

Luftbildkartierung von Schwimmerbahnen – Eine Methode zur iterativen Aufnahme von flächenhaften Strömungsverteilungen und ihr Vergleich zur punktuellen In-situ-Meßwertgewinnung

Von H.-J. DAMMSCHNEIDER

Zusammenfassung

Vergleichende Bewertungen von Geschwindigkeitsaufzeichnungen aus punktuellen In-situ-Einzelströmungsmessungen (Bergen-Strommesser) und zeitgleich/nahezu ortsidentisch-passierend aufgezeichneten Schwimmerbahnen, die aus einer iterativen positionsgenauen Luftbildkartierung gezogen wurden, zeigen häufiger größere Abweichungen voneinander. Die Begründung dafür liegt sowohl in sehr kleinräumigen naturbedingten Geschwindigkeitsscheerungen bzw. -längsprofilunterschieden, als auch in der systemimmanenten Art der Datengewinnung. In-situ-Meßgeräte, hier jene des Typs „Aanderaa-RCM4“, zeichnen primär Strömungsbedingungen und deren zeitliche Änderung an einem definierten Ort auf, verrechnen jedoch (physikalisch korrekt) den turbulenten Einfluß von Walzenstrukturen zu „mittleren“ Geschwindigkeiten. Demgegenüber ist für Schwimmermessungen in ästuarinen Flachwasserbereichen typisch, daß offensichtlich die innerhalb des Wasserkörpers in unterschiedlicher Intensität und räumlicher Verteilung vorhandenen turbulenten Pulse bzw. Walzen die Eigenbewegung der Treibkörper beschleunigen können. Dadurch weisen Schwimmer in Relation zu punktuellen Geschwindigkeitsaufzeichnungen höhere Transporttempi auf und charakterisieren damit deutlicher als die „mittleren“ Geschwindigkeiten der Punktmeßgeräte die tatsächliche, flächenhaft stark wechselnde morphodynamische „Belastung“ des Meßgebietes.

Für die Anwendung im coastal engineering bedeuten diese Erkenntnisse, daß für Zeitreihenuntersuchungen der Strömungs- und Durchflußbedingungen eines wiederholt zu messenden Punktes Einzelmeßgeräte nach wie vor die beste Methode darstellen. Für raumbezogene „Belastungs“-Analysen, speziell Betrachtungen von Materialumlagerungen, ist nach Ansicht des Verfassers jedoch die begleitende ortsgenaue Aufzeichnung von Schwimmerbahnen und deren Fortschrittsgeschwindigkeit notwendig. Letzteres kann mit sehr gutem Erfolg durch eine großräumige, in schneller zeitlicher Folge (iterativ) angesetzte Luftbildkartierung geschehen. Bedingung ist der Einsatz einer größeren Anzahl von Schwimmern bzw. Schwimmergruppen, die zeitlich gestaffelt eingesetzt werden. Die Treibkörper dürfen dabei trotz großer Oberfläche allerdings keine Windangriffsfläche bieten. Die in vorliegender Untersuchung eingesetzten „DÜBER“-Schwimmer erfüllen diesen Anspruch bei geringen Baukosten in sehr guter Weise.

Summary

Large differences were often found between currents measured with individual current meters (Bergen current meter) and simultaneous almost spatially identical drogue measurements which were evaluated using iterative, precise position aerial mapping. The differences lie both in small scale naturally occurring shear flow and longitudinal profiles as well as in systematic effects associated with the data collection. In situ instruments, here "Aanderaa-RCM4", measure primarily current conditions and their temporal changes at a specific location. Turbulent fluctuations are dampened in the "mean velocity" (which is physically correct). On the other hand drogues, especially in shallow water reaches of estuaries, can apparently be accelerated by turbulent pulses or eddies. For this reason drogues show higher transport rates in relation to point measurements and indicate the highly variable morpho-dynamic characteristics of the measurement area.

For this reason point measurements remain the best method for determining the time dependent velocities at a given location. In the author's opinion, parallel drogue surveys are

necessary for spacial analysis, especially for questions on material redistribution. This can be efficiently accomplished by using large scale iterative aerial photography and subsequent mapping. A prerequisite is the use of a large number of drogues and drogue groups in a time staggered manner. The submerged portion can have a large area but the area affected by wind must be small. The "DÜBER Drogue" used in this study satisfies these criteria well while keeping the construction cost low.

Inhalt

1. Einleitung	306
2. Untersuchungsgebiet – die Unterelbe	309
3. Luftbildkartierung von Schwimmbahnen	309
3.1 Grundlagen	309
3.2 Ablauf der Befliegung	315
3.3 Ergebnisse	316
3.3.1 Lokale Strömungsfelder	316
3.3.2 Räumliche Strömungsbelastung	321
4. Punktuelle Strömungsmessungen	326
4.1 Grundlagen	326
4.2 Ergebnisse am Beispiel „Krautsander Watt“	328
5. Raumbewertung nach Meßdatenvergleich – systembedingte Widersprüche?	329
5.1 Flächenhafte und punktuelle Strömung	329
5.2 Turbulenz und Massenbewegung	331
6. Fazit	333
7. Schriftenverzeichnis	334

1. Einleitung

Die Erfassung des Sandtransportes, eine zentrale Aufgabe angewandter Küstenforschung, gibt dem damit betrauten „coastal engineering“ traditionsgemäß die größten Probleme auf. Denn in Verbindung mit der Gebietsgröße sind die in einem weitflächigen Ästuar oder dem Küstenvorfeld herrschenden dreidimensionalen Bewegungsvorgänge der turbulenten Strömung außerordentlich unübersichtlich. Darüber hinaus handelt es sich bei allen Massenbewegungen des Küstenraumes in jedem Fall um unmittelbare alternierende Umlagerungen des Wasserkörpers, deren Quantität, Richtung und Geschwindigkeit auch noch innerhalb der jeweils herrschenden Tidephase wechselnd bzw. instationär ist.

In Anwendung auf den Materialtransport kann das Vorhandensein von Sedimentumlagerungen am augenfälligsten über den meist sehr raschen Eintritt von unerwünschten Mindertiefen im Bereich von Schifffahrtsrinnen wahrgenommen werden. Inhaltlich-naturbezogen bedeutet dies, daß von Tide zu Tide in lokal unterschiedlicher Verteilung große Feststoffmengen unkontrolliert umgesetzt werden. Der Hinweis auf Materialeintrieb in Fahrrinnen impliziert, daß zur Erhaltung der für die Schifffahrt erforderlichen Solltiefen beispielsweise allein im Bereich der Unter- und Außenelbe Jahr für Jahr mit großem logistischen Aufwand rd. 10 Mill. m³ Sedimente aus der Fahrrinne gebaggert werden müssen – finanziert durch öffentliche Mittel.

Die sich sofort anschließende Frage nach Möglichkeiten zur Minimierung der kostenintensiven Baggerungen geht in erster Linie an den gewässerkundlichen Meßdienst. Letzterer steht in der Verpflichtung, einen wissenschaftlich einwandfreien und gleichzeitig praktikablen (= küstenedäquaten) Ansatz zur Erforschung und Klärung der im Hintergrund stehenden großräumigen dynamischen Vorgänge aufzuzeigen.

Zur Zeit beharrt die verfügbare ästuarine Meßtechnik methodisch jedoch noch überwie-

gend auf ortsfester, punktueller Datenaufnahme. Ein besonderes Beispiel dafür liefert die im Mittelpunkt jeder Küsten- und Materialbewegungsforschung stehende Strömungskartierung. Praktisch keine Untersuchung über Einfluß und Folgen wasserbaulicher Unternehmungen im Tidegebiet kommt ohne das Mittel der gezielten, ortsvorgewählten In-situ-Strömungsmessung aus. Dabei ist es allerdings recht problematisch, aus den punktuell gewonnenen Daten stationärer Meßeinrichtungen auf das Verhalten eines flächenhaften instationären Vorgangs zu schließen, sprich: der alternierenden An- und Überströmung einer definierten Gebietseinheit und der damit verbundenen Materialumlagerung „im Wechselschritt“.

In diesem Sinne scheint es dringende Notwendigkeit, eine die Festpunktmethode ergänzende Strömungsaufnahme einzuführen, die bei flächenhafter dynamischer Datenerhebung gebietsbezogene Sohlenbelastungs- und Umlagerungshinweise liefert. Der Blick fällt dabei auf die Kartierung von Schwimmerbahnen, unter der Bedingung, daß diese Vorgehensweise

- a) nicht mit Einzelschwimmern, sondern Gruppen von Treibkörpern
- b) nicht eng begrenzt, sondern über einen größeren Raum in flächendeckender Manier
- c) im gesamten Gebiet zeitgleich in kurzen Zeitschritten (iterativ) über eine volle Tide bzw. Halb tide

durchgeführt wird. Nach Kenntnis des Verfassers wurde jedoch bisher dieses potentielle Arbeitsmittel in der vorstehend geforderten Form nicht angewendet, obwohl Schwimmermessungen in der Küstenforschung grundsätzlich seit langer Zeit üblich sind*. Der Grund liegt darin, daß es nicht möglich war, außer einer qualitativen Wegaufnahme von Schwimmern auch die Geschwindigkeiten mehrerer Treibkörper simultan über Zeit und Raum kontinuierlich und lageexakt zu kartieren. Das aber ist im Tide- und Küstengebiet unabdingbare Voraussetzung einer schlüssigen Analyse raumdynamischer Prozessabläufe.

Daraus ableitend wurde bei vorliegender Untersuchung folgende Zielvorgabe formuliert: Es sollen zur Stützung der in einem morphologischen Problemgebiet anstehenden dynamischen Bewertungen die Methoden

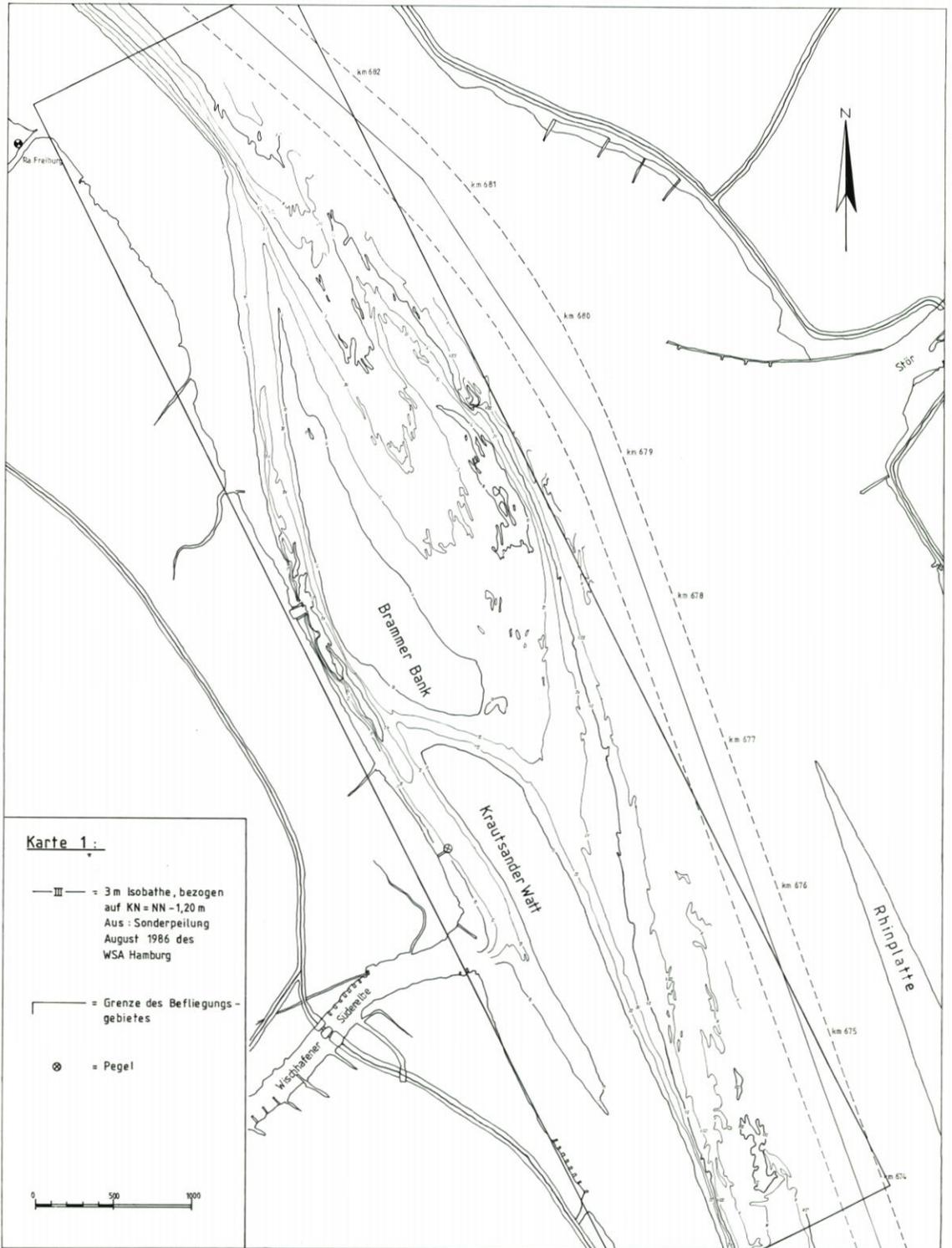
- konventionelle punktuelle Strömungsmessung

und

- flächenhafte Schwimmerkartierung durch periodische Luftbildaufnahme in schneller zeitlicher Folge

parallel eingesetzt und verglichen werden. Dabei gilt es, für eine größere Anzahl von auf dem Wasser freibeweglichen Treibkörpern ein geeignetes Luftbildkartierverfahren technisch vorzubereiten und zu erproben. Gleichzeitig ist eine Überprüfung der Raumaussagesicherheit und der Qualität beider Methoden in gemeinsamer Kopplung vorzunehmen. Angestrebt wird, problemorientiert-praktische Fragestellungen zum Verhalten eines konkreten Untersuchungsgebietes zu klären und dabei parallel, quasi „nebenbei“ einen methodischen Vergleich zwischen einer wie oben geforderten flächenhaften Meßstrategie (Schwimmer) und einer punktuellen Datenaufnahme (Einzel-Strömungsmeßgerät) herzustellen. Beide Methoden werden im Ergebnis bewertet und mit vorhandenen Informationen (quantitativer und qualitativer Art) korreliert.

* Die Namensliste herausragender und i. S. vorliegender Veröffentlichung thematisch verwandt arbeitender Küstenforscher reicht von B. SCHULZ (1925), der bereits 1916 auf große Distanzen und in kleinen Zeitschritten Oberflächenschwimmer einmessen ließ, über W. HENSEN (1941), der in der Elbe umfangreiche Strömungskartierungen mit Treibkörpern durchführte, bis u. a. zu CHRISTIANSEN und RADTKE (1985), die in jüngster Zeit Schwimmermessungen im Hamburger Hafenbereich (Walzenströmungen) ansetzten.



2. Untersuchungsgebiet – die Unterelbe

Das Untersuchungsgebiet, an welchem die angewandte Überprüfung der Flächenwirksamkeit zweier sehr unterschiedlicher Strömungsmessmethoden stattfindet, liegt im Streckenbereich der Unterelbe, km 674 bis 682 (siehe Karte 1). Charakterisiert ist es zum einen durch die ca. vier Kilometer lange Zunge des Krautsander Watts, deren Wurzelzone sich bei km 673 befindet, und durch das nach unterstrom offene „Hufeisen“ der Brammerbank (km 677 – km 681). Strommittig der Hauptelbe, und damit die o. a. Sände seitlich passierend, verläuft die 13,5 m KN tiefe Fahrrinne „Cuxhaven“ – „Hamburg“.

Das Gebiet ist damit sowohl gekennzeichnet durch einen weitestgehend unbeeinflussten Naturraum (= die Sände der Brammerbank und des Krautsander Watts), als auch durch einen von Baggerungen betroffenen Seeverkehrsweg (= Fahrrinne der Unterelbe). Probleme ergeben sich in dieser Zone des Elbeästuars dadurch, daß die Watten und Sände frei von menschlichen Eingriffen (naturbelassen) bleiben sollen, zum anderen jedoch die Morphodynamik dieser Flachwasserareale die benachbarte Fahrrinne negativ berührt: Nach vielen Indizien gilt der Bereich Brammerbank/Krautsander Watt als eine der „Quellen“ für Materialeintrieb in das Hauptelbe-Fahrwasser.

3. Luftbildkartierung von Schwimmbahnen

3.1 Grundlagen

Zur Erhaltung eines auch in Zukunft störungsfreien und leichten Schiffsverkehrs wurde also als „Vorsorgeuntersuchung“ eine schlüssige Bewertung des Naturkomplexes Brammerbank – Krautsander Watt und seines potentiell zu erwartenden Verhaltens gefordert. Wie erwähnt, spielt dabei eine große Rolle, daß das Untersuchungsgebiet in enger Nachbarschaft zu einem vom Verfasser bereits mehrfach beschriebenen Fahrrinnen-Mindertiefenbereich steht – der Baggerstelle „Rhinplatte“ (DAMMSCHNEIDER, 1986). Natürliche Materialumlagerungen in Verbindung mit bestimmten bevorzugten Transportbahnen lassen Vermutungen über die Kopplung zwischen dem hier untersuchten Gebiet der Brammerbank/des Krautsander Watts und der Baggerzone aufkommen. Gerade die räumliche Komponente ist deshalb bei der Wahl der Meßmethoden von größter Bedeutung in dieser Naturuntersuchung. Denn wie bereits angeführt, besteht auch hier das Problem der Küstenforschung in einer flächenhaften Beurteilung des Gesamtraumes.

Als Vorläufer dieser Untersuchung versuchten deshalb bereits BEHRENS und VAGTS (1985) im ersten Ansatz mittels Schwimmermessungen Aussagen zu potentiellen großräumigen Transportwegen im Untersuchungsgebiet zu finden. Aufgrund des zwar sehr guten, jedoch zahlenmäßig auf max. 6 Schwimmer beschränkten Verfahrens konnte noch keine Zeit-Raum-Deckung erreicht werden.

Ein von der Bundesanstalt für Wasserbau entwickeltes Schwimmermeßverfahren (COURTARD und JURISCH, 1986) weist die gleiche Schwäche auf, da bei dem verwendeten Ortungstachygraphen (AGA Geodimeter) nur ein Schwimmkörper über eine beschränkte Strecke (Sichtweite!) verfolgt werden kann. Die On-Line-Verbindung des Vermessungsgerätes mit einem Computer (HP 86B) erlaubt dann zwar die unmittelbare Umsetzung der Daten in eine kartographische Darstellung inkl. Geschwindigkeitsausdruck, jedoch ist dies Verfahren aus Praktikabilitätsgründen für einen Großraum wie Brammerbank/Krautsander Watt mit alternierenden Strömungsrichtungen nicht geeignet.

Aus diesem Grund mußte ein neues Verfahren gesucht werden, da auch die Möglichkeit der flächenhaften Schwimmererfassung mittels Radarbeobachtung für den in Sände und Untiefen gegliederten Untersuchungsraum keine ausreichende Lagegenauigkeit hätte erreichen lassen.

Gewählt wurde deshalb ein (hierfür) neues Arbeitsmittel, nämlich die Kartierung von Schwimmerpositionen vom Flugzeug aus (Luftbildkartierung). Durch eine iterative Befliegung des Raumes in Zeitintervallen von 5–10 Minuten sollten damit im Normalfall relativ leicht Treibbahnen konstruiert werden können.

Basis der Untersuchungsstrategie war also,

- a) die Voraussetzungen für eine kontinuierliche Überfliegung des Gebietes über eine volle Tide in Verbindung mit einer lagegenauen Objektbestimmung im Raum (auf dem Wasser) zu schaffen

und

- b) Schwimmer zu bauen, die ohne Windangriffsfläche luftbildkartierbar sind.

Beide Vorgaben waren zuvor in der geforderten Form noch nicht angegangen worden, so daß einige Grundlagen technischer Natur zunächst voruntersucht und erprobt werden mußten. Der Verfasser wurde bei dieser Arbeit unterstützt von Prof. Dr. F. Voss, der an der TU Berlin (Inst. f. Geographie) Vorüberlegungen zur Luftbildkartierbarkeit schwimmender Objekte anstellte und letztlich auch den Flugeinsatz selbst vornahm. Die gesamte Planung und Logistik, die In-situ-Messungen sowie die Datenauswertung wurden vom Verfasser und seinen Mitarbeitern des Wasser- und Schiffsamtes Hamburg durchgeführt.

Zu dem besonderen Zweck einer Luftbildkartierung mußten zunächst neuartige Schwimmkörper entwickelt werden, was innerhalb relativ kurzer Zeit in Form der sogenannten DÜBER-Schwimmer gelang (benannt nach ihrem Konstrukteur, siehe Abb. 1). Diese



Abb. 1: Luftbildkartierbarer DÜBER-Schwimmer im Tidestrom. Obwohl leicht von Wellen überspült, ist die Schwimmer-Nr. „34“ gut lesbar – auch im Luftbild

besitzen den Vorteil, trotz besonders großer horizontaler Abmessung (Luftbildauflösung) als Körper keine Windangriffsfläche zu bieten.

Die Schwimmkörper der gewünschten Art sollten so konstruiert sein, daß sie mit einfachen Hilfsmitteln schnell und ohne Mühe in größerer Anzahl gebaut werden können. Dazu wurde aus handelsüblichen PVC-Rohren (Durchmesser 7 cm, Steckverbindungen) ein Achteck mit einem Durchmesser von 2,5 m fabriziert. In der Mitte ist eine aus Aluminium bestehende verwindungsarme Metallplatte eingesetzt, die mit Schellen an der Rohrkonstruktion befestigt wird und die Gesamtstabilität herstellt. Im Zentrum befindet sich, in der Tiefe variabel einstellbar, ein konventionelles Treibkreuz bzw. vier Anströmbleche mit einer Anströmfläche von 2000 cm². Als Luftbildreflektor dient die auf der Oberseite aufgesetzte Aluminiumplatte, welche in ihrer Mitte bzw. in Verlängerung der Treibkreuzbefestigung einen Sichtstab zur optischen Verfolgung trägt. Die Grundfarbe der Reflektorplatte der Schwimmer ist gelb und besitzt aufgrund der Farbtemperatur im Luftbild eine hohe optische Auflösung (panchromatischer Infrarot-Luftbildfilm). Die Schwimmer besitzen auf der Oberseite in schwarz abgesetzt formatfüllende Kennziffern. Diese Ziffern sind im Luftbild lesbar und gestatten bei Auswertung der Luftbilder die fortlaufende Kartierung der Positionen jedes einzelnen (individuellen) Schwimmers. Das Gesamtgewicht einer Schwimmereinheit beträgt rd. 12 kg. Dadurch können die Schwimmer ohne Schwierigkeiten auch von kleinen Booten ausgesetzt bzw. eingefangen werden. Nicht nur bei ungünstigen Einsatzgebieten, d. h. nur schwer zu erreichenden Gebieten mit schlechter Verkehrsanbindung, erfolgt ihr Transport in zerlegtem Zustand – das Zusammensetzen bzw. die Demontage ist ohne größere Hilfsmittel möglich.



Abb. 2: Ein Schwimmer im Bereich der landseitigen Umströmung der Brammerbank. Deutlich erkennbar die absolute Planlage des Treibkörpers, der die Wasseroberfläche so gut wie gar nicht überragt und deshalb keinerlei Luftwiderstand bzw. Windangriffsfläche bietet



Abb. 3: Auf dem Weg zum Einsatzort erfolgt der „Massen“-Transport von zerlegten Schwimmern in einer Schute



Abb. 4: Transport eines nach dem Einsatz zerlegten Schwimmers (demoniertes Treibkreuz, herausgenommener Sichtstab)



Abb. 5: Begleitende Positionsbestimmung eines Schwimmers vom Schiff aus (Einzelmessung)

Die Schwimmer sind damit von ihrer Konstruktion her außerordentlich preiswert und schnell zu bauen. Aufgrund der Einfachheit wäre ihr Einsatz in Verbindung mit einer Luftbildkartierung besonders auch für die Erkundung in logistisch unzureichend strukturierten außereuropäischen Ländern geeignet.

Grundsätzlich wurden beim Elb-Einsatz parallel zur Luftbildkartierung die Schwimmer stichprobenartig von Begleitschiffen aus eingemessen. Dabei handelte es sich mehr um eine Verkehrssicherungsmaßnahme mit begleitender Einzelpositionsbestimmung. Denn es war von vornherein klar, daß die Anzahl der Meßwiederholungen und die Lagegenauigkeit des auf den Schiffen installierten Mini-Range-Ortungssystem nicht die gleichen Kartierergebnisse bringen kann, wie sie die gewählte Luftbildmessung aufweist.

Um Luftbildauswertungen von Schwimmerpositionen durchführen zu können, muß für eine Entzerrungsmöglichkeit der Senkrechtaufnahmen gesorgt werden. Dazu wurden im Untersuchungsgebiet mehrere Paßpunkte eingemessen, die landseitig mit einer Bodenfolie (3 m Durchmesser) sowie im Wasser durch einen Pfahl mit Topscheibe markiert wurden (siehe Abb. 6).

Die Schwimmer bzw. Schwimmergruppen wurden, versehen mit einer Anströmblech-Tiefeneinstellung von 60 cm, nach jeweiligem Tidekenterpunkt fortlaufend in einem zuvor festgelegten Zeitrhythmus profilmäßig ausgesetzt. Die Karte 2 gibt dazu das Beispiel der Schwimmergruppe 4 vom 5. 8. 1986 (Flutstrom).

Der Startbefehl für das Flugzeug (Hamburg-Fuhlsbüttel) kam 30 Minuten vor Einsetzen der jeweils ersten Schwimmergruppe des Tages von Bord des Aussetzschiffes, da nur hier vor



Abb. 6: Die Entzerrung der Luftbilder und die Kartierung der Schwimmer war durch die im Arbeitsgebiet mehrfach gesetzten Markierungspunkte möglich. Der weißlackierte Top des Festpunktes besitzt einen Durchmesser von 2 m



Abb. 7 und 8: Schwimmer beim Einsetzen in das Wasser



Abb. 8

Ort der tatsächliche Kenterpunkt der Strömung genau bestimmt werden konnte. Die ersten drei Schwimmergruppen wurden an beiden Untersuchungstagen in einem zeitlichen Abstand von 30 Minuten ausgesetzt, wobei die unmittelbar nach Kenterpunkt herrschende Strömung mit ihrem besonders turbulenten Verhalten interessant erschien. Die Anzahl der Schwimmer je Gruppe betrug mindestens fünf Stück.

3.2 Ablauf der Befliegung

Als Untersuchungstage wurden gemäß Tidekalender der 5. 8. 1986 (Flutstrombefliegung) und der 12. 8. 1986 (Ebbstrombefliegung) ausgewählt. Eine Trennung von Flut- und Ebbstromkartierung war notwendig, da vom Tageslicht her eine volle Tide wohl zu erfassen gewesen wäre, jedoch das Luftbildkartierflugzeug trotz Zusatztanks nur rd. 6 Std. in der Luft bleiben konnte. Eine Zwischenlandung zum Auftanken hätte mit etwa 1 Stunde Unterbrechung für die Kartierung von Schwimmerbahnen eine zu lange Meßpause bedeutet.

Die erste Gruppe von Schwimmkörpern wurde je Befliegungstag genau zum Kenterpunkt der Tide vom Meßschiff „Twiefelfleth“ in einem Profil bei Elb-km 682 (Flutstrom, siehe Karte 2) bzw. km 674 (Ebbstrom) abgesetzt. Ihre Bahnen wie auch die der folgenden sechs Schwimmergruppen wurden nun vom Flugzeug aus „kartiert“.

Die Flughöhe betrug am 5. 8. 1986 im Mittel 1000 m und am 12. 8. 1986 rd. 1350 m über Grund. Die Flugstrecke verlief mit einer Länge von rd. 9 km in einem Längsprofil vom Ausbringepunkt der Schwimmer stromab bzw. stromauf, die gesamte Breite des Gebietes der Brammerbank (1900 m) abdeckend. Die Frequenz der Überflüge betrug im Mittel weniger als 10 Minuten. Die Flugbahn und Luftbildbreite zeigen die Karten 1 und 2. Aufgrund der an den Meßtagen sehr guten Witterung mit hohen Wolken, geringer Lufttrübe und schwachem Wind

wurden klare und gut lesbare Luftbilder produziert. Die Auflösung der Schwimmer inkl. der Leitziffer (!) war trotz ihrer Kleinheit von 2,5 m Durchmesser in allen Luftbildern gut möglich. Die Wiederholungsfrequenz der Überflüge von i.M. < 10 Minuten bedeutet in ihrem Rhythmus, daß zur Ermittlung der Schwimmergeschwindigkeiten eine direkte Beziehung zu den parallel gemessenen punktuellen Strömungsgeschwindigkeiten hergestellt werden kann. Letztere wurden (hier) im 5-Minuten-Intervall als Mittelwert auf Datenträger (Bergen-Strommesser „Anderaa RCM 4“) abgelegt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Lokale Strömungsfelder

Insgesamt wurden während der Flutstrombefliegung (5. 8. 86) sieben Schwimmergruppen und während der Ebbstrombefliegung (12. 8. 86) acht Gruppen in Bewegung gebracht. Alle Schwimmergruppen wurden in einem rechtwinkelig zur Stromachse orientierten Ausgangsprofil in das Wasser eingesetzt. Die Abb. 9 gibt für Flut- und Ebbstrommessung die Anfangszeiten, bezogen auf die Tidekurve, wieder. In Abb. 10 wird am Beispiel der Messung vom 5. 8. 1986 auch die insgesamt meßtechnisch erfaßte Zeit sichtbar, während derer die Flutstromschwimmer das Gebiet passieren. Man erkennt, daß mit dem Einsetzen unmittelbar nach dem jeweiligen Kenterpunkt praktisch je Meßtag eine Halbtide durch Schwimmerbewegungen abgedeckt ist.

Da eine vollständige Kommentierung aller insgesamt ausgewerteten Schwimmerbahnen (mehr als 50 an der Zahl!) und ihrer lokalen Geschwindigkeiten allein aus Gründen des zu großen Umfangs an Daten an dieser Stelle nicht möglich ist, sollen nachfolgend nur die (typischen) Bahnbeschreibungen und -interpretationen einer einzigen Schwimmergruppe gegeben werden. Es handelt sich dabei um die Flutstrom-Schwimmergruppe Nr. 4, deren Bahnverläufe die Karte 2 in einer Übersicht darstellt.

Diese für die Luftbildkartierung stellvertretend vorgestellte Gruppe „4“ (Nr. 41 bis Nr. 45) wurde am 5. 8. 1986 innerhalb von 10 Minuten ab 12.38 Uhr komplett ausgesetzt. Das heißt, diese Gruppe wurde neben drei bereits „in Marsch“ befindlichen Schwimmergruppen (mit zu diesem Zeitpunkt schon 15 Treibkörpern) rd. 2 Stunden nach Kenterpunkt am Eingangsprofil bei km 682 erstmals parallel zu den o. a. Schwimmern luftbildkartiert. Es ist der gleiche Zeitpunkt, zu dem die Schwimmer der ersten Flutstromgruppe bereits oberhalb der Wischhafener Süderelbe das Krautsander Watt in Richtung Hauptelbe passieren (zeitliche Verteilung siehe Abb. 10).

Die landnah des niedersächsischen Ufers abgesetzten Schwimmer dieser Gruppe, Nr. 41 und Nr. 42, wandern (wie auch ihre entsprechenden Gruppenvorläufer Nr. 11–12 bis 31–32) in Richtung binnenseitiger Umströmung der Brammerbank. Sie tun dies jedoch deutlich weniger stark dem Westufer anliegend als alle vorhergehenden Flutstromschwimmer. Es fällt auf, daß der westlichste Schwimmer Nr. 41 dabei eine sehr viel geringere Geschwindigkeit hat als sein etwas strommittiger treibender Begleiter: Während um 13.40 Uhr, also rd. 60 Minuten nach Aussetzen, der Schwimmer Nr. 41 erst an der unterstromigen Spitze des binnenseitigen Flügels der Brammerbank steht, befindet sich Schwimmer Nr. 42 bereits 1000 m weiter stromauf im Beginn der sogenannten „Engstelle“ (Doppelbuhnen km 678,5) der binnenseitigen Umströmung der Brammerbank. Schwimmer Nr. 41 reduziert bis zur Engstelle seine Geschwindigkeit von rd. 0,8 m/sec auf 0,5 m/sec, während Nr. 42 von 1,3 m/sec auf rd. 0,6 m/sec herunterfährt. Interessant ist damit, daß diese Schwimmer genau wie alle zuvor diesen

Befliegung Brammerbank/Krautsander Watt

Tidekurven vom 5.8. und 12.8.1986 , Zeitpunkte der Schwimmer-Aussetzung

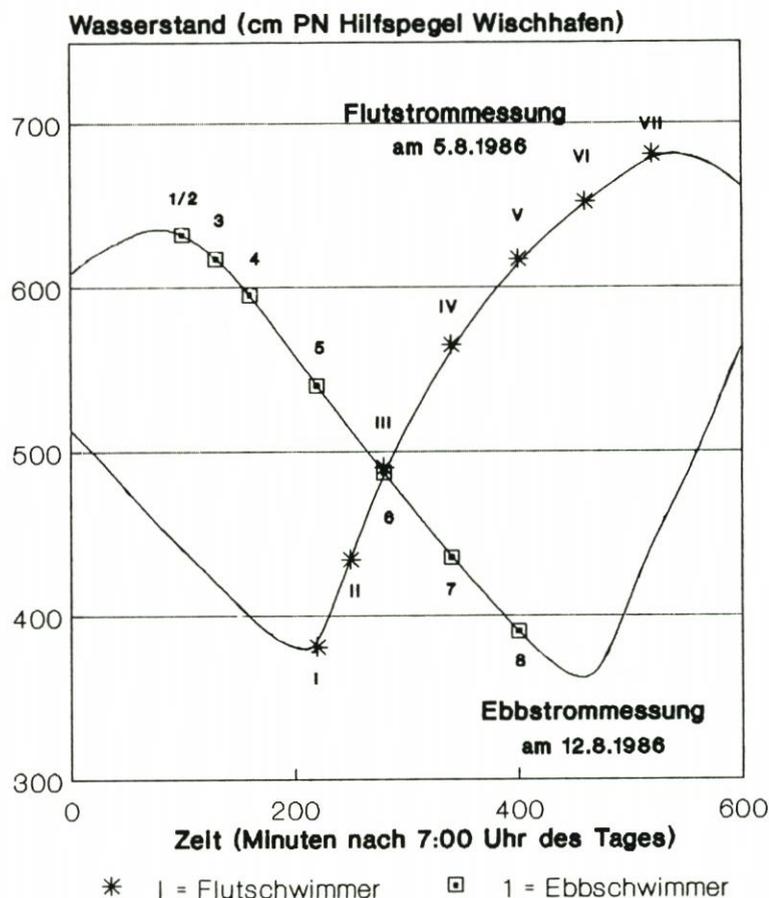


Abb. 9: Zeitpunkte der Schwimmer-Aussetzung, bezogen auf die jeweiligen Tidekurven vom 5. 8. und 12. 8. 1986

Weg nehmenden Treibkörper (Nr. 11–12 bis 31–32) in der Zone des unterstromigen Beginns der westlichen Umströmung der Brammerbank „gebremst“ werden, um anschließend dann wieder in der stromauf folgenden Engstelle zu beschleunigen. Dort werden dann erstmals die höchsten Geschwindigkeiten vom Schwimmer Nr. 41, dem landnah wandernden, erreicht, während Schwimmer Nr. 42 nun etwas langsamer voranschreitet.

In einer zusammenfassenden Bewertung der Schwimmerdynamik kann festgestellt werden, daß nach der ersten Halbphase des Flutstroms im Bereich der Binneneinströmung zur Brammerbank die zuvor (Schwimmergruppen 1–3) sehr starke Rechtsablenkung nachläßt und die Hauptstromkomponente tendenziell nun etwas zum Zentrum der Brammerbank hin verschoben wird. Erst ab der eigentlichen westlichen Umströmung der Brammerbank („Engstelle“) unterliegt der Hauptstrom wieder extrem dem Rechtstrend. Dadurch wird der Schwimmer Nr. 41 auch wie kein anderer landnaher Schwimmer weit stromauf geführt und

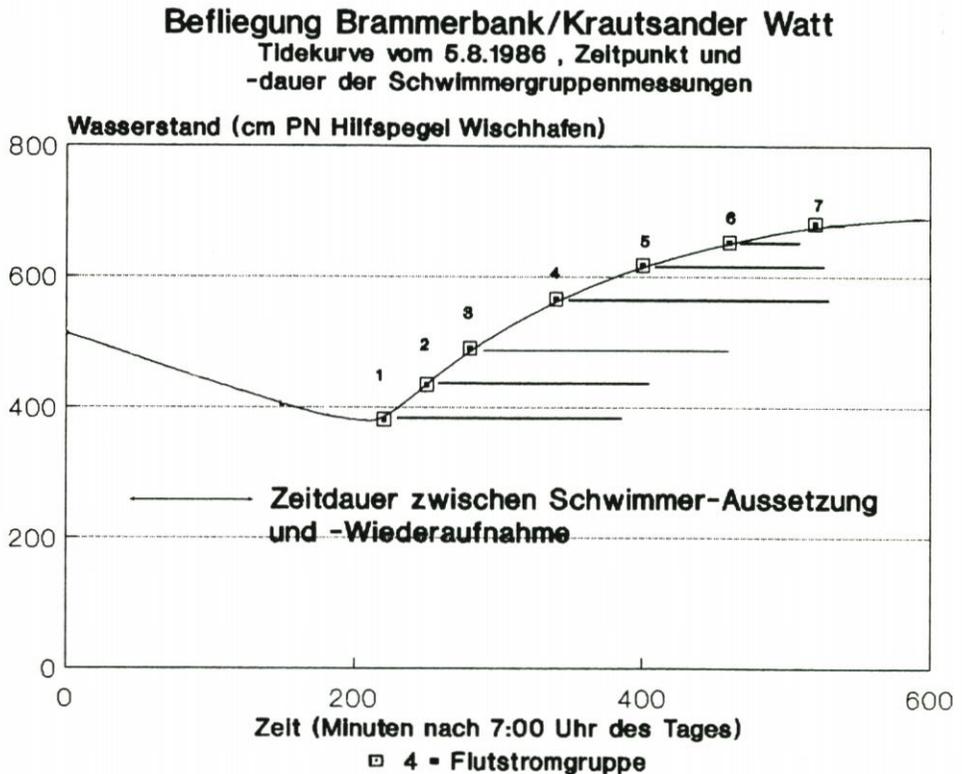
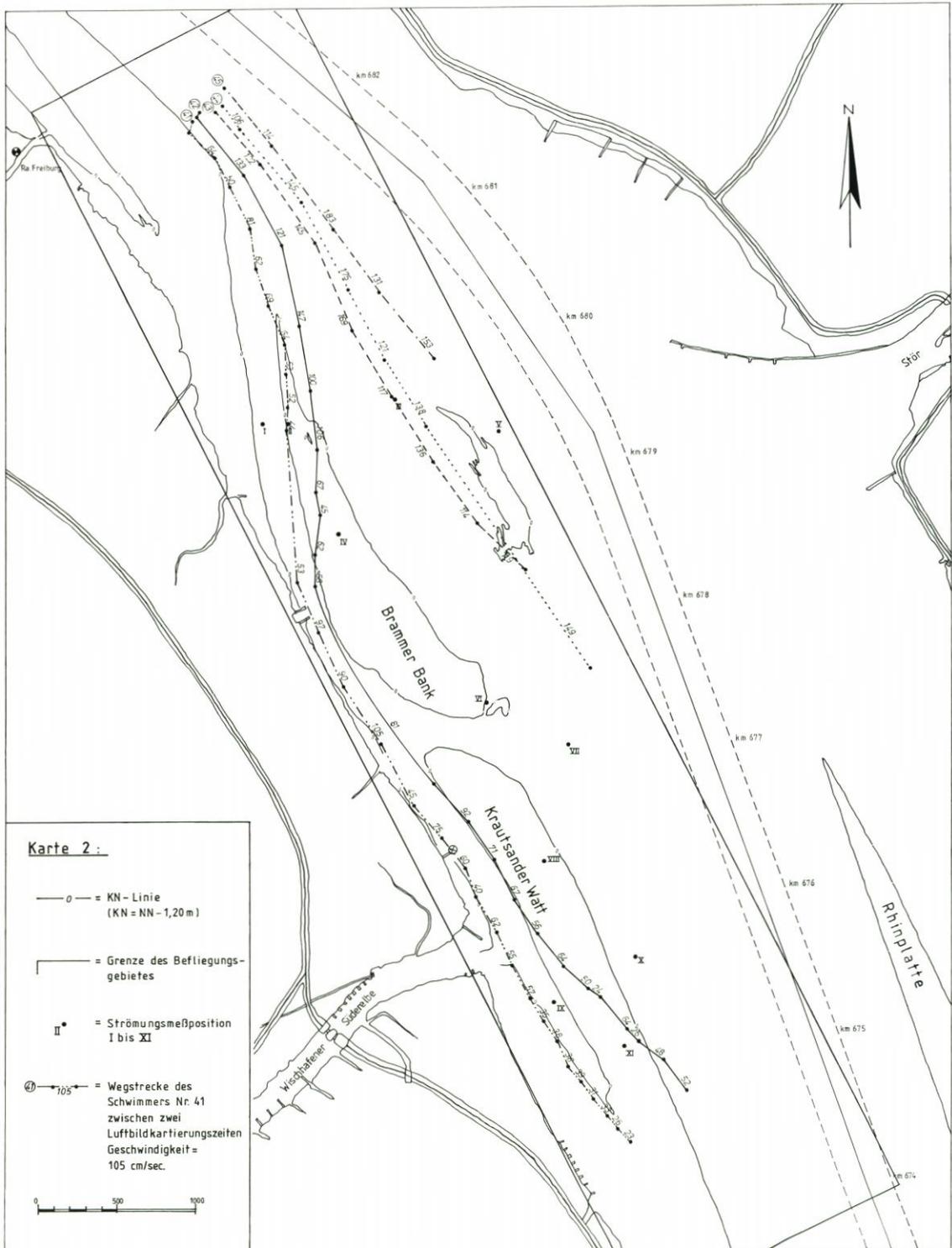


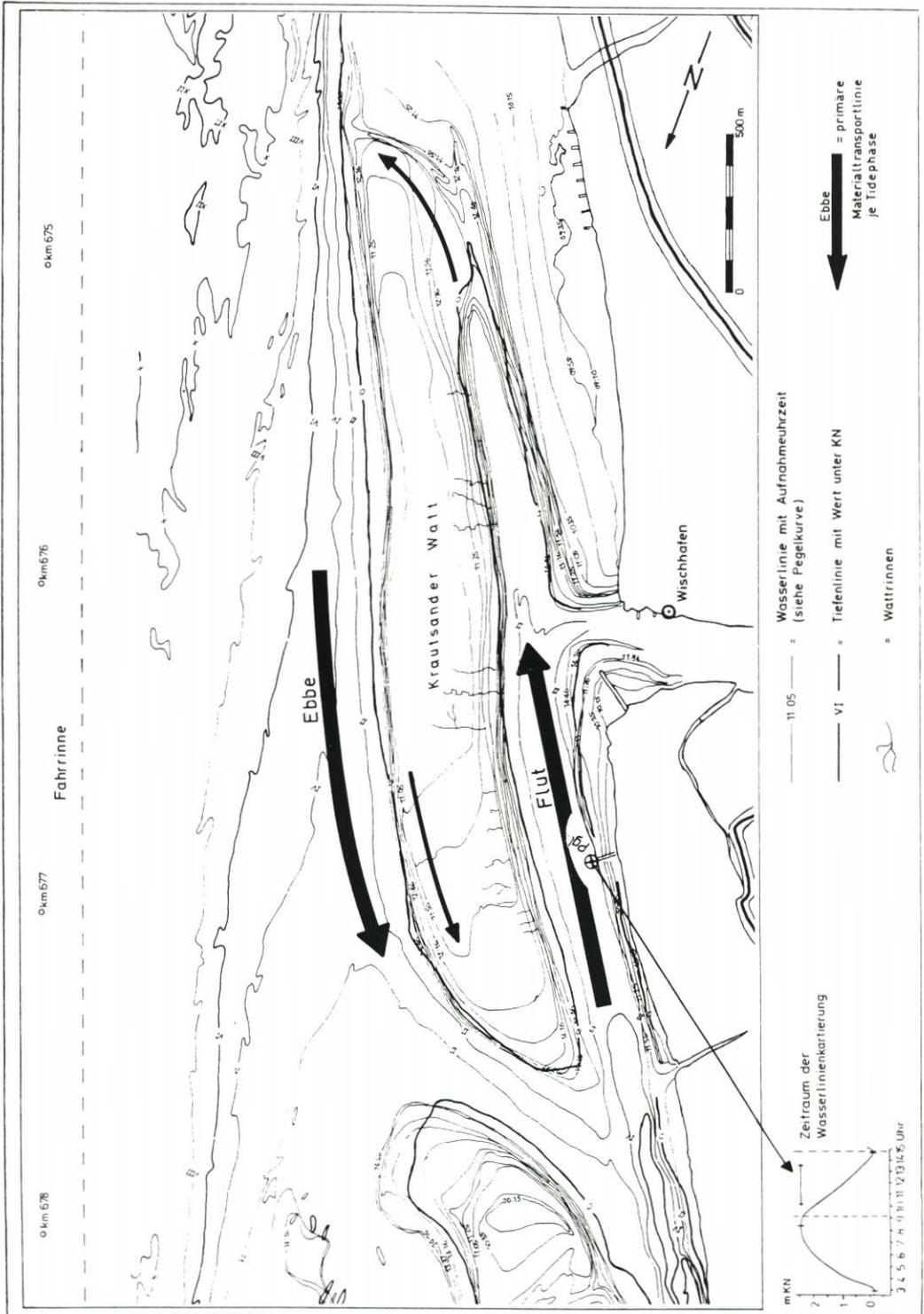
Abb. 10: Am 5. 8. 1986 durch Schwimmerkartierung erfaßte Flutstrom-Tideperiode

neigt erst an der Wurzelzone des Krautsander Watts zu einer Rückkehr in Richtung Hauptelbe.

Von morphodynamisch prägender Bedeutung ist, daß nach der sogenannten „Engstelle“ der westlichen Umströmung der Brammerbank die Geschwindigkeiten beider Schwimmer (Nr. 41 und Nr. 42) zunehmen – um dann erneut, und zwar genau im Bereich der Zungenspitze des Krautsander Watts, auf ein relatives Geschwindigkeitsminimum von 0,45 m/sec (Nr. 41) zu reduzieren! Nach einer daran anschließenden kräftigen, aber kurzzeitigen Beschleunigung (von 0,45 m/sec auf 0,75 m/sec) folgt wiederum eine Geschwindigkeitsabnahme. Diese ist etwa ab Hilfspegel Wischhafen zu beobachten und reduziert das Schwimmertempo sukzessive zurück bis auf nur noch rd. 0,3 m/sec. Um 16.26 Uhr wird der Schwimmer Nr. 41 letztmalig luftbildkartiert (Ende der Befliegung). Er überschreitet anschließend noch die Wurzelzone des Krautsander Watts, und zwar genau dort, wo nach der Wasserlinienkartierung (siehe Karte 3) eine Art Rinne in Richtung Hauptelbe führt und auch ein kleines „Delta“ Materialtransport in diese Richtung andeutet. Die Wasserlinienkartierung ist im übrigen ein Nebenprodukt der Schwimmerbefliegung und ergänzt optimal das morphologische Bild in den Wattbereichen oberhalb KN.

Schwimmer Nr. 42 überquert das Krautsander Watt oberhalb der Einmündung der Wischhafener Süderelbe. Die Geschwindigkeiten zu dieser Tidephase (4¼ Std. nach Kenterpunkt) liegen im betroffenen Abschnitt des Krautsander Watts immer noch über 0,5 m/sec. Sie werden erst im Bereich des Wattrückens auf bis zu 0,24 m/sec reduziert – um nach Überschreitung des Wattrückens im Strom der Hauptelbe erneut zu beschleunigen.





Karte 3: Wasserlinien- und Tiefenkartierung im Bereich des Krautsander Watts (Nach Befliegung vom 12. 8. 1986 und Peilungen vom 29. 7. bis 21. 8. 1986)

Für den Sedimenttransport bedeutet dies, daß während der Tidephase zwischen 2½ und 4 Stunden nach Kenterpunkt, mit sehr hohen Geschwindigkeiten im Bereich der Brammerbank, aller Wahrscheinlichkeit nach sehr viel Material aus dem Brammer-Komplex in Richtung der Binnenseite des Krautsander Watts bewegt wird. Dort kommt selbiges Material jedoch bei Reduzierung der Geschwindigkeiten unter Sedimentationsbedingungen und dürfte zu einem guten Teil

- a) an der Zungenspitze des Krautsander Watts,
- b) an der Binnenflanke des Krautsander Watts und
- c) im Wattüberströmungsbereich (Watrücken und „Delta“)

abgesetzt werden. Eine zusammenfassende Kurzschilderung der insgesamt aus allen Bewegungsbahnen der Untersuchung (Flut- und Ebbweginterpretationen) abgeleiteten Materialtransporttrends zeigt Karte 3. In diese Karte geht damit im Vorgriff auf die flächenhafte Schwimmerbewertung des Abschnitts 3.3.2 auch die insgesamt vorherrschende Ebbstromdynamik ein, welche tendenziell mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten auf der Außenseite des Krautsander Watts vom Flutstrom im Watrückenbereich abgesetztes Material remobilisieren dürfte und mit Trend zur Zungenspitze des Krautsander Watts bzw. Binnenseite der Brammerbank regelrecht „zurück“-transportiert. Auch ohne direkte Sediment-Tracermessungen scheint dadurch in gewissem Umfang eine Art Materialkreislauf sehr wahrscheinlich, zumal auch SAMU (1987) aus quantitativen Kartenauswertungen zu vergleichbaren Hinweisen gelangt.

Die Schwimmer Nr. 43 und 44 ziehen ebenso wie ihre Vorläufer der Gruppen 1 bis 3 durch den Mittelteil der Brammerbank. Ihre Geschwindigkeiten sind sehr hoch, immer deutlich über 1,0 m/sec, größtenteils mit $Tempi > 1,2$ m/sec. Beide Schwimmer neigen ab km 679 dazu, in Richtung Hauptelbe auszuweichen. Sie müssen deshalb leider bei km 678 um 13.30 bzw. 13.41 Uhr aufgenommen werden. Gleiches gilt, allerdings bereits entsprechend früher, für den strommittigen Schwimmer Nr. 45, der schon bei km 680 nach Geschwindigkeiten zwischen 1,3 m/sec und 1,8 m/sec aufgenommen wird.

Insgesamt kommt in den Bahnen der Schwimmerkörper zum Ausdruck, daß die bei BEHRENS und VAGTS (1985) dargestellten Wege für ihren Zeitpunkt innerhalb der Tidephase jenen der Luftbildkartierung entsprechen. Im Unterschied zum Vorläufer dieser Untersuchung können nunmehr jedoch in Abhängigkeit von der Tidephase die Veränderungen der Anströmung des Raumes aufgezeichnet werden sowie die tideabhängigen Schwankungen der lokalen Strömungsbelastungen auch aus Schwimmermessungen erkannt werden. Hinzu kommt, daß im Längsprofil ausgebildete gebietstypische Geschwindigkeits-„Senken“ und „-Höhen“ erkannt werden können – ein entscheidender Unterschied zu punktuellen Strömungsmessungen (siehe Abschnitt 4).

3.3.2 Räumliche Strömungsbelastung

Zur flächenhaften Zusammenstellung der oben ausschnittsweise beschriebenen detaillierten Gebietstrends der Strömung wurde das Untersuchungsareal in 100×100 -m-Rastereinheiten zerlegt. Je Rastereinheit wurde der jeweils dort lokal erreichte Schwimmer-Geschwindigkeitsmaximalwert (Schwimmer- V_{max}) ermittelt und kartographisch dargestellt. Diese Karten der Gebiete maximal erzielter Bewegungsgeschwindigkeiten (Karte 4 und 5) reproduzieren ein Bild der potentiellen „Belastung“ des Untersuchungsgebietes, das die parallel durchgeführten Einzelströmungsmessungen flächenhaft ergänzt und zusammenfaßt. Die Werte geben durch die zeitliche Begrenztheit ihres tatsächlichen Auftretens natürlich keine mittleren Strömungs-

verhältnisse an. Eine solche Darstellung läßt sich aus Schwimmermessungen in instationären Strömungen auch nicht ableiten. Jedoch dienen sie der Abschätzung der flächenhaften Verteilung der Strömung und ihrer Qualität im Raum.

Erkennbar wird die aufgrund der großen Anzahl an Treibkörpern erreichbare Raumdeckung der Schwimmermeßmethode. Dies charakterisiert die Karte der Gebiete maximal erzielter Schwimmertransportgeschwindigkeiten wie folgt:

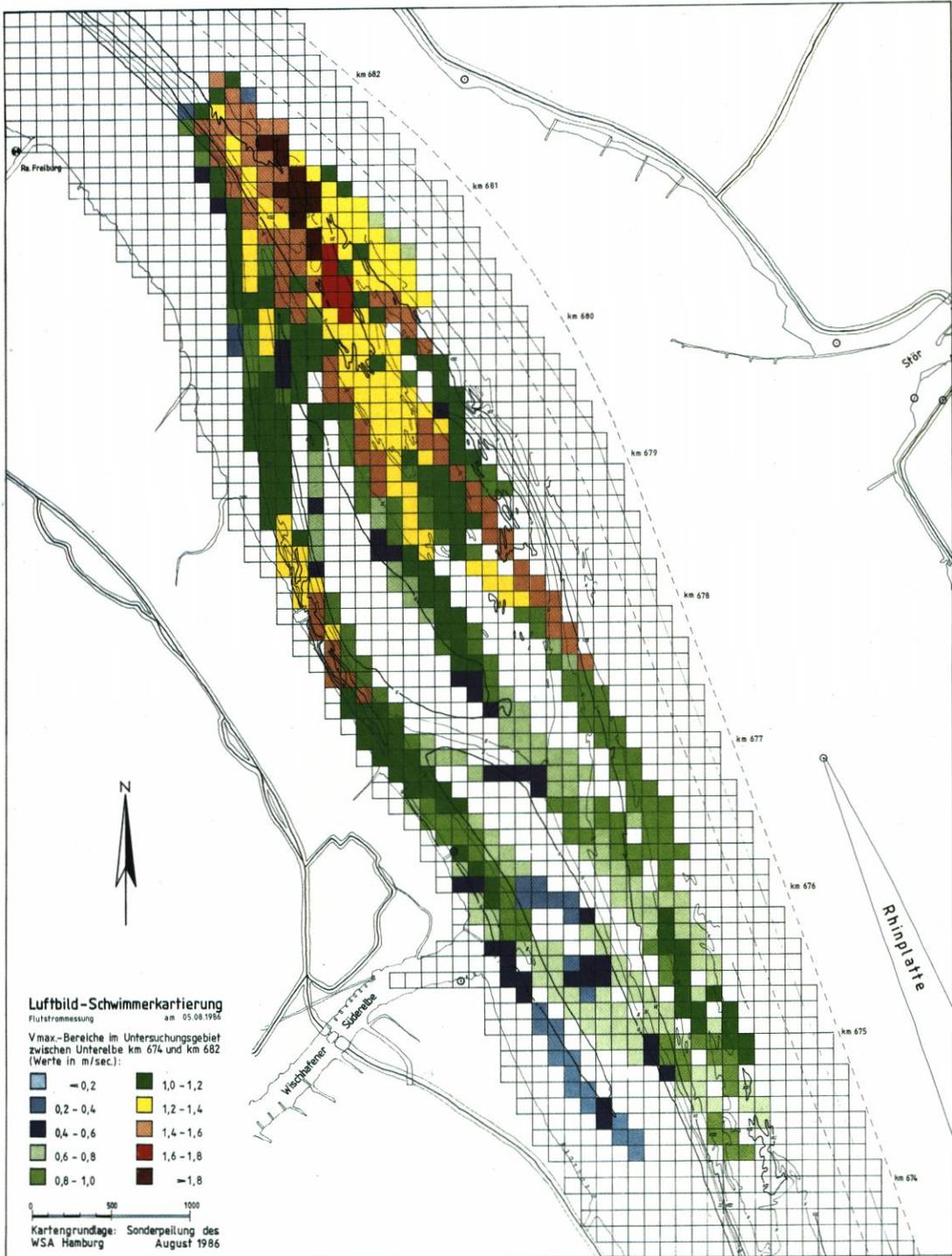
a) Flutstrom.

Die großräumige Stromverteilung zeigt Karte 4. Danach sind die höchsten Geschwindigkeiten im unterstromigen Bereich des Meßgebietes zu verzeichnen. Das Maximum der Strömungs-„belastung“ des Gebietes liegt auf der stromunteren Hauptelbeseite der Brammerbank. Dort kommt es zu Transportgeschwindigkeiten von mehr als 1,8 m/sec. Sehr stark setzt der Strom dann in den Mittelbereich der Brammerbank: Hier im Bereich km 680/679 (gegenüber Störmündung) herrschen auf der Brammerbank Geschwindigkeiten, die teils höher sind als jene auf der strominneren Grenzlinie zur Hauptelbe. Aber auch in der binnenseitigen Umströmung der Brammerbank (Höhe km 678,5) kommt es zu hohen Geschwindigkeiten von >1,4 m/sec. Dies fällt auf, da stromab und stromauf geringere Tempi zu verzeichnen sind. Interessant ist, daß praktisch kein Schwimmer die Öffnung zwischen Brammerbank und Krautsander Watt annimmt, sondern der relativ starke Flutstrom aus der binnenseitigen Umströmung in Richtung Wischhafener Einfahrt bzw. Binnenseite des Krautsander Watts verlängert! Dies läßt sicherlich, wie bereits in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, auf einen Transport von Material aus dem Bereich der Brammerbank zum binnenseitigen Rücken des Krautsander Watts schließen, zumal die in Höhe der Brammerbank recht kräftige Strömung im Bereich des Krautsander Watts bzw. der Wischhafener Einmündung deutlich zurückgeht – und zu Sedimentationstendenzen führen muß!

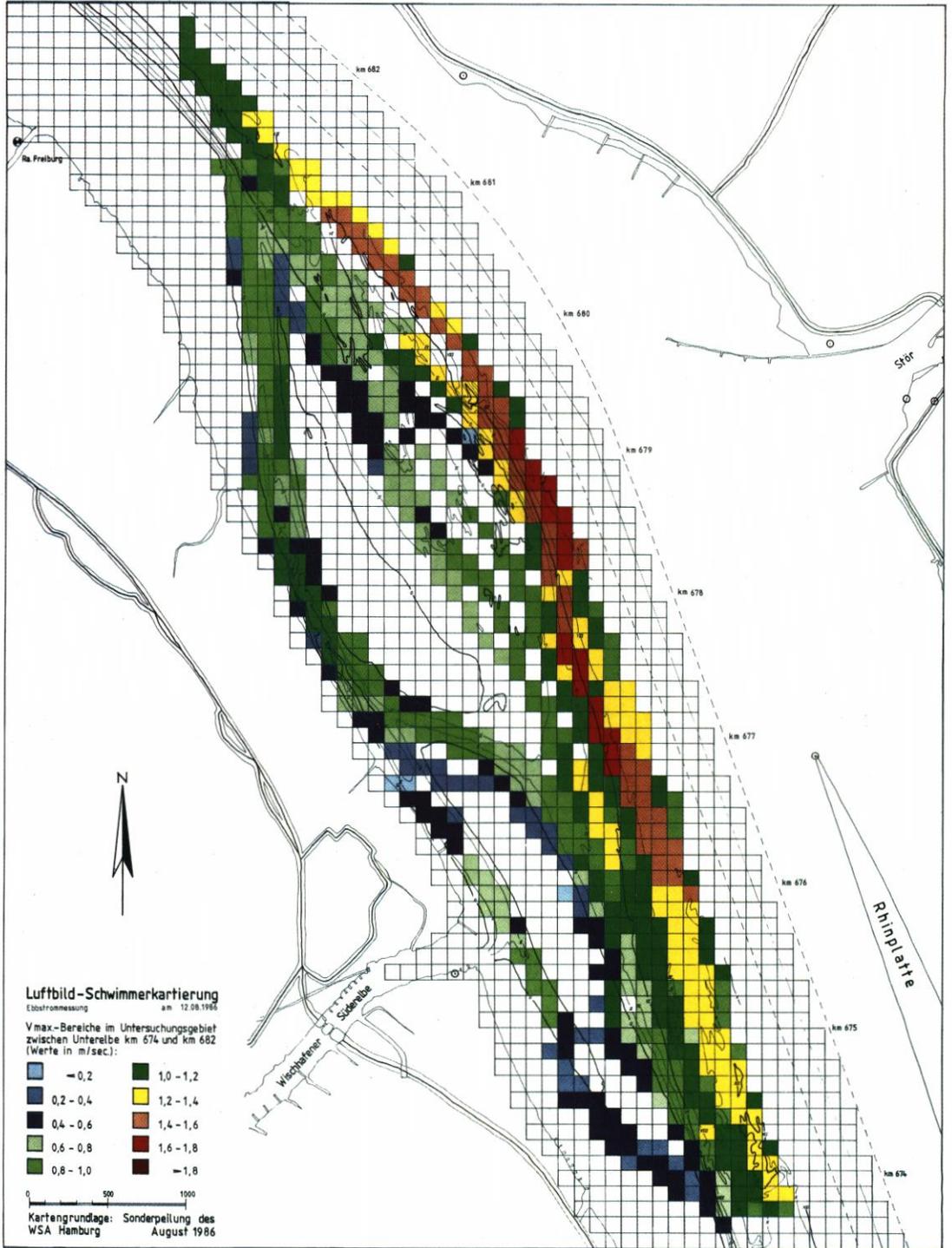
b) Ebbstrom.

Die höchste Strömungsbelastung herrscht nach Karte 5 auf der Außenkante der Brammerbank. Die Bereiche hoher Transportgeschwindigkeiten sind dort praktisch auf der gesamten Länge des Untersuchungsgebietes anzutreffen. Die absoluten Spitzenwerte der Geschwindigkeit bleiben jedoch etwas unter denen des Flutstroms. Die Überströmung der Brammerbank ist geringer als bei Flutstrom, ein großer Anteil der Schwimmer umströmt die Brammerbank. Dies ist im Vergleich zwischen Karte 4 und 5 (Flut- zu Ebbstrom) bereits an der Verlaufsform der Schwimmerbahnen zu erkennen: Bei Flutstrom ist ein gestreckterer Bahneindruck vorherrschend, während bei Ebbstrom die Schwimmerbahnen unter Umgehung der Brammerbank in diesem Raum regelrecht „ausbauchen“. Die Neigung zur Einströmung zwischen Krautsander Watt und Brammerbank ist sehr groß. Dieser Trend ist bereits an der Wurzelzone des Krautsander Watts zu beobachten, jedoch aufgrund stetiger morphologischer Verlängerung des Wattkörpers stromab (Materialtransport) zur Zeit in vollem Umfang erst auf Höhe km 677 möglich.

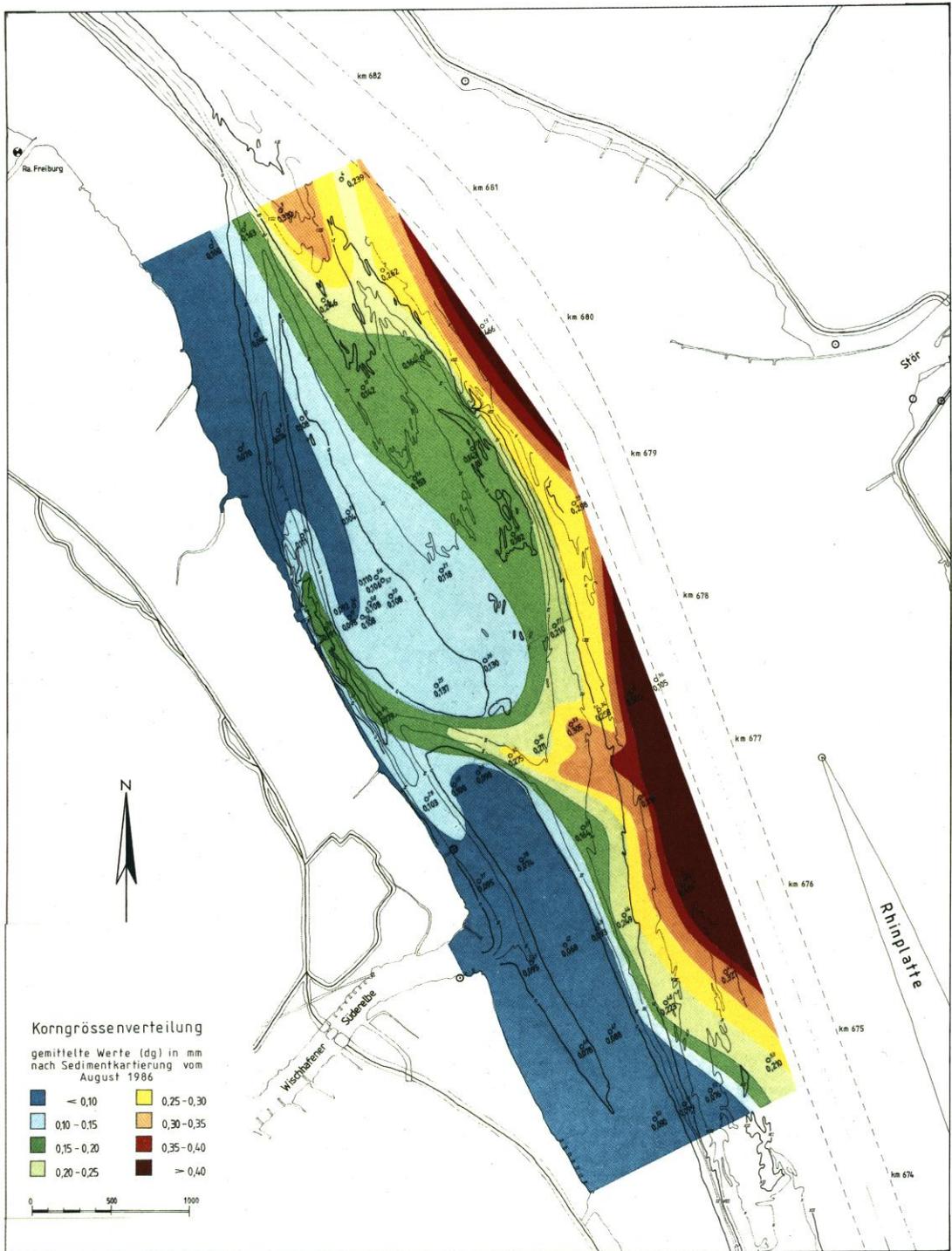
Eine gleichermaßen flächenhaft durchgeführte Kartierung der Korngrößenverteilung im Oberflächensediment des Untersuchungsgebietes bestätigt die starke Abhängigkeit der Materialzusammensetzung von der räumlich-quantitativen Verteilung der Transportgeschwindigkeiten. Karte 6 zeigt die anhand von 58 Proben ermittelte Korngrößenverteilung (dg-Wert). Die Regionalisierung läßt erkennen, daß sich die räumlich-differenzierte Strömungsbelastung (Karte 4 und 5) deutlich im lokalen Sedimentcharakter niederschlägt. Die Abbildung 11 zeigt darüber hinaus auch statistisch, daß eine klare positive Korrelation zwischen den gebietspezifischen V_{\max} der Schwimmerbahnen und den jeweils zugehörigen Sediment-dg-Werten besteht.



Karte 4



Karte 5



Karte 6

Befliegung Brammerbank /Krautsander Watt Korrelation Sediment-dg und Strömungs- geschwindigkeiten (Schwimmer-Vmax)

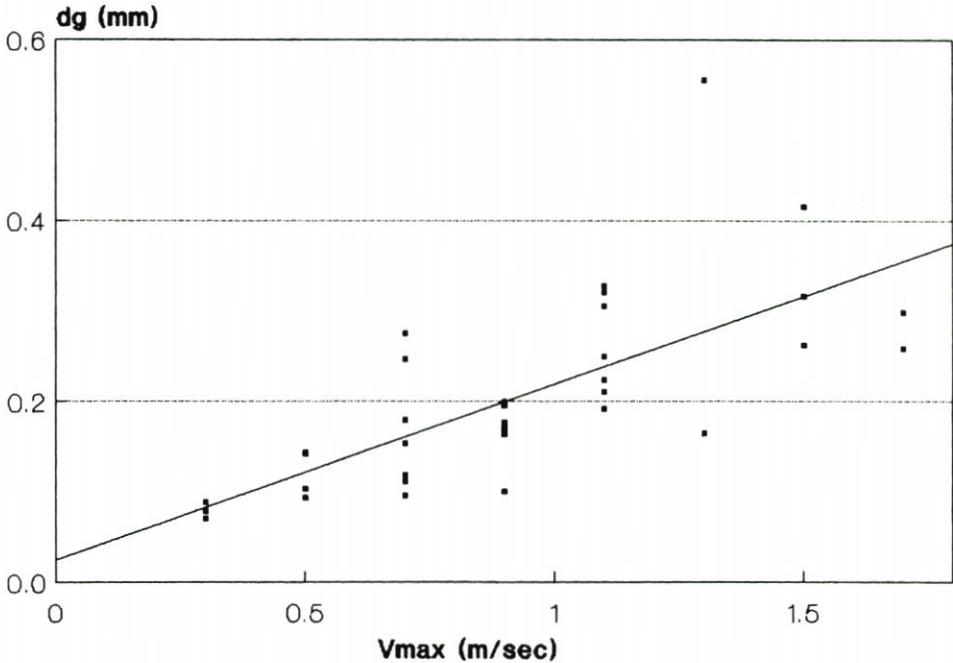


Abb. 11: Korrelation zwischen Transportgeschwindigkeit (V_{max} der Schwimmermessung) und lokal zugehöriger, durch Siebanalyse ermittelten Sediment- d_g -Werten

4. Punktueller Strömungsmessungen

4.1 Grundlagen

Gemessen wurde bei den parallel durchgeführten lokalen Strömungsmessungen mit Einzelmeßgeräten der Fa. Aanderaa (Bergen-Strommesser Typ RCM4), die je Meßpunkt in vertikaler Differenzierung positioniert waren (siehe Abb. 12). Die theoretische Genauigkeit der Aufzeichnungen der verwendeten Strömungsmesser liegt bei ± 1 cm/sec in der Geschwindigkeit und ± 5 Grad in der Richtungsanzeige. Die Geräte des verwendeten Typs RCM 4 nehmen die Strömungsgeschwindigkeit mittels eines Savonius-Rotors auf, dessen Umdrehungen über eine Magnetkupplung in die Bewegung einer Potentiometerachse umgesetzt werden. Eine Stromfahne ist starr am druckfesten Meßgerätegehäuse befestigt. Die Anordnung ist in einem Lager frei beweglich. Alle Meßgrößen werden permanent registriert, der Geschwindigkeitsparameter jedoch (im verwendeten Modus) nur alle 5 Minuten als integrierter (gemittelter) Wert auf dem internen Magnetband abgelegt. Bei der Auswertung der Magnetbänder werden diese per EDV gelesen, auf Fehler geprüft und die Daten letztlich in statistisch handhabbaren Zahlenkomplexen dargestellt. Außer der Geschwindigkeit werden bei den verwendeten Geräten noch Strömungsrichtung (Einzelwert bei 5-Minuten-Abfrage) und Temperatur aufgezeichnet.



Abb. 12: Strömungsmessgeräte in einer Auslegekette

Der große Nachteil des Bergen-Strommessers gegenüber anderen Meßgeräten liegt primär in seiner systembedingten Abstimmungsempfindlichkeit gegenüber Störungen durch Seegang und Verankerungsbewegungen (HAMMOND u. a., 1986), sein Vorteil in der Robustheit der Konstruktion und einer vergleichsweise geringen Empfindlichkeit gegenüber Verkrautung. Aufgrund der an beiden Meßtagen ruhigen Witterung kann jedoch die von QUADFASEL und SCHOTT (1979) festgestellte Neigung der Aanderaa-RCM4 Meßgeräte zur Überhöhung der aufgezeichneten Geschwindigkeit ausgeschlossen werden.

In der Bewertung der Strömungsverhältnisse im Raum Brammerbank – Krautsander Watt wurden übergreifend die mittleren Werte der Gesamtmeßzeit, d. h. der Liegedauer der Strömungsmessgeräte (Positionen siehe Karte 2) zwischen dem 31. 7. und 13. 8. 1986, verwendet. Somit werden hier im Unterschied zur Ein- bzw. Halbtiden-Schwimmermessung die Daten aus 25 Tiden betrachtet. Inwieweit diese gemittelten Werte von einem potentiellen „Langzeitmittelwert“ der Strömung abweichen, ist unbekannt. Sicher ist nur, daß sie einerseits und im Unterschied zu Schwimmermessungen zwar mögliche Singularitäten einer Tide vermeiden, andererseits jedoch auch wiederum noch eine gewisse Datenlücke offenlassen. Gemeint sind Sturmfluten, die zwar nur ein statistisch seltenes Ereignis darstellen, allerdings einen merklichen Einfluß auf die Strömungsverhältnisse bzw. die Morphologie von Wattkörpern haben dürften. D. h., obwohl sie nur selten auftreten, ist ihre tatsächliche dynamische Wirksamkeit von Bedeutung (siehe GÖHREN, 1977).

Ein wirkliches Problem, weil permanent wirksam, stellt die Turbulenz des Wasserkörpers dar. Denn die nur statistisch vergleichbaren Zahlen der Geschwindigkeiten (V_m , V_{max} je

Gerät) sagen nicht unbedingt etwas über die mit der Tidephase (primär nach dem jeweiligen Kenterpunkt) verbundene Unruhe bzw. „Unordnung“ der Strömung und deren Wirkung auf den Materialtransport aus. Zum anderen spielt die Geschwindigkeit der Wasserspiegelveränderung eine große Rolle (Steilheit der Tidekurve). Denn ob beispielsweise nach einem Zeitintervall von 15 Minuten ein Mehr an Wassersäule von 15 cm über einem Strömungsmeßgerät liegt oder aber von 30 cm, das ist ohne Frage ein greifbarer Unterschied in der turbulenten Belastung dieses Meßpunktes. Solche Vorgänge sind derzeit jedoch im Zuge einer mit handelsüblichen Meßgeräten durchgeführten Routinemessung noch nicht quantitativ bewertbar und können nur interpretativ bei der Betrachtung der Gesamtverhältnisse der Strömungskonstellation einbezogen werden.

Neben einer Analyse der tatsächlich aufgezeichneten Strömungsgeschwindigkeiten wurde daher zur Verbesserung der inhaltlichen Aussage einer Strömungsmessung zusätzlich eine einfache Indexzahl eingeführt, die sogenannte „Wirkzeit“ der Tide. Dieser Wert stellt die Zeit dar, in der je Tidephase Geschwindigkeiten mit mehr als 0,30 m/sec erreicht werden. Dadurch ist es überschlägig und im ersten Ansatz möglich, einen Trend der potentiellen Erosionsfähigkeit der jeweiligen Strömungsrichtung anzugeben.

Da es aus Gründen des Datenumfanges an dieser Stelle nicht möglich ist, auf alle sich daraus ergebenden Meßinformationen einzugehen und darüber hinaus die Interpretation von Einzelströmungsmeßprotokollen allgemein bekannt ist, wird nachfolgend nur ein beispielhaftypischer Wertevergleich zweier benachbarter Gerätepositionen gegeben. Obwohl je Meßpunkt meist mehrere Geräte in einer Vertikalen ausgebracht waren (siehe Abb. 12), werden in Hinblick auf die Schwimmermessungen nur die Werte der Oberflächenmeßgeräte (60 cm unter Wasserspiegel) angeführt. Die Datenkurzbeschreibung soll einzig und allein ein Schlaglicht auf die insgesamt vorgenommene Bewertung aller Einzelpunktmessungen werfen. Die Kurzdarstellung kann also nicht mehr leisten als anzureißen, welche Möglichkeit die Interpretation einer Einzelströmungsmessung im Vergleich zu Weg- und Geschwindigkeitsanalysen von Schwimmbahnen bietet. Eine konkurrierende Bewertung beider Methoden wird der Abschnitt 5 liefern.

4.2 Ergebnisse am Beispiel „Krautsander Watt“

Im Vergleich zwischen den Werten der Pos. IX (Innenseite des Krautsander Watts) und Pos. X (Außenseite des Krautsander Watts, siehe Karte 2) läßt sich bei Betrachtung des Gesamtmeßzeitraumes (25 Tiden) deutlich das hier außerordentlich gegensätzliche Strömungsbild ablesen. Während an der Außenseite die Wirkung des Ebbstroms dominiert, überwiegt auf der Innenseite klar der Flutstrom. Dies läßt sich am besten im Vergleich der „Wirkzeiten“ der Strömung ablesen:

	Pos. IX Innenseite	Pos. X Außenseite
Flut	252	246
Ebbe	146	362

Tabelle 3: Mittlere Wirkzeiten der Strömung im Bereich des Krautsander Watts (Werte in Minuten, Lage der Meßpositionen siehe Karte 2)

Die mittleren Geschwindigkeiten weisen ein vergleichbares Bild auf:

	Pos. IX Innenseite	Pos. X Außenseite
Flut	40	42
Ebbe	26	55

Tabelle 4: Mittlere Einzelgerät-Strömungsgeschwindigkeiten (V_m) im Bereich des Krautsander Watts (Werte in cm/sec, Lage der Meßpositionen siehe Karte 2)

Damit kommt auch in den Einzelmeßgerät-Werten der in den Gesamtschwimmerbahnen des Abschnitts 3.3.2 ablesbare Trend zur hohen Beaufschlagung der Wattbinnenseite durch den (im Längsprofil abnehmenden) Flutstrom zum Ausdruck. Der Ebbstrom ist im Binnenbereich des Krautsander Watts ohne wesentlichen Einfluß. Er „schleift“ demgegenüber regelrecht an der Außenseite des Krautsander Watts entlang, da eine Neigung zur binnengerichteten Wattüberströmung zwar tendenziell zu beobachten ist, jedoch mit tidebedingt fallenden Wasserständen erst auf Höhe der bei km 677 befindlichen Öffnung zwischen Krautsander Watt und Brammerbank möglich wird (siehe graphische Darstellung in Karte 3).

5. Raumbewertung nach Meßdatenvergleich – systembedingte Widersprüche?

5.1 Flächenhafte und punktuelle Strömung

Bei einem Vergleich zwischen flächenhaften Schwimmerwegen bzw. -geschwindigkeiten und punktuellen Strömungsmessungen fällt im vorliegenden Datenmaterial sehr oft auf, daß die Transportgeschwindigkeiten der Schwimmer deutlich höher sind als es die (geringeren) Strömungsgeschwindigkeiten an den Einzelmeßgeräten, welche jeweils regional von Schwimmern passiert werden, erwarten lassen*.

Die Abb. 13 gibt ein Beispiel aus dem Bereich der Strömungsmessgeräte Nr. I und II. Die Schwimmer Nr. 31 und 32 ziehen mit Geschwindigkeiten von > 1 m/sec ihren Weg in unmittelbarer Nähe der Strömungsmesspunkte Nr. I und II stromauf. Zeitgleich herrscht am Meßgerät Nr. I eine über 5 Minuten gemittelte Geschwindigkeit von 0,82 m/sec und am Meßpunkt II von 0,61 m/sec. Die Geschwindigkeitsdifferenzen sind in dieser Größenordnung nicht windinduziert, da nur eine sehr schwache Luftbewegung vorliegt. Zudem nehmen die Schwimmer nicht die direkte, möglicherweise leicht winddriftende Oberflächenströmung an, sondern genau wie die Oberflächen-Einzelmeßgeräte jene in 60 cm Tiefe herrschende Strömung (Einstelltiefe des Treibkreuzes). Zum weiteren ragen die Schwimmer mit ihren Auftriebskörpern nicht über die Wasseroberfläche hinaus, sie werden sogar ganz im Gegenteil leicht überspült.

Da das Phänomen der Geschwindigkeitsabweichungen bei sehr vielen Meßstellen und Zeitpunkten zu beobachten war (auch bei noch dichterem Passage als beim o. a. Beispiel), sind im Frühjahr 1987 Nachmessungen vorgenommen worden. Es wurden dazu wiederum meh-

* Anmerkung: Über das hier beobachtete Phänomen hat der Schriftleiter mit dem Verfasser diskutiert. Es wirft Fragen auf, die in der vorliegenden Arbeit nicht geklärt werden können. Bemerkungen oder Anregungen dazu aus dem Leserkreis sowohl theoretisch als auch meßtechnisch wären erwünscht.

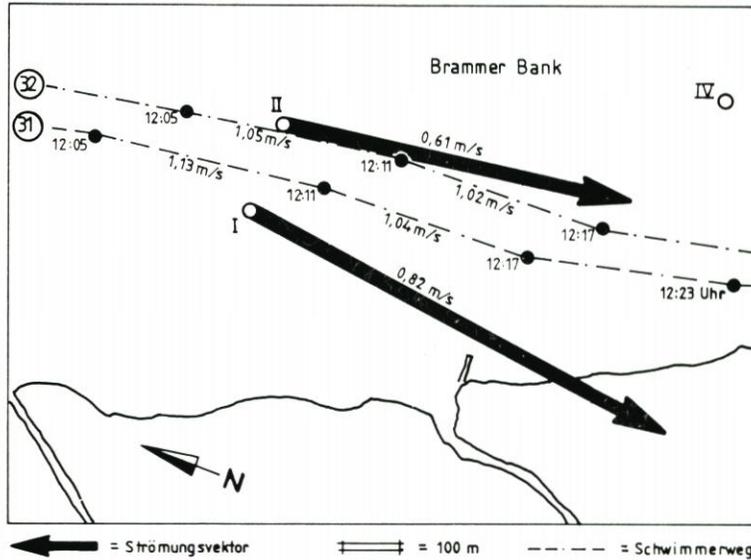


Abb. 13: Bahnlinien und Geschwindigkeiten der Schwimmer Nr. 31 und Nr. 32 im Bereich der Strömungsmesspositionen I und II zwischen 12.05 Uhr und 12.11/12.17 Uhr während der Flutstrombefliegung am 5. 8. 1986. Parallel eingetragen sind die Stromvektoren der Einzelmessgeräte für den Zeitpunkt 12.10 Uhr (= Mittelwert der punktuellen Strömungsgeschwindigkeit zwischen 12.05 Uhr und 12.10 Uhr)

rere Strömungsmesspositionen im Bereich der Brammerbank eingerichtet und erneut, diesmal aber gezielt und bewußt, Schwimmer in relativ geringem Abstand zu diesen Meßstellen geschwindigkeitskontrolliert. Das o. a. Ergebnis wurde bestätigt: Die Schwimmergeschwindigkeiten waren im Vergleich zu den eng passierten Einzelmessgeräten überwiegend „zu groß“. Auch die weitere Einrichtung einer präzisen Meßstrecke in einem morphologisch bzw. dynamisch andersartigen Bereich des Elbeästuars* brachte als Ergebnis, daß Schwimmergeschwindigkeit und punktuelle Strömungsgeschwindigkeit hier grundsätzlich zugunsten der Schwimmer (je nach Tidephase hier ebenfalls bis zu 30 %) voneinander abwichen.

Es kann im übrigen angemerkt werden, daß technische Prüfungen der Einzelmessgeräte des Typs RCM4 deren korrekte Funktion bestätigte. Auch hinsichtlich der Bauart der Schwimmer kann durch Vergleichsmessungen belegt werden, daß diese keine gravierenden Geschwindigkeitsabweichungen zu sonst üblichen (kleineren) Kreuzschwimmern aufweisen.

Aus diesen Ergebnissen wäre zumindest im ersten Ansatz eine der möglichen Schlußfolgerungen, daß tatsächlich auf relativ kurze räumliche Distanzen außerordentlich große Geschwindigkeitsscherungen bzw. Geschwindigkeitsdifferenzen auftreten können. Denn beide Meßsysteme nehmen wie erwähnt die Strömung ca. 60 cm unter der Wasseroberfläche auf, und beide Systeme sind aufgrund der an den Meßtagen herrschenden meteorologischen Bedingungen nur minimal durch Wind etc. beeinflusst.

Daß dem durchaus so ist, belegt nach Ansicht des Verfassers auch eine weitere interessante Beobachtung zur räumlichen Differenzierung. Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben,

* Hanskalbsander Nebelbe: Einrichtung einer terrestrisch exakt vermessenen Schwimmer-teststrecke mit sekundengenau gestoppten Profilverfahren. Das Testlängsprofil verlief parallel zu mehreren entlang der Teststrecke gesetzten Aanderaa-Einzelmessgeräten, die mit 1-Minuten-Auflösung Geschwindigkeitsdaten registrierten.

kommt es nämlich im Bereich der Strömungsmessstellen „I“ und „II“, d. h. der unterstromig-binnenseitigen Umströmung der Brammerbank, bei Flutstrom nicht nur zu einer Querprofil-Scheerung, sondern insgesamt auch zu einer gewissen Längsprofil-„Bremsung“ der Wasserbewegung. Dies ist bei allen Schwimmergruppen der Flutstrombefliegung zu beobachten, die diese Region passieren. Solche Besonderheiten sind natürlich aus dem Datenvergleich der Einzelmessgeräte (auch bei dichter Vernetzung) nicht so ohne weiteres erkennbar.

Grundsätzlich deuten obige Hinweise an, daß in der Tat beträchtliche Schwankungen der Geschwindigkeiten in kleinräumiger Verteilung, d. h.

a) Beschleunigung und Verzögerung des meßbaren Transports im Längsprofil und

b) Geschwindigkeitsscheerungen im Querprofil innerhalb des Meßgebietes vorliegen. Beide Beobachtungen belegen, daß in einer Raumbewertung große Imponderabilien auftreten müssen, wenn Daten zur Bewegungsdynamik (Strömung und Wasserinhaltsstoffe) nur mittels Einzelmessgeräten gewonnen werden. Dies ist zur Zeit jedoch im Bereich der Küstenforschung der Regelfall, nicht allein aus Kostengründen (eine Befliegung kann keine Routinemessung sein), sondern auch aus meteorologischen Gründen – eine Befliegung setzt immer optimale Bedingungen mit klarer Sicht und windarmer Atmosphäre voraus, etwas, das gerade im Küstengebiet relativ selten anzutreffen ist. Zudem bleibt bei Schwimmermessungen ohne Frage ein gewichtiger Schwachpunkt: Die Untersuchung ist zwar flächendeckend, zeitlich allerdings auf eine singuläre Tide bzw. Halb tide beschränkt.

Andererseits muß für gebietsspezifische Grundlagenuntersuchungen des Raumverhaltens und der Raumdynamik davon ausgegangen werden, daß entsprechend o. a. Geschwindigkeitsvarianzen allein mit Einzelmessgeräten nur eine möglicherweise eingeschränkte, lokal begrenzte Sicherheit in der bewertenden Aussage des Gutachters erreicht werden kann. Es bleibt bei jedem Einzelmessgerät immer die Frage nach der Raumrepräsentativität des ausgewählten Punktes.

Zunächst scheint dem Verfasser aber eines sicher: Durch Schwimmermessungen ist mittels der Transportbahnen und deren relativen, flächenhaften Geschwindigkeitsunterschiede bei weitem deutlicher die Raumbelastung, der ein Ästuarbereich unterliegt, aufzeigbar, als durch Einzelströmungsgeräte. Oder mit anderen Worten: Die Wahl der Positionen für Einzelmessgeräte wird zwar unter Beachtung aller wesentlichen hydrologisch-morphologischen Kriterien getroffen, so daß eigentlich nach langjähriger Erfahrung angenommen werden kann, einen sogenannten „repräsentativen“ Meßort gewählt zu haben, jedoch zeigen obige Fakten, daß solche Einzelgerät-Meßkampagnen für sich allein noch keine ausreichende Aussage über die räumliche Verteilung der Strömung und damit auch der Geschwindigkeitsdifferenzierung in einem Testgebiet zulassen.

Somit können die Strömungsmessgeräte zwar sehr wohl die mittleren Verhältnisse eines Punktes (!) des Untersuchungsraumes wiedergeben, nicht jedoch zwingend auch die Bereiche darstellen, die relativ am stärksten von der Strömung beansprucht sind. Letzteres können erheblich besser, wenn auch andererseits auf eine singuläre Tide beschränkt, Schwimmerbahnuntersuchungen leisten.

5.2 Turbulenz und Massenbewegung

Neben den oben beschriebenen Unterschieden in der Raumauflösung der Meßmethoden tritt hinsichtlich des absoluten Vergleichs von Geschwindigkeiten aus punktuellen Einzelmess-

geräten und Schwimmern ein großes Problem auf. Wenn nämlich, wie vorstehend dargestellt, Strömungsmessgeräte die mittleren Verhältnisse nur für einen Festpunkt angeben, Schwimmer jedoch für eine Strecke, so ist dies zu einem Teil natürlich auch dynamisch-physikalisch ein Unterschied.

Bekanntlich nehmen stationäre Meßgeräte primär die Änderungen der Strömungseigenschaft an einem Ort nach der EULERSchen Beschreibungsweise auf. Treibkörper hingegen dokumentieren die Bewegung eines individuellen Wasserteils, also seiner Bahnlinie durch den Raum gemäß der LAGRANGESchen Beschreibungsweise. Rechnerisch wären dies zwei nur leicht voneinander abweichende Naturdaten. Die Abbildung 13 allerdings zeigt das Resultat eines wert- bzw. faktenmäßig doch möglicherweise recht deutlichen Unterschiedes: Für die ortsfeste Strömungsmessung ergibt sich an der Meßposition II darstellungsmäßig (und nach der EULERSchen Berechnung richtig) ein Stromvektor mit dem Geschwindigkeitswert 0,61 m/sec, während beim in minimalem Abstand passierenden Schwimmer Nr. 32 sich eine Bahnlinie (LAGRANSCHKE Teilchen-Trift) mit einer abweichend höheren Transportgeschwindigkeit von 1,05 m/sec zeigt.

Spielt hierbei der aus theoretischen Betrachtungen, aber auch aus Unterwasser-Videoaufzeichnungen des Verfassers (DAMMSCHNEIDER, 1988) ableitbare, d. h. dort sichtbare Einfluß der Turbulenz (und deren Walzenstruktur), eine Rolle? Denn die reine Wasserbewegung des Tidestroms unterliegt außerordentlich schnellen und kurzzeitigen, impulsartigen Veränderungen. Nicht nur über eine Tide hinweg (Kenterpunkt bis Kenterpunkt) herrschen beträchtliche Unterschiede der Stromtempi, sondern auch innerhalb kurzer Zeitintervalle von wenigen Sekunden „pulst“ bzw. variiert die Strömung erheblich. Dies soll und kann von den verwendeten Aanderaa-RCM4 Strommessern wertmäßig nicht zum Ausdruck gebracht werden, da diese über eine gewisse Zeit (hier: 5 Minuten) die Zählimpulse des Meßrotors aufaddieren und erst dann eine Mittelung über die Zeit durchführen (siehe Abschnitt 4.1). Dies bedeutet folglich zwar eine relativ gute Erfassung der mittleren Strömungsbedingungen, nicht jedoch der tatsächlich wirksamen (unmittelbaren) Kräfte im Wasserkörper – gerade die aber prägen nach den Vorort-Video-Sohlbeobachtungen des Verfassers ohne Frage die Feststoffbewegungen am Gewässerboden erheblich!

Tatsächlich (nach o. a. eigenen Videobeobachtungen) erweist sich das bereits theoretisch/labormäßig als ausnahmslos ungeordnet und turbulent erkannte Fließverhalten im realen Naturwasserkörper der Unterelbe als „sprunghaft“: Bei mittleren Strömungen sind ungeordnete Verwirbelungen verschieden großer Wasserballen/-walzen den gleichmäßigen Teilchenbewegungen überlagert. Hierdurch treten nachweislich räumlich starke Unterschiede der Geschwindigkeit auf. FLÜGGE (1982) stellt fest, daß „die kinetische Energie der turbulenten Bewegung . . . nicht als Funktion der aktuellen Tideströmungsgeschwindigkeit v_x und auch nicht als Funktion der REYNOLDSchen Zahl eindeutig beschrieben werden“ kann. Bei gleichen Strömungsgeschwindigkeiten herrschen je nach Tidephase unterschiedliche Werte der turbulenten Bewegung.

Dies in Übertragung auf den Sedimenttransport bzw. die Aufnahme von Material an der Sohle, ihre Verfrachtung und die Ablagerung von Sediment im Gewässerbett bedeutet dann aber, daß mittels der einfachen standortgebundenen Strömungsmessung nur eine eingeschränkte Bewertungsbasis für Umlagerungsprognosen gegeben ist.

Dessen ungeachtet sind Einzelströmungsmessgeräte für die Bestimmung mittlerer Verhältnisse eines geographischen Punktes nach wie vor unbedingt sinnvoll und erforderlich. Für die Charakterisierung eines Raumes und seines Umlagerungsverhaltens (Massenbewegung) sollten jedoch zusätzlich die Bahnlinien von Wasserteilchen entsprechend den LANGRANGESchen Bewegungsgleichungen bestimmt werden. Dazu können nach derzeitigem Stand der

Kenntnis am günstigsten Treibkörper genutzt werden, die in einer wählbaren (der Wassertiefe des Untersuchungsgebietes angepaßten) Tiefe ein Stromkreuz als Strömungswiderstand tragen – wie bei den DÜBER-Schwimmern verwirklicht. „Die ganze Anordnung (eines Schwimmers) folgt deshalb beim Natureinsatz nahezu vollständig der Wasserbewegung in dieser Tiefe“ (DIETRICH u. a., 1975).

Dies deckt dann zumindest einen Teil des turbulenten Einflusses auf, welcher die im Zuge der Wasserbewegung stattfindenden Materialumlagerungen auslöst bzw. prägt. Die Treibkörper nehmen die turbulenten „Pulse“ der Strömung auf und setzen diese in eine sichtbare Bewegung um – sie sind „Indizien“-Träger für die räumliche Verteilung wechselnd starker turbulenter Prozesse. Die Bahnlinien und Transportgeschwindigkeiten der Schwimmer interpretieren nach Meinung des Verfassers quantitativ und lokal nachweisbar die „wahre“ dynamische Raumbelastung, der ein Gebiet durch Strömungsfelder ausgesetzt ist. Demgegenüber geht Turbulenz bei den Einzelmessgeräten zwar ebenfalls in die Datenaufnahme ein, ihre Wirkung wird jedoch auf „Mittelwerte“ der Geschwindigkeit reduziert: Die o. a. Unterwasser-Videobeobachtungen, die auch auf die visuelle Kontrolle des Aanderaa-RCM4 Geräte- und Rotorverhaltens im Natureinsatz ausgedehnt wurden, zeigen selbst bei errechneten Geschwindigkeiten von mehr als 0,4 m/sec zeitweise regelrecht Stillstandsphasen des Savonius-Rotors. Es wäre denkbar, daß sich in diesem Phänomen turbulente „Walzen“, die den Strömungsmesspunkt aperiodisch und in unterschiedlicher Intensität tangieren, beobachtbar niederschlagen.

Letztendlich ist anzunehmen, daß die o. a. Pulse bzw. Walzenstrukturen, welche am Einzelmessgerät zu sprunghaft und kurzzeitig wechselnden Geschwindigkeiten führen, von einem Schwimmer in der Form bewertet werden, daß letzterer durch die im Strom je nach morphologischer Struktur quantitativ differenziert verteilten Maximalwert-Pulse „geschoben“ wird. D. h., es ist denkbar, daß die schwingenden Pulse bzw. Walzenspitzen als Maximalwertbereiche turbulenter Strömung die Schwimmer lokal beschleunigen, während dieser Effekt von den Bergen-Strommessern aufgrund des aperiodisch-kurzzeitigen Auftretens in die Strömungsdaten eingemittelt wird.

Inhaltlich bleibt festzustellen: Bei einer nachweislichen Differenz zwischen der Maximalgeschwindigkeit eines Schwimmers (LAGRANGESche Messung) und eines von selbigem direkt passierten Einzelmessgerätes (EULERSche Messung) gibt der instationäre Schwimmer das transportwirksame Raumbelastungs- V_{\max} an, während das stationäre Einzelmessgerät primär die relative Veränderung der Strömung über die Zeit als Eigenschaftsänderung erfaßt. Diese Ansicht wird nicht zuletzt durch die sehr gute Übereinstimmung zwischen flächenhaften Sediment-dg-Werten und den lokalen Schwimmer- V_{\max} gestützt.

6. Fazit

Unter Berücksichtigung von in vorliegender Untersuchung nur randlich erwähnten Unterwasserbeobachtungen mittels Videosystem und der dabei deutlich erkennbaren Wirksamkeit der Turbulenz auf den Materialtransport ist der Verfasser der Meinung, daß die gebietsbezogene Interpretation von Schwimmerbahnen und deren Transportgeschwindigkeit (dabei: Turbulenzwirkung aktiv quantifiziert) in ihrer raumbewertenden Aussagekraft wesentlich sicherer ist, als es die aus punktuell-zufälligen, dynamisch und räumlich nicht zwingend repräsentativen Werten von Einzelströmungsmessungen (dabei: Turbulenzwirkung „verwischt“ bzw. eingemittelt) gewonnene Arealanalyse sein kann.

Einzelmesswerte der o. a. Bergen-Strommesser (Aanderaa-RCM4) sind deshalb nicht

falsch. Nur, und dies ist der Kernpunkt der vorliegenden Untersuchung, punktuelle Strömungsmessungen nach EULERScher Beschreibungsweise können mit ihren absoluten Geschwindigkeitswerten nicht in gleicher Form als repräsentativ für die Charakterisierung der „Raumbelastung“ eines Untersuchungsgebietes angesehen werden, wie die LAGRANGESche Teilchen-Transportquantifizierung durch Schwimmer. Punkt-Messungen und Schwimmer-Messungen sollten deshalb je nach Aufgabenbeschreibung gewichtet oder (besser) in Kombination zum Einsatz kommen. Die alleinige Verwendung von Einzelmeßgeräten ansonsten zwar zu bewertbaren Zeit- und Punkttrendaussagen, jedoch nicht zu gesicherten Flächen- und Sohlenbelastungsprognosen. Materialumlagerungen werden erst durch flächenauflösende Schwimmerkartierungen besser analysierbar, wobei deren Aufnahme durch Luftbildserien mit guter Genauigkeit und schneller zeitlicher (iterativer) Folge erreichbar ist.

In Anwendung zeigen dies die raumbezogenen Ergebnisse der Untersuchung, welche Hinweise auf Materialumlagerungen „im Kreislauf“ geben. Danach wandert aller Wahrscheinlichkeit nach Material aus dem Bereich der Brammerbank mit dem Flutstrom stromauf. Wie die Schwimmerdaten zeigen, wird dabei sehr stark die Binnenseite des Krautsander Watts beaufschlagt – und dies bei dort sukzessiv im Längsprofil (stromauf) abnehmenden Geschwindigkeiten. Im Zuge dieses Effektes sollte ein bedeutender Anteil des transportierten Sediments zur Akkumulation kommen, vor allem im überströmten/strömungsreduzierten Wattrücken bzw. dem hauptelbeseitigen „Delta“ (siehe Karte 3).

Der Ebbstrom, der „anschließend“ auf der Hauptelbeseite des Krautsander Watts entlangstreicht, remobilisiert dieses Material teilweise wieder und führt es stromab. Da erst bei Unterelbe-km 677 der Trend des Ebbstroms zur westlich gerichteten Einströmung bzw. Umströmung der Brammerbank aktiv werden kann, kommt es dort, in der Öffnung zwischen Krautsander Watt und Brammerbank (speziell im Bereich der Zungenspitze des Krautsander Watts) bei hier abnehmenden Geschwindigkeiten zu Akkumulationstendenzen. Da der Ebbstrom jedoch auch die Brammerbank mittig überströmt, wiederum mit einer im Zentrum gelegenen Geschwindigkeits-„Senke“ und dadurch ausgelöster Sedimentationstendenz, findet der o. a. Flutstrom dann erneut geeignetes Material zur Umlagerung stromauf – der Kreislauf ist geschlossen.

Erklärlich werden durch diese Wechselwirkungshypothese die selbst für Fachleute immer wieder überraschenden, kurzfristig eintretenden und quantitativ bedeutenden Formenänderungen auf der Brammerbank bei insgesamt über die Zeit relativ stabiler Gesamtbilanz. Ebenso wird die Versandung der binnenseitig des Krautsander Watts verlaufenden Stromrinne erklärt, und im selben Sinne bekommt die Stromabverlagerung der Zungenspitze des Krautsander Watts ihre Logik.

7. Schriftenverzeichnis

- ANWAR, H. O. u. ATKINS, R.: Turbulence measurements in simulated tidal flow. J. Hydraul. Div., ASCE, No. HY-8 1980.
- BEHRENS, J. u. VAGTS, W.: Strömungsverhältnisse in Stromverzweigungsbereichen der Unterelbe nach Schwimmermessung. DGM, H. 5/6, 1985.
- BOOTH, D. A., HOWARTH, M. J. u. a.: A Comparison of Residual Currents Estimated with Current Meters and a Parachute Drogue in a Shallow sea. Dt. hydrogr. Zeitschr. H. 31, 1978.
- CHRISTIANSEN, H. u. RADTKE, G.: Strömungsverhältnisse und Sedimentation in ausgewählten Hamburger Hafeneinfahrten. Strom- und Hafenaufbau Hamburg, Gewässerkd. Studie Nr. 4, Hamburg 1985.
- COUTARD u. JURISCH: Neues, verbessertes Verfahren zur Messung von Fließgeschwindigkeiten in der Natur. In: BAW-Brief Nr. 2, 1986.

- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Inluviale Schwemmfächer – über die lokalen Folgen natürlicher Materialumlagerungen im Bereich der Unterelbe. *Die Küste*, H. 43, 1986.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Unterwasser-Videoaufzeichnungen von Sohlbewegungen im Bereich der Unterelbe. Unveröffentl. Untersuchung, Hamburg 1988.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J. u. FELSHART, TH.: Interne Stromfäden und inluviale Schwemmfächer – Angewandte Morphodynamik in Tideflüssen. *Berliner geographische Studien*, Bd. 25, 1987.
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W. u. SIEDLER, G.: *Allgemeine Meereskunde*. Berlin 1975.
- FLÜGGE, G.: Transport- und Ausbreitungsmechanismen in Flüssen und Tideästuarien unter besonderer Berücksichtigung der Strömungsturbulenz. *Mitt. d. Franzius-Inst. d. Univ. Hannover*, H. 55, 1982.
- GÖHREN, H.: Strömungsvorgänge in Wattgebieten bei Sturmfluten. *Die Küste*, H. 31, 1977.
- HAMMOND, TH. M. u. COLLINS, M. B.: Flume Studies of the Response of Various Current Meter Rotor/Propellers to Combinations of Unidirectional and oscillary Flow. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* 32, 1979.
- HAMMOND, TH. M. u. a.: Field and Flume Comparisons of the Modified and Standard (Savonius-Rotor) Aanderaa Self-Recording Current Meters. In: *Dt. hydrogr. Zeitschr.* 2, 1986.
- HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. *Jahrb. d. Hafenbau-techn. Ges.*, Bd. 18, 1941.
- QUADFASSEL, D. u. SCHOTT, F.: Comparison of Different Methods of Current Measurements. *Dt. Hydrogr. Zeitschr.* 32, 1979.
- SAMU, G.: Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Unterelbe. *Mitbl. d. Bundesanst. f. Wasserbau*, Nr. 60, Hamburg 1987.
- SCHULZ, B.: Beiträge zur Kenntnis der Gezeiten an der flandrischen Küste und auf der unteren Schelde. *Deutsche Seewarte*, H. 2, 1925.
- SCHRÖDER, M.: Messung des turbulenten Impuls- und Salztransports in der Mischungszone der Elbe. *GKSS-Bericht Nr. E/16*, Geesthacht 1987.
- SHERWIN, T. J.: Measurements of current speed using an Aanderaa RCM4 current meter in the presence of surface waves. *Continent. Shelf Res.*, 2/1988.
- WEGENER, B.: Rechnergestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien im Verfahren der Wattvermessung. *Wiss. Arbeiten d. Fachr. Vermessungswesen der TU Hann.*, H. 91, 1979.
- WIELAND, P.: Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattenforschung. *Die Küste*, H. 40, 1984.