

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Maushake, Christian**

## **Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP-Messungen**

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/20.500.11970/101575>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Maushake, Christian (2007): Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP-Messungen. In: Die Küste 72. Heide, Holstein: Boyens. S. 125-143.

### **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.



# Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP-Messungen

Von CHRISTIAN MAUSHAKE

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

Die Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg führt in Kooperation mit der niederländischen Firma AquaVision B.V. ein mittelfristiges Untersuchungsprogramm (2006–2008) zur Erfassung suspendierter Sedimente im Elbeästuar durch. Diese Arbeiten finden im Rahmen planrechtlicher Untersuchungen zur weiteren Fahrrinnenpassung der Elbe sowie für Zwecke der Weiterentwicklung und Validierung von numerischen Modellverfahren und Systemstudien zur ästuarinen Schwebstoffdynamik statt.

Zur messtechnischen in-situ-Erfassung von Schwebstoffen hat sich die Verwendung der Rückstreuungssignale von akustischen Doppler-Strömungsmessgeräten (ADCP) zu einem leistungsfähigen Werkzeug entwickelt. Hierbei ist die Kalibrierung der akustischen Signale der aufwändigste und sensitivste Punkt. Daher sind weitere Ziele des Programms

- die Optimierung der Messstrategie,
- die Reduzierung des für die Kalibrierung erforderlichen Aufwandes sowie
- eine Aussage zur Sensitivität des eingesetzten Verfahrens.

Es wurden sowohl schiffsgestützte Messungen auf Quer- und Längsprofilen sowie stationäre Messungen in Verankerungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der ersten Messkampagne im Herbst 2006 zeigen, dass die gewählte Methode gut für die Validierung hoch auflösender numerischer 3-D-Modelle geeignet ist

## S u m m a r y

*The coastal department of the German Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW-DH) and the Dutch company AquaVision B.V. are conducting a medium-term (2006–2008) field investigation of suspended sediments in the Elbe estuary. The results are part of a decision supporting expertise about the effects of dredging and maintenance works in the navigation channel of the Elbe and will be used to validate a 3D numerical model of the area.*

*Due to its non-intrusive nature and the high spatial resolution the use of ADCP backscatter signals has become a powerful tool for in-situ studies of suspended sediments. Calibration of the deployed instruments is the most crucial point in that context and takes up a major part of the project. Thus, to find an optimal strategy for the measurements and, thereby, to reduce the amount of calibration work and quantify the sensitivity of the method are important goals of the study.*

*For the fieldwork ship-borne ADCP measurements on transects across and along the river have been combined with stationary ADCP measurements on fixed positions.*

*The results of the first measurement campaign (in fall 2006) show that the method is very suitable for the data requirements of 3D numerical modelling.*

## K e y w o r d s

ADCP, backscatter, Schwebstoff, BAW, SSC, suspended solids, measurements, Elbe estuary

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	126
2. Messtechnische Grundlagen . . . . .	128
3. Verwendetes Messsystem . . . . .	130
3.1 Acoustic Doppler Current Profiler . . . . .	130
3.2 Kalibriereinheit . . . . .	131
3.3 Orientierungssensoren . . . . .	132
3.4 Messwernerfassung . . . . .	132
4. Messungen . . . . .	133
5. Ergebnisse . . . . .	134
5.1 Längsprofile . . . . .	134
5.2 Querprofile . . . . .	137
5.3 Stationäre Messungen . . . . .	140
6. Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	141
7. Danksagung . . . . .	142
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	142

### 1. Einleitung

Im Rahmen der planrechtlichen Projektarbeiten zur geplanten weiteren Fahrrinnenanpassung der Elbe werden bei der Abteilung Küste der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-DH) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Mit den Methoden der wasserbaulichen Systemanalyse sind fundierte Aussagen zur Veränderung der abiotischen Systemzustände zu erarbeiten. Über die aktuelle Fragestellung der weiteren Fahrrinnenanpassung hinaus werden zukünftig Prognoseverfahren für die mittel- und langfristige Entwicklung des Feststoffhaushaltes im Elbeästuar eine hohe Bedeutung gewinnen. Die zukünftige Entwicklung von Baggermengen, neue Bagger- und/oder Verklappungskonzepte, aber auch Langfristprognosen zu strombaulichen Maßnahmen sind Beispiele für Fragestellungen von hoher ingenieurpraktischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung und wichtiger Bestandteil eines Vorgehens, für welches heute der übergeordnete Begriff des „Sedimentmanagement“ verwendet wird (NETZBAND u. WITTE, 2007).

Für die Methoden der wasserbaulichen Systemanalyse stellen diese anspruchsvollen Fragestellungen eine große Herausforderung dar, zumal die prägenden physikalischen Prozesse zur ästuarinen Schwebstoffdynamik vielfach erst unzureichend und mit großen Unsicherheiten beschreibbar sind. Hier besteht auf allen Feldern der wasserbaulichen Untersuchungsmethoden noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, sowohl bei den Labor- und Naturuntersuchungen wie auch bei numerischen Simulationsverfahren.

Den numerischen Verfahren kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, denn eine Prognose zukünftiger Entwicklungen ist nur möglich, wenn leistungsfähige dreidimensionale hydro- und morphodynamische Simulationsmodelle zur Verfügung stehen, die in der Lage sind, neben der Hydrodynamik auch die Prozesse des Transportes, der Akkumulation, Sedimentation und Erosion von Feststoffen zu analysieren. Derartige Verfahren werden bei der BAW-DH vorgehalten und – soweit sie validiert und überprüft sind – für die Projektbearbeitung operationell eingesetzt und in Kooperation mit Universitäten und anderen Instituten ständig weiterentwickelt und verbessert.

Unverzichtbar und komplementär mit der Methode der numerischen Modellierung verknüpft ist die Anforderung, in-situ Messdaten von Kenngrößen des Feststofftransportes zu erheben, wobei durch die Bereitstellung derartiger Messdaten ein Mehrfachnutzen entsteht:

- Validierungsdaten für die numerische Modellierung,
- (Weiter)-Entwicklung prozessorientierter Modellansätze,
- wissenschaftliche Basisdaten für Beweissicherungs- und Prognoseverfahren
- und nicht zuletzt ein eigenständiger Beitrag zum Verständnis der ästuarinen Transportprozesse.

Aus dieser Notwendigkeit und Motivation heraus hat die BAW-DH ein Messprogramm zur Erfassung von Kenngrößen der Schwebstoffdynamik im Elbeästuar aufgelegt, welches neben den bereits genannten Zielen (aktuelles Planfeststellungsverfahren „weitere Fahrinnenanpassung Elbe“ und Aufbau von Sedimentmanagement-Methoden) auch einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Messkonzepten und -verfahren liefern soll. Hierzu besteht eine fachliche Kooperation mit der niederländischen Firma AquaVision B.V. Die Durchführung der Messungen wird durch die Hamburg Port Authority (HPA) und die Wasser- und Schifffahrtsämter Hamburg und Cuxhaven unterstützt. Das Programm ist zunächst auf drei Jahre ausgelegt (2006 bis 2008) und beinhaltet jeweils im Herbst jedes Jahres die Durchführung einer Messkampagne.

Als Messverfahren wurde das System VISEA/PDT des niederländischen Kooperationspartners AquaVision B.V ausgewählt, weil es zum einen ein hohes Innovationspotential besitzt und zum anderen weitgehend am Markt verfügbare Technologien und Systeme einbindet. Im Kern basiert dieses Verfahren auf der schiffsgestützten Erfassung akustischer Backscattersignale mit einem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Damit ist es möglich, die Wassersäule nahezu vollständig mit einem hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen zu erfassen und Transportbilanzen über Messquerschnitte zu erstellen.

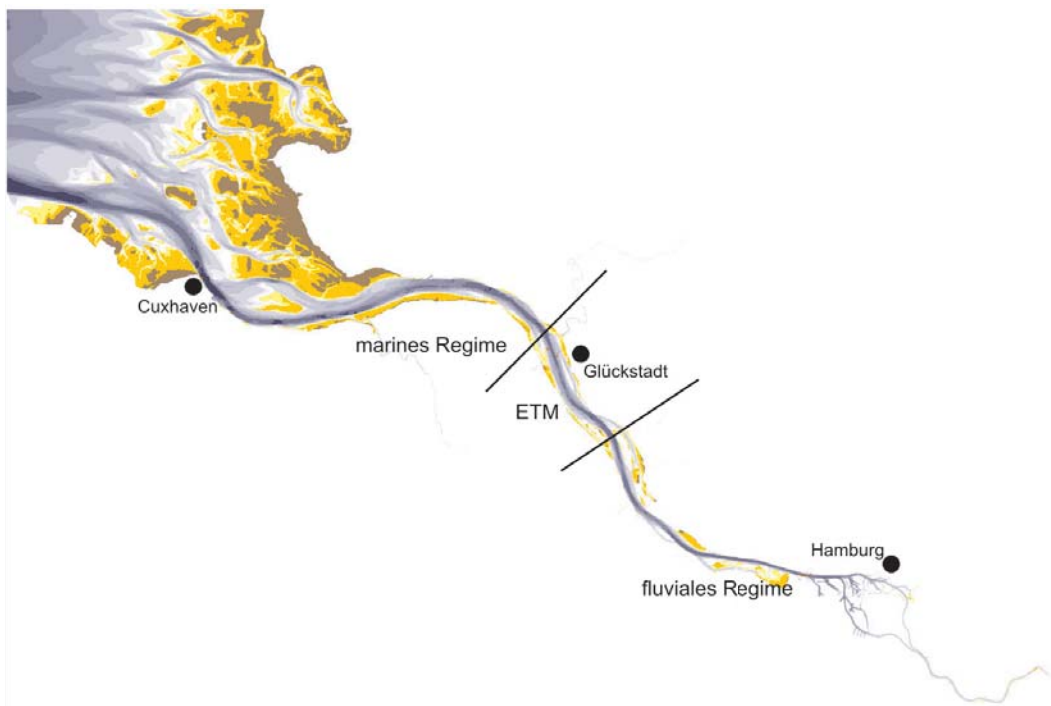


Abb. 1: Untersuchungsgebiet

In Kap. 2 wird dieses Verfahren erläutert; das eingesetzte Messsystem wird in Kap. 3 beschrieben. In Kap. 4 wird das Messprogramm vorgestellt, dessen erste Ergebnisse in Kap. 5 dargestellt und diskutiert werden. Da das gesamte Programm erst im Jahre 2008 endet, kann es sich erst um erste Ergebnisse und Bewertungen handeln.

## 2. Messtechnische Grundlagen

Für die in-situ-Erfassung von Schwebstoffkenngrößen stehen direkte und indirekte Methoden zur Verfügung. Bei den direkten Messungen wird mit mechanischen Verfahren meist auf Basis von Pump- und Schöpfersystemen eine Suspensionsprobe aus der Wassersäule entnommen. Die Analyseergebnisse – z.B. Schwebstoffkonzentrationen, organischer Anteil durch Glühverlust und Körnungslinien – entstehen durch labortechnische Behandlung der Proben. Diese direkte Beprobung des Wasserkörpers ist auch für alle indirekten Verfahren für die Kalibrierung der Geräte unverzichtbar und muss Bestandteil jedes Messkonzeptes sein.

Für die indirekte Messung von Schwebstoffkenngrößen werden hauptsächlich *optische* und *hydroakustische* Sensoren eingesetzt.

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Generell lässt sich sagen, dass optische Sensoren sehr gut geeignet sind, um feinkörnige Sedimente zu erfassen. Optische Signale verhalten sich über große Messbereiche (mehr als 3 Größenordnungen) weitgehend linear zur Messgröße Schwebstoffkonzentration (*Suspended Sediment Concentration*, SSC). Dies ist in natürlichen Systemen, in denen die Konzentrationen stark variieren können, ein Vorteil. Optische Messungen können allerdings nur als Punktmessungen bzw. sehr kleinräumig durchgeführt werden, was das räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen einschränkt und ein großer operationeller Nachteil ist. Prinzipiell bedeutet jeder Sensor, der an den Ort der Messung in der Wassersäule gebracht werden muss, auch immer eine lokale Störung des zu messenden Umfeldes.

Hydroakustische Geräte wie z.B. akustische Strömungsprofiler (ADCP) oder auch Echolote sind in der Lage, die gesamte Wassersäule berührungslos und mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu beschallen. Für die Erfassung von Schwebstoffkonzentrationen macht man sich hierbei die von den Schwebstoffteilchen in der Wassersäule erzeugte Rückstreuung zunutze, den so genannten akustischen Backscatter (HOITINK u. HOEKSTRA, 2005).

Für die Modellierung des von einem ADCP in einer Suspension erzeugten akustischen Backscatter wird die auf Basis der sogenannten „Sonargleichung“ von (MEDWIN u. CLAY, 1998) entwickelte Gebrauchsformel von (DEINES, 1999) verwendet:

$$S_v = 2\alpha R + (E - E_r) + 10 \log_{10} \left[ \frac{T_T R^2}{L P_T} \right] + C \quad (1)$$

mit:

$S_v$	absoluter Backscatter (volumenspezifische Rückstreuung)	[dB]
$\alpha$	Attenuationskoeffizient (Dämpfung durch Wasser und Schwebstoffe)	[dB/m]
$R$	Schrägentfernung zum Messvolumen	[m]
$K_c$	Skalierungsfaktor	[dB/m]
$E$	empfangene Echostärke	[counts]
$E_r$	Rauschniveau des Schallwandlers	[counts]

$T_T$	Schallwandler – Temperatur	[°C]
$L$	Länge des Sendeimpulses	[m]
$P_T$	Sendeleistung	[W]
$C$	Konstante	[dB]

Es wird also gezeigt, dass der absolute Backscatter von

- geometrischen (entfernungsabhängigen)
- instrument-spezifischen und
- Attenuations-Termen

abhängt. Die geometrischen Abhängigkeiten lassen sich durch Laufzeitmessung der Schräg-entfernung  $R$  (Echolotung) gut erfassen. Die instrument-spezifischen Anteile können ebenfalls durch Messung (z.B. der Temperatur  $T_T$  oder der Echostärke  $E$ ) bzw. durch Kalibrierung beim Instrumentenhersteller (z.B.  $E_r$  und  $K_c$ ) berücksichtigt werden.

Wesentlich komplexer unter in-situ-Bedingungen ist die Berücksichtigung der Attenuation  $\alpha$ . Es gilt:

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s \quad (2)$$

Das Rückstreuverhalten der hydroakustischen Signale hängt also vom Attenuationsverhalten  $\alpha_w$  des Wasserkörpers und der in ihm suspendierten Schwebstoffe  $\alpha_s$  ab.  $\alpha_w$  wird nach einem empirischen Ansatz von FRANÇOIS and GARRISON (1982) berücksichtigt, die  $\alpha_w$  als Funktion der Wassertemperatur und des Salzgehaltes darstellen – zwei Parameter, die auch unter in-situ-Bedingungen gut zu erfassen sind.

$\alpha_s$  ist von URICK (1948) untersucht und formuliert worden:

$$\alpha_s = \left[ \frac{k^4 \alpha^3}{96 \rho_s} + \frac{k(\sigma - 1)^2 s}{2 \rho (s^2 + (\sigma + \delta))} \right] \frac{20}{\ln(10)} M \quad (3)$$

Hierin sind u.a.:

$$s = \left[ 1 + \frac{2}{\beta \langle \alpha \rangle} \right] \frac{9}{2 \beta \langle \alpha \rangle} \quad (3a)$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3b)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{9}{\beta \langle \alpha \rangle} \right] \quad (3c)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi f}{\nu}} \quad (3d)$$

$K$	Wellenzahl = $2\pi/\lambda$	
$a$	Partikelradius	[m]
$M$	Massenkonzentration der Sedimente	[kg/m <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>-3</sup> ]
$\nu$	Viskosität des Wassers	[m <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup> ]
$f$	Ultraschallfrequenz (typischerweise 1.2 oder 0.6 Mhz)	[Mhz]

Diese Zusammenhänge gelten unter der Annahme, dass das Gesetz der „Rayleigh-Streuung“ erfüllt ist. Hiernach kann die Form der Partikel vernachlässigt werden, solange die Größe der Partikel im Verhältnis zur akustischen Wellenlänge klein ist ( $ka \ll 1$ ).

In Gleichung (3) wird gezeigt, dass die Attenuation durch die Schwebstoffe  $\alpha_s$  wiederum abhängig ist von Sedimenteigenschaften selbst, wie z.B. der Korngrößenverteilung und der Dichte und Form der Partikel – und damit also von Eigenschaften, die man eigentlich erfassen möchte. Das bedeutet, dass eine explizite Funktion für die Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen aus akustischem Backscatter nicht möglich ist, sondern auf ein Iterationsverfahren (die sogenannte inverse Modellbildung) zurückgegriffen werden muss. Dieses Problem ist in der Literatur u.a. von THORNE u. HANES (2002) beschrieben.

Aus praktischen Erwägungen wird es jedoch unter in-situ-Bedingungen nicht möglich sein, alle charakteristischen Kenngrößen so zu erfassen, dass eine direkte Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen (SSC in [mg/l]) aus Messrohdaten (akustische Rückstreuung in [counts]) möglich ist. Daher wird für die endgültige Umrechnung des akustischen Backscatters in Schwebstoffkonzentrationen eine Kalibrierfunktion auf der Basis von Schwebstoffproben aus der Wassersäule angewendet. Sie lautet:

$$10\log_{10}(SSC_{[mg/l]}) = a * s_v_{[dB]} + b \quad (4)$$

Hierin ist:

- $s_v$  absoluter Backscatter gemäß Gleichung (1) [dB]
- b und a Steigung und Achsenabschnitt einer Regressionsgeraden aus Schwebstoffproben vs. absolutem backscatter.

Wie im Folgenden noch zu zeigen sein wird, ist insbesondere die Ermittlung der Kalibrierkonstanten a und b eine große praktische Herausforderungen bei der Umrechnung akustischer Backscatter-Daten in Schwebstoffkonzentrationen unter ästuarinen Bedingungen.

### 3. Verwendetes Messsystem

Das für das „Schwebstoffmessprogramm Elbe 2006–2008“ konzipierte Messsystem basiert im Wesentlichen auf der Durchführung hydroakustischer Profilmessungen mit Acoustic Doppler Current Profilern, die sowohl ortsfest in Verankerungen als auch vom fahrenden Schiff aus eingesetzt werden.

#### 3.1 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Kernstück des eingesetzten Messsystems sind ADCPs der Firma RDInstruments vom Typ Workhorse Rio Grande (600 Khz) bzw. verankerte Systeme des Typs Workhorse SC (600, bzw. 1200 Khz). Die ADCPs dienen hierbei sowohl als Backscatter-Sensor als auch als Strömungssensor. Für Schwebstoffmessungen können prinzipiell auch andere hydroakustische Instrumente verwendet werden, die den Verlauf der akustischen Signale durch die Wassersäule digital aufzeichnen, wie z.B. moderne Vermessungsecholote. Da es sich beim akustischen Backscatter um eine skalare Messgröße handelt, sind die vier Schallwandler eines ADCP für eine Schwebstoffmessung prinzipiell nicht erforderlich. ADCP haben jedoch zwei Vorteile:



- ADCPs sind originär als Strömungsprofiler konstruiert, so dass – identisch zum aufgezeichneten Backscatter-Profil – auch ein Strömungsprofil erfasst wird. Das heißt, dass die ermittelten Schwebstoffkonzentrationen dann mit den Strömungswerten z.B. in Transportraten auf Messquerschnitten verrechnet werden können.
- Es gibt mittlerweile eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen die sich mit der Umrechnung von ADCP-Backscatter-Daten in Schwebstoffkonzentrationen befassen, so dass die in Kapitel 2 dargestellten theoretischen Grundlagen als recht gut untersucht und abgesichert gelten können. Darüber hinaus stehen für den verwendeten Gerätetyp mindestens 2 kommerziell verfügbare Softwareprodukte für die Kalibrierung und Umrechnung der Backscatter-Daten zur Verfügung:
  - SEDIVIEW der Dredging Research Ltd., UK
  - und das für das hier vorgestellte Messprogramm in einer modifizierten Version verwendete
  - VISEA / PDT der AquaVision B.V., Niederlande.

Beide Verfahren sind in verschiedenen Projekten erfolgreich eingesetzt worden, so dass eine für die Projektbearbeitung unverzichtbare Betriebssicherheit vorausgesetzt werden kann.

### 3.2 Kalibrierereinheit

Die für die Kalibrierung des akustischen Backscatter-Signals erforderlichen Daten werden mit einer Multisonden-Einheit auf Fierprofilen vom Bord des Messschiffes aus erfasst (siehe Abb. 2). Folgende Sensoren werden eingesetzt bzw. Messgrößen werden erfasst:

- Valeport CTD 606 zur Messung von
  - Leitfähigkeit
  - Temperatur
  - Tiefe (Druck)
  - Optischer Rückstreuung (Seapoint OBS)
- LISST 100 Laser Scattering und Transmissionsmessung
  - Korngrößenverteilung in 32 Stufen von 2.5 bis 500 micron
  - Volumenkonzentration der Suspension ( $\mu\text{l/l}$ )
  - Optische Transmission
  - Druck/Temperatur
- Pumpsystem zur Entnahme von Schwebstoffproben aus der Wassersäule.

Die Sensoren sind so in einem Fierrahmen installiert, dass die Daten bzw. die Pumpproben zeitgleich aus nahezu demselben Wasservolumen entnommen werden (Abstand der Sensorköpfe  $< 50$  cm).

Mit diesem Sensorsystem werden alle für eine Umrechnung und Kalibrierung des Backscatter-Signals erforderlichen gewässerphysikalischen Zustandgrößen erfasst.



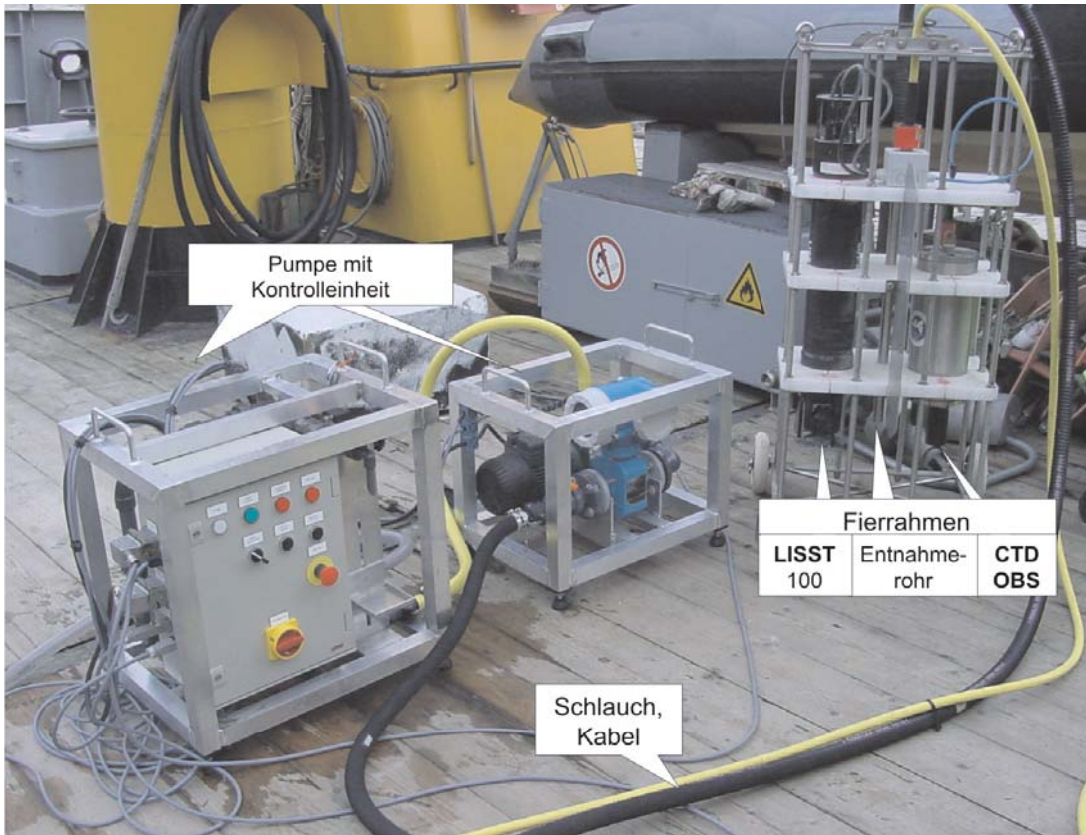


Abb. 2: Kalibriereinheit an Deck

### 3.3 Orientierungssensoren

Für die Geo-Referenzierung (Ortsbestimmung) des Messfahrzeuges bzw. der Messgeräte wird ein DGPS-System verwendet, dessen WGS84-Koordinaten in Echtzeit in das Landessystem (Gauß-Krüger, Bessel) transformiert und in den Rohdatensatz integriert werden. Für die Nordorientierung des ADCP-Instrumentenkoordinatensystems wird ein Glasfaserkreisel eingesetzt, der darüber hinaus auch die Drehwinkel „Roll“ und „Pitch“ zur Verfügung stellt. Hierfür reichen in der Regel allerdings auch die Werte des integrierten ADCP-Sensors.

### 3.4 Messwerverfassung

Die gesamte Erfassung und Steuerung des Messablaufs wird durch die Software VISEA/PDT (VISEA spricht „Visi“, PDT = Plume Detection Toolbox) vorgenommen. Hierbei ist VISEA das Grundmodul für die Durchführung von ADCP-Strömungsmessungen. Die PDT ist ein Zusatzmodul für die Normierung und Transformation der aufgezeichneten akustischen Backscatterdaten in Schwebstoffkonzentrationen. Das ADCP wird direkt über VISEA/PDT konfiguriert und gesteuert. Alle anderen Sensoren (CTD, LISST etc.) werden zwar über die jeweilige instrumentenspezifische Software konfiguriert und gestartet, die Daten werden

dann aber zentral in VISEA/PDT erfasst und gespeichert und erhalten hierbei einen einheitlichen, vom System generierten Zeitstempel, so dass eine exakte zeitliche und örtliche Zuordnung aller Sensordaten zueinander gewährleistet ist. Dies schließt auch die Pumpensteuerung zur Entnahme der Schwebstoffproben aus der Wassersäule ein, um die Daten der späteren Laboranalyse mit den Daten der anderen Mess-Systeme, insbesondere den Backscatter-Daten aus den einzelnen ADCP-Messzellen zu synchronisieren. Diese strenge zeitliche Synchronisierung ist von zentraler Bedeutung für die Datenqualität.

Darüber hinaus entsteht eine einheitliche, projektbezogene Daten- und Verzeichnisstruktur.

Dieses konsistente Datenkonzept und die synchronisierte Erfassung aller relevanten Sensorrohdaten vereinfachen auch die Durchführung erforderlicher Korrekturrechnungen, so z.B. das Anbringen einer Kompasskorrektur oder die Berücksichtigung unterschiedlicher Salzgehalte.

#### 4. M e s s u n g e n

Die Elbe stellt mit ihrer Schifffahrtsrinne auf einer Länge von ca. 120 km die Verbindung zwischen der Nordsee und dem größten deutschen Seehafen Hamburg her. Neben dieser wirtschaftlichen Funktion als Verkehrsweg ist die Elbe aber auch ein Umweltsystem mit ausgedehnten Wattflächen im Außenbereich und einer Vielzahl von Nebenarmen, Einmündungen, Sänden und Inseln, das komplexen hydro- und morphologischen Wechselwirkungen unterliegt und in etwa drei Bereiche unterteilt werden kann (siehe Abb. 1):

- die marin geprägte Außenelbe
- die Untere Elbe mit dem Hafengebiete: limnisch geprägt
- und eine Trübungszone (estuarine turbidity maximum = ETM) im Bereich der Elbinsel „Rhinplatte“.

Um die unterschiedlichen Randbedingungen in diesen Teilgebieten zu berücksichtigen, ist das auf drei Jahre ausgelegte Messprogramm so konzipiert worden, dass die Messungen im gesamten Elbeästuar zwischen Cuxhaven und Hamburg, wie folgt, durchgeführt werden:

- a) Schiffsgestützte Messungen auf Längsprofilen zwischen Cuxhaven und Hamburg, bzw. umgekehrt. Die Messfahrten wurden bei Anpassung an die Verkehrssituation im Revier jeweils etwa in Fahrtrinnenmitte durchgeführt.
- b) Schiffsgestützte Messungen auf Querprofilen (Ganztidenmessungen über ca. 13 Std.), je ein Querschnitt von Ufer zu Ufer in den charakteristischen Teilgebieten des Ästuars:
  - Außenelbe, Cuxhaven (marin)
  - Hafen, EADS / Nienstedten (limnisch)
  - Rhinplatte, Glückstadt (ETM)
- c) Ortsfeste Messungen im Bereich der Querprofile entsprechend b) über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen, jeweils von ca. 2 Wochen vor der Ganztidenmessungen bis ca. 2 Wochen danach. Die verankerten Geräte wurden außerhalb des Fahrwassers in der Nähe des Tonnenstrichs positioniert.

Die Messungen werden jeweils im Herbst durchgeführt. Dieser einheitliche Zeitraum ist gewählt worden, um eine möglichst vergleichbare Grundsituation in der Hydrologie, der Sedimentologie, der Biologie und der Meteorologie zu erfassen (z.B. Oberwasser, Algenblüte, Wetter).

Während der ersten im Herbst 2006 durchgeführten Messkampagne konnten so folgende Datensätze erhoben werden:

- ca. 400 km ADCP-Profilfahrten auf Längsschnitten zwischen Hamburg und Cuxhaven. Hierbei wurden auf ca. 70 Stationen Kalibrierungsmessungen durchgeführt, bei denen u.a. mehr als 200 Schwebstoffproben zur Laboranalyse entnommen wurden.
- Insgesamt ca. 200 Querungen auf den drei Messprofilen, jeweils über eine Tide, bei denen insgesamt auf ca. 160 Kalibrierstation über 300 Schwebstoffproben entnommen wurden.
- Insgesamt über 100 Tage stationäre ADCP-Daten auf vier Lokationen im Messgebiet, bei denen 5-Minuten-Mittelwerte in Messlotrechten erfasst wurden.

Wie in Kap. 2 erläutert, kommt der Kalibrierung zur Ermittlung der Koeffizienten  $a$  und  $b$  aus Gleichung (4) eine hohe Bedeutung für die Qualität der Messergebnisse zu. Die Durchführung der Kalibrierungsmessungen ist bei schiffsgestützten Profilmessungen kein großes praktisches Problem, da die erforderlichen Kalibriereinrichtungen (siehe Abb. 2) direkt von Bord des Messfahrzeuges eingesetzt werden können. Ein Nachteil ergibt sich dadurch, dass der Messbetrieb (die Quer- oder Längsprofilfahrt) während dieser Zeit unterbrochen werden muss. Die bisher gemachten Erfahrungen zeigen, dass mindestens eine Kalibrierung pro Stunde eingeplant werden muss, um den wechselnden Randbedingungen in einem Ästuar (Wasserstand, Strömungsverhältnisse, Schwebstoffzusammensetzung etc.) Rechnung zu tragen. Hierdurch liegt der Aufwand für die Durchführung der Kalibrierungsmessungen derzeit noch bei ca. 30–50 % der Gesamtzeit, so dass die Datendichte im Vergleich zu konventionellen ADCP-Querprofilfahrten reduziert ist.

Die Kalibrierung der verankerten Systeme ist deutlich aufwändiger, da hier die Verankerungspositionen extra angefahren werden müssen, um entsprechende Kalibrierungsmessungen durchführen zu können. Im Zeitraum der Messkampagne Herbst 2006 ist dies insgesamt 4-mal gemacht worden. Die spätere Auswertung hat jedoch gezeigt, dass dies nicht ausreichte, um eine vertrauenswürdige Kalibrierung zu erzielen.

## 5. Ergebnisse

Entsprechend der durchgeführten Messungen liegen Ergebnisdatensätze in drei unterschiedlichen Kategorien vor:

- schiffsgestützte Längsprofile
- schiffsgestützte Querprofile
- stationäre Messungen in Verankerungen.

### 5.1 Längsprofile

Längsprofile sind gut geeignet, um die aktuelle Lage und Ausdehnung der Trübungszone (ETM) im Ästuar zu identifizieren. Da es aber nicht möglich ist, die gesamte Längsachse des Ästuars zeitgleich oder auch „tidephasengleich“ abzufahren, ist bei der Interpretation darauf zu achten, die Ergebnisse an einem bestimmten Ort auf der Längsachse (Stromkilometer) der entsprechenden Tidephase zuzuordnen.

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse von 2 Längsfahrten zwischen Cuxhaven und Hamburg vom 27. September 2006 und 2. November 2006, in denen sich die Lage der Trübungszone zu zwei

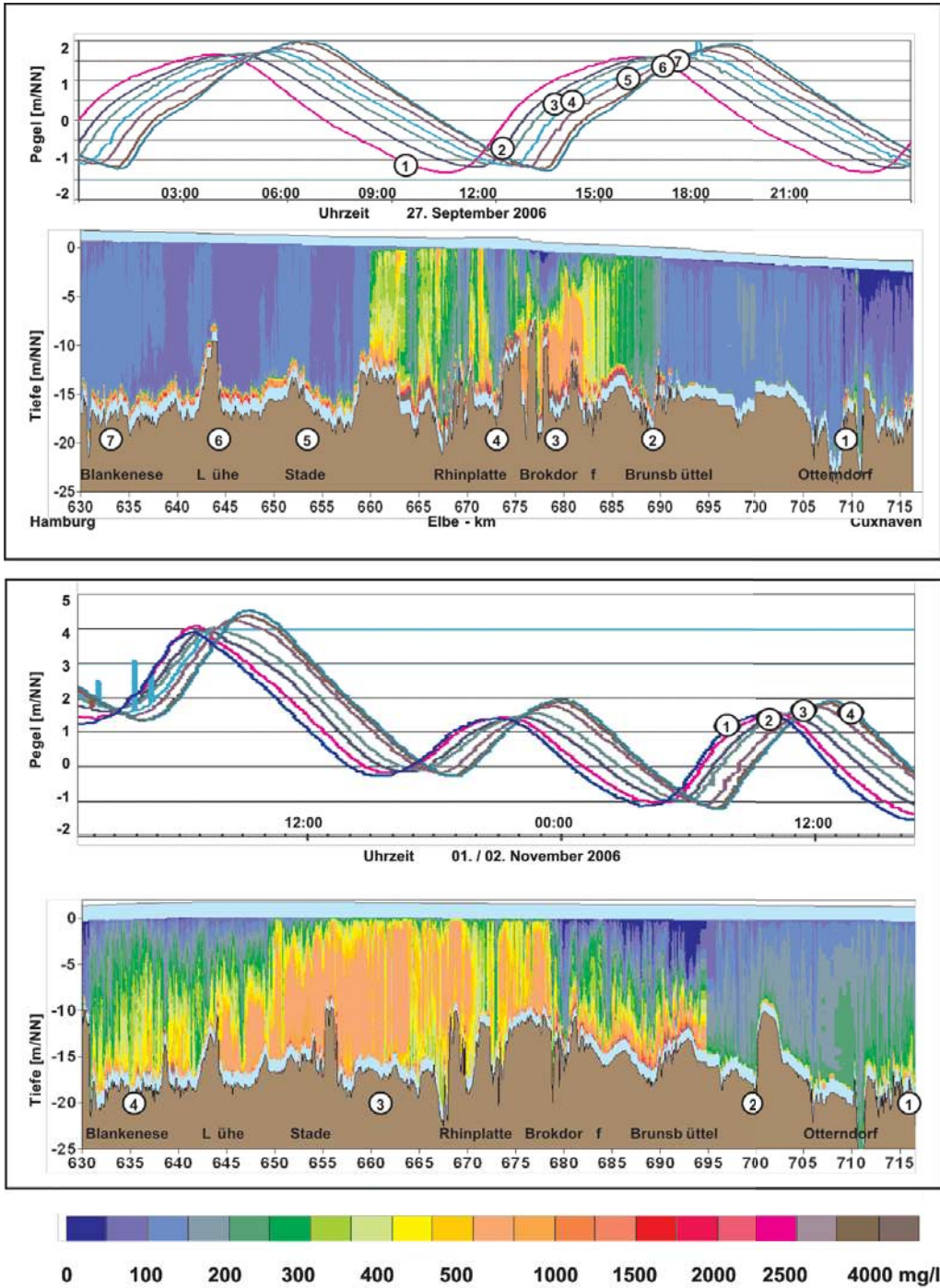


Abb. 3: Schwebstoffverteilung in der Elbe entlang eines Längsprofils zwischen Hamburg und Cuxhaven an zwei Tagen. Oben: 27. September 2006, unten: 2. November 2006 (Sturmtief Britta)



unterschiedlichen hydrologischen Grundsituationen zeigt. Die Abflussverhältnisse am Pegel Neu-Darchau waren an beiden Tagen mit 266 bzw. 306 m<sup>3</sup>/s in etwa vergleichbar auf einem niedrigen Niveau, verglichen mit dem langjährigen mittleren Abfluss von 720 m<sup>3</sup>/s (Abb. 4).

Die Tideverhältnisse jedoch waren sehr unterschiedlich: Während die Messfahrt am 27. September bei „normalen“ Tidebedingungen stattfand, waren die Verhältnisse am 2. November noch stark geprägt von dem einen Tag zuvor über die Nordsee ziehenden Orkantief „Britta“. Die Pegelkurve in Abb. 3 (unten) zeigt für die Tide am 1. November Wasserstände von zum Teil deutlich über 4 m NN. Die Tideverhältnisse hatten sich am 2. November (Tag der Messfahrt) zwar wieder normalisiert, die Lage und Ausdehnung der Trübungszone war aber offensichtlich noch deutlich bestimmt durch die Sturmtide. Die Schwebstoffkonzentrationen, die sich bei „normalen“ Verhältnissen (27. September) deutlich als Trübungszone zwischen Strom-km 660 und 690 abzeichnen, reichen nun weit stromaufwärts bis in den Bereich „Lühe“/„Blankenese“ bei Strom-km 630.

Die Einflussfaktoren auf die Lage und Ausdehnung der Trübungszone in Ästuaren sind vielfältig und seit Jahren Gegenstand von Untersuchungs- und Forschungsprogrammen (z.B. BERGEMANN, 2004). Die bisher durchgeführten Analysen basieren dabei zumeist auf der Entnahme von Oberflächenproben aus der Fahrwassermittte, z.B. durch tidephasengleiche Probenentnahme von der Oberfläche aus einem Helikopter. Mit der hier vorgestellten Technologie ist es nun möglich, einen nahezu geschlossenen Längsschnitt der Schwebstoffverteilung in sehr kurzer Zeit zu erheben und so die Schwebstoffdynamik in der gesamten Wassersäule zu analysieren.

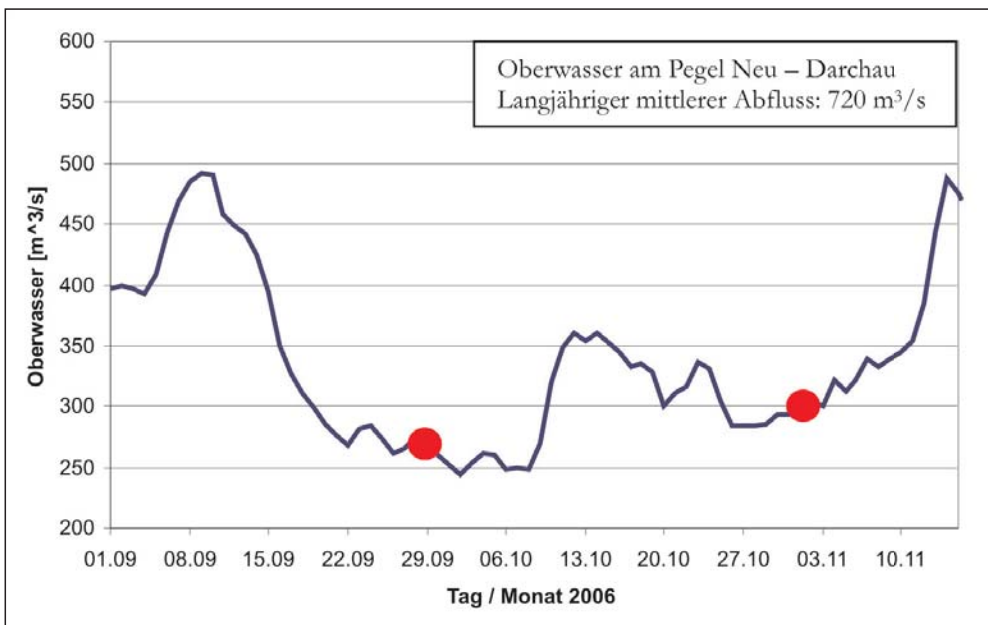


Abb. 4: Verlauf des Oberwasserzflusses der Elbe am Pegel Neu-Darchau.  
In Rot: Zeitpunkte der Längsprofilfahrten

## 5.2 Querprofile

Für Transportbilanzen und eine tidebezogene Analyse der Schwebstoffdynamik sind Messungen auf Querschnitten über den Zeitraum eines Tidezyklus (ca. 12:25 h) durchgeführt worden.

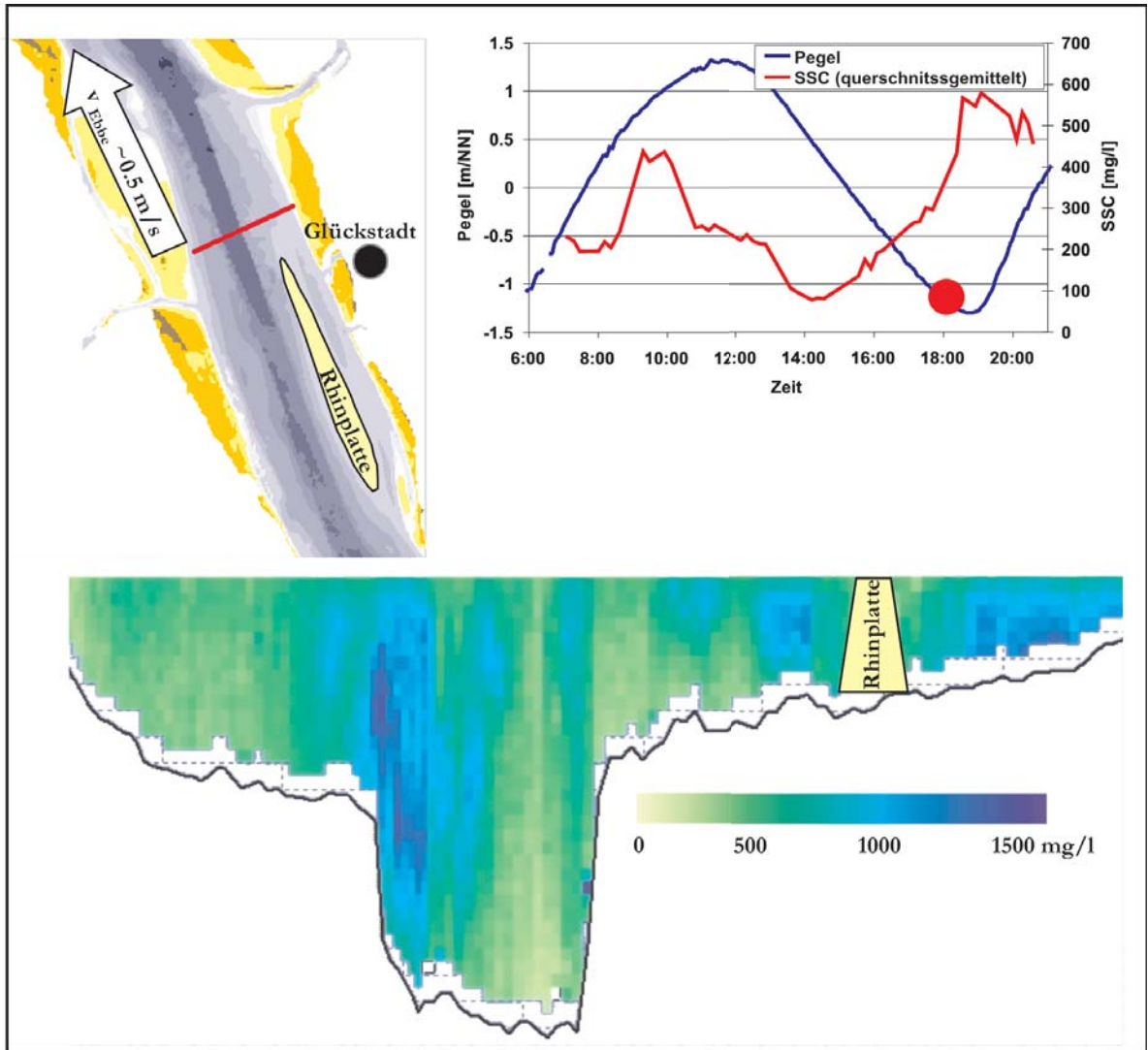


Abb. 5: Schwebstoffverteilung auf einem Messquerschnitt an der Rhinplatte (Übersichtsplan oben links, rote Linie) kurz vor Tnw ( $\sim 0.5 \text{ m/s}$  Ebbstromgeschwindigkeit). Das Zeitreihendiagramm zeigt den querschnittsgemittelten Verlauf der Schwebstoffkonzentration über die gesamte Messtide (roter Punkt: Zeitpunkt des dargestellten Messquerschnittes)

Bei der Querprofilmessung wird ein Messquerschnitt in quasi-kontinuierlicher Fahrt abgefahren, unterbrochen durch die erforderlichen Kalibriermessungen, wie unter 4. beschrieben. Damit liegen Schwebstoff- und Strömungsprofile desselben Messquerschnittes fast über die gesamte Wassersäule und den Zyklus einer Tide vor, so dass geschlossene Transportbilanzen vorgelegt werden können. Ausgenommen hiervon sind die Messbereiche, die von einem ADCP nicht erfasst werden können:

1. Eine durch Sensoreintauchtiefe und Schallwandler-Blanking nicht erfasste Oberflächenschicht von ca. 2 m.
2. Eine durch akustische Nebenkeuleneffekte verursachte Schicht von ca. 6% + ½ ADCP-Tiefenzelle (hier = 25 cm) der Wassertiefe an der Gewässersohle.
3. Die Böschungsbereiche am linken und rechten Ufer.

Auswertelgorithmen die – wie bei der ADCP-Abflussmessung – diese Profilanteile an der Schwebstoffbilanz rechnerisch berücksichtigen, liegen bei der BAW derzeit noch nicht vor. Ihre Entwicklung ist u.a. Bestandteil des laufenden Untersuchungsprogramms.

Abb. 5 zeigt beispielhaft die Schwebstoffverteilung des Messquerschnittes an der Rhinplatte (ca. Strom-km 677) ca. 30 Min. vor Tideniedrigwasser bei 0.5 m/s Ebbstromgeschwindigkeit. Der Messquerschnitt hat die seewärtige Öffnung der Glückstädter Nebelalbe, die durch die Elbinsel „Rhinplatte“ abgetrennt, wird mit einbezogen (Die Lage der Rhinplatte ist in der Querprofilardarstellung angedeutet). Zu der in Abb. 5 gezeigten Tidephase konzentrieren sich die Schwebstoffe im Bereich der Rhinplatte, in der Glückstädter Nebelalbe und am linken Rand des Hauptfahrwassers. Im Rahmen des durchgeführten Messprogramms sind auf dem Messquerschnitt „Rhinplatte“ insgesamt 46 derartige Querfahrten aufgenommen worden.

In Tab. 1 sind die maximal auftretenden Kennwerte der Schwebstoffkonzentration, der Transportrate und der Strömungsgeschwindigkeit jeweils als Flut-/Ebb- und tidegemittelter Wert aller drei untersuchten Querschnitte aufgetragen. Die jeweils höchsten Schwebstoffkonzentrationen treten an der Rhinplatte mit 435 mg/l (Flut) und 735 mg/l (Ebbe) auf. Die maximale Schwebstoffkonzentration tritt an der „Rhinplatte“ also bei Ebbstrom auf und ist fast doppelt so hoch, wie die maximale Flutstromkonzentration, obwohl die maximal gemessene Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit nahezu gleich groß ist. Beim Querschnitt „Hafen“ ist dieses Verhältnis fast umgekehrt: Die maximale Flutstromkonzentration ist mit 417 mg/l fast doppelt so groß wie die maximale Ebbstromkonzentration. In Cuxhaven ist das Verhältnis der maximalen querschnittsgemittelten Schwebstoffkonzentrationen bei Flut- und Ebbstrom nahezu ausgeglichen.

Tab. 1: charakteristische Tidekennwerte der Schwebstoffkonzentration (SSC), des Transportes (flux) und der Strömungsgeschwindigkeit (velocity) in den drei untersuchten Messquerschnitten

Querprofil	Flut			Ebbe			tide-gemittelte Werte	
	*querschnittsgemittelter Maximalwert						SSC	flux
	max*. SSC	max*. flux	max.* velocity	max.* SSC	max.* flux.	max.* velocity		
	[mg/l]	[g/m <sup>2</sup> /s]	[m/s]	[mg/l]	[g/m <sup>2</sup> /s]	[m/s]	[mg/l]	[g/m <sup>2</sup> /s]
Hafen (limnisch)	417	289	<b>1.47</b>	202	155	1.08	151	110
Rhinplatte (ETM)	<b>435</b>	<b>354</b>	1.02	<b>735</b>	<b>373</b>	0.98	<b>298</b>	<b>144</b>
Cuxhaven (marine)	137	125	1.26	119	100	<b>1.34</b>	69	50



Wie unter 4. erläutert, sind während der Querprofilmessungen stündlich Messungen zur Kalibrierung des Systems durchgeführt worden. Hierdurch ist es möglich, den aufgezeichneten ADCP-Backscatter Daten zeit- und ortsnah ermittelte Kalibrierfunktionen zuzuordnen.

In Abb. 6 sind alle während der Ganztidenmessungen auf den drei Messquerschnitten ermittelten und in Gleichung (4) eingeführten Kalibrierkoeffizienten als Zeitreihe aufgetragen und in Bezug zur Tidephase gesetzt worden. Die hierbei auftretende Varianz der Koeffizienten ( $a \sim 0.02$  bis  $0.075$ ,  $b \sim 3-6$ ) macht deutlich, dass es unter den komplexen Bedingungen der ästuarinen Schwebstoffdynamik derzeit nur mit zeitnah durchgeführten Kalibrierungsmessungen möglich ist, die akustischen Backscatter-Daten zuverlässig in Schwebstoffkonzentrationen zu transformieren.

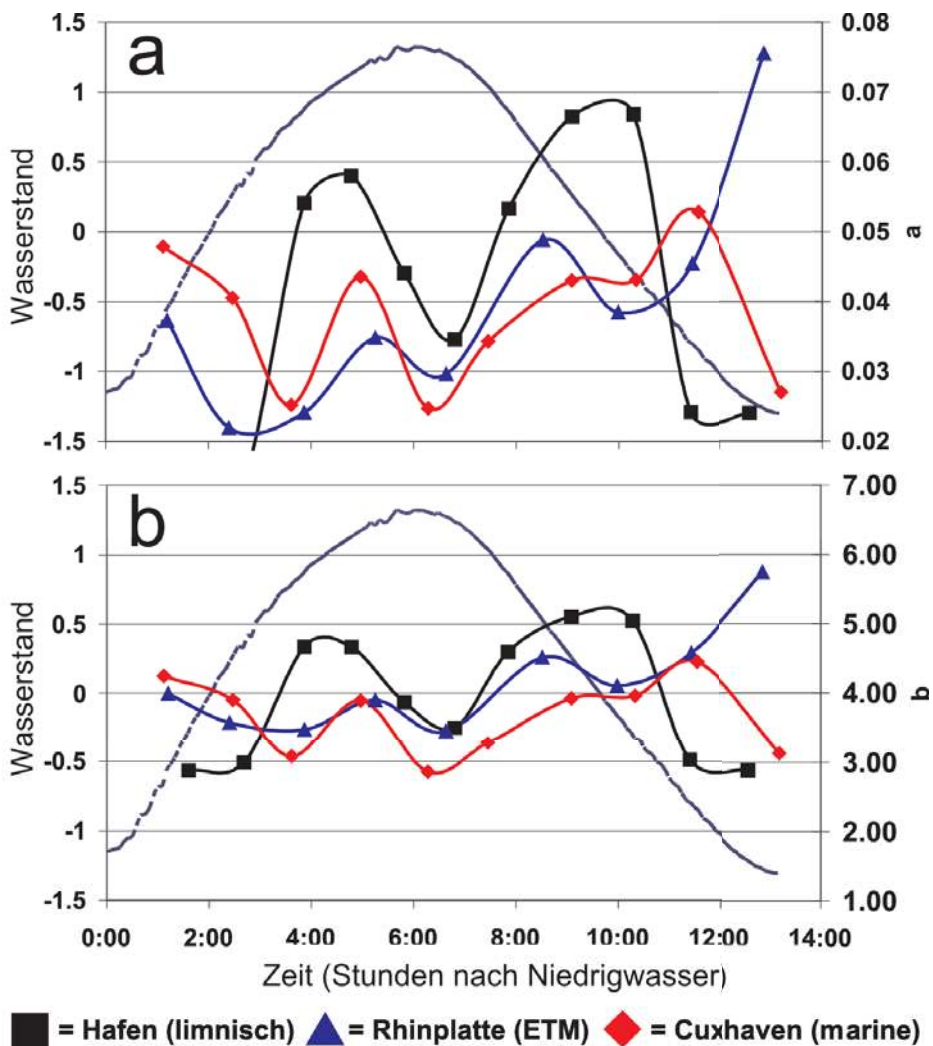


Abb. 6: Verlauf der Koeffizienten  $a$  und  $b$  in den drei Messquerschnitten über den Verlauf der Tide (Anmerkung: die Tidekurve ist schematisch und soll den Bezug zur Tidephase herstellen, tatsächlich sind die Messungen in den drei dargestellten Querschnitten zu unterschiedlichen Tiden durchgeführt worden)

Abb. 6 zeigt weiterhin, dass es im Verlauf der Tide offensichtlich Korrelation zwischen der Tidephase und dem Verlauf der Koeffizienten gibt. Andererseits zeigt der Verlauf der Graphen, dass sie sich im Niedrigwasser zu Beginn und zum Ende der Messung teilweise nicht gut schließen oder sogar auseinander laufen (z.B. Abb. 6, oben, blaue Linie). Die aus der bisherigen Messkampagne im Herbst 2006 vorliegenden Kalibrierdatensätze reichen noch nicht aus, um eine eindeutige – z.B. tidephasenbezogene – funktionale Beschreibung abzuleiten. Dies wird Gegenstand der weiteren Arbeiten in diesem Projekt sein.

### 5.3 Stationäre Messungen

Da schiffsgestützte Profilmfahrten, wie in 5.1 und 5.2 beschrieben, aufgrund des hohen Aufwandes nur kampagnenbezogen über kurze Zeiträume durchgeführt werden können, ist es ein langfristiges Ziel, die hier vorgestellte Technologie auch auf festen Messstationen betreiben zu können. Für das hier vorgestellte Messprogramm sind zu diesem Zweck in einem Zeitraum von 2–3 Wochen vor und nach den Ganztidenmessungen insgesamt fünf ADCP-Geräte an Verankerungen im Bereich der drei Messquerschnitte ausgebracht worden. Hiermit ist es möglich, die Strömungs- und Schwebstoffdynamik in einer einzelnen Messlotrechten über längere Zeiträume zu erfassen, wobei die Messung bei dem gewählten Verankerungstyp am Rand der Fahrrinne stattfindet. Die Durchführung von „Langzeit“-Messungen ermöglicht eine bessere Beurteilung der hydrologischen Gesamtsituation und unterstützt so auch die Interpretation der hoch auflösenden Quer- und Längsprofilmessungen gemäß 5.1 und 5.2. Im Unterschied zu den schiffsgestützten Messungen ist es bei den Verankerungen jedoch nur möglich, punktuell über jeweils relativ kurze Zeiträume Kalibriermessungen durchzuführen.

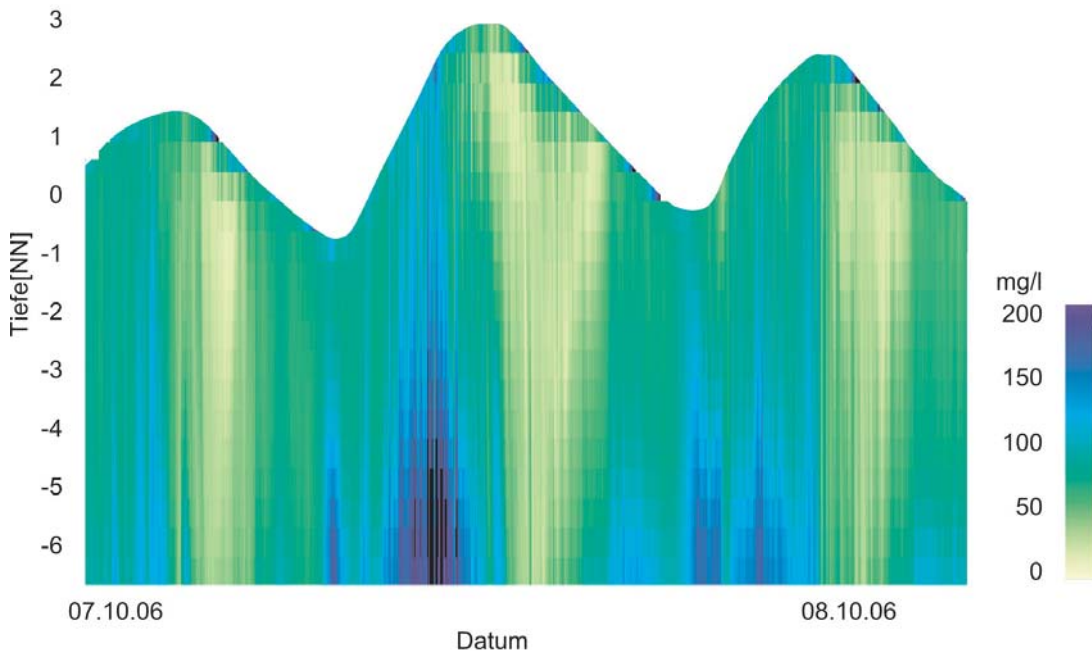


Abb. 7: Schwebstoffkonzentrationen über ca. 1,5 Tiden auf der Position „Brammer Bank“ am westlichen Fahrrinnenrand im Bereich „Rhinplatte“ (siehe Übersichtsplan Abb. 5)

So sind alle während der durchgeführten Längs- und Querprofilfahrten „in der Nähe“ der Verankerungen durchgeführten Kalibriermessungen einbezogen worden, um die entsprechenden Koeffizienten  $a$  und  $b$  (gemäß Gleichung (4)) für die Umrechnung der in den Verankerungen aufgezeichneten Backscatter-Daten abzuleiten. Aufgrund der in 5.2 bei den Querschnittsmessungen gezeigten hohen Varianz der Koeffizienten reicht die Anzahl der vorliegenden Datensätze jedoch nicht aus, um vertrauenswürdige Kalibrierfunktionen für die Umrechnung der in den verankerten ADCPs aufgezeichneten Backscatter-Daten über längere Zeiträume abzuleiten. Eine qualitative – nicht kalibrierte – Aussage bleibt aber auch auf Basis der vorliegenden Daten möglich. Das heißt, dass sich Phasen verstärkter oder verminderter Schwebstoffaktivität eindeutig identifizieren lassen.

Abb. 7 zeigt die Schwebstoffkonzentrationen auf der Position „Brammer Bank“ während einer Tide am 8./9. Oktober 2006. Man erkennt deutlich, dass mit der an diesem Tag höher auflaufenden Tide im Flutast auch die Schwebstoffkonzentrationen deutlich stärker ansteigen, als bei den Nachbartiden. Die scheinbar hohen Werte, die teilweise im Bereich der Oberfläche auftreten, sind auf akustische Wechselwirkungen mit der Oberfläche zurückzuführen und nicht als Schwebstoffkonzentrationen zu interpretieren. Für die Kalibrierung der Schwebstoffkonzentrationen ist ein aus allen verfügbaren Koeffizienten gebildeter mittlerer Wert verwendet worden.

Für die Langzeitbeobachtung von Schwebstoffkonzentrationen aus akustischem Backscatter in festen Messstationen sind unter den Randbedingungen eines Ästuarsystems noch umfangreiche Arbeiten und Untersuchungen über die Zusammenhänge bei der Kalibrierung erforderlich.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Bericht wird der erste Teil eines auf drei Jahre ausgelegten Untersuchungsprogramms zur Erfassung der Schwebstoffdynamik auf der Basis akustischer Backscatter-Messungen mit einem ADCP dokumentiert. Diese erstmalig von der BAW-DH im Rahmen der Projektbearbeitung eingesetzte Methode zeichnet sich insbesondere durch folgende Leistungsmerkmale aus:

- Bei einem schiffsgebundenem Einsatz können quasi geschlossene Schwebstoff- und Transportbilanzen auf beliebigen Messquerschnitten mit einer sehr hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung erstellt werden.
- Sehr gute Eignung, das prozessorientierte Verständnis der Schwebstoffdynamik in einem Tideästuar zu verbessern. Damit wird ein unverzichtbarer Beitrag für die Validierung der bei der BAW betriebenen numerischen Modellverfahren geliefert.
- Gute Absicherung der Ergebnisse durch ein multimodales Sensorkonzept und eine synchronisierte Datenerfassung in einem konsistenten Datenmodell.

Die messtechnische Herausforderung besteht derzeit in der Kalibrierung des Systems, da es unter in-situ-Bedingungen praktisch nicht möglich ist, alle charakteristischen Kenngrößen so zu erfassen, dass eine direkte Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen aus den Messrohdaten möglich ist. Eine zuverlässige Umrechnung gelingt derzeit nur, wenn Kalibrierdatensätze vorliegen, die mit geringer zeitlicher und örtlicher Distanz zu den ADCP-Messungen aufgenommen wurden. Insofern kann die Datenqualität bei den durchgeführten Längs- und Querprofilfahrten aufgrund der hohen Kalibrierdatendichte als hoch eingeschätzt werden. Aber auch ohne ausreichende Kalibrierung ist eine qualitative, normierte Aussage in jedem Fall möglich, so dass Systemstudien zur

Schwebstoffdynamik möglich sind. Dies gilt z.B. für die durchgeführten verankerten Messungen.

Die Methode soll im weiteren Verlauf des noch bis 2008 weiterlaufenden Messprogramms operationell weiter optimiert werden. Das betrifft z.B. die Betriebssicherheit in der Anwendung der komplexen Messanlage oder auch die Einbindung und Interpretation ergänzender Sensorik, wie z.B. dem in der Kalibriereinheit installierten LISST 100. Durch Einbindung eines zweiten – in der Frequenz unterschiedlichen – ADCP sollen die frequenzabhängigen Terme in Gleichung (3) bzw. (3d) bessere Berücksichtigung finden.

Das Verständnis der Faktoren, die die Kalibrierung des Systems beeinflussen, soll weiter verbessert werden, um den Aufwand für die Kalibrierung bei der schiffsgestützten Messung zu reduzieren, mittelfristig auch Daten aus verankerten Stationen zuverlässig analysieren zu können und damit einen wichtigen Beitrag zum Langzeitmonitoring von Schwebstoffen anbieten zu können.

Das Projekt wird in der ersten Jahreshälfte 2009 abgeschlossen und in einem Abschlussbericht dokumentiert.

## 7. D a n k s a g u n g

Umfangreiche Messkampagnen, wie die hier vorgestellte, sind ohne die Kooperationsbereitschaft der beteiligten Institutionen und die Einsatzbereitschaft jedes Einzelnen nicht durchführbar. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang:

- Hamburg Port Authority (HPA) für die Kooperation und Personal- und Schiffsgestellung des Taucherschiffes „Düker To“ und des gewässerkundlichen Messschiffes „Reinhard Woltman“,
- HPA, Stackmeisterei Finkenwerder für den Aufbau der Verankerungen,
- WSA Hamburg, Abz. 1 Wedel für Anker- und Betonungsmaterial, sowie Notbergungseinsatz,
- WSA Cuxhaven für Gestellung des gewässerkundlichen Messschiffes „Vogelsand“ und Unterstützung beim Ausbringen von Verankerungen,
- AquaVision B.V., dem Kooperationspartner der BAW für gute Zusammenarbeit
- und nicht zuletzt den beteiligten Kollegen in der BAW.

## 8. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- BERGEMANN, M.: Die Trübungszone in der Tideelbe – Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung, interner Kurzbericht der ARGE Elbe, download unter <http://www.arge-elbe.de/wge/Download/DTexteH.html>, 2004.
- DEINES, K. L.: Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profiles, Oceans 99 MTS/IEEE proceedings, San Diego, 1999.
- FRANCOIS, R. E. u. GARRISON, G. R.: Sound Absorption Based on Ocean Measurements: Part I. Pure Water and Magnesium Sulfate Contributions, Journal of Acoustic Society of America 72, S. 896–907, 1982.
- FRANCOIS, R. E. u. GARRISON, G. R.: Sound Absorption Based on Ocean Measurements: Part II. Boric Acid Contribution and Equation for Total Absorption, Journal of Acoustic Society of America 72, S. 1879–1890.
- HOITINK, A. J. F. u. HOEKSTRA P.: Observations of Suspended Sediment from ADCP and OBS Measurements in a Mud-dominated Environment, Coastal Engineering 52 (103–118), Elsevier, 2005.
- MEDWIN, H. u. CLAY, C. S.: Fundamentals of Acoustical Oceanography, Academic Press, 1998.

- NETZBAND, A. u. WITTE, H.-H.: Vorhersageverfahren und -modelle für Sediment- und Schadstofftransport, Optimierungsverfahren für Unterhaltungsbaggerungen, HANSA International Maritime Journal, 144. Jahrgang – Nr. 1, 2007.
- URICK, R. J.: The Absorption of Sound in Irregular Particles, Journal of Acoustic Society of America 20, S. 283–289, 1948.
- THORNE, P. D. u. HANES, D. M.: A Review of Acoustic Measurements of Small-scale Sediment Processes, Continental Shelf Research, 22(4), S. 603–632, 2002.