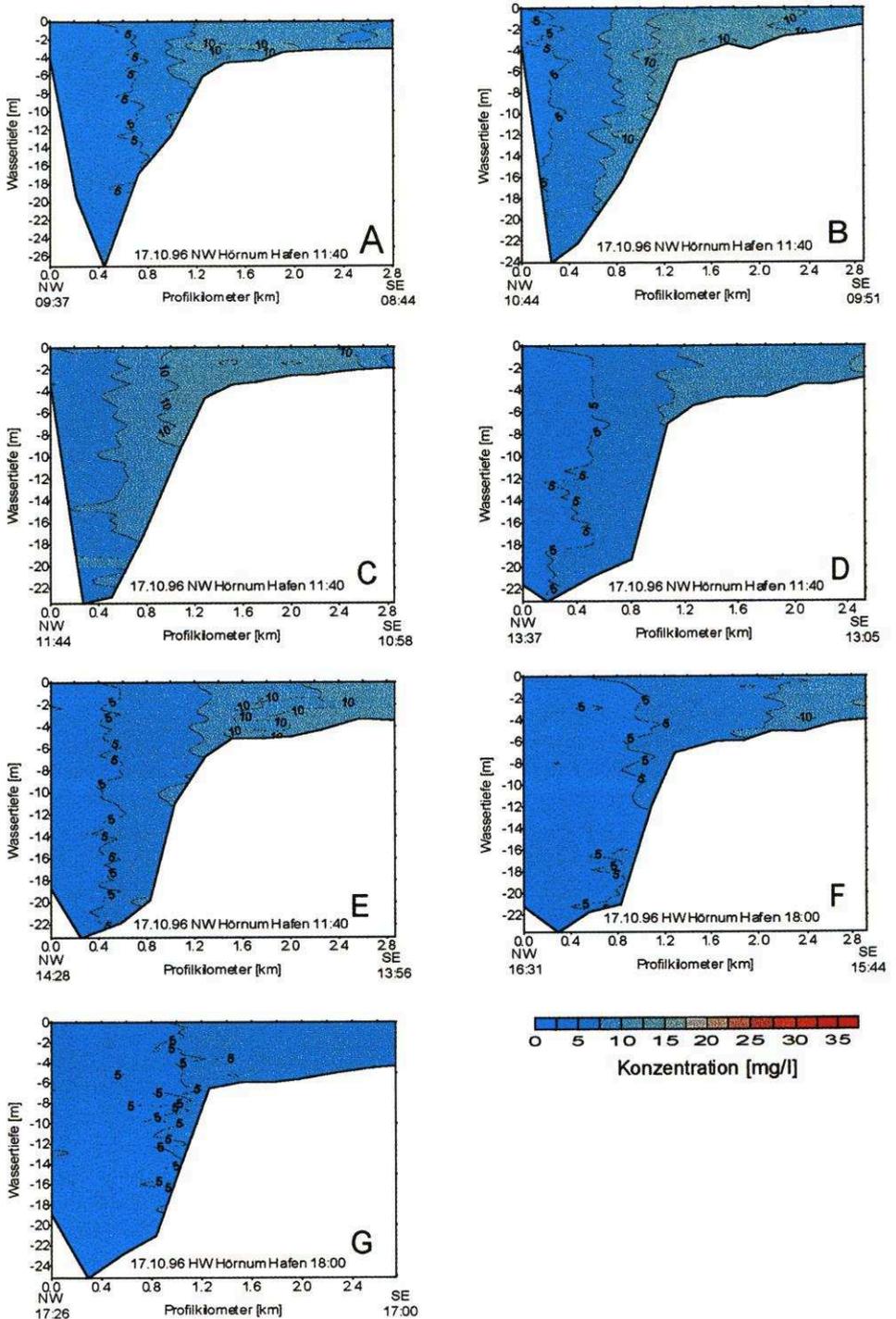


Abb. 10: Schwebstoffverteilung Profil Hörnum-Amrum, 17. 10. 1996, Schnitte etwa 2,5 h vor Tnw bis 1 h nach Thw, Zeiten in MESZ

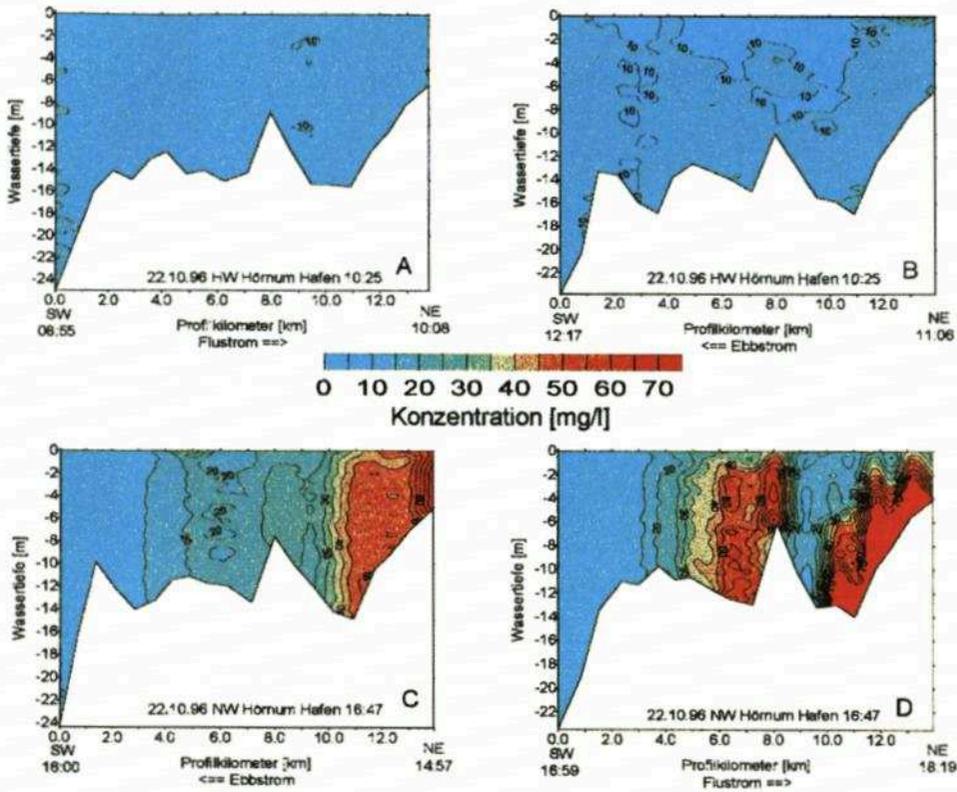


Abb. 11: Schwebstoffverteilung Längsschnitt durch das Hörnum-Tief, 22. 10. 1996, erster Schnitt etwa 1 h vor Thw, letzter Schnitt etwa 30 min nach Tnw, Zeiten in MESZ

Verteilungsmuster der beschriebenen Form treten immer dann auf, wenn die Transporte der feinkörnigen Sedimente im wesentlichen von den Tideströmungen abhängen. Werden diese Transportprozesse zusätzlich von Einflüssen stärkeren Seegangs überlagert, kann es zu einer gravierenden Umgestaltung der Verteilungsmuster kommen. Ein sehr anschauliches Beispiel für eine derartige Situation zeigt die Abb. 13. Dargestellt ist eine Serie von sieben Schnitten, wobei der erste die Verhältnisse knapp drei Stunden nach Tidehochwasser wiedergibt und der letzte Schnitt die Schwebstoffverteilung rund drei Stunden nach dem rechnerischen Tideniedrigwasser am Pegel Hörnum aufzeigt. Weitere Messungen konnten an diesem 27. 3. 1996 nicht durchgeführt werden, da am späten Nachmittag zu starker Seegang herrschte.

Im Vergleich zur Serie vom 18. 10. 1996 (Abb. 10) fällt auf, daß nicht nur auf dem Flach vor Amrum relativ hohe Konzentrationen vorkommen, sondern ganz besonders auch auf der Westseite der Rinne, am steilen Hang zur Hörnum-Odde und zu den Theeknopssänden. Die ausgeprägten Schwebstoffwolken am Süden der Sylts treten allerdings nur bei Wasserständen auf, die ab etwa halber Tide erreicht werden (Schnitt A, B, F und G in Abb. 13). Erst dann sind die Wassertiefenverhältnisse auf den Sänden derart, daß es bei ausreichend starken westlichen Winden durch intensive Brandung zur Mobilisierung von Sedimenten kommt. Wie die Meßergebnisse belegen, wird das so in Bewegung gebrachte Material durch Brandungs-, Trift- und Tideströmungen zusätzlich einige hundert Meter weit in den Querschnitt der Ge-

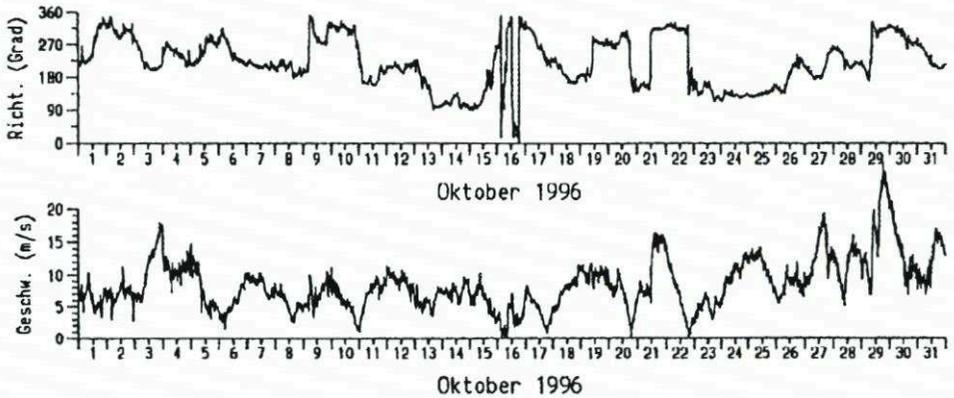


Abb. 12: Windrichtung und Windstärke für den Oktober 1996 an der Station Westerland

zeitenrinne eingetragen. Die sich in diesem Zusammenhang und im Hinblick auf die morphologische Stabilität der Hörnum-Odde aufdrängende Frage, ob diese Sedimente von den Tideströmungen in der Rinne weitertransportiert werden, ist auf der Basis der vorhandenen Ergebnisse leider nicht zu klären. Auch die Auswertung der Längsschnittmessungen gibt hierüber keinen Aufschluß, da die auf der Westseite der Rinne beobachteten Schwebstoffwolken nur in ganz wenigen Ausnahmefällen am seewärtigsten Rand der Längsschnitte in Erscheinung traten. Denkbar ist jedoch, daß das Material, ausgehend vom Westhang der Rinne, einem Transportband folgt, das durch den eher in der Rinnenmitte verlaufenden Längsschnitt nicht berührt wird.

Das Verteilungsmuster entlang der Längsschnitte zeigte sich, zumindest bei den während der Meßkampagnen erfaßten Starkwindereignissen, relativ unbeeinflusst von Seegangseinflüssen. Erhöhte Konzentrationen waren, solange noch gemessen werden konnte, nicht feststellbar. Im Fall des 21. 10. 1996, als seegangbedingt nur noch auf dem Längsprofil gearbeitet werden konnte, traten gleichförmig über den gesamten Schnitt sogar nur außergewöhnlich geringe Konzentrationen auf. Der sonst vorzufindende laterale Gradient der Schwebstoffverteilung war nicht vorhanden. Er bildet sich erst wieder aus, wenn, wie bereits beschrieben, bei nachlassendem Windeinfluß das schwebstoffreiche Wattenwasser in die Rinne drängt (Abb. 11). Dieses Ergebnis deckt sich gut mit Erfahrungen aus dem Nordsylder Wattenmeer (AUSTEN, 1996).

Der Einfluß des Seegangs wirkt sich aber nicht nur auf das räumliche Verteilungsmuster der suspendierten Sedimente aus, sondern führt auch zu einer gravierenden Überprägung der zeitabhängigen Schwebstoffführung, die, wie sie bereits beschrieben, durch den Wechsel der Tideströmungen und die großräumige Schwebstoffverteilung bestimmt wird. Ein anschauliches Beispiel dafür liefert wiederum die Abb. 13. Sie zeigt, daß im Bereich des Meßquerschnitts die höchsten Konzentrationen nicht mehr wie bei durchschnittlichen Wetterlagen in der zeitlichen Nähe zum Tideniedrigwasser vorkommen. Sie treten vielmehr dann auf, wenn bei entsprechendem Wind und Wasserstand die Brandung auf den Theeknopssänden zur Aufwirbelung und zum Transport von Sedimenten führt. Eine genauere zeitliche Zuordnung zum generellen Verlauf der Tide soll hier allerdings unterbleiben. Ihre Gültigkeit wäre lediglich auf den jeweils untersuchten Einzelfall beschränkt, da durch das Wechselspiel verschiedenster Einflußgrößen, wie Windrichtung, Windstärke, Windwirkdauer, Windstauverhältnisse, Tidephase, lunarer Tidezyklus, örtliche Exposition, differierende Materialzusammen-

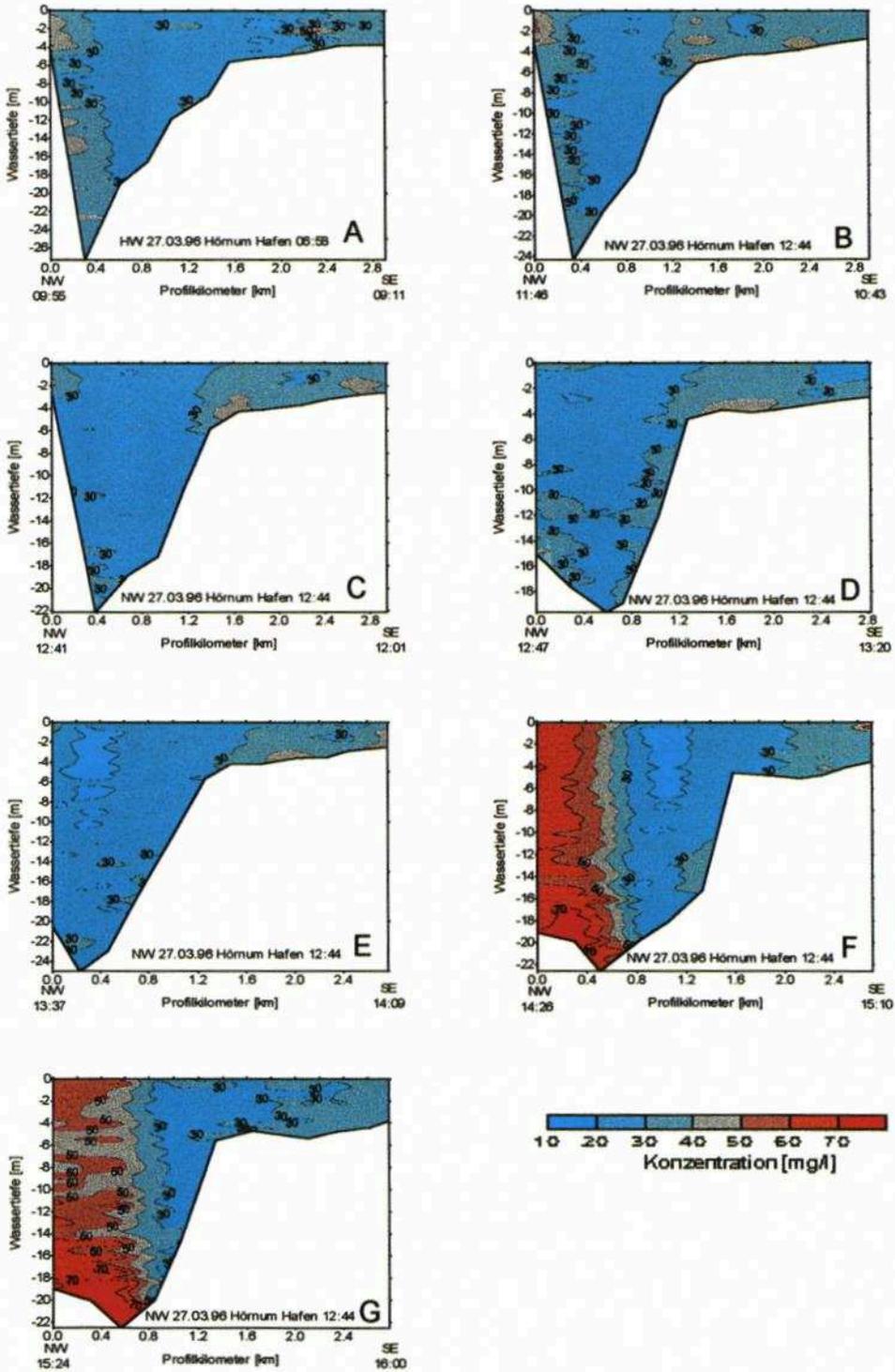


Abb. 13: Schwebstoffverteilung Profil Hörnum-Amrum, 27. 3. 1996, Schnitte von etwa 3 h vor Tnw bis 3 h nach Tnw, Zeiten in MESZ

setzung usw. ein derart komplexes Wirkgefüge entsteht, das derzeit sowohl qualitativ als auch quantitativ nur unzureichend zu beschreiben ist.

Neben den zeitlich, raum-zeitlich und seegangsbedingten Variationen der Schwebstoffführung des Gewässers kommen auch solche Effekte vor, die an bestimmte Lokalitäten gebunden zu sein scheinen. Dazu gehört z. B. das fast immer im Mittelabschnitt des Längsschnitts zu beobachtende Schwebstoffmaximum (z. B. in Abb. 11). Dieser Bereich der Wattstromrinne, wo der innere Abschnitt des Hörnum-Tiefs, die gemeinsame Rinne von Wester- und Osterley und das Eidumtief zusammentreffen, zeichnet sich durch vergleichsweise geringe Wassertiefen und feinkörnigere Rinnensedimente aus (AHRENDT, 1992). Die Tatsache, daß hier bei allen Messungen eine Anreicherung von suspendierten Sedimenten festgestellt wurde, scheint darauf hinzuweisen, daß durch die sich aufspaltenden oder auch zusammenfließenden Strömungen der Turbulenzgrad im Wasser hoch sein muß. Diese Vermutung deckt sich zudem gut mit Erfahrungen, die während der Schiffsmessungen gesammelt wurden. So waren in diesem Abschnitt ausgeprägte Schwebstoffwolken, Übergangszonen zwischen verschiedenen Wasserkörpern (Fronten bzw. Stromkanten) und Bereiche mit „Kabelwasser“ zu beobachten. Erhöhte Turbulenz, sich überlagernde Transportbahnen der Nebenrinnen sowie die Verbreitung vergleichsweise feinkörniger Sedimente scheinen somit für die Ausbildung dieser relativ ortsfesten Trübungszone verantwortlich zu sein.

Erhöhte Turbulenz ist vermutlich auch der Grund für ein weiteres, häufig auf dem Flach vor der Insel Amrum anzutreffendes Schwebstoffmaximum. Es nimmt in wechselnder Ausbildung mal den gesamten Flachwasserabschnitt ein, häufig konzentriert es sich jedoch auf den Übergangsbereich von der tiefen Rinne zum flachen Wasser (Abb. 10, 13). Welche Kräfte hier für die Anreicherung von Schwebstoffen verantwortlich sind, konnte auf der Basis der vorhandenen Daten nicht geklärt werden. Denkbar sind einerseits seegangsbedingte, turbulente Aufwirbelungsvorgänge, deren Intensität besonders am Übergang vom tiefen zum flachen Wasser vergleichsweise hoch sein sollte. Andererseits tritt dieses Phänomen auch bei ruhigen Bedingungen auf und zeigt eine gewisse tideabhängige Variabilität in der Form der Ausbildung. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, daß der Randbereich der Rinne eine Übergangszone zu ausgedehnten Flachwassergebieten bildet, Abschnitten also, die im Wattenmeer oft durch höhere Schwebstoffgehalte gekennzeichnet sind. So könnte es im Grenzbereich zwischen den Wassermassen der Rinne und des Flachs zu advektiven, tidegesteuerten Bewegungen kommen, wie sie beispielsweise im Bereich einer Front oder Stromkante auftreten. Die Ergebnisse der Strömungsmessungen, wie sie bei ROSS (1998) vorgestellt werden, lassen allerdings keine ausgeprägten Unterschiede am Rande der Amrumer Schulter erkennen. Die Entwicklung vom tieferen zum flacheren Wasser hin ist vielmehr sowohl bei Ebbe als auch bei Flut durch eine graduell gleichförmige Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten geprägt.

3.3 Schlußfolgerungen

Zusammenfassend betrachtet, haben die Ergebnisse gezeigt, daß das großräumige Schwebstoffverteilungsmuster im Hörnum-Tief in der für Wattgebiete typischen Weise aufgebaut ist. Die niedrigsten Konzentrationen kommen in den seewärtigeren Bereichen vor, während die inneren Abschnitte durch höhere Feststoffgehalte gekennzeichnet sind. Dieses Verteilungsmuster ist das Ergebnis tidebedingter Anreicherungsprozesse, wie sie zusammenfassend von DRONKERS (1984) beschrieben werden.

Darüber hinaus hängen räumliche Verteilung und Gehalt an suspendierten Sedimenten von zahlreichen, sich überlagernden, teils periodischen und teils zufälligen Prozessen ab.

Eine Charakterisierung kurzperiodischer Vorgänge, wie sie beispielsweise durch Seegang (einzelne Welle oder Wellengruppe) hervorgerufen werden, oder von Effekten, die zufällig eingetreten sind, ist aufgrund der komplexen Wirkgefüge generell äußerst schwierig, bzw. auf der Basis der vorhandenen Meßergebnisse nicht möglich. Die erarbeiteten Resultate geben aber durchaus Aufschluß über einige längerperiodische Abläufe bzw. über einige wiederkehrende Eigenarten der Schwebstoffverteilung, die an örtliche Besonderheiten geknüpft sind.

Der wohl wichtigste längerperiodische Prozeß, der das Verteilungsmuster der Schwebstoffe prägt, ist der Transport durch die Tideströmungen. Mit Hilfe der verschiedenen Analyseverfahren (z. B. Zeitreihenanalysen) konnte eine advective Transportkomponente herausgearbeitet werden, deren Periode vergleichbar mit der einer Tide ist. Ihr Anteil am Feststoffgehalt ist auf die großräumige Verfrachtung von Wassermassen zurückzuführen, die in unterschiedlichem Maße mit Feststoffen beladen sind. Die advective Transportkomponente wird überlagert von ebenfalls tidebedingten, allerdings kürzerperiodischen Sedimentations- und Resuspensionsvorgängen, welche in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit zu lokalen Änderungen der Schwebstoffkonzentration beitragen. Beide Vorgänge konnten durch die Messungen als charakteristische Eigenschaften des Transports feinkörniger Sedimente erfaßt und beschrieben werden.

Zu den wiederkehrenden, jedoch nur mittelbar tidebedingten Eigenarten des Schwebstofftransports ist ebenfalls die Mobilisierung von Sedimenten durch Brandung auf den Theeknopssänden zu rechnen. Durch diesen Vorgang, der von Seegang und Wasserstand abhängig ist, werden sowohl feinkörnige Schwebstoffe als auch gröberkörnige Sande (AHRENDT, 1992) in das Hörnum-Tief verfrachtet.

Lokale Eigenarten sind es auch, die dort, wo der innere Abschnitt des Hörnum-Tiefs, die gemeinsame Rinne von Wester- und Osterley und das Eidumtief zusammentreffen sowie am Rande der Amrumer Schulter immer wieder zu Anreicherungen von suspendierten Sedimenten führen. Die übergreifende Interpretation der Meßergebnisse hat gezeigt, daß diese beiden Trübungsmaxima sowie die zuvor beschriebene seegangsbedingte Mobilisierung von Sedimenten als kennzeichnende Eigenarten der Schwebstoffverteilung zu beschreiben sind.

Die meist geringe Schwebstofffracht, die darüber hinaus nur nachrangig von der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit am Meßort abhängig ist, sowie die bei AHRENDT (1992) beschriebene weiträumige Verbreitung von gröberkörnigen Sanden, die in weiten Abschnitten des Hörnum-Tiefs größere Sohltransportkörper aufbauen, weist darauf hin, daß zwischen anstehenden Rinnensedimenten und Suspensionsfracht ein nur geringer Austausch stattfindet.

4. Danksagung

Abschließend möchte ich allen Kollegen im Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum und im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie den Besatzungen der Schiffe „Südfall“, „Oland“ und „Habel“ für die engagierte Zusammenarbeit danken.

5. Schriftenverzeichnis

- AHRENDT, K.: Entwicklung und Sedimenthabitus des Hörnum- und Vortrappiefs. *Meyniana*, 44: 53–65, 1992.
- AUSTEN, G.: Qualitative und quantitative Untersuchungen an Schwebstoffen im Sylt-Réme Wattenmeer. *Berichte, Forsch.- u. Technologiezentrum Westküste d. Univ. Kiel*, 11: 1–160, 1996.

- AUSTEN, G., FANGER, H.-U., KAPPENBERG, J., MÜLLER, A., PEJRUP, M., RICKLEFS, K., ROSS, J. u. WITTE, G.: Schwebstofftransport im Sylt-Rømø-Tidebecken: Messungen und Modellierungen. – In: GÄTJE, Ch. & REISE, K. [Hrsg]: Ökosystem Wattenmeer. Austausch-, Transport-, und Stoffumwandlungsprozesse (Springer, Berlin), 185–214, 1998.
- DRONKERS, J.: Import of fine marine sediments in tidal basins. Neth. Inst. Sea Res. Publ. Series, 10: 83–105, 1984.
- EISMA, D. u. KALF, J.: Distribution, organic content and particle size of suspended matter in the North Sea. Neth. J. Sea Res., 21: 265–285, 1987.
- VAN DE KREEKE, J., DAY, C. M. and MULDER, H. P. J.: Tidal variations in suspended sediment concentration in the Ems estuary: origin and resulting sediment flux. J. Sea Res., 38: 1–16, 1997.
- NOMMENSEN, B.: Die Sedimente des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht). Diss. Univ. Kiel: 268 S., 1982.
- OHM, K.: Optische Messungen zur Bestimmung von Schwebstofftransporten. Die Küste, H. 42: 227–236, 1985.
- PAFFENHÖFER, G.-A.: Concentration of particulate matter in the North Frisian Wadden Sea. Helgoländer wiss. Meeresunters, 31: 367–379, 1978.
- PEJRUP, M.: Suspended sediment transport across a tidal flat. Marine Geology, 82: 187–198, 1988.
- POSTMA, H.: Sediment transport and sedimentation. In: OLAUSSON, E. u. CATO, I. [Hrsg.]: Chemistry and biochemistry of estuaries: 153–183, 1980.
- RICKLEFS, K.: Near bottom measurements of waves, currents and turbidity in a muddy tidal flat environment. Forschungszentrum Terramare Berichte, 2: 94–96, 1997.
- RICKLEFS, K. u. AUSTEN, G.: Ergebnisse von Schwebstoff- und Strömungsmessungen in den Rückseitenwatten der Insel Sylt (Nordsee/Deutsche Bucht). Meyniana, 46: 91–106, 1994.
- ROSS, J.: Die Strömungsverhältnisse zwischen Sylt und Amrum. Die Küste, *dieses Heft*: 117–139, 1998.
- SWAN, A. R. H. u. SANDILANDS, M.: Introduction to geological data analysis. Blackwell (London), 446 S., 1995.