

## **Einfluss von Langleinen-Aquakulturen auf die Schwebstoffverteilung in einem Ria an der Küste Galiziens in Spanien (Ria de Vigo)**

(Vom Fachbereich Hydrogeologie der Universität Bayreuth als Diplomarbeit angenommen)

**Autorin:**

***N. Jäger***

**wissen  
scharft  
nutzen**

**GKSS 2007/1**



**Einfluss von Langleinen-Aquakulturen auf  
die Schwebstoffverteilung in einem Ria an  
der Küste Galiziens in Spanien (Ria de Vigo)**

(Vom Fachbereich Hydrogeologie der Universität Bayreuth als Diplomarbeit  
angenommen)

**Autorin:**

***Nadine Jäger***

(Institut für Küstenforschung)

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.  
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

*Anforderungen/Requests:*

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH  
Bibliothek/Library  
Postfach 11 60  
D-21494 Geesthacht  
Germany  
Fax.: (49) 04152/871717

Als Manuskript vervielfältigt.  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0  
Max-Planck-Straße 1 · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

GKSS 2007/1

## Einfluss von Langleinen-Aquakulturen auf die Schwebstoffverteilung in einem Ria an der Küste Galiziens in Spanien (Ria de Vigo)

*(Vom Fachbereich Hydrogeologie der Universität Bayreuth als Diplomarbeit angenommen)*

Nadine Jäger

*86 Seiten mit 49 Abbildungen und 3 Tabellen*

### Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von Langleinen-Aquakulturen auf die Strömungsfelder und die lokalen Verteilungen des Schwebstoffes in einer Bucht des Ria de Vigo in Spanien. Die Miesmuscheln, die an Flößen kultiviert werden, ernähren sich durch Filtration von Schwebstoffen aus dem umgebenden Meerwasser. Die Untersuchung fokussiert die Ergebnisse auf der Ebene eines Floßfeldes sowie auf der Ebene einzelner Flöße.

Im Vergleich zur Stromachse des Ria, in der alternierende Tideströmungen vorliegen, verändern lokale bathymetrische Effekte die Strömungsrichtung im Muschelfeld erheblich. Zugleich bremsen die Flöße die Strömung lokal stark ab.

In der Totwasserzone der Flöße ist das Phytoplankton durch die Muschelfiltration im Floß deutlich reduziert. Die räumlichen Anomalien von Salzgehalt und Temperatur in der Totwasserzone legen nahe, dass vertikale Austauschprozesse die Nahrungszufuhr innerhalb des Floßfeldes gewährleisten.

### The effects of mussel cultures on suspended particulate matter concentration in the Ria de Vigo in Spain

#### Abstract

This investigation deals with the impact of mussel cultures on the local current fields and distributions of suspended particulate matter (SPM) in an embayment of the Ria de Vigo, Spain. In this region mussels are cultivated ropes suspended on wooden rafts. They feed by filtration of surrounding sea water. In this investigation there is a focus on raft scale and on the scale of the whole raft field. In contrast to the main axis of the Ria, where alternating tidal currents prevail, the local bathymetry alters the direction of the currents considerably. At the time the rafts slow down the flows.

In the Ria tide current is alternating. Within the raft field local bathymetry and the rafts change current direction. Reduced phytoplankton by mussel filtration was found in the dead water zone of the rafts. Spatial anomalies of salinity and temperature in the dead water zone suggest that vertical exchange processes ensure food supply in the mussel field.

*Manuskripteingang in TDB /Manuscript received: 3. Januar 2007*



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>v</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Einordnung im EU-Projekt MaBenE . . . . .  | 1         |
| 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit . . . . .   | 3         |
| <b>2 Feldarbeiten</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes . . . . .   | 4         |
| 2.2 Darstellung des Messaufbaus . . . . .  | 6         |
| 2.3 Messstrategie . . . . .  | 7         |
| 2.4 Hydrographische Randbedingungen . . . . .  | 9         |
| <b>3 Methoden</b>  | <b>13</b> |
| 3.1 ADCP . . . . .   | 13        |
| 3.1.1 Theoretische Grundlagen . . . . .  | 13        |
| 3.1.2 Messung der Strömungsgeschwindigkeit und der akustischen<br>Rückstreuung . . . . .               | 17        |
| 3.2 Multisonde . . . . .   | 19        |
| 3.2.1 Messung der Transmission . . . . .   | 20        |
| 3.2.2 Messung der optischen Rückstreuung . . . . .   | 21        |
| 3.2.3 Chlorophyllmessung mit dem Fluorometer . . . . .   | 22        |
| 3.3 Labormethoden . . . . .  | 22        |
| 3.4 Räumliche Dateninterpolation mittels objektiver Analyse . . . . .                                  | 24        |
| 3.5 Bilanzierung der Flüsse durch Floßbereich . . . . .  | 27        |
| <b>4 Ergebnisse und Interpretation</b>   | <b>30</b> |
| 4.1 Eigenschaften der Schwebstoffe . . . . .   | 30        |
| 4.2 Berechnung von Chlorophyll- und Schwebstoffkonzentrationen mit indi-<br>rekten Verfahren . . . . . | 33        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2.1    | Zuordnung der Fluorometerdaten zu den Chlorophyllkonzentrationen . . . . .             | 33        |
| 4.2.2    | Zuordnung der optischen Messdaten zu den Schwebstoffkonzentrationen . . . . .          | 34        |
| 4.2.3    | Zuordnung der akustischen Rückstreusignale zu den Schwebstoffkonzentrationen . . . . . | 37        |
| 4.3      | Polygonebene . . . . .   | 38        |
| 4.3.1    | Strömungsmuster . . . . .  | 38        |
| 4.3.2    | Vertikalprofil . . . . .   | 42        |
| 4.3.3    | Veränderung der Rückstreuintensität . . . . .  | 43        |
| 4.4      | Floßebene . . . . .  | 46        |
| 4.4.1    | Räumliche Muster der Strömung . . . . .  | 46        |
| 4.4.2    | Räumliche Muster der Schwebstoffe . . . . .  | 52        |
| 4.4.3    | Flussbilanzen . . . . .  | 62        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>64</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>68</b> |
| <b>A</b> | <b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>   | <b>69</b> |
| A.1      | Abkürzungen . . . . .  | 69        |
| A.2      | Symbole . . . . .  | 70        |
| <b>B</b> | <b>Dichte des Meerwassers und Gezeiten</b>   | <b>72</b> |
| <b>C</b> | <b>Zusätzliche Abbildungen</b>   | <b>73</b> |
| <b>D</b> | <b>Fotos</b>   | <b>77</b> |
|          | <b>Danksagung</b>  | <b>79</b> |
|          | <b>Erklärung</b>   | <b>80</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Lage des Ria de Vigo in Spanien . . . . .  | 4  |
| 2.2 | Topographie des Meeresbodens im Bereich der untersuchten Bucht und Lage der Flöße . . . . .                | 6  |
| 2.3 | Messaufbau auf dem MS Storch . . . . .   | 7  |
| 2.4 | Lage und Nummerierung der Flöße . . . . .  | 8  |
| 2.5 | Lufttemperaturen im Ria de Vigo während der Kampagne . . . . .   | 10 |
| 2.6 | Wassertemperatur im Ria . . . . .  | 11 |
| 2.7 | Strömungsmuster im Ria bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 12 |
| 2.8 | Strömungsmuster im Ria de Vigo bei auflaufendem Wasser . . . . .   | 12 |
| 3.1 | Aufbau des ADCP . . . . .  | 13 |
| 3.2 | Aufbau der Multisonde . . . . .  | 19 |
| 3.3 | Objektiv analysierte Felder der Salinität und der dazugehörigen Fehlerfelder einer Floßumrundung . . . . . | 26 |
| 3.4 | Verlauf der gemessenen Werte von den interpolierten Werten . . . . .                                       | 26 |
| 3.5 | Schematische Darstellung einer Floßumrundung . . . . .   | 28 |
| 3.6 | Prinzip der Flussberechnung . . . . .  | 29 |
| 4.1 | Veränderung des Schwebstoffgehaltes der Wasserproben mit der Wassertiefe . . . . .                         | 31 |
| 4.2 | Veränderung des Glühverlustes mit der Wassertiefe . . . . .  | 31 |
| 4.3 | Veränderung des Medians der Korngrößenverteilung mit der Tiefe . . . . .                                   | 32 |
| 4.4 | Korngrößenverteilung einer Wasserprobe . . . . .   | 33 |
| 4.5 | Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Chlorophyllkonzentration . . . . .                                    | 34 |
| 4.6 | Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration von der Attenuation und der optischen Rückstreuung . . . . .     | 35 |
| 4.7 | Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration von der akustischen Rückstreuung . . . . .                       | 38 |
| 4.8 | Strömungsmuster um das Polygon bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 40 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.9  | Strömungsmuster im Polygon bei auflaufendem und ablaufendem Wasser  | 40 |
| 4.10 | Vertikalprofil in der Nähe von Floß 35 . . . . .  | 42 |
| 4.11 | Verlauf der akustischen Rückstreuung auf Polygonebene bei auflaufendem Wasser . . . . .   | 45 |
| 4.12 | Verlauf der akustischen Rückstreuung auf Polygonebene bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 45 |
| 4.13 | Gemessene Horizontalgeschwindigkeiten um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .   | 47 |
| 4.14 | Objektiv analysierte Felder der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .   | 48 |
| 4.15 | Objektiv analysierte Felder der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .   | 50 |
| 4.16 | Objektive analysierte Felder der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit um Floß 15 bei auflaufendem Wasser . . . . .   | 51 |
| 4.17 | Objektive analysierte Felder der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit um Floß 15 bei auflaufendem Wasser . . . . .   | 52 |
| 4.18 | Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung und der optischen Rückstreuung um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .                                     | 54 |
| 4.19 | Objektiv analysierte Felder der Chlorophyllkonzentration um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 54 |
| 4.20 | Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung um Floß 15 in verschiedenen Tiefen bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 56 |
| 4.21 | Objektiv analysierte Felder des Salzgehalts und der Temperatur um Floß 15 bei ablaufendem Wasser . . . . .  | 57 |
| 4.22 | Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung um Floß 15 in verschiedenen Tiefen bei auflaufendem Wasser . . . . .   | 59 |
| 4.23 | Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung, der Chlorophyllkonzentration, des Salzgehalts und der Temperatur um Floß 15 bei auflaufendem Wasser . . . . . | 60 |
| B.1  | Dichte des Meerwassers in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt  | 72 |
| C.1  | Abhängigkeit der optischen Rückstreuung von der Attenuation aufgeteilt nach Wassertiefe . . . . .   | 73 |
| C.2  | Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration von der optischen Rückstreuung aufgeteilt nach Glühverlust . . . . .  | 73 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| C.3 | Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration von der optischen Rückstreuung aufgeteilt nach Wassertiefe . . . . . | 74 |
| C.4 | Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration von der Attenuation aufgeteilt nach Glühverlust . . . . .            | 74 |
| C.5 | Flüsse um Floß 15 . . . . .  | 75 |
| C.6 | Abhängigkeit der Chlorophyllkonzentration von der Attenuation . . . . .  | 75 |
| C.7 | Strömungsmuster um das Polygon in unterschiedlichen Tiefen . . . . .   | 76 |
| D.1 | Foto eines Floßes mit dem MS Storch . . . . .  | 77 |
| D.2 | Foto einer Miesmuschel . . . . .   | 77 |
| D.3 | Foto eines Floßes im Ria de Vigo . . . . .   | 78 |
| D.4 | Foto der Langleinen unter Wasser . . . . .   | 78 |



# 1 Einleitung

Die Kultivierung von Miesmuscheln wird in vielen Ländern Europas intensiv betrieben. Im Norden von Spanien, wo Miesmuscheln an Langleinen kultiviert werden, liegt die jährliche Produktion bei etwa 400 000 Tonnen. Der Anbau von Miesmuscheln, der vor ca. 60 Jahren seinen Anfang nahm, ist in Galizien in den letzten Jahren zu einem bedeutenden wirtschaftlichen Faktor angewachsen. Wie einem Artikel (Carbajo, 2004) der spanischen Tagespresse zu entnehmen ist, steht Galizien weltweit an zweiter Stelle der Muschelproduktion. Lange Zeit stellte die Kultivierung von Muscheln einen unbedeutenden Teil der Maritimwirtschaft dar, der vor allem als Nebenerwerb und Subsistenzwirtschaft von ökonomisch Unterprivilegierten betrieben wurde. Erst in den letzten Jahren wandelte sich die Muschelzucht als Folge verbesserter Kultivierungstechniken und Exportmöglichkeiten zu einem eigenständigen Wirtschaftszweig. In Spanien nimmt heute die Muschelproduktion 23 % der gesamten Produktion an Meeresfrüchten ein und ist dadurch ein wichtiger Wirtschaftszweig. Damit lässt sich das Interesse der Forschung erklären, das Wachstum der Muscheln und ihre Auswirkung auf das Ökosystem näher zu untersuchen und zu erklären. Auch in Deutschland ist geplant, die Kultivierung von Miesmuscheln an Langleinen zu intensivieren (Walter, 2003).

## 1.1 Einordnung im EU-Projekt MaBenE

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des EU-Projektes MaBenE (**Man**aging **Benthic Ecosystems** in relation to physical forcing and environmental constraints) angefertigt. Das Projekt MaBenE beschäftigt sich mit der Vereinbarkeit von Ökologie und Ökonomie, bezogen auf Aquakulturen in Küstengewässern (URL2, 2005). Die kommerzielle Ansiedlung von Aquakulturen, wie sie in den Küstengewässern mehrerer Länder in Europa verbreitet ist, stellt einen erheblichen Eingriff in die lokalen Ökosysteme dar. Ziel des Projektes MaBenE ist es, die Auswirkungen dieser Eingriffe zu untersuchen, um die Produktion von Aquakulturen mit der Erhaltung des Ökosystems und der Sicherung der Biodiversität in Einklang zu bringen. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Interaktion zwischen physikalischen Faktoren wie Strömung und Turbulenz und den

biologischen Prozessen verschiedener Organismen gelegt.

Ein bedeutender Wirtschaftszweig im Bereich Aquakulturen ist die Kultivierung von Miesmuscheln. In Europa werden Miesmuscheln als Hängekulturen, als Bodenzuchten oder auf Pfählen gezüchtet. Die großflächige Kultivierung von Miesmuscheln beeinflusst in vielerlei Hinsicht ökologische Prozesse: Miesmuscheln können den Eutrophierungsprozess in nährstoffreichen Gewässern durch ihre Filtrationsaktivität vermindern. Dadurch können hohe Nährstoffeinträge ausgeglichen und Algenblüten verhindert werden. In nährstoffarmen Gewässern können sie jedoch Nährstoffumsetzungsraten anregen und damit die Produktivität der Primärproduzenten, wie z.B. Algen, erhöhen.

Die Turbulenz und die dadurch erzeugten Austauschprozesse sind essentiell für die Anlieferung von Phytoplankton und damit für die Ernährung der Muscheln. Im Rahmen von MaBenE wird untersucht, wie sich die Muscheln bei verschiedenen Standortbedingungen unter unterschiedlichen hydrodynamischen Voraussetzungen ernähren. Insgesamt zielt das Projekt darauf ab, ein Ökosystemmodell als Managementwerkzeug zu entwickeln, das auf einem gekoppelten physikalisch-biologischen Modell basiert<sup>1</sup>.

Innerhalb des Projektes wurden drei Küstengewässer als Beispiele für Miesmuschelkulturen untersucht. Diese drei Gebiete unterscheiden sich aufgrund ihrer hydrodynamischen Bedingungen deutlich voneinander.

Die Oosterschelde in den Niederlanden ist tidedominant und Turbulenzen entstehen aufgrund der Tidedrömung. In diesem Gebiet ist der horizontale Austausch bedeutend. Der Limfjorden, Dänemark, wird stark durch den Wind beeinflusst, was zu einer vertikalen Durchmischung führt (Wiles et al., 2006). Der Tideeinfluss ist gering. Die Muscheln werden in beiden Gewässern am Boden kultiviert.

Im Ria de Vigo ist zwar auch der horizontale Austausch durch den Tideeinfluß messbar, hier ist jedoch zusätzlich das sog. Upwelling zu beobachten: Zeitweise bringen südwärts gerichtete Winde bedeutende Mengen an kaltem, nährstoffreichem Tiefenwasser an die Oberfläche. Dieser Prozess regt das Muschelwachstum an, weil das nährstoffreiche Wasser das Phytoplanktonwachstum anregt (Smyth et al., 2001; Joint et al., 2001).

Das Upwelling im Ria tritt besonders in den Sommermonaten auf. Der Austausch wird durch die spezielle Topographie der galizischen Küste verstärkt (Figueiras et al., 2002). Außerdem entstehen auch durch die Langleinen-Kulturen selbst horizontale wie vertikale Turbulenzen, da sie im Wasser ein Hindernis darstellen.

---

<sup>1</sup>Das Modell MOHID wurde vom Institut Maretec erstellt.

Diese drei Gebiete stellen repräsentative Beispiele für Miesmuschelkulturen in Europa dar, die sich nicht nur in ihren physikalischen Rahmenbedingungen, sondern auch in der Art der Muschelkulturen unterscheiden. Die vorliegende Arbeit ist Teil umfassender Untersuchungen im Ria de Vigo. Innerhalb der am Projekt beteiligten Arbeitsgruppen wurde auf unterschiedliche Fragestellungen eingegangen und es wurden verschiedene räumliche Skalen bearbeitet. Im Gegensatz zur großskaligen Ebene, die den gesamten Ria betrachtet, und der kleinskaligen, die sich auf die Muscheln innerhalb eines Floßes konzentriert, ist diese Arbeit dazwischen angesiedelt. Im Mittelpunkt standen dabei einzelne Flöße wie auch ein Floßfeld. Dieses besteht aus mehreren Flößen und wird im folgenden als Polygon bezeichnet.

### 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Langleinen-Aquakulturen auf die Schwebstoffverteilung zu bestimmen. Die Studie soll dazu beitragen, die Anlieferung der Schwebstoffe und die Filtration durch die Muscheln besser zu verstehen. Muscheln ernähren sich durch Filtration der im Wasser vorhandenen schwebenden Substanzen und bevorzugen dabei organische Bestandteile, vor allem Phytoplankton (Asmus und Asmus, 1991). Nicht verwertbares Material wird in Form von Kotpillen wieder ausgeschieden. Durch die Filtration der Muscheln wird die Schwebstoffkonzentration und damit die Phytoplanktonkonzentration über Muschelbänken reduziert (Tweddle et al., 2005; Dolmer, 1999). Umgekehrt kann somit die Filtrieraktivität von Muschelkulturen über die Veränderung der Schwebstoffkonzentration abgeschätzt werden. Im Fall von Langleinenkulturen muss daher der Nahbereich um die Flöße herum untersucht werden.

Dazu ist es erforderlich, die Strömungsverhältnisse um die Flöße aufzuklären. Eine Schwebstoffbilanz um einzelne Flöße soll deren Filtrationsleistung aufklären. Um diese Fragestellungen zu lösen, wurde der Schwebstoff mit indirekten akustischen und optischen Methoden gemessen. Ein ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) maß die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung. Die Schwebstoffkonzentration wurde hydroakustisch aus der Intensität des Rückstreusignals eines ADCP abgeschätzt. Eine Multisonde gab neben Parametern wie Temperatur, Druck und Leitfähigkeit, auch Aufschluss über die Fluoreszenz als Maß für die Chlorophyllkonzentration und die optische Attenuation sowie die optische Rückstreuung als Maß für die Schwebstoffkonzentrationen gemessen. Die vorliegende Arbeit soll darüber hinaus einen Beitrag zur Validierung des physikalisch-biologischen Modelles MOHID leisten.

## 2 Feldarbeiten

### 2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Der Ria de Vigo gehört zu den Riasküsten an der Westküste Spaniens in Galizien (s. Abb. 2.1). Eine Riasküste ist ein ertrunkenes fluviales Kerbtal (Ott, 1996; Adelman et al., 2000). Die Bucht des Ria ist gezeitenbeeinflusst und nach Nordost-Südwest ausgerichtet. Im Osten fließt der Fluß Oitebén in den Ria de Vigo, der sich über circa 30 km bis zum Atlantik hin aufweitert. Im Westen ist der Ria zum Atlantik hin offen, wobei ihm zwei Inseln vorgelagert sind, die den direkten Meerzugang verkleinern. Die Breite des Ria nimmt zum offenen Meer hin zu und beträgt an der Öffnung zum Meer etwa 6 km.

Der Ria de Vigo gehört zu einem der vier Rias in Galizien, in denen die Muschelproduktion an Flößen intensiv betrieben wird. Insgesamt werden  $250 \times 10^6 \text{ kg y}^{-1}$  Muscheln produziert. In dieser Region ist die europaweit höchste Muschelproduktion zu verzeichnen. (Figueiras et al., 2002)

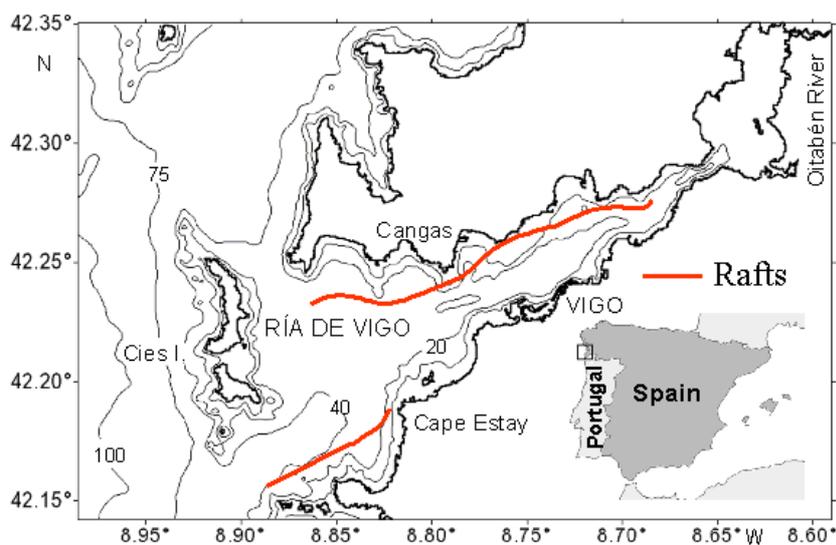


Abbildung 2.1: Lage des Ria de Vigo in Spanien. Entlang der dick gekennzeichneten Linien werden Muscheln kultiviert.

Im Ria de Vigo werden an zahlreichen Stellen Muscheln der Gattung *Mytilus gal-*

*loprovincialis* gezüchtet (s. Abb. D.2 im Anhang). Im gesamten Ria de Vigo befinden sich 478 Flöße (rafts), wobei die Muschelproduktion pro Floß und pro Jahr  $75 \times 10^3 \text{ kg}$  beträgt (Figueiras et al., 2002).

In Spanien werden, vornehmlich in strömungsarmen Meeresbuchten wie dem Ria de Vigo, Hängekulturen eingesetzt (Ott, 1996; Walter, 2003). Dabei werden Holzflöße von einem Ausmaß von  $20 \times 25 \text{ m}$  mit  $12 \text{ m}$  langen Leinen im Abstand von ca.  $1 \text{ m}$  versehen und mit Ketten am Meeresboden befestigt, wodurch sie sich im Gezeitenstrom flexibel hin und her bewegen und dadurch um einige Meter versetzt werden können (s. Abb. D.3 im Anhang). Übersichtsweise kann man davon ausgehen, dass an einem Floß ca.  $100 \text{ t}$  Muscheln hängen, wobei das Gewicht vom Entwicklungsstadium der Muscheln abhängt. Die Flöße sind in Feldern, sogenannten Polygonen, mit etwa 50 bis 100 Flößen angeordnet und haben einen Abstand von ca.  $150 \text{ m}$  zueinander (s. Abb. 2.2). Insgesamt gibt es im Ria de Vigo sieben Muschelfelder, wobei der Abstand zwischen den einzelnen Feldern unterschiedlich groß ist.

Eines dieser Felder wurde näher untersucht. Dieses Feld besteht aus 69 Flößen und liegt etwa  $500 \text{ m}$  von der Nordküste des Ria entfernt in einer Bucht. In seinen Ausmaßen ist das Polygon am südlichen Rand ca.  $1500 \text{ m}$  lang und ca.  $500 \text{ m}$  breit. Das Polygon befindet sich in der Nähe des Küstenabschnittes des Dorfes Cangas. Abbildung 2.2 zeigt die Topographie des Meeresboden (Bathymetrie) am untersuchten Muschelfeld. Der Meeresboden fällt unter den Flößen von ca.  $10 \text{ m}$  bis hin zu  $30 \text{ m}$  in Richtung Süd-West ab. Die seichtesten Stellen wurden in der Nähe der Landzunge am östlichen Ende des untersuchten Polygons gemessen. Südlich des Polygons, zum Inneren des Ria hin, wird eine maximale Wassertiefe von ca.  $40 \text{ m}$  erreicht. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Ria überschreiten in der Regel  $30 \text{ cm s}^{-1}$  nicht. Der Tidenhub beträgt ca.  $2 \text{ m}$ .

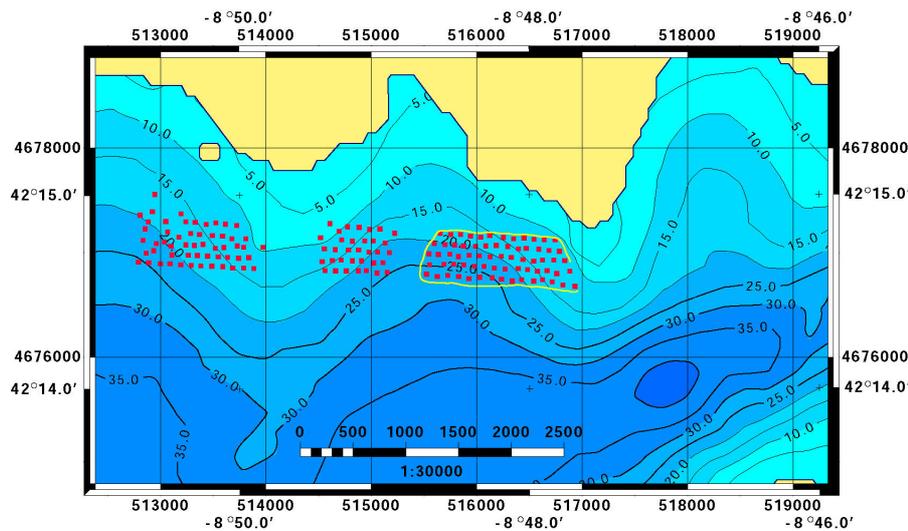


Abbildung 2.2: Topographie des Meeresbodens in der untersuchten Bucht und die Lage der Flöße (rot). Eine Polygonumrundung um das untersuchte Muschelfeld ist gelb dargestellt.

## 2.2 Darstellung des Messaufbaus

Die Messungen wurden mittels des Forschungsschiffes „Storch“, das eine Länge von 10.3 m und einen Tiefgang von 0.9 m besitzt, durchgeführt (s. Abb. 2.3). Die Daten wurden mit zwei Messinstrumenten aufgenommen, einem ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) und einer Multisonde, dem sogenannten „Siltmeter“. Der ADCP war an Backbord im hinteren Bereich des Schiffes angebracht.

Zur Ausstattung der Multisonde gehörten Sensoren für Temperatur, Druck, Salzgehalt, drei Sensoren zur Messung der optischen Attenuation, ein Sensor zur Messung der optischen Rückstreuung, sowie ein Fluorometer zur Messung der Fluoreszenz. Zusätzlich war eine Pumpe für die Wasserproben, die zur Herleitung der Schwebstoffkonzentrationen nötig sind, angebracht. Die Sonde wurde an Steuerbord hinten befestigt und konnte von dort mit einer Einleiterwinde ins Wasser gefiert werden.

Auf die Methoden und Funktionsweisen der Messgeräte wird in Kap. 3 näher eingegangen. Die Messgeräte haben gegenüber vereinzelt Probenahmen den Vorteil, dass sie kontinuierlich messen. Somit sind umfangreichere Untersuchungen möglich. Es handelt sich jedoch um indirekte Verfahren, die eine Kalibrierung zur Umrechnung in Konzentrationen nötig machen. (Holdaway et al., 1999)

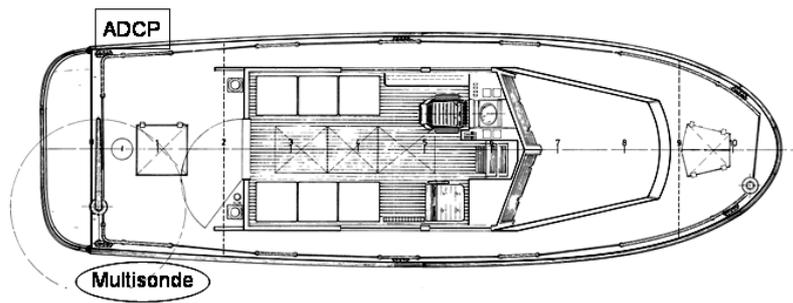


Abbildung 2.3: Skizze (von oben) des Messaufbaus auf dem MS Storch während der Kampagne. ADCP und Multisonde sind seitlich angebracht.

## 2.3 Messstrategie

Die Messkampagne fand vom 21. bis zum 30. Juli 2004 statt. Die angewandte Messstrategie sollte möglichst gut an das Auftreten eines Upwelling-Ereignisses angepasst werden. Wie oben erwähnt, tritt dies besonders in den Sommermonaten in dem untersuchten Gebiet auf.

Im Untersuchungszeitraum fand jedoch nur ein schwaches Upwelling (vgl. Abb. 2.6) statt. Dies hatte zur Folge, dass das Phytoplanktonwachstum nicht deutlich gesteigert wurde. Deshalb wird im Folgenden nicht explizit darauf eingegangen.

Da die Muscheln an Langleinen kultiviert werden und der Schwebstoff in Abhängigkeit von der Strömung angeliefert wird, wurden mit dem Schiff Spiralen um die Flöße gefahren. Mit den so durchgeführten Messungen sollte aufgeklärt werden, wie sich die Schwebstoffkonzentration um die Flöße in Abhängigkeit von der Strömung um das Floß ändert. Damit sollten radiale und winkelabhängige Verläufe erstellt und anschließend in zweidimensional interpoliert werden, um kontinuierliche Felder rund um die Flöße zu erzeugen.

Der Messstrategie liegt folgende Vorstellung zugrunde: Die Schwebstoffe werden mit der Strömung angeliefert, ein Teil des Wassers wird abgebremst, passiert dann das Floß und wird währenddessen filtriert. An der gegenüberliegenden Seite tritt das filtrierte und damit schwebstoffärmere Wasser aus dem Floß aus. Die Hauptströmungsrichtung ändert sich in Abhängigkeit von der Tide.

Um den Muschleinfluss auf großskaliger Ebene zu messen, wurde das Polygon sowohl umrundet als auch zwischen den einzelnen Flößen hindurchgefahren (s. Abb. 2.2). Des Weiteren wurde das Polygon längs und quer durchfahren, um die räumlichen Muster der Schwebstoffverteilung innerhalb des Polygons zu untersuchen und zu quantifizieren. Auf kleinskaliger Ebene wurden einzelne Flöße umrundet.

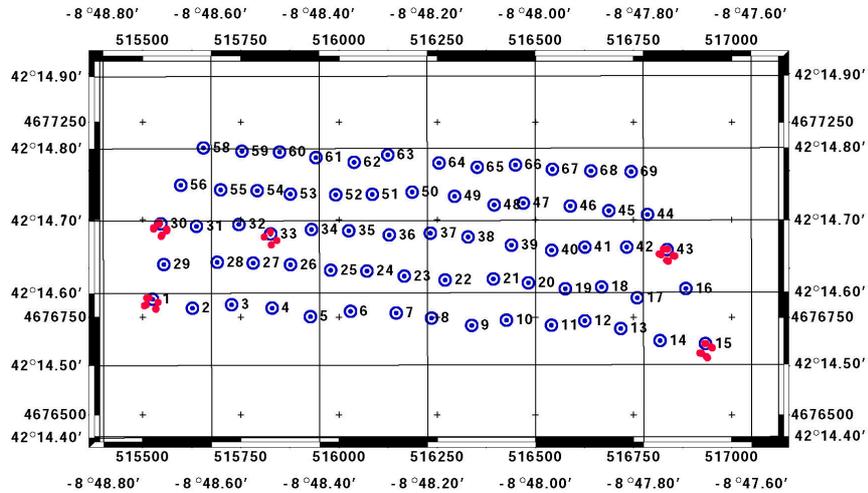


Abbildung 2.4: Lage und entsprechende Nummerierung der Flöße im Polygon. Die näher untersuchten und per GPS eingemessenen Flöße sind zusätzlich mit vier Punkten gekennzeichnet.

Dabei wurde besonders um die Flöße mit den Nummern 1, 15, 43, 44, 33 und 35 gemessen. Die Flöße 1 und 15 bildeten die Eckpunkte zum Inneren des Ria hin und wurden näher untersucht. Die Flöße 33 und 35 lagen im Innern des Polygons, während 30, 43 und 44 an der östlichen bzw. westlichen Seite lagen (s. Abb. 2.4). Im Rahmen dieser Arbeit wird besonders Floß 15 näher beleuchtet, da sich die Strukturen um dieses Floß als repräsentativ herausstellten. Die Positionen der Flöße wurden aus einem Luftbild abgeleitet. Die Flöße an den Außenseiten des Polygons wurden zusätzlich an ihren vier Eckpunkten zu zwei verschiedenen Tidephasen mit GPS eingemessen, um die genaue Floßposition zu ermitteln und die Floßverschiebung zwischen Ebbe und Flut genauer abschätzen zu können.

Insgesamt wurden während der Kampagne 19 Floßumrundungen durchgeführt, die, nach der entsprechenden Tidephase aufgeteilt, in Tab. 2.1 dargestellt sind. Für diese Arbeit wurden Floßumrundungen um Floß 15 bei vollem Flut- und Ebbstrom ausgewählt, da hier die klarsten und zeitstabilsten Signaturen erwartet werden konnten.

Die Messungen der Multisonde liefen stets parallel zu den ADCP-Messungen. Die Sonde wurde während der Fahrt auf eine bestimmte Tiefe, meist 7 m, abgelassen und geschleppt. Mehrfach wurde während der Fahrten angehalten, um Vertikalprofile aufzuzeichnen. Dabei wurde die Sonde während der Messung bis auf den Meeresboden abgesenkt. Teilweise wurden dabei Wasserproben in verschiedenen Wassertiefen für

Tabelle 2.1: Anzahl der Floßumrundungen zu unterschiedlichen Tidephasen  
*NW=Niedrigwasser; HW=Hochwasser; Zahlen=Abstand in Stunden vom Kenterpunkt.*  
 Die näher untersuchten Floßumrundungen sind fett eingezeichnet.

| Floßnr. | Tidephase |    |    |          |    |    |    |    |    |    |          |    |    |  |
|---------|-----------|----|----|----------|----|----|----|----|----|----|----------|----|----|--|
|         | NW        | +1 | +2 | +3       | +4 | +5 | HW | +1 | +2 | +3 | +4       | +5 |    |  |
| 1       |           |    | X  |          | X  | X  |    |    |    |    |          |    | XX |  |
| 15      | X         | X  |    | <b>X</b> |    |    |    |    |    |    | <b>X</b> |    |    |  |
| 30      |           | X  |    |          | X  |    |    |    |    |    |          |    | X  |  |
| 33/35   |           | X  |    |          | X  |    |    |    |    |    |          |    |    |  |
| 43      | X         |    |    | X        |    |    |    |    |    | X  |          |    |    |  |
| 44      |           |    |    |          |    | X  |    | X  |    |    |          |    |    |  |

die Korngrößenanalyse und zur Bestimmung der Schwebstoff- und Chlorophyllkonzentration (s. Kap. 3.2) genommen. Die ADCP-Messung lief währenddessen kontinuierlich weiter. Mit dieser Methodik konnten Strömungsdaten und Daten der akustischen Rückstreuung bis in 15 m Tiefe gewonnen werden. Die Multisonde hingegen liefert nur Daten aus der Tiefe, in der sie sich jeweils befindet.

Durch die kombinierte Anwendung akustischer und optischer Methoden sollten die Schwebstoffverhältnisse auf verschiedene Weise untersucht werden und ein dreidimensionales Bild für alle Parameter angenähert werden. Anhand der eingesetzten Messmethoden können Informationen über die Strömung (Richtung und Geschwindigkeit), die Schwebstoffkonzentration und die Qualität des Schwebstoffes gewonnen werden. Dabei spielt die Chlorophyllkonzentration eine besondere Rolle, da Phytoplankton die bevorzugte Nahrung für die Muscheln darstellt. Diese wurde über eine weitere unabhängige Messung der Fluoreszenz mit einem Fluorometer bestimmt. Bei den Messungen waren besonders die niedrigen Schwebstoffkonzentrationen im Bereich von  $1 \text{ mg l}^{-1}$  eine Herausforderung, da die eingesetzten Systeme für im Wattenmeer übliche Konzentrationen von ca.  $50 \text{ mg l}^{-1}$  optimiert waren. Die Verhältnisse unterhalb der Flöße konnten mit den genutzten Messinstrumenten nicht ermittelt werden (vgl. Kap. 3).

## 2.4 Hydrographische Randbedingungen

### Wetterdaten während der Kampagne

In Bouzas, westlich von Vigo und an der südlichen Küste des Rias gelegen, wurde eine Dauermessstelle vom Instituto de Investigaci3n Marinas installiert.

In Abb. 2.5 ist der Verlauf der Temperatur vom 19.07. bis zum 29.07.2004 dargestellt<sup>1</sup>. Die Schwankungen über den Tagesverlauf werden deutlich. Da jedoch die Messungen an Bord des MS Storch nur tagsüber stattfanden, sind besonders die Maxima von Bedeutung. Tagsüber stiegen die Höchstwerte der Lufttemperatur von 21 °C am 19.07.2004 auf 31 °C am 25.07.2004. Danach fielen die Temperaturwerte bis zum 28.07. auf ein Maximum von 22 °C und stiegen am 29.07. wiederum leicht an. Der Niederschlag während dieser Zeit war vernachlässigbar.

Die vorherrschende Windrichtung war zu Beginn der Messkampagne Süd-West. Am 23.07. drehte der Wind auf Nord-West, um schließlich ab dem 26.07. wieder südwestlich ausgerichtet zu sein. Die Windgeschwindigkeit fiel nachts deutlich ab. Tagsüber schwankte sie zwischen 5 und 7 m s<sup>-1</sup>.

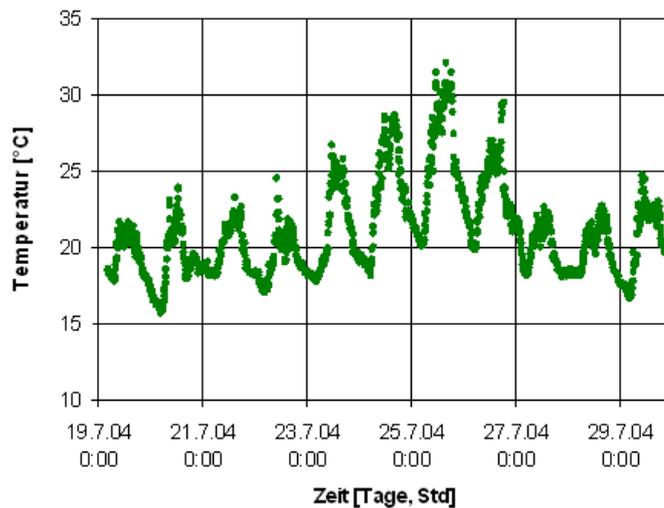


Abbildung 2.5: Lufttemperaturen während der Kampagne [Tage, Std]. Der Temperaturmesser war am Hafen von Bouzas, westlich von Vigo, angebracht.

### Wassertemperaturverlauf

An einer Dauermessstelle im Ria wurde die Wassertemperatur in mehreren Tiefen kontinuierlich gemessen. Die Messstelle lag ca. 15 km östlich vom untersuchten Muschelfeld im Inneren des Ria. Der Verlauf der Wassertemperatur ist in Abb. 2.6 dargestellt. Während der Messkampagne stieg die Temperatur zunächst an, was auf ein leichtes Downwelling hinweist. Ab dem 25.07. kommt es zu einem leichten Upwellingereignis,

<sup>1</sup>Die Daten wurden freundlicherweise vom Instituto de Investigaciones Mariñas (IST) zur Verfügung gestellt. (<http://www.iim.csic.es>)

nachdem der Wind am 23.07. gedreht hat. Kälteres Tiefenwasser gelangt in oberflächennahe Bereiche<sup>2</sup>.

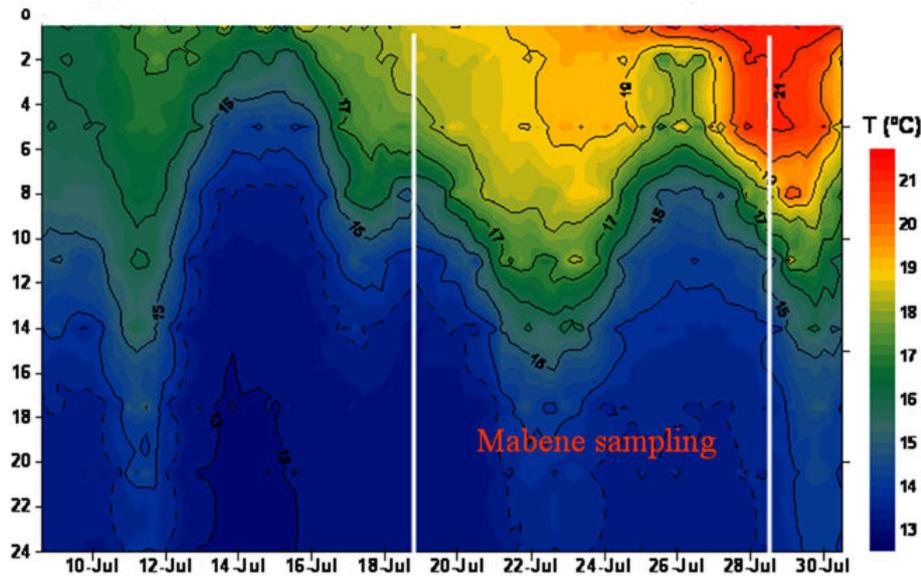


Abbildung 2.6: Wassertemperatur in Abhängigkeit von der Wassertiefe [m] im Ria vom 19. bis zum 30.07. (Francisco G. Figueiras, IIM, Spain, 2005)

### Strömungsverhältnisse

Die Strömungsverhältnisse im Ria wurden von IST, Maretec, im Rahmen von MaBenE für die Tage der Kampagne modelliert<sup>3</sup>. Anhand des Modelllaufs für den gesamten Ria kann auf die Hauptströmungsrichtung im Ria geschlossen werden. Um genauere Aussagen über die untersuchte Bucht und das Muschelfeld zu treffen, muss das Modell feiner aufgelöst werden. Der Modelllauf besitzt eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten.

Aus den Daten wurden Beispiele für vollen Flutstrom und vollen Ebbstrom jeweils am 28.07. ausgewählt. Dabei wird deutlich, dass die Hauptströmungsrichtung der oberflächennahen Strömung im Ria zum vollen Ebbstrom süd-westlich verläuft (Abb. 2.7) und dass die Strömung in der Bucht aufgrund der vorspringenden Küstenlinie abgelenkt wird. Durch die dem Ria im Westen vorgelagerten Inseln wird die Strömung im Mündungsbereich nach Süden bzw. Norden abgelenkt.

<sup>2</sup>Die Abbildung wurde freundlicherweise von Francisco G. Figueiras, Instituto de Investigaciones Maríñas (IST), Vigo, Spanien, zur Verfügung gestellt. (<http://www.iim.csic.es>)

<sup>3</sup>Die Abbildungen wurden freundlicherweise von Luis Fernandes, Instituto Superior Técnico (IST) Maretec, Lisboa, Portugal, zur Verfügung gestellt. (<http://www.mohid.com>)

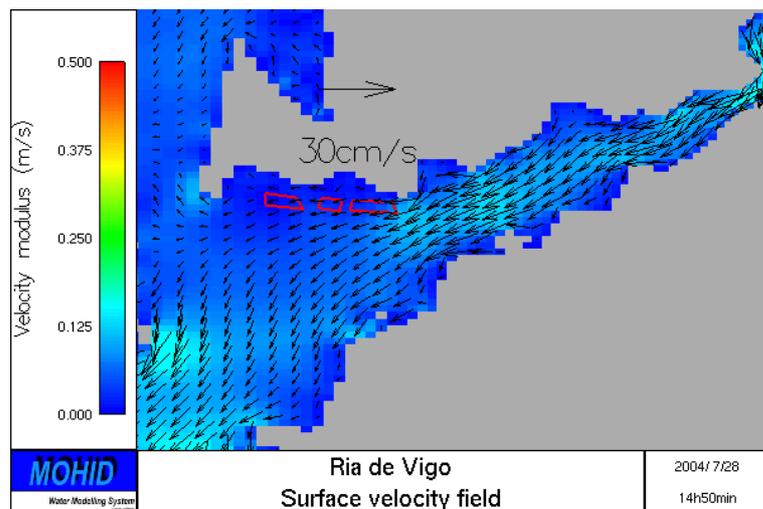


Abbildung 2.7: Oberflächennahe Strömungsmuster im Ria bei Ebbe am 28.07. um 14:50 Uhr, 3 Std. nach HT (Luis Fernandes, IST, Portugal, 2005). Die Muschelfelder sind rot umrandet dargestellt.

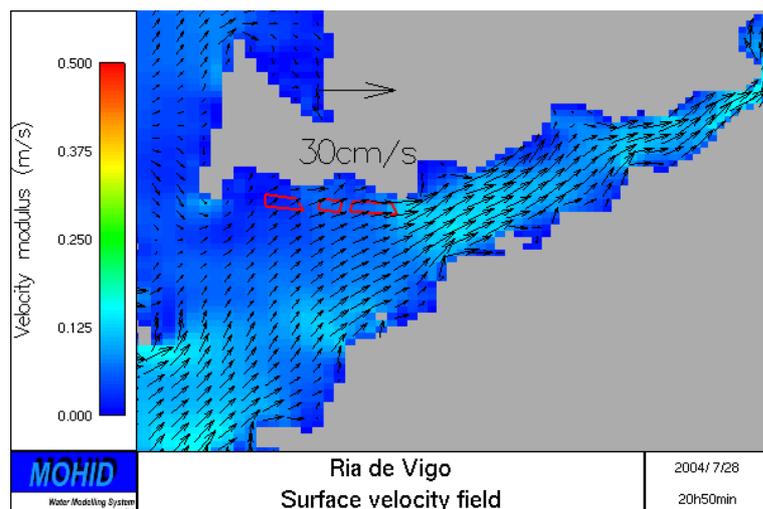


Abbildung 2.8: Oberflächennahe Strömungsmuster im Ria bei Flut am 28.07. 20:50 Uhr, 3 Std. nach LT (Luis Fernandes, IST, Portugal, 2005). Die Muschelfelder sind rot umrandet dargestellt.

Im vollen Flutstrom zeigt die Strömung ein entgegengesetztes Bild. Die Hauptströmungsrichtung ist nord-östlich (Abb. 2.8) ausgerichtet. Die Strömungsgeschwindigkeiten bewegen sich im Bereich von  $10 \text{ cm s}^{-1}$ .

## 3 Methoden

### 3.1 ADCP

Der „Acoustic Doppler Current Profiler“, kurz ADCP genannt, ist ein Messgerät, mit dem Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden. Dabei wird das Prinzip des Dopplereffektes ausgenutzt. Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein Workhorse-ADCP von RD Instruments (URL3, 2005) eingesetzt, der bei einer Frequenz von 1200  $kHz$  mit vier Schallstrahlen arbeitet und in 40  $cm$  Tiefe am Schiff eingebaut war. Diese Strahlen werden von vier Schallgebern, sog. Transducern, ausgesendet und breiten sich im Wasser kegelförmig aus. Sie weisen in entgegengesetzte Richtungen und sind damit in der Janus-Konfiguration angebracht (s. Abb. 3.1). Der eingesetzte ADCP besitzt einen Strahlwinkel von  $20^\circ$ . Im folgenden Kapitel werden die Funktionsweise des ADCP und die erzeugten Rohdateien erklärt.



Abbildung 3.1: Aufbau des ADCP-Kopfes von RD Instruments

#### 3.1.1 Theoretische Grundlagen

##### Der Doppler-Effekt

Der ADCP sendet Schallwellen aus und berechnet anhand der Dopplerverschiebung der wieder empfangenen Schallwellen die Strömungsgeschwindigkeit. (Gordon, 1996;

Kostaschuk et al., 2005).

Der Doppler-Effekt basiert auf einer Frequenzverschiebung, die aus einer relativen Bewegung zweier Objekte zueinander resultiert. Bewegen sich ein Sender und ein Empfänger relativ zueinander, so stimmt die von der Quelle abgestrahlte nicht mit der empfangenen Frequenz überein. Wenn sich Sender und Empfänger aufeinander zu bewegen, ist die empfangene Frequenz höher. Bewegen sie sich voneinander weg, ist sie niedriger (Tipler, 1994).

Der Schall wird in Pulsen einer bestimmten Frequenz ausgesendet. Der erzeugte Schall wird von einem bewegten Objekt im Gegensatz zu einem stationären Objekt mit einer Frequenzverschiebung zurückgeworfen. Dieser Unterschied resultiert aus dem Doppler-Effekt. Der ausgesendete Schall wird von kleinen Partikeln und Plankton, sogenannten „Streuern“, gestreut. Diese sind überall im Wasser vorhanden und bewegen sich in der Regel mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Wasser. Bewegt sich das Wasser relativ zum ADCP, empfangen und streuen diese Partikel das einfach dopplerverschobene Signal. Der zum ADCP gestreute Teil wird von diesem noch einmal dopplerverschoben registriert, so dass eine doppelte Verschiebung auftritt.

Weiterhin muss der Winkel des Vektors der Wassergeschwindigkeit zur Strecke zwischen ADCP und Streuern miteinbezogen werden. Insgesamt ergibt sich folgende Beziehung zwischen Dopplerfrequenz  $F_D$  und der Relativgeschwindigkeit des Wassers  $V_W$ :

$$F_D = 2 \cdot F_S \cdot \frac{V_W}{C} \cdot \cos(B) \quad (3.1)$$

$F_D$ : Dopplerfrequenzverschiebung [ $s^{-1}$ ]

$F_S$ : Schallfrequenz in Ruhe [ $s^{-1}$ ]

$V_W$ : Relativgeschwindigkeit [ $m s^{-1}$ ]

$C$ : Schallgeschwindigkeit [ $m s^{-1}$ ]

$B$ : Winkel zwischen relativem Geschwindigkeitsvektor und Strecke zwischen ADCP und reflektierenden Partikeln

### Die Sonargleichung

Aus der Intensität der rückgestreuten und vom ADCP empfangenen Signale kann die Volumenkonzentration der Schwebstoffe im Prinzip berechnet werden. In diesem Falle sind durchgehende Schwebstoffmessungen über die gesamte messbare Tiefe möglich. Ein Teil des Schalls wird, wie oben beschrieben, vom Schwebstoff wieder zur Quelle zurückgeworfen. Je höher die Konzentration ist, desto stärker ist auch die Intensität des rückgestreuten Signals. Die Sonargleichung setzt dieses Signal in Beziehung zur volumenspezifischen Rückstreustärke  $S_v$ , der Intensität des ausgesendeten Signals, den Schallverlusten durch geometrische Aufweitung des Schallkegels und der Schalldämpfung durch das Wasser und die Schwebstoffe selbst. Die volumenspezifische Rückstreustärke ist das Produkt von Volumenkonzentration des Schwebstoffes und dem Streuquerschnitt.

Die Sonargleichung beschreibt die Beziehung zwischen volumenspezifischer Rückstreustärke und der vom ADCP empfangenen Schallintensität (Thorne et al., 1991; Hill et al., 2003; Deines, 1999; Hoitink, 2005):

$$S_v = 10 \log_{10}(G) + 10 \log_{10}(M_{Rt}) \quad (3.2)$$

$$= C_x + 10 \log_{10}(T + 273.16) + K_C(E_{Rt} - E_r) + 10 \log_{10} R_t^2 + 2\alpha_w \cdot R_t + 2\alpha_s \cdot R_t \quad (3.3)$$

|              |   |
|--------------|---|
| $S_v$ :      | volumenspezifische Rückstreustärke [dB]   |
| $G$ :        | Streuquerschnitt [ $\mu m^2$ ]  |
| $M_r$ :      | Volumenkonzentration [ $mg dm^{-3}$ ] im radialen Abstand $r$ vom Schallgeber   |
| $C_x$ :      | gerätespezifische Konstanten  |
| $\alpha_w$ : | Schallabsorptionskoeffizient für die Dämpfung durch Wasser [ $dB m^{-1}$ ]      |
| $\alpha_s$ : | Schallabsorptionskoeffizient für die Dämpfung durch Schwebstoff [ $dB m^{-1}$ ] |
| $R_t$ :      | radialer Abstand vom Schallgeber [ $m$ ]  |
| $K_c$ :      | Skalierungsfaktor [ $dB Count^{-1}$ ]   |
| $E_r$ :      | Rauschniveau des Schwingers [Counts]  |
| $E_{Rt}$ :   | vom radialen Abstand $R_t$ her empfangene Echointensität [Counts]               |
| $T$ :        | Wassertemperatur am Schallgeber [ $^{\circ}Celsius$ ]                           |

Die Terme der Gleichung beschreiben folgendes:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $10 \log_{10}(T + 273.16)$ | die Temperatur in Abhängigkeit von der Verstärkung,       |
| $K_C(E_{Rt} - E_r)$        | das empfangene Signal abzüglich des Hintergrundrauschens, |
| $10 \log_{10} R_t^2$       | die Verluste durch geometrische Aufweitung und            |
| $2\alpha_w \cdot R_t$      | die Schalldämpfung durch das Wasser und.                  |
| $2\alpha_s \cdot R_t$      | die Schalldämpfung durch den Schwebstoff.                 |

Alle Terme sind in Dezibel angegeben, ein 10er-logarithmisches Maß für Intensitätsdämpfungen. Eine Änderung der Dezibel von  $+3$  bedeutet (bei konstanter Korngrößenverteilung, s. u.) z.B. eine Verdopplung bzw. Halbierung der Schwebstoffkonzentration.

Auf Gerätekonstanten wie beispielsweise den Durchmesser des Schallgebers etc. wird an dieser Stelle nicht eingegangen, für weitere Einzelheiten sei auf den Artikel von Deines (1999) verwiesen. Der effektive Streuquerschnitt  $G$  ist stark vom Durchmesser der Streuer abhängig, bei der Annahme von Rayleigh-Streuung von seiner dritten Potenz. Die Schalldämpfung durch den Schwebstoff wiederum ist proportional zur Schwebstoffkonzentration. Sie kann bei niedrigen Schwebstoffkonzentrationen, wie dies im Ria der Fall ist, vernachlässigt werden. Dadurch vereinfacht sich die Sonargleichung erheblich, da sie direkt lösbar wird und auf ein iteratives Verfahren verzichtet werden kann.

Bezeichnet man den Term  $10 \log_{10}(T + 273.16) + K_C(E_{Rt} - E_r) + 10 \log_{10} R_t^2 + 2\alpha_w \cdot R_t$  als die auf Schallverluste im Wasser und die ADCP-Temperatur korrigierte, damit von  $R_t$  unabhängige empfangene Rückstreuintensität  $I_{dbcorr}$ , so lässt sich die Sonargleichung wie folgt nach  $M_{Rt}$  auflösen:

$$10 \log_{10}(M_{Rt}) = C_x - 10 \log_{10}(G) + I_{dbcorr} \quad (3.4)$$

In der Regel besteht zwischen mittlerem Streudurchmesser und der Schwebstoffkonzentration eine direkte Beziehung. Die Zunahme von  $I_{dbcorr}$  mit der Volumenkonzentration ist dann nur noch näherungsweise linear und der Proportionalitätsfaktor ungleich 1 (Hoitink, 2005). Die Konstanten A und B der Beziehung  $10 \log_{10}(M_{Rt}) = A + B \cdot I_{dbcorr}$  versucht man empirisch anhand einer Regression zwischen Konzentrationen aus Wasserproben und den zugehörigen ADCP-Rückstreuintensitäten zu bestimmen. Streuen die Streudurchmesser jedoch sehr stark und sind nicht korreliert mit der Schwebstoffkonzentration, so ist eine Umrechnung von ADCP-Rückstreuintensitäten in Schwebstoffkonzentrationen ohne eine durchgehende gleichzeitige Kenntnis der Streudurchmesser in der Regel nicht mehr möglich.

#### **3.1.2 Messung der Strömungsgeschwindigkeit und der akustischen Rückstreuung**

Um Strömungen dreidimensional erfassen zu können, werden vier Schallstrahlen ausgesendet, die sich mit der Tiefe kegelförmig ausbreiten. Zwei sich in der Janus-Konfiguration gegenüberstehende Schallgeber ergeben jeweils ein Strahlenpaar und messen eine Horizontalkomponente und die Vertikalgeschwindigkeit. Somit misst ein Paar eine Richtungskomponente und die Vertikalgeschwindigkeit und das andere Paar misst die dazu senkrechte Horizontalkomponente sowie die Vertikalkomponente. Aus der Differenz der beiden Vertikalgeschwindigkeiten kann eine Fehlergeschwindigkeit, die sogenannte „error velocity“ berechnet werden. Diese dient zur Ermittlung der Datenqualität und kann darüber hinaus auch Hinweise darauf geben, ob sich die Strömungsmuster innerhalb der Strahlen auf kleinräumiger Skala tatsächlich ändern. (Gordon, 1996)

Um aus den gemessenen Daten die Strömungsgeschwindigkeiten über Grund zu berechnen, müssen einige Korrekturen angewandt werden. Zum einen muss die Schiffsgeschwindigkeit bei unbewegtem Boden abgezogen werden. Die Methode beruht auf dem sog. „bottom track“, der die Geschwindigkeit vom Boden relativ zur Schiffsgeschwindigkeit misst. Dabei wird die Bewegung des Schiffs relativ zum Boden in alle Richtungen berücksichtigt. Die gefahrenen Schiffskurse können damit relativ zum Startpunkt festgelegt werden. Zum anderen muss auch das Schlingern des Schiffes, das sog. „pitch and roll“, korrigiert werden (Prinz, 2003).

#### **Datenaufnahme**

Ein ADCP misst Tiefenprofile der Strömungsgeschwindigkeit. Dafür werden die Geschwindigkeitsprofile in einzelne Segmente, sogenannte Tiefenzellen, geteilt. Die Größe der Tiefenzellen wurde für die hier vorgestellten Untersuchungen auf 25 cm festgelegt. Das ADCP mittelt damit die Strömungsgeschwindigkeiten über ein Tiefensegment von 25 cm. Bei der Einbautiefe des ADCP von 40 cm und der Störung des Schalls durch das Schiff konnten erst ab einer Tiefe von 3 m ungestörte Daten erhalten werden. Die Frequenz des ADCP von 1200 kHz lässt eine Strömungsmessung in Abhängigkeit von der Intensität des rückgestreuten Signals bis zu 15 m zu, wobei der Boden bis zu 35 m geortet werden kann.

Je nach Taktung nimmt der ADCP Tiefenprofile in unterschiedlichen zeitlichen Abständen auf. Bei den Untersuchungen wurde mit einer Taktung von 2.82 s begonnen. Diese wurde dann auf 3.26 s erweitert, weil damit die Tiefenmessung von 30 m auf 35 m Tiefe vergrößert werden konnte. Dadurch war es möglich, im gesamten Messgebiet ein Bodensignal zu erhalten. Das Signal zur Erfassung des Meeresbodens ist für die Korrekturrechnungen wichtig, wie im nächsten Abschnitt kurz erläutert wird.

Die Daten werden im ASCII-Format ausgegeben und folgendermaßen eingeteilt: Jede zeitliche Einheit ist ein „Ensemble“, das alle 3.26 s aufgenommen wird, wobei jedes „Ensemble“ ein Vertikalprofil darstellt. Ein „Ensemble“ besteht aus dem „Header“, der Informationen wie GPS-Koordinaten, Datum, Uhrzeit etc. enthält. Im darauf folgenden Abschnitt werden die tiefenorientierten Daten, wie Strömungsgeschwindigkeiten, Strömungsrichtung, Echointensität der vier Strahlen und Daten zur Qualitätsprüfung, in Tabellenform aufgezeichnet. Bei schlechter Qualität der Daten, d.h. wenn die Fehlergeschwindigkeit zu hoch ist, werden automatisch Platzhalter eingesetzt. In einer Datei werden alle gemessenen „Ensembles“ aneinandergehängt, bis die Datenaufnahme gestoppt und neu gestartet wird.

#### **Probleme bei der Datenerfassung**

Die Anwendung eines 1200 kHz ADCP war aufgrund der niedrigen Schwebstoffkonzentrationen nicht optimal. Je höher die Frequenz ist mit der gemessen wurde, desto stärker ist auch die Dämpfung im Wasser. Da diese von den Messwerten abgezogen werden muss, sind Werte, bei denen die Korrektur auf die Dämpfung größer als das Rückstreusignal des Messwertes ist, nicht mehr vertrauenswürdig. Aus diesem Grund können nur die Daten bis zu 15 m Wassertiefe ausgewertet werden. Im oberen Be-

reich werden nur die Daten ab 3 m betrachtet, da der Einfluss von Störgeräuschen und Luftblasen zu hoch war. Zu Beginn der Kampagne fielen die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und kurze Zeit später der Schiffsgenerator aus. Es musste ein Ersatzgenerator beschafft werden, mit dem eine stabile Stromversorgung jedoch nicht mehr gesichert war. Die Daten waren dadurch verrauscht und mussten entsprechend geglättet werden.

### 3.2 Multisonde

Als weiteres Messsystem wurde eine Multisonde, das Siltmeter, eingesetzt. An dieser Sonde waren verschiedene Sensoren eingebaut. Der Wasserdruck dient zur Bestimmung der Tiefenposition der Sonde. Weitere Zustandsgrößen sind Wassertemperatur und spezifische Leitfähigkeit, aus denen u.a. Salzgehalt und spezifische Dichte des Wassers abgeleitet werden können (UNESCO, 1981). Die Trübung des Wassers wurde mit Transmissionssensoren bei 660 nm und mit einem Sensor der optischen Rückstreuung bei 880 nm gemessen. Weiterhin war ein Fluorometer eingebaut, aus dessen Signal die Chlorophyllkonzentration abgeleitet werden kann. Mittels Wasserproben sollten absolute Schwebstoff- und Chlorophyllkonzentrationen bestimmt werden.

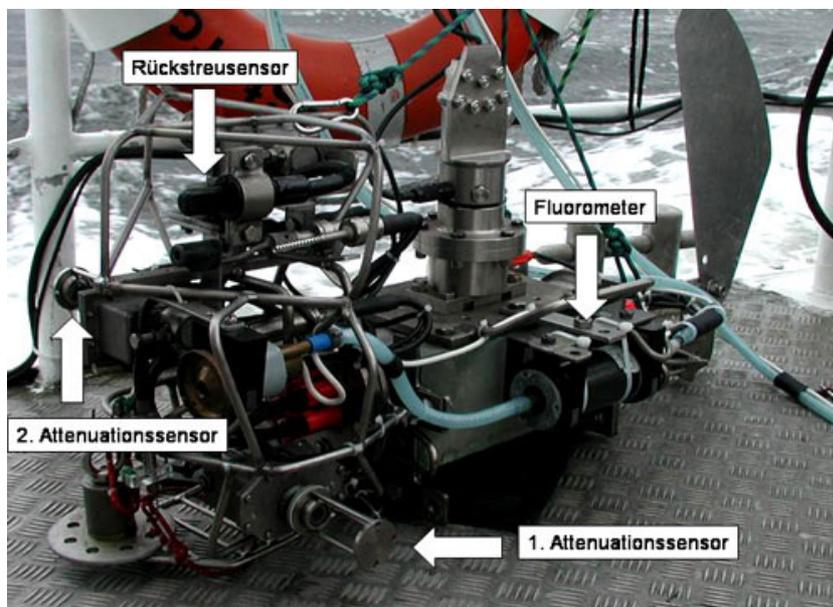


Abbildung 3.2: Aufbau der Multisonde

### 3.2.1 Messung der Transmission

Die Messung der Transmission in Prozent beruht auf der Abschwächung eines ausgesandten Lichtstrahls durch die im Wasser enthaltenen Inhaltsstoffe (Rybaczek, 1992). Im Falle der Sensoren der Multisonde wird Licht von einer LED (Light Emitting Diode) durch einen halb durchlässigen Spiegel ausgestrahlt, der den größten Teil des Lichtes ins Wasser durchlässt. Das reflektierte Licht wird durch eine Referenzdiode kontrolliert, um die Leuchtdiode zu regulieren. Der Lichtstrahl wird durch eine Linse parallel gebündelt, die optisch mit einem externen Fenster verbunden ist. Nachdem der Lichtstrahl das Wasser durchquert hat, wird der Strahl über einen Spiegel zur Messdiode zurückgeworfen. Die Länge der Messstrecke ist der Weg vom Fenster bis zum Spiegel und wieder zurück. Die drei Sensoren haben Weglängen von jeweils 0.12 m und senden Licht mit einer Wellenlänge von 670 nm aus.

Da der Schwebstoffgehalt nicht direkt gemessen werden kann, wird die Transmission in Abhängigkeit von der Trübung gemessen und in Attenuation umgerechnet. Die Attenuation ist die Lichtabschwächung durch Absorption und Streuung. Der Attenuationskoeffizient setzt sich aus dem spektralen Absorptionskoeffizienten  $a$  und dem spektralen Streukoeffizienten  $b$  zusammen. Anhand des Lambert-Beer'schen-Gesetzes kann die Abnahme der Lichtintensität beschrieben werden, nachdem das Licht einen bestimmten Weg in einem optischen Medium zurückgelegt hat:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_0} = Tr = e^{K \cdot l} \quad (3.5)$$

$\phi_1$  : Strahlungsintensität nach Zurücklegen der Weglänge  $l$

$\phi_0$  : Strahlungsintensität am Ausgangspunkt

$Tr/100$  : gemessene Transmission [%]

$K$  : Attenuationskoeffizient [ $m^{-1}$ ]

$l$  : Weglänge [ $m$ ]

Durch einfache Umwandlung kann der Attenuationskoeffizient  $K$  wie folgt berechnet werden:

$$K = -\frac{\ln(Tr)}{l} \quad (3.6)$$

Der Attenuationskoeffizient  $K$  ist eine Funktion der Wellenlänge und der spezifischen Natur des attenuierenden Mediums (Rybaczek, 1992). Für Suspensionen mit fes-

ten Teilchengrößenverteilungen und optischem Brechungsindex ist der Attenuationskoeffizient proportional zur Schwebstoffkonzentration (Campbell und Spinrad, 1987; Meerestechnik-Elektronik, 1989). Auch die Daten der Multisonde mussten von Fehlmessungen bereinigt werden.

#### **Überprüfung der Messqualität**

Um das optimale Funktionieren der Sensoren zu überprüfen, wurden sie zweimal täglich bei völliger Durchlässigkeit und völliger Abdeckung überprüft. Die Überprüfung war aufgrund der niedrigen Schwebstoffkonzentrationen von besonderer Bedeutung. Dadurch war der relative Fehler der Messung hoch, denn die Transmission lag in einem Bereich von 90 %. Die Stabilität des 0 %-Wertes wird bei vollständig abgedeckten Spiegeln gemessen, während der 100 %-Wert in destilliertem Wasser gemessen wird. Die Stabilität dieser Messung und auch die Abweichung von 0 bzw. 100 % kann als Maß für die Qualität bzw. als Fehler der Messung gewertet werden. Gegebenenfalls können die Sensoren bei geringer Abweichung korrigiert werden. Da der 100 %-Wert des ersten Sensors während der Kampagne dauerhaft erhöhte Werte zeigte, wurde dieser nicht in die Auswertung mit einbezogen. Zur Analyse wurde hauptsächlich auf den zweiten Sensor zurückgegriffen, da dieser am stabilsten lief. Der Sensor zeigte nur an einem Tag, am 25.07.2004, abweichende Werte. Daraufhin wurden alle Werte, die an diesem Tag gemessen wurden, mit einer linearen Ausgleichsfunktion korrigiert. Der dritte Sensor wurde am 25.07. und 26.07. linear korrigiert.

#### **3.2.2 Messung der optischen Rückstreuung**

Das Siltmeter ist zusätzlich mit einem optischen Rückstreusensor zur Messung des gestreuten Lichtes ausgestattet. Dieser Sensor misst das Streulicht, das vom Schwebstoff im Wasser zurückgeworfen wird. Er wird nach dem „Formazin Turbidity Standard“ (FTU) umgerechnet. Die Lichtquelle besteht aus zwei Dioden mit einer Wellenlänge von 880 nm aussenden. Die Detektoren bestehen aus Silikon-Fotodioden, die sichtbares Licht mit einem Filter blockieren, um unabhängig vom Tagesstreulicht zu messen. Die Daten werden mit einer Rate von 10 *Hz* aufgenommen. (Seepoint, 1988)

Das rückgestreute Signal ist stark abhängig von der Korngrößenverteilung in der Suspension und kann deshalb von Suspension zu Suspension stark variieren (Green und Boon, 1993).

### 3.2.3 Chlorophyllmessung mit dem Fluorometer

Die Chlorophyll-a-Konzentration im Wasser gilt als Maß für die Biomasse des Phytoplanktons (Gameiro et al., 2004). Die Bestimmung der Chlorophyll-a-Konzentration erfolgt über die Messung der Fluoreszenz. Dazu wird ein In-situ-Fluorometer, ein sog. Profiler, eingesetzt, der an der Multisonde befestigt wird und kontinuierlich das Fluoreszenzsignal des Phytoplanktons misst. Dabei wird das Wasser zur Abschattung des Tageslichtes durch ein Quarzrohr im Fluorometer gepumpt. Die Chlorophyllmoleküle in den Phytoplanktonzellen werden durch eine externe Lichtquelle, einer „Light-Emitting-Diode“ (LED) bei 470 nm angeregt. Ein Teil der absorbierten Energie wird als Fluoreszenz mit größerer Wellenlänge emittiert, welches vom Detektor gemessen wird (Zee, 2002; URL1, 2005). Damit sind kontinuierliche Fluoreszenzmessungen möglich.

## 3.3 Labormethoden

Parallel zur Datenaufzeichnung mit der Multisonde wurden in bestimmten Tiefen Wasserproben genommen, um die Schwebstoffkonzentration gravimetrisch zu ermitteln. Dazu wurde das Wasser mittels einer Pumpe, an Deck in Flaschen gefüllt und anschließend im Labor weiterverarbeitet. Das Volumen einer Wasserprobe betrug 5 l, um bei geringen Schwebstoffkonzentrationen genügend Material zu erhalten. Das Füllen der 5 l - Flaschen nimmt 2 1/2 Minuten in Anspruch. Im Labor wurden die Wasserproben über vorgewogene Glasfaserfilter (Whatman GF/C) filtriert. Diese wurden im Anschluss getrocknet und erneut gewogen. Aus der Differenz zwischen dem nach der Filtration erhaltenen Wert und dem vorgewogenen Filter wurde der Schwebstoffgehalt als Masse pro Volumen ermittelt. Anschließend wurde der Glühverlust (Loss on Ignition, LoI) durch Glühen der Filter bei 525 °C und erneutes Wiegen bestimmt. Der Glühverlust ist ein Maß für den Anteil der organischen Substanz des Schwebstoffes, da die gesamte organische Substanz bei der Glühtemperatur verbrannt wird (Förstner et al., 1986). Damit können die organischen und anorganischen Bestandteile des Schwebstoffes getrennt nachgewiesen werden.

Der Glühverlust wird wie folgt berechnet:

$$LoI = \frac{SPMC - SSC}{SPMC} \quad (3.7)$$

*LoI* : Glühverlust [%]

*SPMC* : Gesamtschwebstoffkonzentration [*mg l*<sup>-1</sup>]

*SSC* : anorganischer Anteil des Schwebstoffes [*mg l*<sup>-1</sup>]

Für die Korngrößenbestimmung wurden ebenfalls Wasserproben mit einem Volumen von 5 *l* genommen. Diese wurden im Labor über Membranfilter (Schleicher & Schüll ME 25) filtriert und getrocknet. Die Filter wurden gekühlt und im Labor der GKSS einer Korngrößenanalyse mit einem optischen Partikel-Messgerät (Galai CIS 1, L.O.T.-Oriol GmbH Darmstadt) unterzogen.

Zusätzlich wurden Wasserproben zur Kalibrierung des In-situ-Fluorometers genommen. Diese wurden im Labor auf ihre Chlorophyll-*a*- und Phaeopigmentkonzentration analysiert. Dazu wurden 0.5 *l*-Flaschen innerhalb von 15 Sekunden gefüllt. Aufgrund der Lichtempfindlichkeit des Chlorophylls waren alle Flaschen lichtundurchlässig und alle Schritte der Analyse mussten in abgedunkelten Räumen durchgeführt werden. Die Proben wurden sofort auf dem Schiff über einen Glasfaserfilter (Whatman GF/F) filtriert oder kühl gelagert und innerhalb von sechs Stunden im Labor weiterverarbeitet. Dabei wurde das Verfahren der Ethanolextraktion nach Jespersen und Christofersen (1987) angewendet, bei dem als Extraktionslösung nicht Aceton sondern 96 %-iges Ethanol benutzt wird. Die Glasfaserfilter wurden für 12 bis 24 Stunden in die Ethanollösung zum Extrahieren gegeben. Die Fluoreszenz des Extraktes wurde mit einem bereits kalibrierten Labor-Fluorometer gemessen. Nach einer Ansäuerung mit HCl wurde die Fluoreszenz erneut gemessen. Dies dient der Trennung von Chlorophyll *a* und seinen Abbauprodukten, den sog. Phaeopigmenten. Phaeopigmente absorbieren im gleichen Wellenlängenbereich wie Chlorophyll. Als Abbauprodukt stören sie daher die Bestimmung der Konzentration an aktivem Chlorophyll, das als Maß für die Phytoplanktonmasse herangezogen wird. (Nusch, 1980)

Die Umrechnung erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$Chl - a = \frac{F_m}{F_m - 1} \cdot (F - F^a) \cdot \frac{V_E}{V} \cdot k \cdot f \quad (3.8)$$

$$Pheo = \frac{F_m}{F_m - 1} \cdot (F_m \cdot F^a - F) \cdot \frac{V_E}{V} \cdot k \cdot f \quad (3.9)$$

$Chl - a$  : Chlorophyll a [ $\mu g l^{-1}$ ]

$Pheo$  : Phaeopigment-Konzentration [ $\mu g l^{-1}$ ]

$F$  : Fluoreszenz vor der Ansäuerung

$F_a$  : Fluoreszenz nach Ansäuerung

$V$  : Volumen des filtrierten Wassers [ $l$ ]

$V_E$  : Extraktvolumen [ $ml$ ]

$F_m$  : Verhältnis  $F/F_a$  für reines Chlorophyll

$f$  : Kalibrierfaktor [ $g l^{-1}$ ]

$k$  : Slitfaktor

Die Kalibrierung des In-situ-Fluorometers wird in Kap. 4.2.1 beschrieben.

### 3.4 Räumliche Dateninterpolation mittels objektiver Analyse

Um aus den Messungen längs des Schiffskurses ein räumlich zusammenhängendes Bild rund um die Flöße zu gewinnen, wurden die in der Nähe der Flöße erhaltenen ADCP- und Schwebstoffdaten mit dem Verfahren der Objektiven Analyse (OA) interpoliert und analysiert. Die OA ist ein von Bretherton et al. (1976) und Carter und Robinson (1987) entwickeltes statistisches Verfahren, das in Meteorologie und Ozeanographie weit verbreitet ist. Es dient dazu, räumlich ungleichmäßig verteilte Messdaten auf ein regelmäßiges Gitter zu projizieren. Im Gegensatz zur „Nearest Neighbour Interpolation“, bei der nur die Messdaten berücksichtigt werden, die jedem Gitterpunkt am nächsten liegen, werden bei der OA alle Messungen mit einbezogen. Der Beitrag jedes Messwerts wird mit der inversen Distanz vom Gitterpunkt gewichtet. Zusätzlich werden die Beiträge aller Messwerte mit einer zu definierenden räumlichen Korrelationskala gewichtet, die der Halbwertsbreite der Gauß'schen Glockenkurve entspricht. Messwerte, die in unmittelbarer Nähe eines Gitterpunktes liegen, erhalten dann volles statistisches Gewicht, während diejenigen Punkte, die genau eine Korrelationskala vom Gitterpunkt entfernt liegen, mit  $1/e$  gewichtet werden. Ein Grundtheorem der OA ist die Annahme,

dass der Mittelwert aller Messwerte Null ist. Da dies in der Regel nicht der Fall ist, wird von den Messwerten zuerst das arithmetische Mittel subtrahiert, und die OA wird dann auf die verbleibenden Anomalien angewendet, deren Mittel per definitionem Null ist. Anschließend wird der Mittelwert wieder zur objektiv analysierten Verteilung der Anomalien addiert.

Ein besonderer Vorteil der OA liegt darin, dass zu jedem objektiv analysierten Feldpunkt ein statistischer Fehler angegeben wird. In die Berechnung der Fehlerfelder gehen drei verschiedene Parameter mit ein. Dazu zählt der Fehler des räumlichen Abstandes von der Gesamtheit der echten Messwerte, der mit der Distanz gewichtet wird. Die angenommene Unsicherheit für den Hintergrund kann anhand der Standardabweichung der Messwerte berechnet werden. In diesem Fall wurde dieser Fehler jedoch abgeschätzt. Als dritter Parameter wird die Unsicherheit der beobachteten Messwerte berücksichtigt.

Als ein Beispiel sind in Abb. 3.3 die interpolierten Felder des Salzgehaltes und die dazugehörigen Fehlerfelder gezeigt. Die Fehler sind auf dem Schiffskurs am geringsten. Die Kurse liegen dicht genug, um in der Regel eine durchgehende und vertrauenswürdige Interpolation zwischen den Schiffskursen zu ermöglichen. Der innere Bereich um die Flöße bleibt bei der gewählten Obergrenze des Fehlers ausgespart, da die Flöße in diesem Fall einen unbekanntem Störfaktor darstellen.

In Abb. 3.4 sind die Messungen und objektiv analysierten Felder des Salzgehaltes längs des Schiffskurses dargestellt. Die objektive Analyse bewirkt eine Glättung der Werte, zeigt aber die wesentlichen Strukturen.

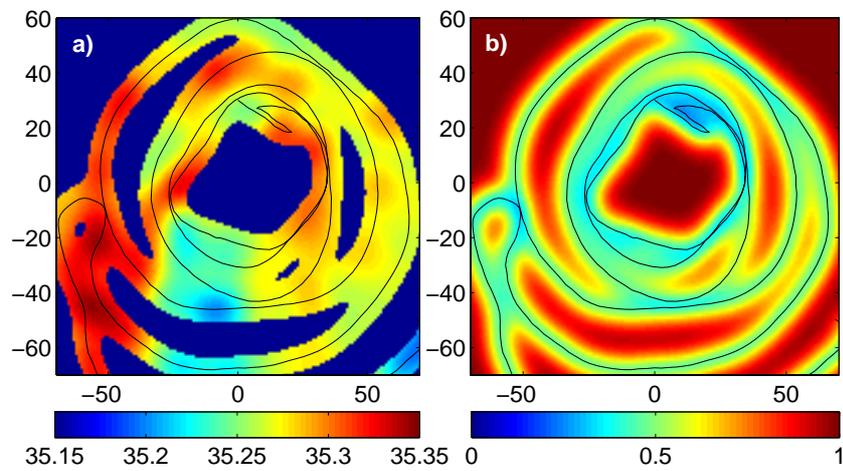


Abbildung 3.3: Objektiv analysierte Felder a) des Salzgehaltes [*ppt*] und b) der Fehlerfelder bei einer Floßumrundung in 6 bis 7 m Tiefe am 24.07. um 10:59 Uhr, ca. 2.5 Std. vor LT

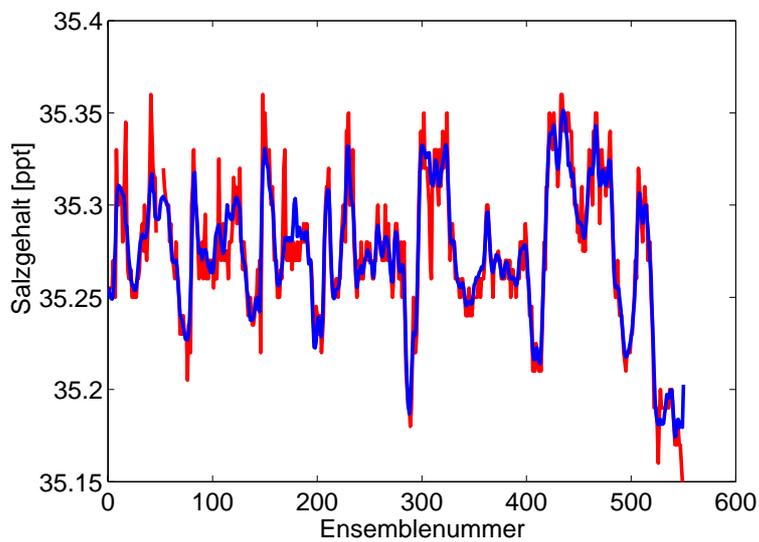


Abbildung 3.4: Verlauf der gemessenen und der objektiv analysierten Werte des Salzgehaltes am Beispiel der Floßumrundung am 24.07. um 10:59 Uhr.  
rot = gemessene Werte, blau = interpolierte Werte

### 3.5 Bilanzierung der Flüsse durch Floßbereich

Die Messungen um die Flöße herum ergeben folgende Fragen: Wie groß ist die Menge des Materials, das die Muscheln pro Zeit herausfiltrieren? Wie lange ist die Aufenthaltsdauer im Floß? Anhand der Strömungsdaten, die mit dem ADCP gemessen wurden, soll eine Wasserbilanz erstellt werden. Ist der Wasserdurchfluss bekannt, kann dieser mit dem Gehalt des Schwebstoffes gewichtet werden und somit eine Schwebstoffbilanz erstellt werden.

Handelt es sich um eine geschlossene Bilanz, entspricht Eintrag gleich Austrag. Aus Gründen der Massenerhaltung sollte die berechnete Wasserbilanz nicht signifikant von Null abweichen, wohingegen eine negative Schwebstoffbilanz eine Schwebstoffsinke anzeigen würde.

Zur Berechnung der Gesamtbilanz wird über eine geschlossene Oberfläche rund um das Floß summiert. Die Oberfläche besteht aus der Wasseroberfläche, einem Mantel aus senkrechten Wänden rund um die Floßseiten und dem oberflächenparallelen Bodestück. Der Fluss durch die Oberfläche ist gleich Null. Der Fluss durch den Boden kann nicht gemessen werden.

Für die Flussberechnung wurde ein Programm erstellt, das auf den Strömungsvektoren basiert, die vom ADCP gemessen wurden. Der Integrationsmantel rund um das Floß wurde aus dem Schiffskurs berechnet, wobei dieser in rechtwinkligen Koordinaten aus dem „bottom track“ gewonnen wird. Anhand des Gauß'schen Integralsatzes (Bronstein und Semendjajew, 1991) wird der horizontale Fluss durch das betrachtete Volumen berechnet. Das Integral der Flüsse wird durch die Summe über einzelne Flächenabschnitte angenähert. Der Integrationsmantel um das Floß wird demnach aus den Wegstücken des Schiffskurses, multipliziert mit den ADCP-Zellentiefen ( $\Delta h_{tz} = 25 \text{ cm}$ ) zusammengesetzt, für jede Einzelfläche der Teilfluss berechnet und diese dann aufsummiert.

Der Anfangspunkt entspricht dabei dem Startpunkt der Fahrt. In Abb. 3.5 ist eine Floßumrundung schematisch dargestellt. Jedes „Ensemble“, erhält bezogen auf die Startposition, einen relativen Positionswert durch die Schiffsbewegung. Dieser zeigt die relative Schiffsbewegung als Vektor und damit die Richtung an. Betrachtet man die Differenz aus dem ersten und dem darauffolgenden Wert des „bottom tracks“ und multipliziert diese mit der Dauer eines „Ensembles“, erhält man die Strecke  $s$ , die während eines „Ensembles“ zurückgelegt wurde. Zusätzlich sind auch die Normalenvektoren der Einzelstrecken dargestellt, die senkrecht auf diesen stehen.

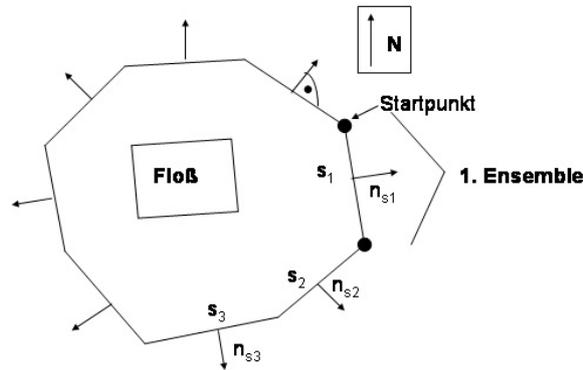


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer Floßumrundung zur Berechnung der Flüsse mit den Streckenvektoren  $\vec{s}$  der einzelnen „Ensembles“ und den senkrecht darauf stehenden Normalenvektoren  $\vec{n}_s$ .

Abb. 3.6 zeigt die berechneten Vektoren eines „Ensembles“. Aus dem Streckenvektor wird der Normalenvektor  $\vec{n}_s$  berechnet, der senkrecht auf  $\vec{s}$  steht und die Richtung des Flusses angibt. Die Normalenvektoren wurden so gewählt, dass sie nach außen zeigen. Damit sind alle Flüsse von innen nach außen positiv und umgekehrt. Eine Stoffsenke wie die Filtration der Muscheln sollte sich durch negative Schwebstoffflüsse bemerkbar machen.

Der Fluss soll senkrecht zum gefahrenen Track und zum Tiefenvektor ausgerichtet sein. Eine wichtige Bedingung ist die einheitliche Richtung der Normalenvektoren. Es gibt zwei Lösungen für einen Normalenvektor auf  $\vec{s}$ . Um richtig bilanzieren zu können, wurde als Konvention festgelegt, dass die Flüsse nach außen positiv und die Flüsse nach innen negativ sind. Somit müssen bei der Floßumrundung alle Normalenvektoren nach außen zeigen.

Um den Fluss über die Tiefe von 15 m berechnen zu können, muss der Querschnitt aus dem Vektor  $\vec{s}$  und der Tiefe  $H$  bestimmt werden. Mit der Projektion des Vektors  $\vec{v}$  auf die Fläche  $A$  und der Aufsummierung über die Tiefenzellen erhält man den Durchfluss durch eine „Ensemblefläche“. Schließlich müssen die einzelnen „Ensembles“ einer Umrundung addiert werden, um den gesamten Durchfluss zu erhalten. Durch eine prozentuale Gewichtung des Schwebstoffes am Gesamtwasserdurchfluss kann auf den Schwebstofffluss geschlossen werden.

$$\vec{s} = \vec{v}_{BT} \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

$$A = |\vec{s}| \cdot \Delta h_{tz} \quad (3.11)$$

$$\Phi_{ens}(n) = \sum_{z=1}^{60} \vec{n}_s \cdot A \cdot v(\vec{z}) \quad (3.12)$$

$$\Phi_{total} = \sum_{n=1}^N \Phi_{ens}(n) \quad (3.13)$$

$\vec{s}$ : Vektor der Strecke, abgeleitet aus dem „bottom track“

$\vec{n}_s$ : Normalenvektor auf den Streckenvektor  $\vec{s}$

$v_{BT}$ : Vektor der Schiffsgeschwindigkeit

$\vec{v}$ : Vektor der Strömungsgeschwindigkeit

$\Delta h_{tz}$ : Tiefe einer Zelle = 25 cm

$A$ : Fläche eines „Ensembles“ [ $m^2$ ]

$\Delta t$ : Zeitdauer eines „Ensembles“ = 3.26 Sekunden

$\Phi_{ens}$ : Wasserdurchfluss durch ein „Ensemble“

$\Phi_{total}$ : Gesamter Durchfluss

$H$ : Gesamttiefe, hier 15 m

$n$ : Zähler über die „Ensembles“

$z$ : Zähler über die Tiefenzellen

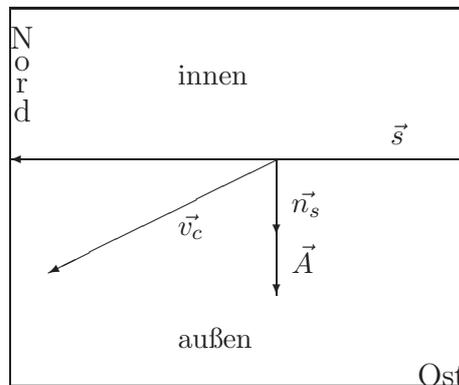


Abbildung 3.6: Prinzip der Flussberechnung am Beispiel eines einzelnen „Ensembles“

$\vec{s}$ = Vektor der Strecke,  $\vec{v}_c$ = Vektor der Strömungsgeschwindigkeit,  $\vec{n}_s$ = Normalenvektor der Strecke

Zur Vereinfachung ist ein Streckenvektor mit der Nordkomponente 0 dargestellt.

## 4 Ergebnisse und Interpretation

Im diesem Kapitel werden zunächst die Eigenschaften der Schwebstoffe näher erläutert. Anschließend werden die Schwebstoff- und Chlorophyllkonzentrationen anhand der Wasserproben hergeleitet. Daraufhin werden die Ergebnisse auf Polygonebene dargestellt und diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse auf Floßebene aufgezeigt und erläutert.

### 4.1 Eigenschaften der Schwebstoffe

Bei Betrachtung der Ergebnisse in Bezug auf die grundsätzlichen Eigenschaften der Schwebstoffe im Ria de Vigo fallen vor allem die niedrigen Schwebstoffkonzentrationen auf. Auffallend sind die insgesamt sehr niedrigen Schwebstoffkonzentrationen. In der Nordsee, einem Schelfmeer, wird Schwebstoff im Bereich von 10 bis  $180 \text{ mg l}^{-1}$  gemessen (Förstner et al., 1986). Wie Abbildung 4.1 zeigt, decken die Schwebstoffproben im Ria de Vigo einen Bereich von  $0.3$  bis  $3 \text{ mg l}^{-1}$  ab. Es ist deutlich zu erkennen, dass der überwiegende Teil der Proben unter  $1.8 \text{ mg l}^{-1}$  liegt. Lediglich zwei Proben, die in jeweils  $30 \text{ m}$  Tiefe genommen wurden, zeigen höhere Werte. Beide Entnahmestellen lagen im Inneren des Ria in größerer Entfernung zur Küste. Im Inneren des Ria ist im tieferen Wasser also eine Zunahme des Schwebstoffes festzustellen. An weniger tiefen Stellen wurde nur ein schwache Zunahme des Schwebstoffgehaltes festgestellt. Insgesamt nehmen die Schwebstoffkonzentrationen mit der Tiefe zu. Dies ist insbesondere in der Nähe des Bodens der Fall, da die Turbulenz durch die Bodenreibung nachlässt.

Darüber hinaus wurde der Schwebstoff qualitativ untersucht. Abb. 4.2 stellt den Glühverlust in Prozent in Abhängigkeit von der Wassertiefe dar. Der Glühverlust weist eine breite Streuung auf, nämlich zwischen  $0 \%$  und  $75 \%$ . Er nimmt jedoch mit der Tiefe deutlich zu, d.h. der Anteil der organischen Substanz am Schwebstoff steigt mit der Tiefe an. Die beiden Punkte, die einen erhöhten Glühverlust aufweisen, lagen außerhalb des Polygons. Die Punkte mit höherem Glühverlust lagen zeitlich zumeist um den Ebbkenterpunkt. Zum vollen Gezeitenstrom hingegen enthielten die Proben einen sehr niedrigen Anteil an organischer Substanz.

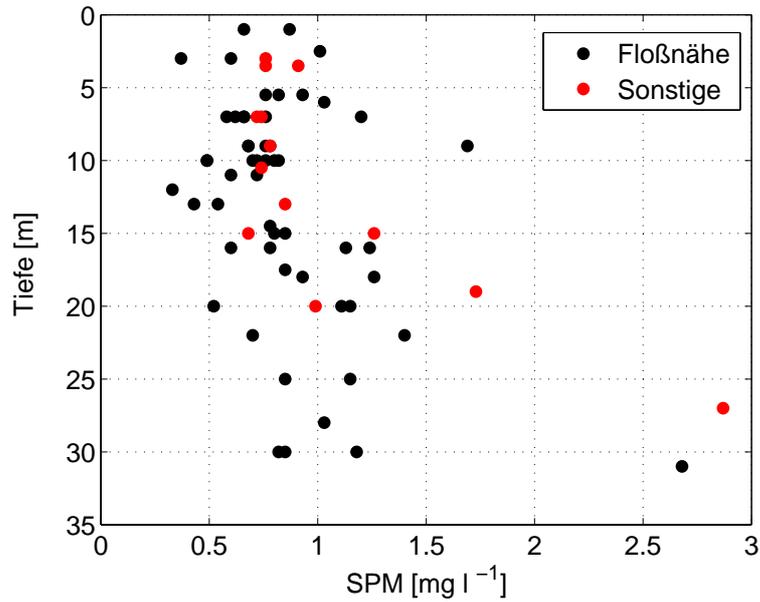


Abbildung 4.1: Veränderung der Schwebstoffkonzentration der Proben [ $\text{mg l}^{-1}$ ] mit der Wassertiefe, in der die Proben genommen wurden. Die Symbole stehen für unterschiedlichen Orte der Probenahme und sind nach Floßnähe und sonstige Orte, die nicht in der Nähe der Muscheln lagen, eingeteilt.

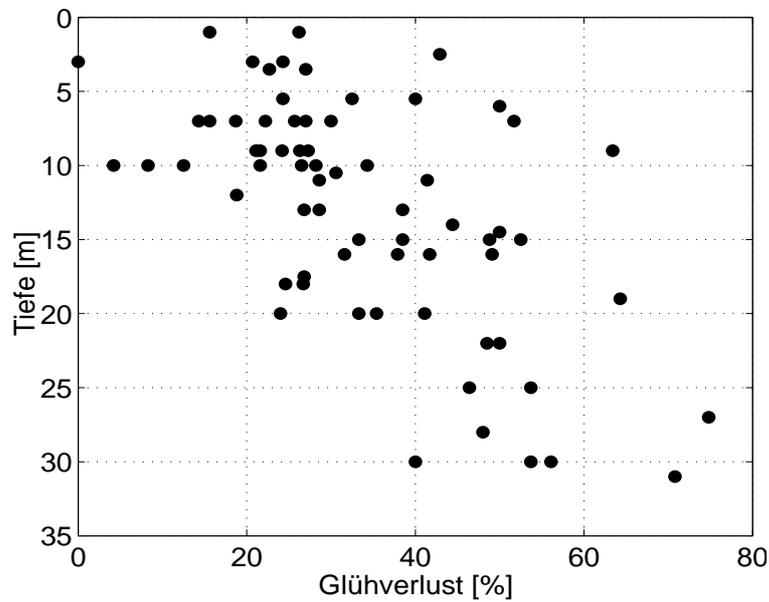


Abbildung 4.2: Veränderung des Glühverlustes in % mit der Wassertiefe, in der die Proben genommen wurden.

Auch die Korrelation zwischen optischer Rückstreuung und Attenuationskoeffizient ist sehr gering, was auf eine Zweiteilung der Werte zurückzuführen ist. Diese Zweiteilung ist im Anhang in Abb. C.1 dargestellt und lässt sich fast vollständig durch eine Aufteilung der Werte  $> 12 m$  und  $< 12 m$  Wassertiefe erklären, wo die Langleinen enden. Im Bereich der Langleinen wird aufgrund der Heterogenität der Schwebstoffe unterschiedliches Material von den beiden Sensoren wahrgenommen.

Da der Rückstreusensor bei einer höheren Wellenlänge emittiert, nämlich  $880 nm$ , werden anhand dieses Sensors eher Rückschlüsse auf den anorganischen Teil des Schwebstoffes oder auf totes organisches Material wie Detritus ermöglicht. Die Attenuation, die bei  $660 nm$  emittiert, liegt näher an Chlorophyll und damit im Bereich der organischen Substanz.

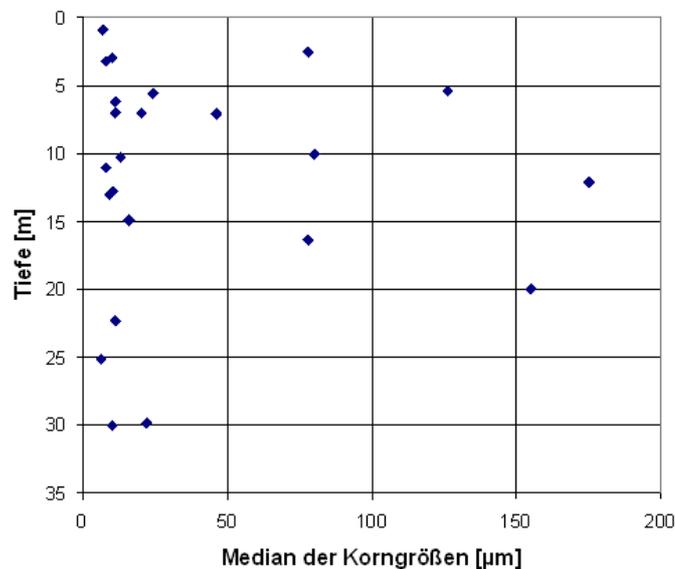


Abbildung 4.3: Veränderung des Medians der Korngrößen [ $\mu m$ ] mit der Tiefe

In Abb. 4.3 ist der Median der Korngrößen in Abhängigkeit von der Wassertiefe, in der die Proben genommen wurde, dargestellt. Es zeigt sich eine Fraktion mit geringen Korngrößen unter  $20 \mu m$ , die auch mit der Tiefe nicht variabel ist. Eine zweite Fraktion weist einen stark variablen Median der Korngrößen auf. Die Korngrößenverteilung im Bereich der Langleinen ist stark heterogen, da die variablen Korngrößen zwischen 3 und 20 m Tiefe auftreten.

Abb. 4.4 wurde als Beispiel für eine heterogene Korngrößenverteilung einer Wasserprobe ausgewählt. Die Korngrößen schwanken zwischen 0 und  $200 \mu m$  und decken damit einen weiten Größenbereich ab. Zwei Maxima zwischen 0 und  $50 \mu m$  und  $> 200 \mu m$

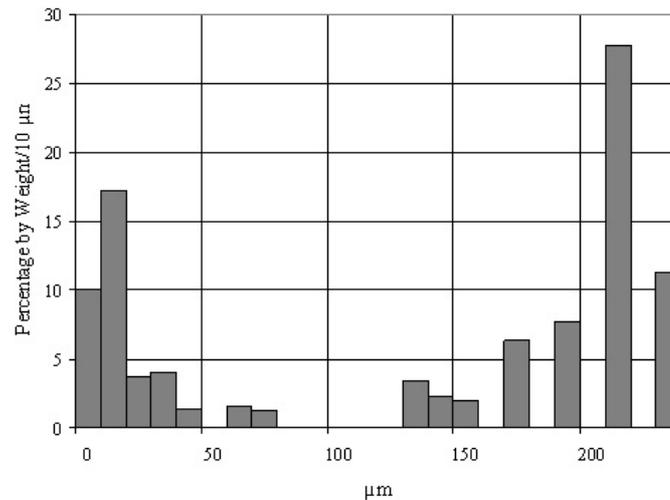


Abbildung 4.4: Korngrößenverteilung [ $\mu\text{m}$ ] einer Wasserprobe, die am 27.07., um 15:16 Uhr, in der Nähe von Floß 1 in 12 m Tiefe genommen wurde, ca. 1.5 Std. vor NW

machen eine zweigipfelige Korngrößenverteilung deutlich.

## 4.2 Berechnung von Chlorophyll- und Schwebstoffkonzentrationen mit indirekten Verfahren

Um die Werte der optischen Sensoren der Multisonde in Chlorophyll- bzw. Schwebstoffkonzentrationen umzurechnen, werden die Wasserproben anhand der Zeitangaben dem Mittel der Sondenwerte zugeordnet. Mit einem Programm wurden die im Zeitfenster der Probenahme aufgezeichneten Daten extrahiert und gemittelt. Die erhaltenen Mittelwerte wurden gegen die entweder fluorometrisch oder gravimetrisch im Labor bestimmten Chlorophyll-a- oder Schwebstoffkonzentrationen aufgetragen.

### 4.2.1 Zuordnung der Fluorometerdaten zu den Chlorophyllkonzentrationen

Im Folgenden wird die Chlorophyll-a-Konzentration zur Vereinfachung als Chlorophyllkonzentration bezeichnet.

In Abb. 4.5 sind die Chlorophyllkonzentrationen der Probenwerte gegen die Fluoreszenzwerte der Multisonde dargestellt. Daraus ergibt sich eine hochsignifikante Korrelation mit einer erklärten Varianz von annähernd 99 %.

In der Ausgleichsgeraden wurden nur die Werte  $> 6$  m berücksichtigt, da in Oberflächennähe in der Regel ein sogenannter „Quenching-Effekt“ auftritt (Maxwell und

Johnson, 2000). Dieser Effekt führt zu einer geringeren Fluoreszenzausbeute bei gleicher Chlorophyllkonzentration, da das Phytoplankton in Oberflächennähe an höhere Einstrahlung angepasst ist. Im Ria de Vigo wurde dieser Quench-Effekt unterhalb von 6 m nicht mehr beobachtet.

Wie aus Abb. 4.5 zu erkennen ist, lagen die beobachteten Chlorophyllkonzentrationen im Untersuchungszeitraum im Bereich von 0.7 bis 16  $\mu\text{g l}^{-1}$ .

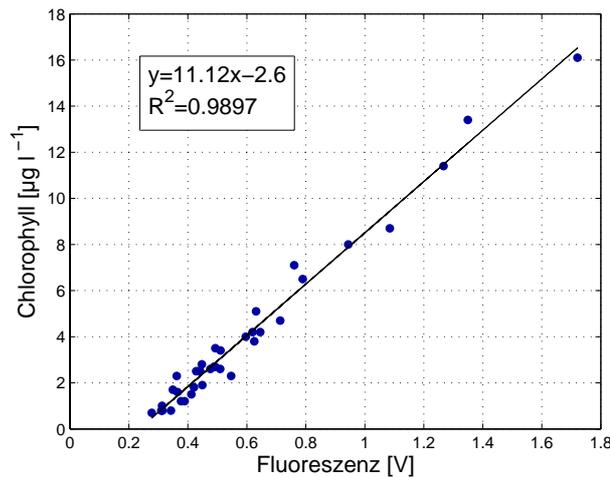


Abbildung 4.5: Abhängigkeit der Fluoreszenz [V] von der Chlorophyllkonzentration [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ] mit der Ausgleichsgeraden. Daten  $> 6$  m Wassertiefe. Weiterhin sind die erklärte Varianz als  $R^2$  und die Gleichung der Ausgleichsgeraden dargestellt.

#### 4.2.2 Zuordnung der optischen Messdaten zu den Schwebstoffkonzentrationen

Mit den Schwebstoffdaten der Wasserproben und den mit den Sensoren gemessenen Werten wurde versucht, Ausgleichsgeraden für die optische Rückstreuung und die optische Attenuation zu erstellen. Die Ausgleichsgeraden sind in Abb. 4.6 dargestellt.

Trägt man die Attenuation gegen die Filterprobenwerte auf, fällt die geringe Korrelation auf, die auf eine Zweiteilung zurückzuführen ist (Abb. 4.6 a)). Die Schwebstoffkonzentration, die oberhalb von 12 m Wassertiefe gemessen wurde, korreliert nicht mit dem Attenuationskoeffizienten. Unterhalb von 12 m Wassertiefe ist der Korrelationskoeffizient größer, die erklärte Varianz  $R^2$  liegt bei 76 %.

Werden die Werte des Attenuationskoeffizienten in Klassen des Glühverlustes von  $< 30$  % und  $> 30$  % eingeteilt, fällt auf, dass sich ebenfalls eine Zweiteilung ergibt (Anhang Abb. C.4). Dabei korreliert die Attenuation bei geringen Glühverlusten bis

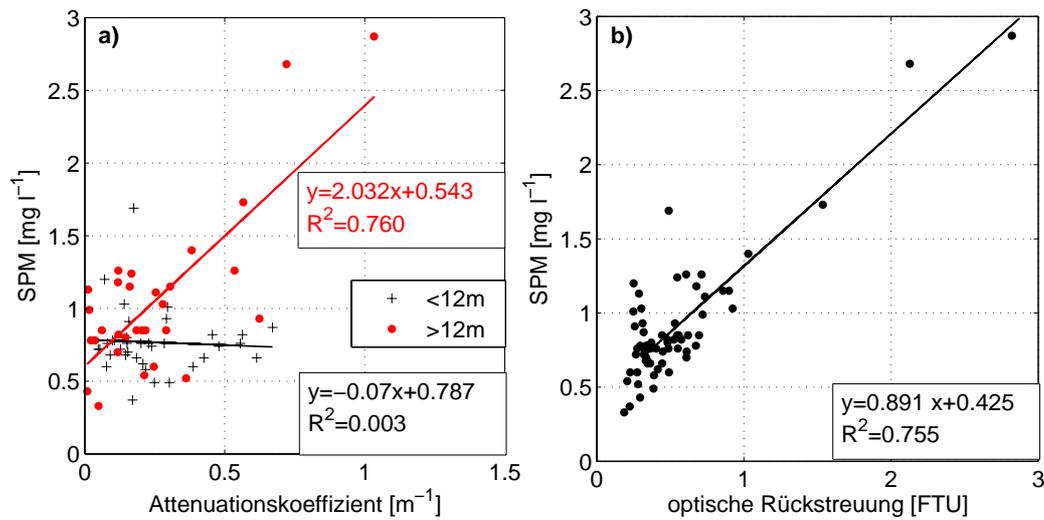


Abbildung 4.6: Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration [ $mg\ l^{-1}$ ] von der a) Attenuation [ $m^{-1}$ ] und b) der optischen Rückstreuung mit Ausgleichsgeraden, Geradengleichungen und erklärten Varianzen  $R^2$ .  
(zu a): Die Kreuze stellen Werte oberhalb von 12 m dar, die Punkte unterhalb von 12 m.)

30 % kaum mit der Schwebstoffkonzentration, wohingegen bei höheren Glühverlusten eine deutliche Korrelation zu erkennen ist. Dies stimmt mit der beobachteten Zunahme des Glühverlustes mit der Tiefe überein (vgl. Abb. 4.2).

Trägt man den Attenuationskoeffizienten gegen die Chlorophyllkonzentration der Wasserproben auf, streuen die Werte innerhalb einer Tiefenstufe wenig, wohingegen kein signifikanter Zusammenhang für den gesamten Datensatz festgestellt werden konnte (Abb. C.6 im Anhang). Die erklärten Varianzen sind bis zu einer Tiefe von 18 m für jeden Tiefenbereich sehr hoch und liegen zwischen 84 % und 96 %. Da die Irrtumswahrscheinlichkeiten  $p$  für alle Tiefenstufen unter 0.05 liegen, ist die Korrelation hoch signifikant. Zwar ändern sich die Verhältnisse der Werte zueinander mit jeder Tiefenstufe, dennoch kann davon ausgegangen werden, dass der Attenuationssensor im oberen Tiefenbereich bis zum Ende der Langleinen hauptsächlich Chlorophyll erkennt, wohingegen die Korrelation zwischen Schwebstoffkonzentration und Attenuationskoeffizient in den oberen Metern sehr gering ist. Es ist demnach zu erwarten, dass der Attenuationssensor ähnliche Muster zeigt wie das Fluorometer.

In Tabelle 4.1 sind die erklärten Varianzen  $R^2$  für den optischen Rückstreusensor und die Attenuation dargestellt. Die Varianzen beziehen sich auf den gesamten Schwebstoff, den organischen und den anorganischen Anteil. Es sind nur schwache Korrelationen zwi-

schen dem Gesamtschwebstoffgehalt und dem Attenuationskoeffizienten zu erkennen, die für die Kalibrierung nicht ausreicht.

Tabelle 4.1: Erklärte Varianzen  $R^2$  für die Schwebstoffkonzentration in bezug auf Attenuation und optische Rückstreuung

| $R^2$             | SPM   | SSC   | POM   | Att   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| opt. Rückstreuung | 0.755 | 0.188 | 0.761 | 0.468 |
| Attenuation       | 0.345 | 0.368 | 0.235 |       |

Auch für den Sensor der optischen Rückstreuung wurde eine Ausgleichsgerade erstellt (Abb. 4.6). Die erklärte Varianz liegt bei 75 %. Jedoch korrelieren die Werte der Schwebstoffproben, die unterhalb von 12  $m$  genommen wurden, mit einer erklärten Varianz  $R^2$  von 89 % besser, als die oberhalb von 12  $m$  genommenen (Abb. C.2 im Anhang). Der Sensor verhält sich umgekehrt wie bei der Messung der Attenuation. Der Sensor reagiert im Bereich unterhalb von 12  $m$  weniger auf eine Schwebstoffzunahme als im Bereich oberhalb von 12  $m$  Wassertiefe. Damit wird eine Kalibrierung besonders bei niedrigen Schwebstoffkonzentrationen erschwert, da die Konzentrationen durch die Geradengleichung überschätzt werden würden.

Tabelle 4.1 zeigt auch die erklärten Varianzen der optischen Rückstreuung. Der optische Rückstreusensor korreliert mit dem organischen Teil des Schwebstoffes, POM, mit einer erklärten Varianz von 76 %. Mit dem Rückstreusensor kann folglich besonders der organische Teil des Schwebstoffes aufgeklärt werden. Der Rückstreusensor korreliert mit dem anorganischen Anteil, SSC, nur sehr schwach, da er eine erklärte Varianz von 19 % aufweist. Auch Abb. C.3 im Anhang zeigt eine hohe Korrelation zwischen der optischen Rückstreuung und den Schwebstoffproben, bei denen Glühverluste von mehr als 30 % auftreten.

Die Herleitung von Schwebstoffkonzentrationen mittels der optischen Sensoren ist aufgrund der heterogenen Schwebstoffverhältnisse problematisch. Für die Attenuation können nur die Werte umgerechnet werden, die unterhalb von 12  $m$  Wassertiefe gemessen wurden. Da während der Kampagne die Sonde jedoch überwiegend in 7  $m$  geschleppt wurde und unterhalb von 12  $m$  keine Muscheln mehr vorzufinden sind, kann dieser Sensor nicht kalibriert werden. Oberhalb von 12  $m$  gibt die Attenuation haupt-

sächlich Aufschluss über die Chlorophyllkonzentration, weshalb dieser Sensor nicht in die weitere Betrachtung einbezogen wird. Die optische Rückstreuung kann in Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass auch bei diesem Sensor die Korrelation mit den organischen Bestandteilen des Schwebstoffes deutlich höher ist. Außerdem beruht die erklärte Varianz hauptsächlich auf dem Beitrag der Proben aus größeren Wassertiefen.

Aus den vorliegenden Daten kann nicht geschlossen werden, um welche Art der organischen Substanz es sich handelt. Campbell und Spinrad (1987) erklären die Unterschiede zwischen der gravimetrischen Schwebstoffmessung und der Attenuationsmessung mit der unterschiedlichen Qualität des Schwebstoffes. Unterschiedliche Korngrößen können die Kalibrierung beeinflussen. Wie oben gezeigt, ist in den oberen Wasserschichten Material mit geringem Glühverlust und hohem Anteil an Chlorophyll vorhanden, während in den tieferen Wasserschichten hauptsächlich organisches Material mit verhältnismäßig wenig Chlorophyll vorhanden ist. Da sich, wie gezeigt, auch der Glühverlust mit der Tiefe ändert, deutet diese Zweiteilung auf eine Veränderung der optischen Qualität des Schwebstoffes in 12 m Tiefe, am Ende der Floßleinen, hin. Im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten kann qualitativ nicht vollständig auf die Zusammensetzung des Schwebstoffes geschlossen werden. Es kann lediglich zwischen organischen und anorganischen Bestandteilen durch den Glühverlust unterschieden werden.

### 4.2.3 Zuordnung der akustischen Rückstreusignale zu den Schwebstoffkonzentrationen

Um Schwebstoffkonzentrationen aus den ADCP-Messungen ableiten zu können, müsste die laut Kap. 3.1.2 korrigierte Rückstreustärke anhand der Wasserproben kalibriert werden (Kostaschuk et al., 2005). Die eindeutige Lösung der Sonargleichung setzt eine konstante Korngrößenverteilung voraus (Wren et al., 2000). Die untersuchten Proben wiesen jedoch meist eine zweigipfelige oder breite Korngrößenverteilung auf (vgl. Abb. 4.4). Ändert sich die Zusammensetzung des Schwebstoffes, wird der Zusammenhang zwischen akustischer Rückstreuung und der Schwebstoffkonzentration weniger deutlich.

Abb. 4.7 zeigt den Zusammenhang zwischen Schwebstoffkonzentration und Rückstreustärke. Eine signifikante Korrelation ist nicht zu erkennen. Auch eine Aufteilung in verschiedene Tiefenstufen verbessert die Korrelation nicht. Die erklärten Varianzen liegen unter 32 %. Eine Kalibrierung der akustischen Rückstreuung ist daher aufgrund der

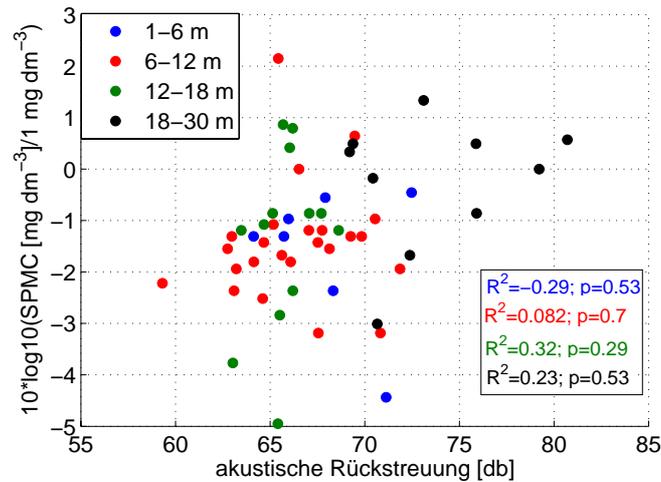


Abbildung 4.7: Abhängigkeit der akustischen Rückstreuung [dB] von der Schwebstoffkonzentration [logarithmiert].

heterogenen Korngrößenverteilung nicht möglich.

Bei der Betrachtung der räumlichen Muster werden daher nur die auf Attenuation und geometrische Aufweitung korrigierten Rückstreuintensitäten als qualitatives Maß für die Änderungen der Schwebstoffkonzentration benutzt.

### 4.3 Polygonebene

Im folgenden Kapitel werden die Strömungsverhältnisse und die Muster der akustischen Rückstreuung auf Polygonebene dargestellt.

#### 4.3.1 Strömungsmuster

Die Strömung wurde auf Polygonebene untersucht, indem sowohl um das gesamte Polygon herum als auch Transekte durch das Polygon hindurch gemessen wurden, wobei die Daten bis in 15 m Wassertiefe verlässlich waren. Eine gesamte Polygonumrundung dauert ungefähr 30 Minuten. Man erhält keine synoptische Aufnahme. Unter der Annahme, dass sich der Tideeinfluss innerhalb dieser Zeit nicht merklich ändert, sind die Daten jedoch als gute Annäherung an ein synoptisches Bild zu sehen. Im Folgenden wird eine Fahrt um das Polygon im vollen Ebbstrom diskutiert.

Insgesamt liegen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von  $10 \text{ cm s}^{-1}$ . Während der Messungen änderten sich die Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten durch den Einfluss der Flöße, sowohl vertikal als auch horizontal, deutlich. Eine Poly-

gonumrundung (s. Abb. 4.8) wurde am 22.07. um 9:43 Uhr bei ablaufendem Wasser zwei Stunden vor dem Kenterpunkt durchgeführt. Die Umrundung erfolgte im Uhrzeigersinn. Die Abbildung zeigt Strömungsvektoren, die von 3 bis 11 *m* Wassertiefe und über 16.3 Sekunden gemittelt wurden. Trotz dieser Glättung bleiben die wesentlichen Muster noch erhalten.

An der östlichen Seite des Polygons weisen die Strömungen nach Süden. Der südliche Rand dieser Polygonseite zeichnet sich durch eine Richtungsänderung nach Süd-Westen aus, während die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmen. An der westlichen Seite des Polygons sind schwache Strömungen zu beobachten. Die Strömungspfeile zeigen gegen Norden bzw. Nord-Westen. An der Nordseite wechselt die Strömungsrichtung zwischen Nord-Osten und Süd-Osten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist deutlich niedriger als im Süden. Am südlichen Rand fällt zudem eine deutliche Zweiteilung auf. In der westlichen Hälfte liegt eine Hauptströmungsrichtung von Norden bis Nord-Westen vor. Etwa nach der Hälfte der gefahrenen Strecke kippt die Strömung, die Hauptströmungsrichtung ändert sich und zeigt nach Süden bzw. Süd-Westen.

In Bereichen, wie dem süd-östlichen Teil des Polygons, wo nur wenige Flöße ein Hindernis darstellen, sind die Strömungsgeschwindigkeiten am höchsten. Die Änderung der Strömungsrichtung im Osten ist auf die Landzunge und die dadurch abnehmende Wassertiefe zurückzuführen. Die niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Westen können auf die Flöße zurückgeführt werden, da das Wasser mit großer Wahrscheinlichkeit das Polygon zumindest teilweise durchflossen hat und an dieser Stelle wieder nach außen tritt. An der südlichen und nördlichen Seite wechselt die Strömungsrichtung in Abhängigkeit von den Flößen, die dort im Strömungsschatten liegen oder die Strömung abbremsen.

Auch tiefenabhängig ändert sich die Strömung deutlich. In Abb. C.7 im Anhang ist die Polygonumrundung in verschiedenen Tiefen dargestellt, wobei jede Tiefenstufe noch im Bereich der Langleinen liegt, die 12 *m* tief im Wasser hängen. Vertikal wurde über einen Meter gemittelt. Von einer horizontalen Mittelung wurde abgesehen, um die feineren Strukturen besser aufzulösen. In geringer Tiefe zeigt die Strömung ein ähnliches Muster, wie dies auch in Abb. 4.8 dargestellt ist. Jedoch schwankt die Strömung stärker, da nicht horizontal gemittelt wurde. Auch zwischen 7 und 8 *m* bleiben diese Muster erhalten. Eine Änderung ist ab 9 *m* Wassertiefe zu beobachten. Im Norden und Westen zeigen die Vektoren hauptsächlich gegen Süd-Osten und Schwankungen sind kaum zu erkennen. Auch die Ebbströmungen im Süd-Osten sind nicht mehr deutlich zu erkennen.

Die kleinskaligen Schwankungen können auf einzelne Flöße bzw. deren Zwischenräu-

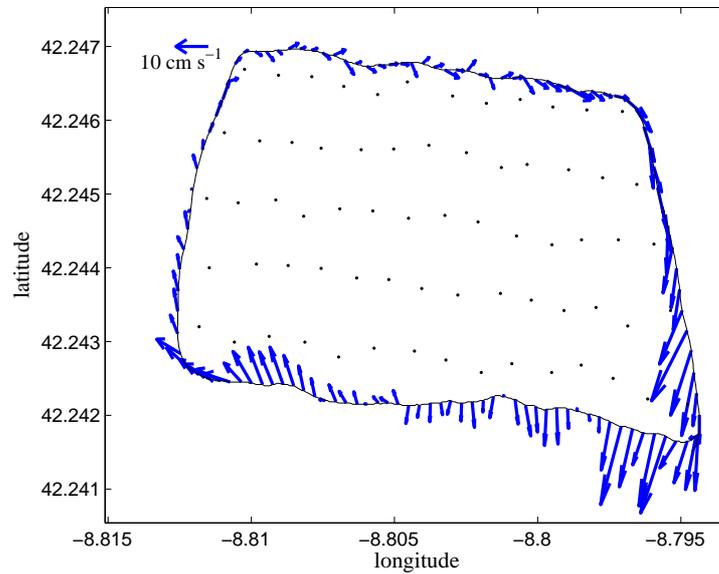


Abbildung 4.8: Strömungsmuster um das Polygon bei Ebbe, am 22.07. um 09:43 Uhr, ca. 4 Std. nach HW, Mittel über 3 - 11 m Tiefe und 16.3 Sek.

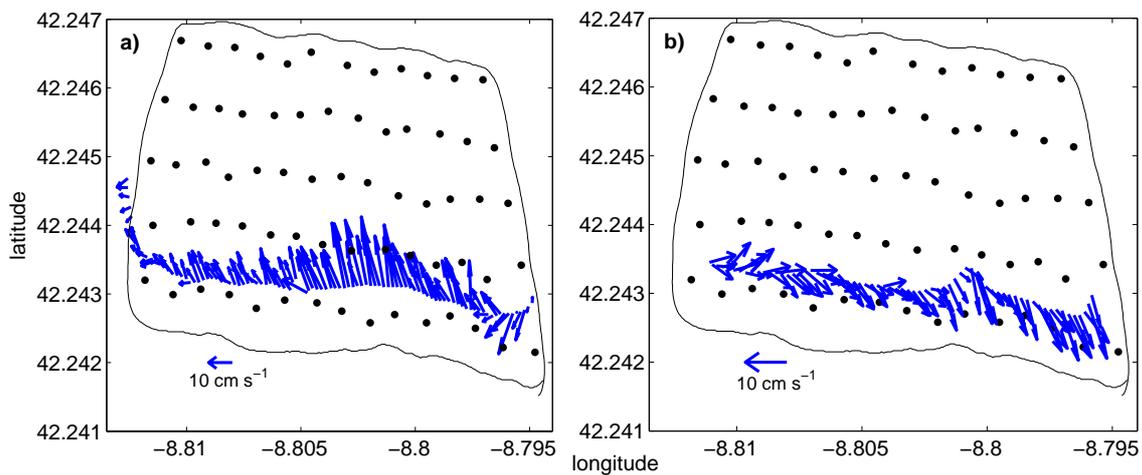


Abbildung 4.9: Strömungsmuster in der südlichen Fahrrinne durch das Polygon bei a) Ebbe, am 28.07. um 13:45 Uhr, ca. 2 Std. nach HW und b) Flut, am 24.07. um 15:51 Uhr, ca. 2.5 Std. nach NW, Mittel über 3-11 m Tiefe und 16.3 Sek.

me zurückzuführen sein. Die Änderungen ab 9 m Wassertiefe können mit dem Ende der Langleinen zusammenhängen. Dort treffen Wasserkörper mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit aufeinander. Unterhalb des Floßes liegen wahrscheinlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten vor als in dem Bereich der Langleinen, wo die Strömung auf Hindernisse trifft und gebremst wird. Die Punkte am nord-östlichen Rand zeigen keine Strömungsvektoren, da an diesen Stellen der Seeboden erreicht war.

Darüber hinaus wurde ein Kurs durch die südlichste Fahrrinne des Polygons von Westen nach Osten untersucht. Dieser Kurs wurde sowohl bei Ebbe als auch bei Flut gefahren.

Bei Ebbe wurde am 28.07. um 13:45 Uhr mit den Messungen begonnen. An der östlichen Seite des Polygons herrschen süd-westliche Strömungsrichtungen vor. Nach Westen hin wechselt diese gegen Nord-Westen und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zu. An der westlichen Seite außerhalb des Polygons dreht die Strömung nochmals und zeigt gegen Süd-Westen.

Die Zweiteilung der Strömung ist im Gegensatz zu Abb. 4.8 nach Osten verschoben. Dies kann an den unterschiedlichen Zeiten liegen, da die Messungen zu Abb. 4.8 vier Stunden nach Hochwasser begonnen wurden und die Messungen zu Abb. 4.9 a) zwei Stunden nach Hochwasser. Die Strömung hat sich, wie zum Vergleich in Abb. 4.8 ersichtlich ist, bereits gedreht. Es wird deutlich, dass ein Unterschied von zwei Stunden während der gleichen Tidephase bereits ein anderes Bild ergibt.

Die Messung bei Flut startete am 24.07.2004 um 15:51 Uhr, ca. 2.5 Stunden nach Niedrigwasser (Abb. 4.9 b)). Auf der westlichen Seite des Polygons ist die Strömung gegen Nord-Osten gerichtet und läuft damit auf die Küste zu, wohingegen sie an den weiter östlich gelegenen Positionen in Richtung Süd-Osten verläuft.

Es fällt auf, dass die Strömung sowohl bei Ebbe als auch bei Flut stark von der Topographie des Meeresbodens abhängt. Weiterhin sind zu beiden Tidephasen Zweiteilungen der Strömungsrichtung zu sehen. Betrachtet man die Küstenlinie und die Topographie des Meeresbodens in der Bucht, wird klar, dass diese Richtung bei Ebbe am östlichen Ende der Bucht aufgrund der Landzunge, die ein Hindernis darstellt, vorherrscht. Die Strömung wird bei Ebbe durch die Landzunge nach Süden hin abgelenkt und beschreibt damit einen Bogen in der Bucht. Bei Flut lenkt die Landzunge die Strömung bereits weiter westlich ab.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ebbströme im und um das Polygon keine eindeutige Richtung aufzeigen. Die Strömungsrichtungen sind zweigeteilt: sie zeigen im Westen des Polygons gegen Nord-Westen und im Osten gegen Süd-Westen. Im

Gegensatz dazu weisen die Flutströme klarere Muster auf. Diese zeigen gegen Osten oder Süd-Osten je nach Lage im Polygon. Die Topographie des Meeresbodens und damit die Landzunge nord-östlich des Polygons beeinflussen die Strömung deutlich.

### 4.3.2 Vertikalprofil

Aus Temperatur, Salzgehalt und Druck wurde empirisch die Dichte des Wassers berechnet. Der Zusammenhang von Dichte mit Temperatur und Salzgehalt ist im Anhang in Abbildung B.1 dargestellt. Die Gleichung für die Berechnung der Dichte wurde im 10. Bericht der UNESCO (1981) veröffentlicht. Die Dichte ist ein wichtiger Parameter, um Wasserkörper unterschiedlicher Herkunft unterscheiden zu können (Günther et al., 1992). Im Ria kann damit unterschieden werden, ob das Wasser eher aus dem salzarmen Zufluss stammt oder ob es aus salzreichen, kälteren Tiefen kommt. Veränderungen der Dichte können darüber hinaus interne Bewegungen und turbulente Austauschvorgänge hervorrufen. Dichtesprünge können dadurch vertikale Strömungen und Veränderungen der horizontalen Strömungen verursachen. Eine stabile Dichteschichtung zeichnet sich dadurch aus, dass die Dichte mit der Tiefe zunimmt.

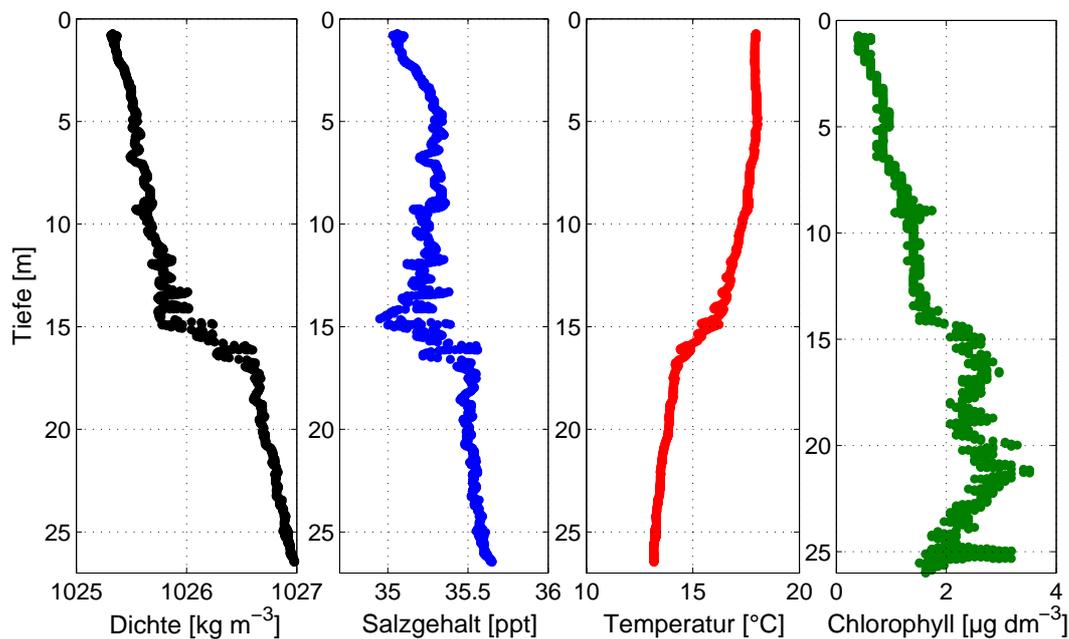


Abbildung 4.10: Vertikalprofil in der Nähe von Floß 35 im Inneren des Polygons. Die vier Abbildungen zeigen Dichte [ $\text{kg m}^{-3}$ ], Salzgehalt [ppt], Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] und Chlorophyllkonzentration [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ] am 22.07. um 12:18 Uhr, ca. 30 Min. nach NW.

In Abb. 4.10 ist ein Vertikalprofil dargestellt, das typisch für das Polygon ist. Die

Aufnahme des Profils erfolgte am 22.07., etwa 2 Stunden nachdem die Polygonumrundung gefahren wurde (vgl. Abb. 4.8). Bei diesem Vertikalprofil ist die Tiefenverteilung verschiedener Parameter abgebildet. Die Dichte nimmt bis 10 *m* kontinuierlich zu. Bei 15 *m* Tiefe ist ein Dichtesprung zu verzeichnen. Auch der Salzgehalt nimmt bis in diese Tiefe hin zu, während die Temperatur entsprechend abnimmt. Auch die Chlorophyllkonzentration nimmt mit der Tiefe zu, wobei die Zunahme ab 14 *m* am deutlichsten ist.

Diese Veränderungen ab 15 *m* Tiefe können mit der Länge der Langleinen zusammenhängen, die bis in 12 *m* Tiefe hängen. Einerseits kann der Dichtesprung durch die Änderung der Wassertemperatur begründet sein. Das Wasser wird zwischen den Langleinen abgebremst und kühlt mit der Tiefe langsamer ab. Andererseits weist der Sprung im Salzgehalt darauf hin, dass an dieser Stelle zwei Wasserkörper aufeinandertreffen. Unterhalb von 15 *m* liegt salzreicheres Wasser aus größeren Tiefen vor. Die Zunahme der Chlorophyllkonzentration in größerer Tiefe könnte auf die Muscheln zurückgeführt werden, die das Phytoplankton aufgrund der Länge der Langleinen nur bis in 12 *m* Tiefe filtrieren können.

Eine Auswirkung des Dichtesprunges auf die Strömung kann nicht nachgewiesen werden, da unterhalb von 15 *m* keine Strömungsdaten vorliegen.

### 4.3.3 Veränderung der Rückstreuintensität

Im Folgenden wird die akustische Rückstreuung mittels zweier Fahrten durch die südliche Fahrrinne des Polygons betrachtet. Die Strömungsmuster, die bei den entsprechenden Schiffskursen gemessen wurden, sind bereits in Abb. 4.9 vorgestellt worden. In Abb. 4.11 sind der Schiffskurs und die akustische Rückstreuung in verschiedenen Tiefen bei Flut gegen die Ostkoordinate dargestellt (vgl. Kap. 4.3.1). Bei der Betrachtung der Rückstreuungsmuster auf Polygonebene fällt besonders auf, dass die akustische Rückstreuung von Westen nach Osten abnimmt.

In 4 bis 5 *m* Tiefe beträgt die akustische Rückstreuung im Westen zwischen 67 bis 69 *dB*. Die Rückstreuung schwankt anfangs leicht und fällt weiter im Osten im Mittel bis auf ca. 63 *dB*. Auch in 7 bis 8 *m* Tiefe nimmt die akustische Rückstreuung ebenfalls von Westen nach Osten ab, die Werte sind insgesamt niedriger als zwischen 4 und 5 *m* Wassertiefe. Dieses Muster ändert sich aber in größerer Tiefe. Zwischen 11 und 12 *m* Tiefe steigt die Rückstreuung leicht an und sinkt ganz im Osten auf 60 *dB* ab. Darüber hinaus weist die Rückstreuung in allen Tiefen kleinskalige Maxima

und Minima auf.

In Abb. 4.12 ist die bei den entsprechenden Kursen gemessene akustische Rückstreuung bei Ebbe dargestellt. Die Werte der akustischen Rückstreuung bei Ebbe und Flut können nicht ohne weiteres verglichen werden, da an verschiedenen Tagen gemessen wurde und sich dadurch die Randbedingungen geändert haben. Um den 27.07. wurden insgesamt höhere Werte gemessen, da an diesem Tag ein leichtes Upwelling auftrat (vgl. Abb. 2.6).

In 4 bis 5 *m* Tiefe bleibt die akustische Rückstreuung zunächst konstant, zeigt dann ein deutliches Minimum und steigt ganz im Osten wieder an. Insgesamt sinken die Rückstreuwerte jedoch von ca. 69 auf 67 *dB*. In größerer Tiefe zwischen 7 und 8 *m* bleibt die Rückstreuung zunächst fast konstant und fällt ebenfalls im Osten, an der gleichen Stelle, stark ab. Zwischen 11 und 12 *m* schwankt die Rückstreuung im Westen um 67 *dB*. Die Schwankungen verstärken sich weiter östlich stark. Die Rückstreuung sinkt bis auf ca. 64 *dB* ab. In 11 bis 12 *m* und in 4 bis 5 *m* Tiefe nimmt die Rückstreuung ganz im Osten wiederum zu.

Sowohl bei Ebbe als auch bei Flut nimmt die akustische Rückstreuung von Westen nach Osten hin ab. Es ist wahrscheinlich, dass der Schwebstoff westlich angeströmt wird. Auf dem Weg durch das Polygon, an verschiedenen Flößen vorbei, wird die Schwebstoffgehalt von Westen nach Osten verringert.

Bei Flut nimmt die Rückstreuung bis in 8 *m* Tiefe besonders ab der Stelle ab, an der sich die Strömung dreht und fortan eine süd-östliche Strömungsrichtung vorherrscht (s. Abb. 4.9 a)). Der leichte Anstieg von Westen nach Osten ab 11 *m* Tiefe und die weniger ausgeprägten Schwankungen können daran liegen, dass das Ende der Langleinen erreicht ist und die Muschelfiltration in diesem Bereich nicht mehr ausgeprägt ist. In allen Tiefen nimmt die Intensität der Rückstreuung besonders am östlichen Ende des Polygons ab. Betrachtet man den Kurs, der gefahren wurde, könnte diese Abnahme auf die Kurve zurückzuführen sein, die durch die Lage der Flöße bedingt, gegen Ende des Kurses gefahren wurde. Es könnte folglich sein, dass in diesem Bereich des Kurses im Strömungsschatten eines Floßes (Floß 17), aus dem filtrierte Wasser direkt austritt, gemessen wurde.

Bei Ebbe kann die Zunahme der Rückstreuung am östlichen Ende des Schiffskurses mit der Änderung der Strömungsrichtung erklärt werden (vgl. Abb. 4.9 b)). Die Schwankungen der Rückstreuung sind besonders bei Ebbe in 11 bis 12 *m* Tiefe ausgeprägt, aber auch die Werte in anderen Tiefen weisen Schwankungen auf. Da während der Fahrt von Westen nach Osten mehrere Flöße passiert werden, können die Schwankungen an der

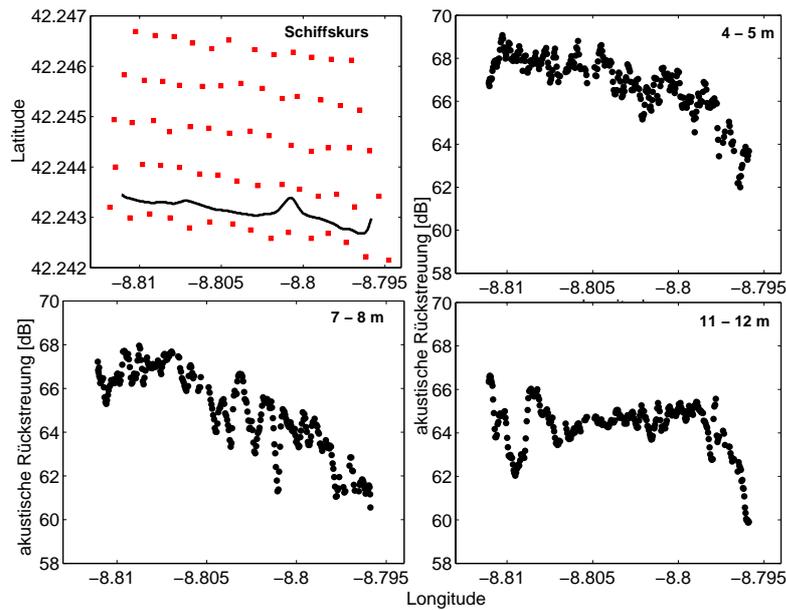


Abbildung 4.11: Verlauf der akustischen Rückstreuung (gleitendes Mittel über 13 Sekunden) eines Transektes mit der Ostkoordinate durch das Polygon von Westen nach Osten in verschiedenen Tiefen *bei Flut*, am 24.07. um 15:51 Uhr, ca. 2.5 Std. nach NW. Die akustische Rückstreuung ist gegen die Ostkomponente (longitude) aufgetragen. Zusätzlich ist der Schiffskurs durch das Polygon aufgetragen.

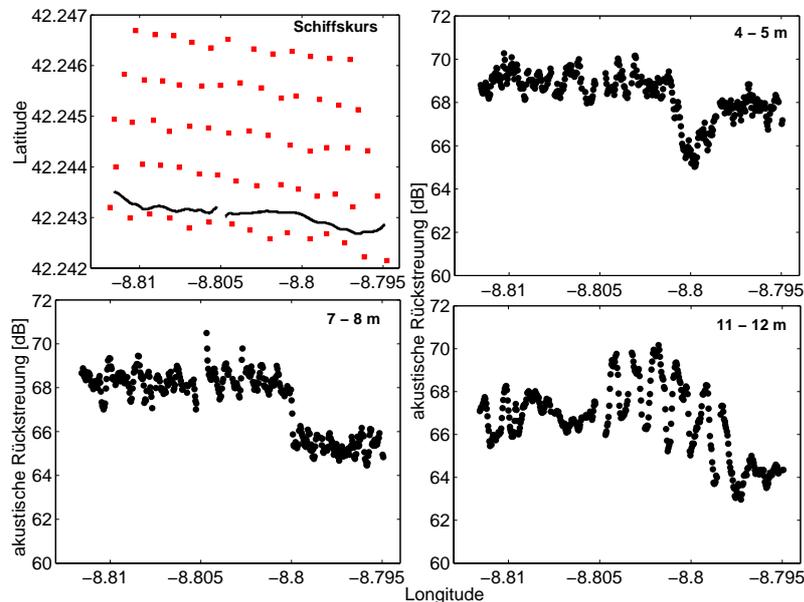


Abbildung 4.12: Verlauf der akustischen Rückstreuung (gleitendes Mittel über 13 Sekunden) eines Transektes mit der Ostkoordinate durch das Polygon von Westen nach Osten in verschiedenen Tiefen *bei Ebbe*, am 28.07. um 13:45 Uhr, ca. 2 Std. nach HW. Die akustische Rückstreuung ist gegen die Ostkomponente aufgetragen (longitude). Zusätzlich ist der Schiffskurs durch das Polygon aufgetragen.

Reduktion des Schwebstoffes durch einzelne Muschelflöße liegen. Im östlichen Teil des Kurses stimmen die acht Minima mit den acht Flößen, die in nächster Nähe passiert wurden, überein.

Da das prinzipielle Muster der Abnahme auch bei Ebbe erhalten bleibt, ist das ein Hinweis darauf, dass wenig Schwebstoff bei Ebbe angeliefert wird. Es könnte folglich sein, dass der Schwebstoff zum größten Teil aus Süden oder Westen, nicht aber aus Osten oder Nord-Osten angeliefert wird.

## 4.4 Floßebene

Im folgenden Kapitel werden die räumlichen Muster der Strömung und der Schwebstoffe um Floß 15 dargestellt. Anschließend werden die Flüsse durch ein Floß berechnet.

### 4.4.1 Räumliche Muster der Strömung

Zur weiteren Analyse wurde auf Floßebene eine Floßumrundung (Floß 15) bei ablaufendem Wasser, 2 1/2 Stunden vor Niedrigwasser ausgewählt. Hier werden die wesentlichen Muster und Prozesse deutlich, die auch bei Fahrten um andere Flöße gemessen wurden. Abb. 4.13 zeigt die Strömung vektoriell entlang des gefahrenen Kurses bei Ebbe. Es wurde eine Spirale um Floß 15 gefahren, wobei in Floßnähe begonnen wurde. Anhand der Punkte wird die gemessene Position des Floßes deutlich. Da die Abmessungen der Flöße 20 x 25 m betragen, nimmt das Floß oftmals nur die Hälfte bis zu einem Viertel der umfahrenen Fläche ein.

In Abb. 4.13 werden folgende Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt, zum einen gemittelt von 4 bis 5 m Tiefe, und zum anderen gemittelt von 7 bis 8 m Tiefe. Zeitlich wurde nicht gemittelt. Im Mittel liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei  $10 \text{ cm s}^{-1}$ . Damit gibt diese Abbildung einen ersten Eindruck von den Strömungsverhältnissen um ein Floß. Beim ersten Fall ist zu sehen, dass das Floß von Nord-Osten angeströmt wird. Zwischen 7 und 8 m dreht die Strömung gegen Norden. Gut zu erkennen ist in beiden Tiefenbereichen, dass das Wasser hinter dem Floß deutlich abgebremst wird und die Geschwindigkeit auf unter  $3 \text{ cm s}^{-1}$  sinkt. Im Süd-Westen sind nur niedrige Geschwindigkeiten, ohne Vorzugsrichtung zu erkennen.

Insgesamt sind die Strömungsverhältnisse um die einzelnen Flöße herum sehr heterogen. Besonders zwischen 4 und 5 m Tiefe sind die Vorzugsrichtungen der Strömung um das Floß nur schwer zu erkennen. Bei der Mittelung über die gesamte Länge der

Langleinen können wichtige Informationen verloren gehen. Folglich müssen die Strömungsverhältnisse nach Tiefen differenziert betrachtet werden. Um ein klares, zusammenhängendes Bild zu erhalten, werden im Folgenden die Daten mit objektiv analysierten Feldern dargestellt und diskutiert. Eine Floßumrundung dauerte typischerweise

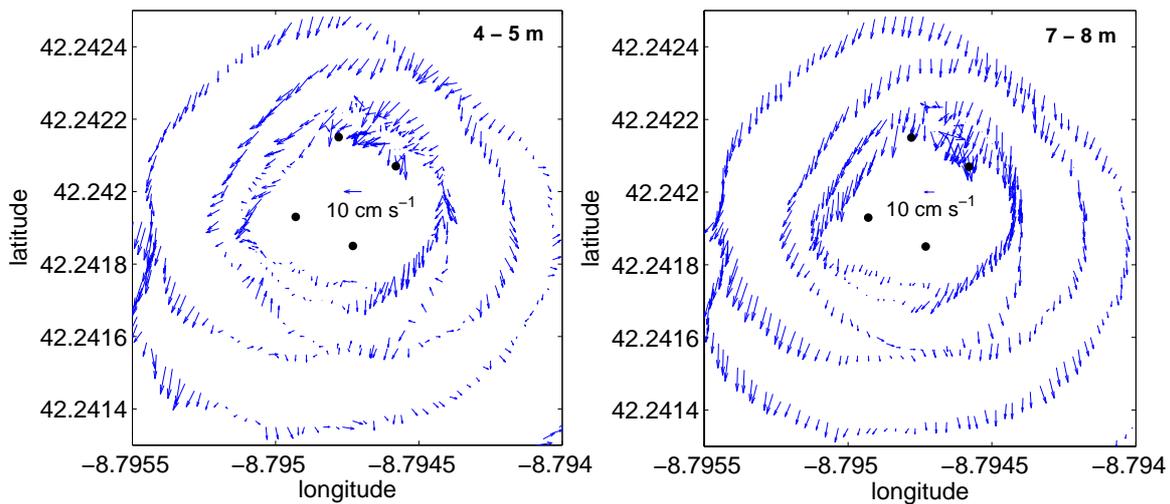


Abbildung 4.13: Gemessene Horizontalgeschwindigkeiten *bei Ebbe* um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr, 2.5 Std vor NW. Die Pfeile stellen Geschwindigkeit und Richtung der Strömung dar. Die schwarzen Punkte zeigen die Floßbecken an, die per GPS eingemessen wurden. a) vertikale Mittelung von 4 bis 5 m, b) vertikale Mittelung von 7 bis 8 m.

5 bis 7 Minuten. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die mittleren Strömungsverhältnisse innerhalb dieser Zeit nur unwesentlich geändert haben und die gezeigten Daten einer wirklichkeitsnahen Momentaufnahme um das Floß entsprechen.

Bei allen Darstellungen der objektiv analysierten Floßfelder wird ein imaginärer Punkt in der Mitte der gefahrenen Spirale als Nullpunkt gewählt. Einzelne Wirbel, die kleiner als 5 m sind, werden bei der Darstellung nicht aufgelöst. Das Interpolationsverfahren wurde optimiert, um die generelle Strömungsrichtung aufzuklären. Alle 5 m stellt ein Pfeil die Strömung dar. Flächen mit Punkten bedeuten, dass der ermittelte Fehlerwert über der gewählten Obergrenze liegt (s. Kap. 3.4).

Die Vertikalgeschwindigkeit ist anhand von farblich kodierten Feldern dargestellt (vgl. Abb. 4.14 und 4.17), wobei die positiven Werte eine nach oben gerichtete Vertikalkomponente bedeuten und die negativen Werte nach unten gerichtet sind.

Die interpolierten Daten um die Flöße herum zeigen, wie sich die Strömung mit der

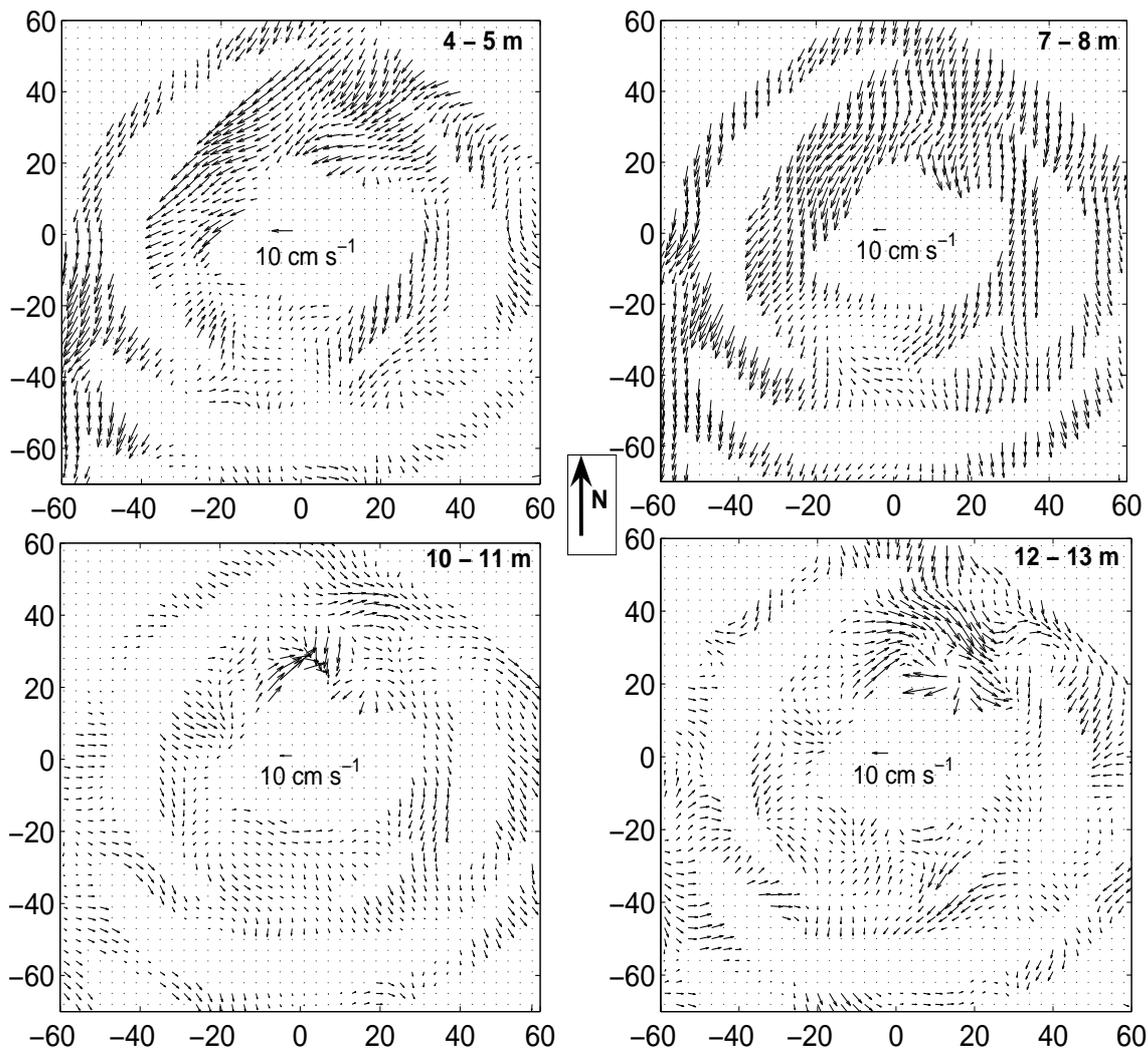


Abbildung 4.14: Objektiv analysierte Felder der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit [ $cm s^{-1}$ ] um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe, in 4 - 5 m, 7 - 8 m, 10 - 11 m und 12 - 13 m Wassertiefe, ca. 2.5 Std. vor NW. Die vertikale Achse zeigt Richtung Norden.

Tiefe verändert. Um die Änderung zu verschiedenen Tidephasen zu betrachten, müssen verschiedene Floßumrundungen, die zu unterschiedlichen Zeiten gemessen wurden, herangezogen werden.

Abb. 4.14 zeigt die horizontale Strömungsgeschwindigkeit um Floß 15, bei vollem Ebbstrom, in verschiedenen Wassertiefen. In 4 bis 5 *m* Wassertiefe wird das Floß von Nord-Osten angeströmt. In größerer Tiefe dreht die Strömungsrichtung gegen Norden. Ab 8 *m* Tiefe wird das Floß vollständig von Norden angeströmt. An der süd-westlichen Seite des Floßes ist die Strömung stark verlangsamt und bildet Wirbel. Eine eindeutige Strömungsrichtung ist nicht mehr erkennbar. Ab ca. 11 *m* Tiefe ist eine einheitliche Richtung der Strömung um das gesamte Floß nicht mehr auszumachen.

Sobald das Wasser auf das Floß trifft, wird in allen Tiefen ein großer Teil davon abgelenkt, umströmt das Floß und fließt hinter dem Floß wieder zusammen. Im Süd-Westen tritt das durch die Langleinen abgebremste Wasser aus dem Floß aus. Unterhalb der Langleinen kann das Wasser ungehindert weiterfließen. Dennoch wird es durch die Wirbel, die durch die Reibung an der Unterseite der Flöße entstehen, aufgehalten.

Abb. 4.15 zeigt die vertikalen Strömungen in verschiedenen Tiefen. Diese schwanken zwischen  $-2$  und  $2 \text{ cm s}^{-1}$ . Im Süd-Westen sind direkt am Floß über die verschiedenen Tiefen hinweg deutliche Aufwärtsströmungen sichtbar. An der Stelle, an der die Strömung auf das Floß trifft, überwiegen ab 5 *m* Tiefe die Abwärtsbewegungen. Oberhalb von 5 *m* überwiegt eine Aufwärtsbewegung. Besonders zwischen 7 und 8 *m* Tiefe ändern sich die Richtungen der Vertikalbewegung um das Floß herum oftmals, was wiederum ein Hinweis auf komplizierte Wirbelstrukturen ist. Ab 7 *m* Tiefe bewegt sich das Wasser abwärts, sobald es auf das Floß trifft und an der gegenüberliegenden Seite aufwärts. Das Muster der vertikalen Wirbel bleibt in einer Tiefe von 6 bis 13 *m* erhalten, obwohl sich die Richtung, aus der das Floß angeströmt wird, mit der Tiefe ändert. Auffallend sind auch die vertikalen Bewegungen, die über einen weiten Tiefenbereich erhalten bleiben. Am nördlichen Rand der Floßumrundung, an dem der Schiffskurs beginnt, ist über alle Tiefenstufen hinweg eine Abwärtsbewegung zu erkennen. Diese Abwärtsbewegung ist bereits ab 3 *m* erkennbar und nimmt mit zunehmender Tiefe zu. Ein ähnliches Phänomen ist auch am südlichen Teil der Floßumrundung zu sehen. Etwas weiter Richtung Süden herrschen durchweg negative Vertikalströmungen vor. Ab 12 *m* Tiefe bilden sich kleinere Wirbelstrukturen, da die Vertikalgeschwindigkeit besonders in Floßnähe stark wechselt.

Insgesamt ist ein starker vertikaler Austausch vorhanden. Viele Strukturen, die über weite Tiefen erhalten bleiben, weisen darauf hin, dass der vertikale Austausch auch über

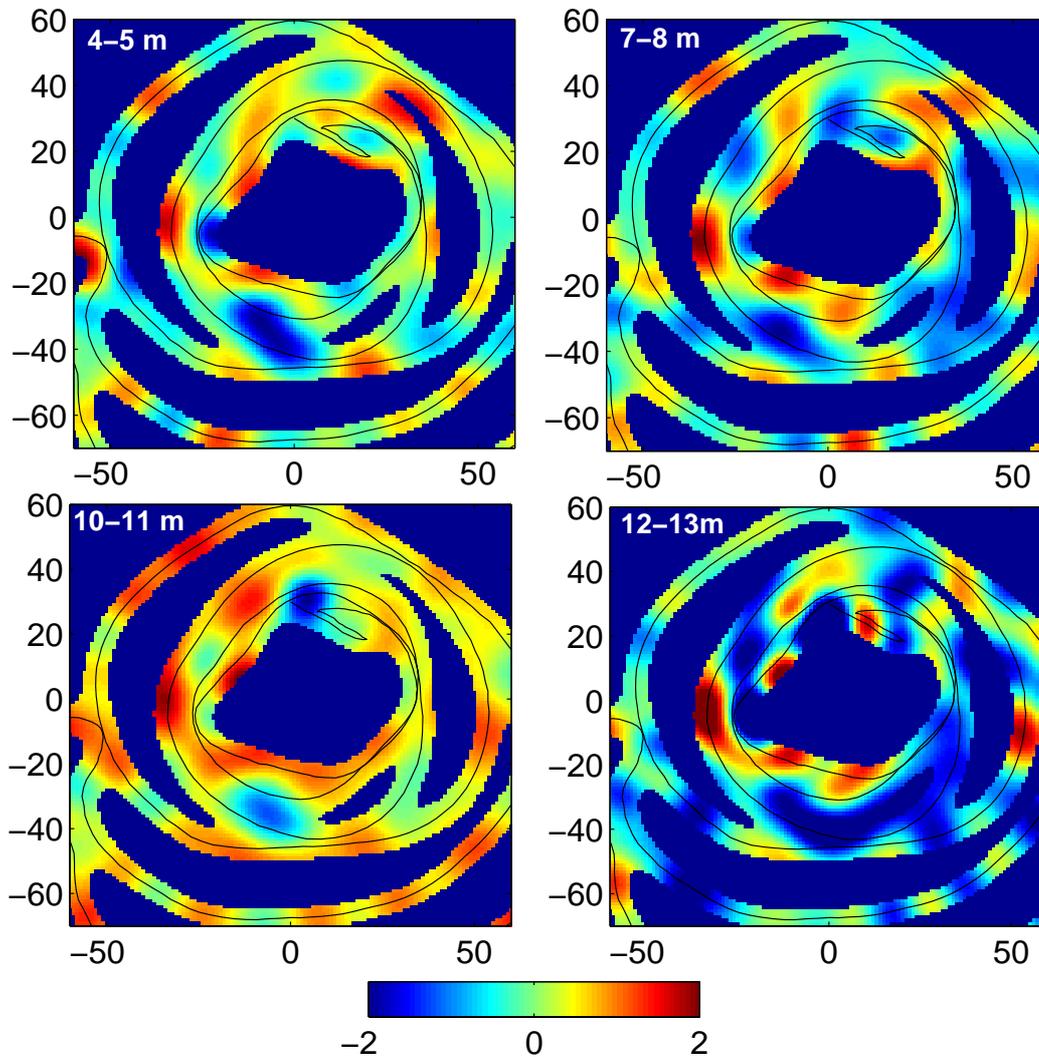


Abbildung 4.15: Objektiv analysierte Felder der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit [ $cm s^{-1}$ ] um Floß 15 am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe, mit gefahrenem Kurs in 4 - 5 m, 7 - 8 m, 10 - 11 m und 12 - 13 m Wassertiefe ; ca. 2.5 Std. vor NW, ausgerichtet gegen Norden

größere Tiefenstufen stattfindet. Besonders in größerer Tiefe, zum Ende der Langleinen hin, taucht das Wasser beim Auftreffen auf das Floß ab und taucht wahrscheinlich im hinteren Bereich des Floßes wieder auf.

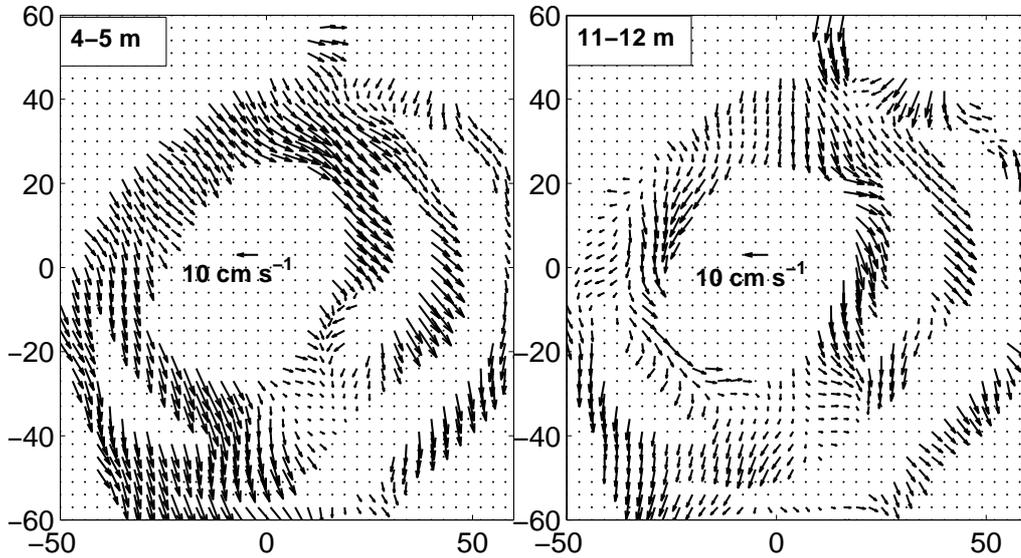


Abbildung 4.16: Objektiv analysierte Felder der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit [ $cm s^{-1}$ ] um Floß 15, am 24.07., um 16:10 Uhr, bei Flut, in 4 - 5 und 11 - 12 m Wassertiefe; ca. 3 Std. nach NW, ausgerichtet gegen Norden

Abb. 4.16 zeigt die horizontale Strömungsgeschwindigkeit in zwei ausgewählten Tiefen um Floß 15 bei Flut, 3 Stunden nach Niedrigwasser. Hier wird das Floß von Nord-Westen her angeströmt. Die Richtung entspricht der auf Polygonebene gemessenen Strömung (vgl. Abb. 4.9). Bei diesem Floß strömt das Wasser wieder aus der Bucht heraus. Es befindet sich am östlichen Ende der Bucht. Wie auch während des Ebbstroms (vgl. Abb. 4.14) wird die Strömung bei Flut größtenteils um das Floß herumgelenkt und nur ein Teil des direkt auftreffenden Wassers durchströmt dieses. Süd-östlich des Floßes tritt der bemerkenswerte Effekt auf, dass das Wasser eine geringe Strömungsgeschwindigkeit und keine Vorzugsrichtung hat. Wie auch während des Ebbstroms wird auch beim Flutstrom die Strömung mit der Tiefe gegen Süden abgelenkt. Ab 11 m Tiefe wird das Floß von Norden her angeströmt.

Die Vertikalbewegung (s. Abb. 4.17) ist auch hier ausgeprägt. In 6 bis 7 m Tiefe zeigen die vertikalen Strömungen im Süd-Osten und Nord-Westen der Floßumrundung Aufwärtsbewegungen. Im Nord-Westen trifft an dieser Stelle die Strömung auf das Floß. Die Strömung wird nach oben abgelenkt. In größerer Tiefe sind diese Muster

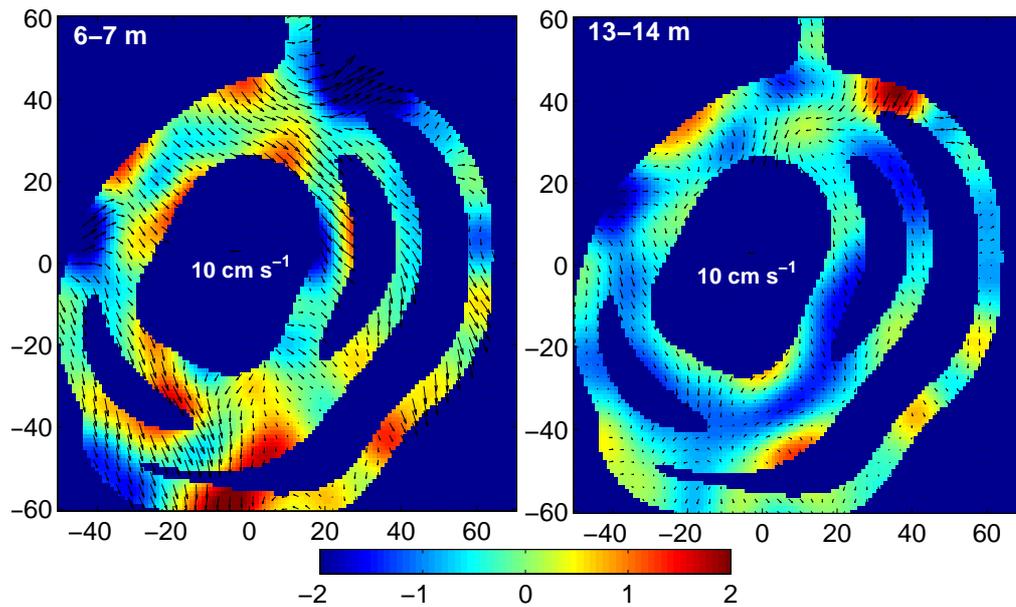


Abbildung 4.17: Objektiv analysierte Felder der vertikalen Strömungsgeschwindigkeit [ $cm s^{-1}$ ] um Floß 15, am 24.07., um 16:10 Uhr, bei Flut in 6 - 7 m und 13 - 14 m Wassertiefe mit den entsprechenden Strömungsmustern; ca. 3 Std. nach NW, ausgerichtet gegen Norden

nur teilweise wiederzuerkennen und die negativen Vertikalbewegungen sind deutlich ausgeprägt.

Die Flöße stellen Hindernisse dar und bremsen die Strömungsgeschwindigkeit ab. Es kommt zu Wirbelstrukturen und dadurch zu vertikalem Austausch um das Floß herum. Eindeutige Muster, die bei jedem Floß vorhanden sind, konnten nicht gefunden werden. Dennoch beeinflussen die Flöße die Vertikalströmung.

Insgesamt zeigen die horizontalen und vertikalen Strömungen erkennbare Muster, die bei allen Floßumrundungen erhalten bleiben. Daraus ergibt sich folgendes Bild: Das Floß mit den Langleinen stellt ein deutliches Hindernis dar. Das Wasser weicht seitlich, aber auch vertikal aus. Zusätzlich entstehen Wirbel. Auf der gegenüberliegenden Seite tritt das abgebremste Wasser aus dem Floß aus und die vom Floß abgelenkten Wasserströme treffen wieder aufeinander.

#### 4.4.2 Räumliche Muster der Schwebstoffe

##### Floßumrundung um Floß 15 bei ablaufendem Wasser

Neben den Strömungsfeldern wurden auch die Schwebstoffdaten objektiv analysiert. Abb. 4.18 zeigt die akustische und die optische Rückstreuung der Floßumrundung um

Floß 15 bei Ebbe. Es wurde zwischen 7 und 8 m gemittelt, denn in dieser Tiefe wurde die Sonde geschleppt und Daten aller Messgeräte liegen vor. Beide Abbildungen weisen ein deutliches Minimum im Süd-Westen auf.

Dennoch decken sich die Lage des Minimums und weitere Strukturen nicht völlig. Die Abnahme der Rückstreuung wird in unmittelbarer Floßnähe am deutlichsten und lässt in größerem Abstand zum Floß nach, d.h. die Einflusszone der Muscheln wird mit größerem Abstand zum Floß geringer. Zusätzlich wurden in Abb. 4.18 a) die Strömungsmuster aufgetragen. Damit können die Werte der Rückstreuung mit den Werten der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung verglichen werden. Das Minimum der Rückstreuung fällt mit einem Bereich sehr niedriger Strömungsgeschwindigkeiten zusammen.

Die optische Rückstreuung um das Floß deckt einen Bereich von 0.25 bis 0.45  $FTU$ , was aufgrund der Geradengleichung einer Schwebstoffkonzentration von 0.6 bis 0.8  $mg\ l^{-1}$  entspricht (vgl. Abb. 4.6 b)). Eine genaue Angabe der Schwebstoffkonzentration ist jedoch schwierig, weil die optische Rückstreuung besonders im niedrigen Konzentrationsbereich überschätzt wird. Im Norden und Nord-Westen sind besonders hohe Werte der optischen Rückstreuung zu erkennen. Am nördlichen Rand, wo die Strömung auf das Floß trifft, bilden sich Höchstwerte aus, die sich entlang der westlichen und östlichen Seite abschwächen.

Die objektiv analysierten Chlorophyllkonzentrationen der Floßumrundung zeigen die gleiche Struktur wie die optischen und akustischen Messungen (s. Abb. 4.19), nämlich ein Minimum im Süd-Westen des Floßes. Es wurde in 7 bis 8 m Tiefe gemessen. Diese Minimalwerte sind in Floßnähe am niedrigsten. In größerer Entfernung vom Floß zeigen sie eine Tendenz nach Osten und spiegeln damit den Verlauf der Strömung wider. Um das gesamte Floß herum beträgt die Chlorophyllkonzentration ca. 2  $\mu g\ l^{-1}$ . Im Einflussbereich der Muscheln sinken die Werte auf ca. 1  $\mu g\ l^{-1}$ , was einer Verringerung um ca. 50 % entspricht.

Die Abhängigkeit der akustischen und optischen Rückstreuung sowie die der Chlorophyllkonzentration von der Strömung wird deutlich, da sich ein Minimum der Rückstreuung im abstromigen Bereich des Floßes ausbildet, welches ein deutlicher Hinweis auf die Filtrationsaktivität der Muscheln ist.

Die hohe Rückstreuung sowie die hohe Chlorophyllkonzentration um das Floß herum können ein Hinweis auf den Teil Schwebstoffes sein, der nicht von den Muscheln beeinflusst ist. Das Umfließen des Floßes wird auch durch die Strömungsmuster bestätigt. Somit kommt nur ein geringer Teil des Wassers mit den Muscheln in Berührung. Ein

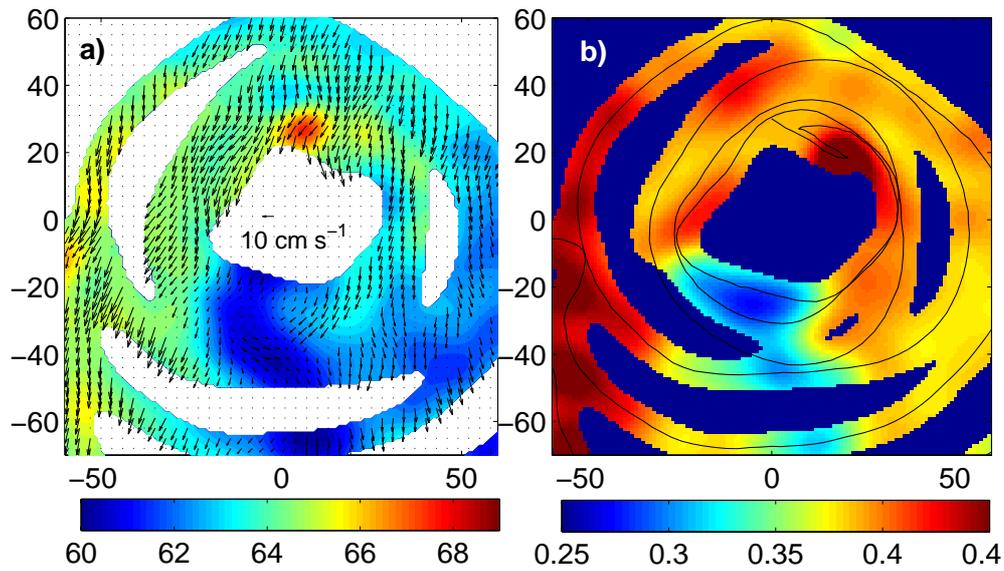


Abbildung 4.18: Objektiv analysierte Felder um Floß 15 am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe: a) Akustische Rückstreuung [dB] mit Strömungsfeldern [ $cm s^{-1}$ ] und b) optische Rückstreuung [FTU] mit gefahrenem Kurs um Floß 15 in 7 - 8 m Wassertiefe; ca. 2.5 Std. vor NW

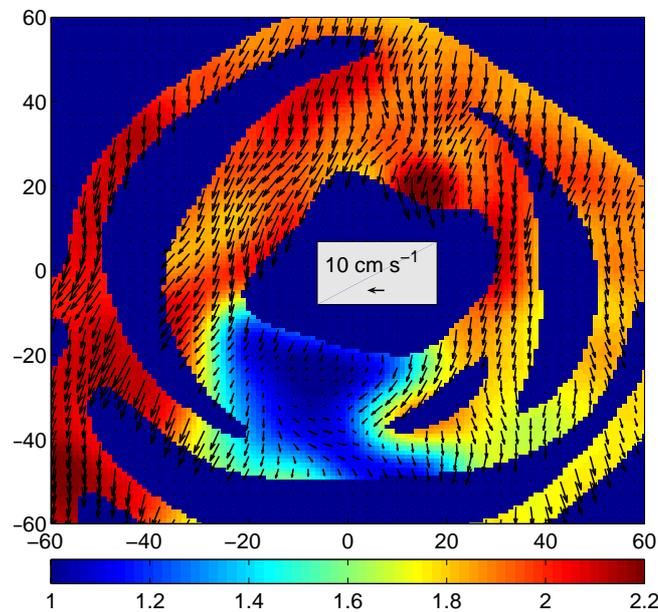


Abbildung 4.19: Objektiv analysierte Felder der Chlorophyllkonzentration [ $\mu g l^{-1}$ ] um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe, zwischen 7 und 8 m Tiefe mit Strömungsmuster [ $cm s^{-1}$ ]; ca. 2.5 Std. vor NW

großer Teil wird aufgrund des Floßes, das als Hindernis fungiert, abgelenkt.

Die Muster der akustischen und optischen Rückstreuung stimmen nicht völlig überein, was auf den Unterschied des Messprinzips zurückgeführt werden kann. Der Sensor der optischen Rückstreuung erfasst feinkörnigeres und auch organisches Material. Dieser Sensor lässt keine Rückschlüsse auf die Chlorophyllkonzentration zu, sondern eher auf Abbauprodukte, wie z.B. Detritus. Anhand der akustischen Rückstreuung kann auf grobkörnigeres Material geschlossen werden. Dies kann durch Zooplankton verursacht werden (Sindlinger et al., 2005).

Die vertikalen Veränderungen können nur anhand der akustischen Rückstreuung dargestellt werden, da die Multisonde jeweils in einer festen Tiefe geschleppt wurde. Abb. 4.20 zeigt die akustische Rückstreuung der gleichen Floßumrundung in unterschiedlichen Tiefen. In allen Tiefen sind zusätzlich die entsprechenden Strömungsmuster dargestellt. Zwischen 14 und 15 *m* Wassertiefe waren keine zuverlässigen Strömungswerte vorhanden. Deshalb ist diese Floßumrundung ohne Strömung, jedoch mit dem gefahrenen Schiffskurs dargestellt. Beim Vergleich der verschiedenen Tiefenbereiche fällt auf, dass die akustische Rückstreuung um das Floß mit der Tiefe erst zu- und dann deutlich abnimmt. Zwischen 3 und 4 *m* Wassertiefe herrschen akustische Rückstreuungswerte von ca. 64 *dB* vor. Diese steigen dann bis zu 68 *dB* an und sinken dann wieder ab 10 *m* auf ca. 62 *dB*.

Das Minimum der Rückstreuung im abstromigen Bereich ist in 3 *m* Tiefe noch nicht zu erkennen und bildet sich erst in einer Wassertiefe ab 4 *m*. Die Rückstreuung in diesem Bereich ist zwischen 7 und 8 *m* Wassertiefe am niedrigsten. In größerer Tiefe weitet sich das Minimum im abstromigen Bereich auf und verschwindet schließlich in 10 *m* Tiefe. Ab 11 *m* Tiefe ist eine Erhöhung der Rückstreuung an der Stelle zu erkennen, an der weiter oben das Minimum lag.

Zudem sind in 7 und 14 *m* Tiefe Maxima der Rückstreuung zu erkennen, wo die Strömung auf das Floß trifft. Auch der Sensor der optischen Rückstreuung zeigt an dieser Stelle ein Maximum (vgl. Abb. 4.18). Dieses Maximum bildet sich zwischen 7 und 8 *m* langsam aus und erreicht zwischen 9 und 10 *m* seine größte Ausdehnung, um schließlich in noch größerer Wassertiefe wieder schwächer zu werden.

Das Minimum der Rückstreuung, das im Süd-Osten vorliegt und in 7 bis 8 *m* Tiefe die niedrigsten Werte erreicht, kann als Zone des filtrierte Wassers interpretiert werden. Der Schwebstoff tritt in einer höheren Konzentration mit der Strömung im Nord-Osten in das Floß ein und tritt mit geringerer Konzentration auf der gegenüberliegenden Seite aus dem Floß aus. Das Maximum in größerer Tiefe könnte ein Hinweis darauf sein, dass

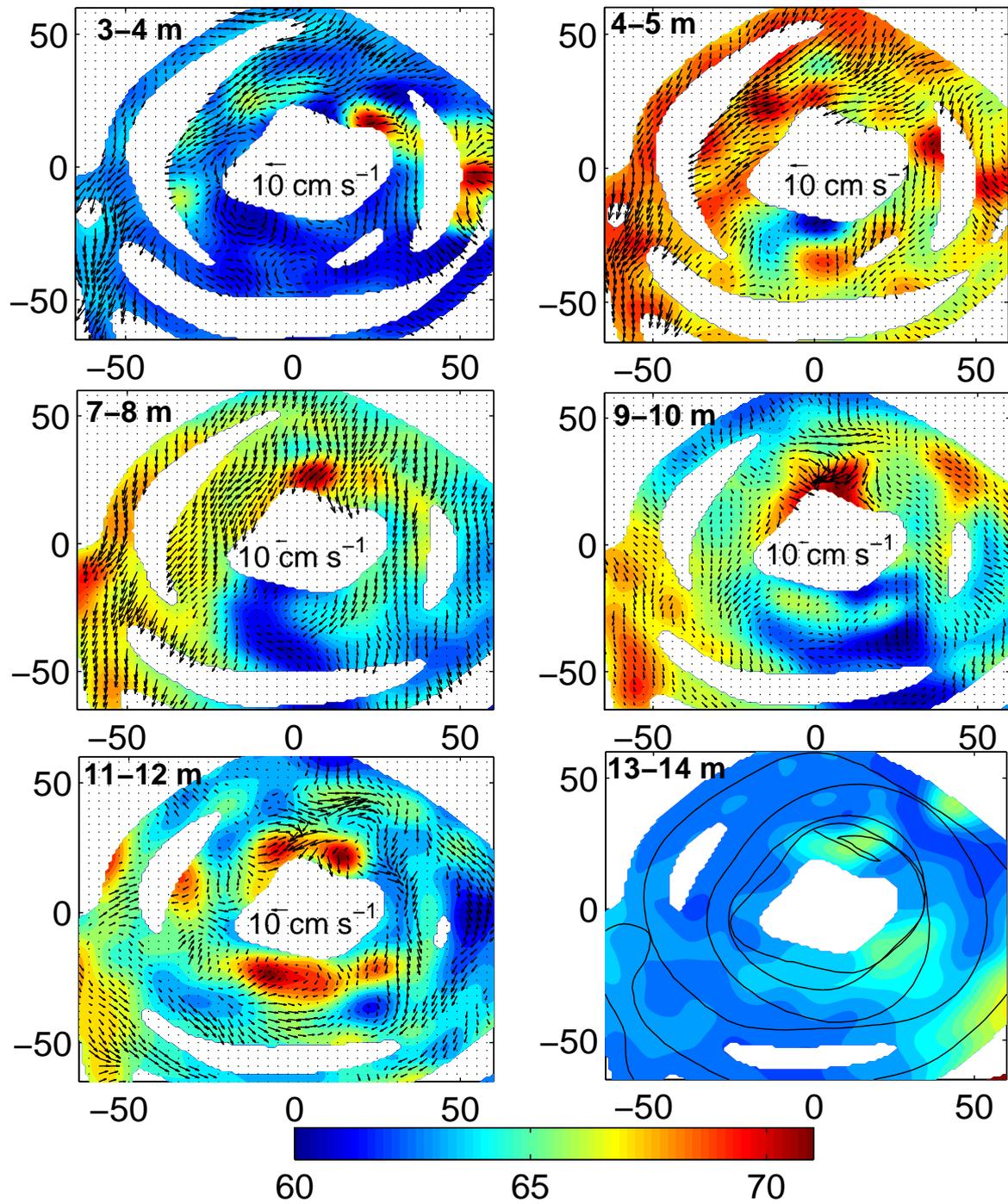


Abbildung 4.20: Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung [dB] um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe, in sechs verschiedenen Wassertiefen: 3 - 4 m, 4 - 5 m, 7 - 8 m, 9 - 10 m, 11 - 12 m, 14 - 15 m, ca. 2.5 Std. vor NW. Abb. 1-5 mit Strömungsmustern [ $\text{cm s}^{-1}$ ], Abb. 6 mit gefahrenem Kurs

Schwebstoff aus den Langleinen herabsinkt und aufgrund der Strömung hinter das Floß gespült wird. Es kann sich dabei um Kotpillen oder abgestorbenes Material handeln.

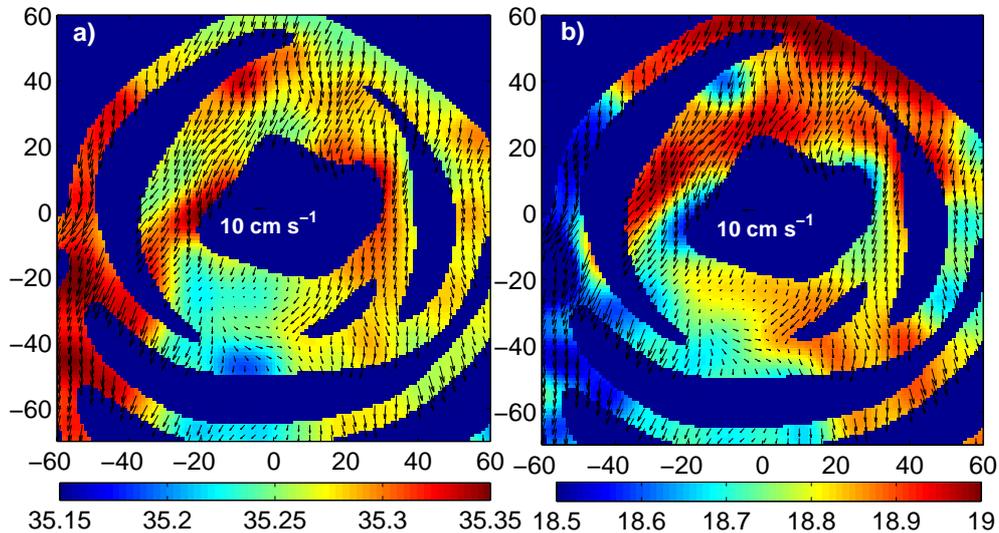


Abbildung 4.21: Objektiv analysierte Felder a) des Salzgehalts [ppt] und b) der Temperatur [°C] um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr, bei Ebbe zwischen 7 und 8 m Tiefe mit Strömungsmuster [ $cm s^{-1}$ ]; ca. 2.5 Std. vor NW

Anhand von Abb. 4.21 können Salzgehalt und Temperatur der Floßumrundung verglichen werden. Temperatur und Salzgehalt entsprechen sich an den Stellen, wo der Salzgehalt zunimmt und die Temperatur abnimmt.

Der Salzgehalt zeigt ein Minimum im abstromigen Bereich, das auch die anderen Sensoren zeigen (Abb. 4.19 und 4.18) vorzufinden ist. Die Temperatur weist jedoch kein eindeutiges Maximum auf.

Das könnte an der Sonneneinstrahlung liegen, die in dieser Tiefe noch Einfluss auf die Temperatur hat. Der Salzgehalt hingegen ist ein konservativer Stoff und eignet sich daher als „Tracer“ für die Herkunft von Stoffen. Im Polygon ist ein deutlicher Vertikalgradient vorhanden (vgl. Abb. 4.10). Der Salzgehalt nimmt mit der Tiefe zu und eine Veränderung des Salzgehaltes kann deshalb darauf hinweisen, aus welcher Tiefenschicht das Wasser stammt.

Die Veränderung des Salzgehaltes an der Stelle des Schwebstoffminimums zeigt, dass entweder im oder hinter dem Floß ein vertikaler Austausch stattfindet, der weniger durch Vermischung als vielmehr durch Verdrängung erfolgt ist, was durch die klaren Grenzen der Muster nahe gelegt wird.

### Floßumrundung um Floß 15 bei auflaufendem Wasser

Die Beobachtungen um das Floß bei Ebbe werden nun ergänzt durch entsprechende bei Flut. Dieser Vergleich ist besonders günstig, da beide Messfahrten am gleichen Tag stattfanden. Zusätzliche Langzeitveränderungen des Systems, wie z.B. ein Upwelling-Ereignis, können ausgeschlossen werden.

In Abb. 4.22 sind die räumlichen Muster der akustischen Rückstreuung in verschiedenen Tiefen dargestellt. Insgesamt erreicht die akustische Rückstreuung Höchstwerte von ca. 66 *dB* und liegt damit unter den Werten, die während des Ebbstroms gemessen wurden. Im vertikalen Schnitt sinken die Rückstreuintensitäten um das Floß herum, bis sie dann ab einer Tiefe von etwa 12 *m* wieder ansteigen.

Gemäß der Änderung der Strömungsrichtung bei Flut (vgl. Abb. 4.16) verlagert sich die Position des Rückstreuminimums zwischen 4 und 5 *m* Wassertiefe nach Süd-Osten. Das Floß wird aus Nord-Westen angeströmt. An der Stelle, wo das Schwebstoffminimum auftritt, sind auch bei dieser Floßumrundung niedrige Strömungsgeschwindigkeiten ohne Vorzugsrichtung zu beobachten. Ein Maximum an der Stelle, wo die Strömung auf das Floß trifft, ist jedoch in 4 bis 5 *m* Tiefe nicht zu erkennen. Zwischen 7 und 8 *m* ist das Minimum im abstromigen Bereich noch sichtbar, jedoch wird ein Bereich erhöhter Rückstreuwerte zwischen Floß und Schwebstoffminimum deutlich. Bis in 11 *m* Tiefe sinkt die Rückstreuung um das gesamte Floß, nur im abstromigen Bereich ist eine deutliche Erhöhung sichtbar. Dabei steigen die Werte bis auf ca. 66 *dB* an. In noch größerer Tiefe steigt die akustische Rückstreuung um das gesamte Floß und besonders im Süd-Westen wieder stark an. Das Maximum im abstromigen Bereich bleibt dabei erhalten.

Weiterhin gibt es zwischen akustischer Rückstreuung, Chlorophyllkonzentration, Salzgehalt und Temperatur deutliche Zusammenhänge. Abb. 4.23 dient als Vergleich dieser vier Parameter. Durch die Darstellung der Chlorophyllkonzentration mit den Strömungsvektoren in Abb. 4.23 wird der Zusammenhang zwischen dem Minimum der Chlorophyllkonzentration und dem Minimum der Strömungsgeschwindigkeit klar. Im Nord-Westen wird das Floß angeströmt. Dort weist die Strömung die höchste Geschwindigkeit auf. Auf der gegenüberliegenden Seite im abstromigen Bereich treten besonders niedrige Strömungsgeschwindigkeiten auf. Eine Vorzugsrichtung ist nicht zu erkennen. Die Chlorophyllkonzentration, die akustische Rückstreuung und auch der Salzgehalt erreichen an dieser Stelle die niedrigsten Werte, wobei die Werte der Temperatur dort ansteigen.

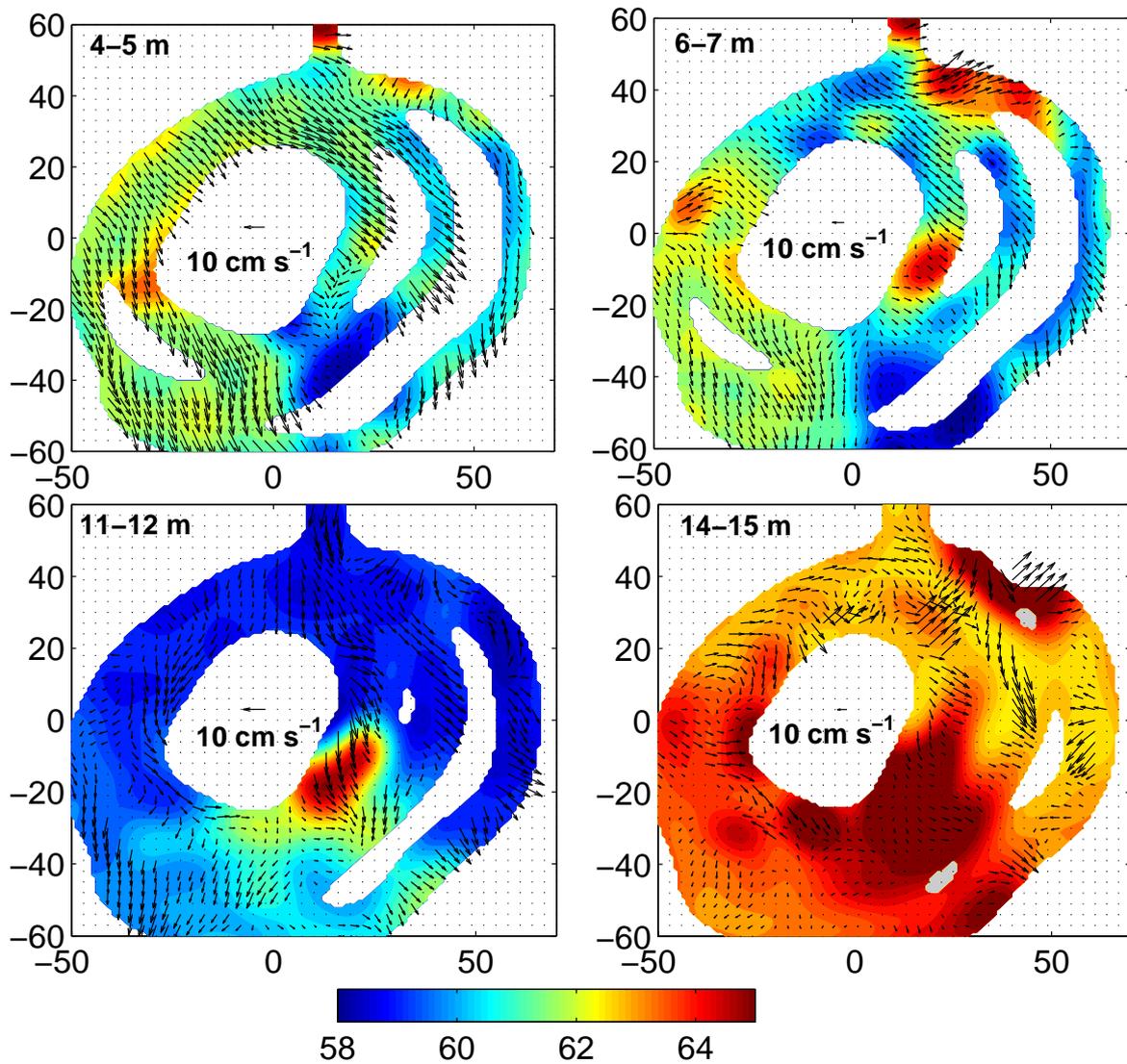


Abbildung 4.22: Objektiv analysierte Felder der akustischen Rückstreuung [ $dB$ ] um Floß 15, am 24.07., um 16:10 Uhr, bei Flut in vier verschiedenen Wassertiefen: 4 - 5 m, 6 - 7 m, 11 - 12 m, 14 - 15 m mit Strömungsmuster [ $cm s^{-1}$ ], ca. 3 Std. nach NW.

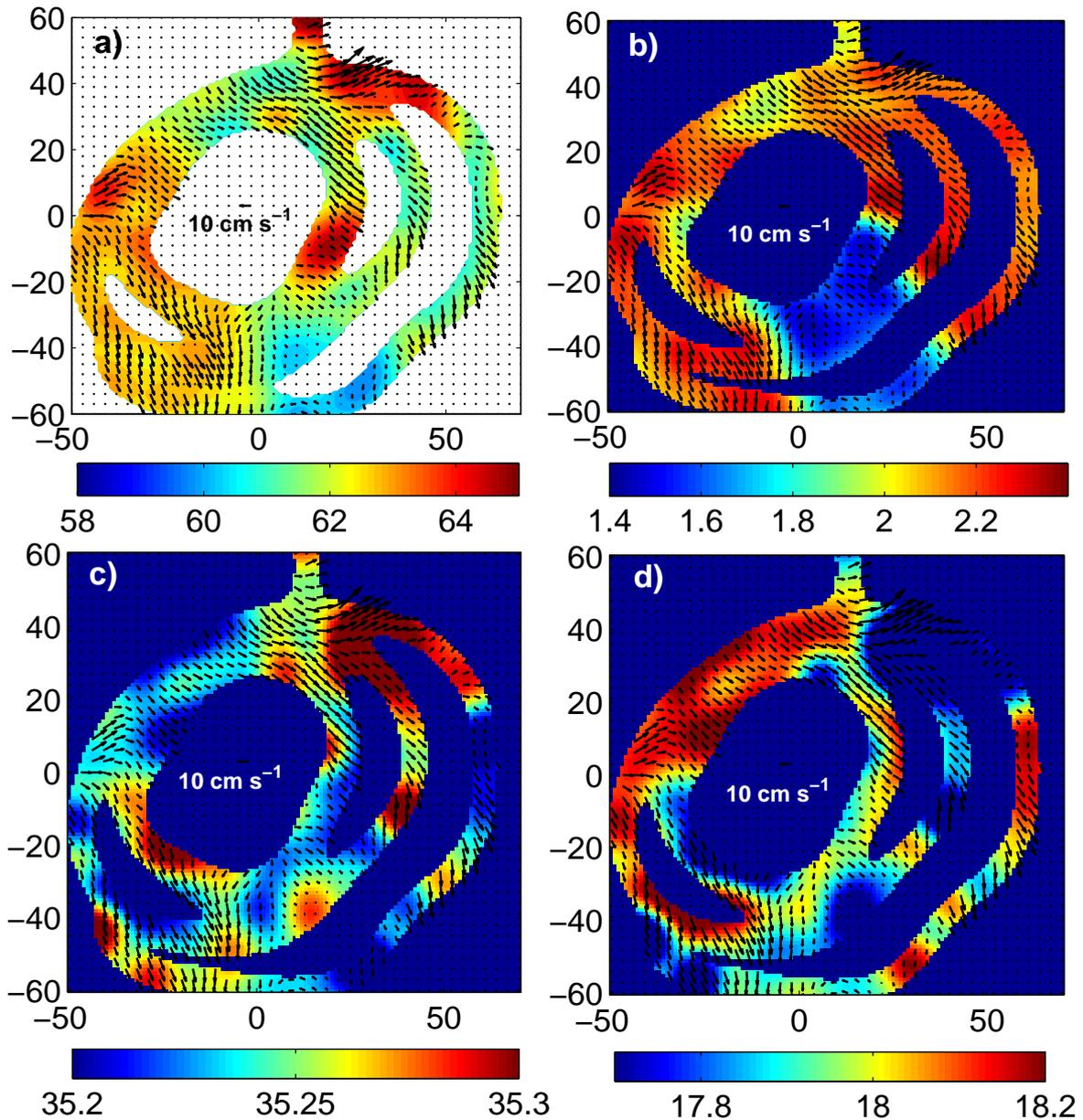


Abbildung 4.23: Objektiv analysierte Felder um Floß 15 am 24.07, um 16:10 Uhr, *bei Flut*: a) akustische Rückstreuung [ $\text{dB}$ ] b) Chlorophyllkonzentration [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ] c) Salzgehalt [ $\text{ppt}$ ] d) Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] in 6 - 7 m Wassertiefe mit Strömungsmuster [ $\text{cm s}^{-1}$ ]; ca. 3 Std. nach NW

Auch bei Ebbe ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Flut, mit der Ausnahme, dass sich die Lage der Minima aufgrund der Strömungsrichtung geändert hat. Die Filtrationsaktivität ist bereits ab 4 *m* Tiefe zu erkennen und ist in 6 bis 7 *m* am meisten ausgeprägt. Das filtrierte Wasser fließt langsam aus dem Floß heraus. Das Maximum der akustischen Rückstreuung ab 6 *m* Tiefe im Osten des Floßes korrespondiert mit der nach Süd-Osten gerichteten Strömung in diesem Bereich. Dies könnte wiederum ein Hinweis auf einen durch das Floß abgelenkten Wasserstrom sein. Das Wasser könnte jedoch auch aus dem Floß kommen und dabei bereits Ausscheidungsprodukte der Muscheln enthalten. Die Erhöhung der akustischen Rückstreuung in größerer Tiefe könnte wiederum auf die Abbauprodukte der Muscheln zurückgeführt werden. Das Floß liegt am süd-östlichen Rand des Polygons und damit nahe an der Landzunge. Es ist denkbar, dass sich die Ausscheidungsprodukte mehrerer Flöße an dieser Stelle sammeln, da es im abstromigen Bereich mehrerer Flöße liegt und auch einer Landzunge vorgelagert ist. Die hohen Chlorophyllkonzentrationen um das Floß herum weisen ebenfalls auf das Wasser hin, das das Floß umflossen hat.

Die verringerten Werte des Salzgehaltes treten an der Stelle auf, wo das filtrierte Wasser aus dem Floß tritt und weist wiederum darauf hin, dass Wasser in oder direkt hinter dem Floß vertikal umgelagert wird und in 6 - 7 *m* Tiefe Wasser aus höheren Tiefen eingemischt wird.

### **Zusammenfassung der Ergebnisse auf Floßebene**

Bei beiden vorgestellten und den meisten in dieser Arbeit nicht vorgestellten Fällen zeigt sich ein wiederkehrendes Muster. Das Wasser umströmt die Flöße im wesentlichen und nur ein geringer Teil scheint in den Floßbereich einzudringen. Im abstromigen Bereich des Floßes tritt das Wasser mit geringer Geschwindigkeit aus und es bildet sich ein Bereich geringer Strömungsgeschwindigkeiten.

Im diesem Bereich bildet sich durch die Filtration der Muscheln von oben nach unten ab 4 *m* Wassertiefe ein akustisches Rückstreuminimum, das in 7 bis 8 *m* Tiefe seine stärkste Ausprägung hat. Lage des Minimums hängt dabei von der Tidephase und der Lage des Floßes im Polygon ab. Im unteren Bereich der Flöße schlägt dieses Minimum in ein lokales Maximum um. Aus den Mustern der Chlorophyllkonzentrationen und der optischen Rückstreuung kann geschlossen werden, dass das Minimum durch die Abnahme an Phytoplankton, mit Sicherheit Folge der Filtration durch die Muscheln, verursacht ist. Das weiter unten beobachtete Rückstreuungsmaximum könnte ein aus

dem Floß sickernde Wasserkörper mit schnell sinkenden Material, vermutlich Kotpillen, darstellen. Die Salzgehaltsmuster im Einflussbereich der Muscheln legen nahe, dass zumindest das in 7 bis 8 *m* Tiefe aus dem Floß kommende Wasser ursprünglich aus einer in der Regel höheren Wasserschicht stammt. In dem Floß oder direkt dahinter spielt vertikaler Austausch von Wasser eine deutliche Rolle.

#### 4.4.3 Flussbilanzen

Anhand der zuvor beschriebenen Methoden wurden Wasserflüsse durch das Polygon berechnet. Für die Bilanzierung der Flüsse wurde eine Floßumrundung um Floß 15 über 12 *m* Wassertiefe integriert und zwar von 1 *m* bis in 13 *m* Tiefe. In größerer Tiefe sind keine Daten vorhanden. Die Wasserbilanzen sind nur in wenigen Tiefen geschlossen. Da sich das Volumen des Wasserkörpers nicht ändert, muss Wasser von oben oder unten zufließen oder abfließen. In Abb. C.5 a) im Anhang sind Zufluss und Abfluss und der daraus resultierende Nettofluss dargestellt. Besonders in 7 - 8 *m* Tiefe ist der Zufluss hoch. Doch die Bilanz ist auch in dieser Tiefe nicht ausgeglichen. Es fließt mehr Wasser zu als ab. Weiterhin sind in Abb. C.5 b) im Anhang die berechneten Flüsse als Vektoren (blau) dargestellt, die senkrecht auf den Streckenvektoren stehen. Das Wasser fließt mit hoher Geschwindigkeit in den Bereich, wo das Floß liegt. An der Stelle des Rückstreuminimums, im Süd-Westen des Floßes, sind kaum Flüsse vorhanden. Die Flüsse des austretenden Wassers sind sehr gering.

Aufgrund dieser Bilanz der Wasserflüsse ist eine Bilanzierung der Schwebstoffflüsse nicht umsetzbar. Diese basieren auf den Wasserflüssen und werden lediglich mit Schwebstoffgehalten gewichtet. Als Annäherung für die Schwebstoffflüsse wurden die Strömungsgeschwindigkeiten mit der akustischen Rückstreuung in Dezibel multipliziert. An der Stelle, wo die höchsten Schwebstoffflüsse zu erwarten wären, nämlich zwischen 5 und 8 *m*, sind kaum bzw. sehr kleine Wasserflüsse aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit vorhanden. Außerdem spielt auch der vertikale Austausch in und um das Floß herum eine wichtige Rolle. Es liegen jedoch keine Daten unterhalb von 15 *m* und innerhalb des Floßes vor. Ein zusätzliches Problem stellte das umfahrene Volumen dar. Da dieses deutlich größer ist als das Floß selbst, wird besonders an der südlichen Seite nicht-filtrierte Wasser miteinbezogen und verfälscht so die Bilanz.

Anhand der Aufenthaltszeit des Wassers kann die Zeit betrachtet werden, die das Wasser benötigt, um das Floß zu durchfließen. Gleichzeitig ist das der Zeitraum, der den Muscheln zur Verfügung steht, um den Schwebstoff aus dem Wasserkörper zu filtrieren.

Die Aufenthaltszeit des Wassers im Floß kann nur abgeschätzt werden, da Messungen direkt am Floß fehlen. Ein Floß umfaßt ein Volumen von ca.  $6000 \text{ m}^3$ , da es  $25 \text{ m}$  lang und  $20 \text{ m}$  breit ist und die Langleinen  $12 \text{ m}$  tief in das Wasser hängen. Das von den Muscheln verdrängte Wasser wird dabei vernachlässigt. Die Fläche, die umfahren wurde, ist jedoch deutlich größer und damit wurde ein deutlich höheres Volumen Wasser umfahren, wodurch das Innere der Floßumrundung ca.  $21000 \text{ m}^3$  enthält. Die Flüsse in diesem Bereich liegen als Mittel aus Zufluss und Abfluss bei ca.  $43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Daraus ergibt sich eine Aufenthaltszeit im inneren Ring der Floßumrundung von ca. 470 Sekunden, also annähernd 8 Minuten. Die Aufenthaltszeit bezogen auf das kleinere Volumen des Floßes ergibt  $2 \frac{1}{2}$  Minuten. Da die Strömungsgeschwindigkeiten im Floß durch die Langleinen abgebremst werden, werden die Flüsse im Bereich des Floßes überschätzt. Daher handelt es sich bei dem berechneten Wert um eine minimale Aufenthaltsdauer. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die Aufenthaltszeit im Floß deutlich höher und damit im Bereich von min. 5 Minuten liegt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einfluss der Langleinen-Aquakulturen auf die Schwebstoffkonzentration konnte gezeigt werden, da Miesmuscheln Schwebstoff und besonders Phytoplankton zur Nahrungszufuhr filtrieren. Die Filtration kann durch eine verminderte Schwebstoff- und Chlorophyllkonzentration im abstromigen Bereich der Flöße nachgewiesen werden. Im diesem Bereich verringern die Miesmuscheln die Chlorophyllkonzentration, die ein Maß für Phytoplankton darstellt, um ca. 50 %, da die Konzentration von ca. 2 (im oberstromigen Bereich) bis auf  $1 \mu\text{g l}^{-1}$  (im abstromigen Bereich) sinkt.

Der Einfluss der Muscheln ist aufgrund der Durchmischung des Wassers in einer schmalen, etwa 20 m breiten Zone im abstromigen Bereich des Floßes nachzuweisen. Innerhalb und im Nahbereich um das Floß herum kommt es zu erheblichen Vertikalbewegungen des Wassers, die zu Austausch- und Verdrängungsprozessen führen. Das filtrierte Wasser im abstromigen Bereich stammt in 7 m aus geringerer Tiefe.

Die Filtrationsleistung ist zwischen 6 und 8 m Wassertiefe am deutlichsten ausgeprägt. Oberhalb ist die Filtration nur schwach oder nicht mehr nachweisbar. In den unteren Tiefenschichten wird Material mit der Strömung aus dem Bereich des Floßes herausgetragen, das in oder hinter dem Floß herabsinkt. Dabei kann es sich um Abbauprodukte der Muscheln handeln.

Auf der Skalenebene des Polygons ist zu erkennen, dass die Flöße, ebenfalls die Verteilung des Schwebstoffes beeinflussen. Die Filtrierwirkung der Flöße ist tideunabhängig. Ursache ist vermutlich, dass die Ebbströmung geringere Schwebstoffgehalte antransportiert als die Flut.

Die Zusammensetzung des Schwebstoffes ist insgesamt heterogen. Der Schwebstoff besteht sowohl aus feinen als auch, besonders im Bereich der Langleinen, groben Partikeln und enthält einen hohen Anteil an organischem Material. Unterhalb von 12 m, wo die Langleinen enden, wird die Zusammensetzung des Schwebstoffes homogener. Eindeutige Schwebstoffkonzentrationen können nur für Werte hergeleitet werden, die unterhalb der Langleinen genommen wurden.

Eine vollständige Bilanzierung der Flüsse durch ein Floß ist messtechnisch nicht möglich, da an der unmittelbaren Umgrenzung der Flöße nicht gemessen werden konnte.

Der folglich hohe Anteil an nicht-filtriertem Wasser verfälscht die Bilanz. Die Bilanzierung wurde zusätzlich erschwert, da während einer Messfahrt um ein Floß keine stationären Verhältnisse bestehen und die Vertikalkomponente innerhalb eines Floßes nicht erfasst werden kann. Die Aufenthaltszeit des Wassers im Floß und der Durchfluss können jedoch geschätzt werden.

Die Schwebstoffbilanz in Abhängigkeit von der Wasserbilanz erfordert neue Ansätze, damit die Strömungen nicht über- bzw. unterschätzt werden. Auch verändern sich die Nettoflüsse über die Tiefe zu stark, um über die ganze Länge der Langleinen integriert werden zu können. Dies könnte erst durch weiterführende Messungen ADCP-Messungen bis zum Meeresboden hin erreicht werden. Erst dann könnte eine vollständige Bilanzierung des Schwebstoffumsatzes angenähert werden.

Aufgrund der vorliegenden Arbeit ergeben sich weitere offene Fragen, wobei zwei Fragestellungen besonders interessant scheinen. Die stoffliche und granulometrische Zusammensetzung des Schwebstoffes muss genauer untersucht werden, damit die Zuordnung der gemessenen Daten zu den Schwebstoffkonzentrationen ermöglicht wird. Mit einem Messgerät für die kontinuierliche Bestimmung von Korngrößen (BB-Lisst) wurden bereits während der Untersuchungen in Spanien Daten aufgenommen. Eine Auswertung liegt noch nicht vor. Zu empfehlen wären außerdem Messungen über längere Zeiträume während starker Upwelling-Phasen, da in diesen Phasen das Nährstoffangebot und die Filtration der Muscheln besonders ausgeprägt sind.

## Literaturverzeichnis

- Adelmann, D., Albert, K., Alpers, W., und andere (2000). *Lexikon der Geowissenschaften*, Bd. 3. Spektrum Akademischer Verlag.
- Asmus, R. und Asmus, H. (1991). Mussel beds: Limiting or promoting phytoplankton? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 148:215–232.
- Bretherton, F. P., Davis, R., und Fandry, C. (1976). A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to mode-73. *Deep Sea Research*, 23:559–582.
- Bronstein, I. N. und Semendjajew, K. A. (1991). *Taschenbuch der Mathematik*. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 349-350.
- Campbell, D. E. und Spinrad, R. W. (1987). The relationship between light attenuation and particle characteristics in a turbid estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25:53–65.
- Carbajo, P. (2004). El milagro del mejillón. *El País*. Ausgabe: 22. November 2004, 76-77.
- Carter, E. und Robinson, A. (1987). Analysis models for the estimation of oceanic fields. *J. Atmosph. Ocean. Technol.*, 4:49–74.
- Deines, K. L. (1999). Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers. Oceans Conference Proceedings, IEEE, <http://www.rdinstruments.com>.
- Dolmer, P. (1999). Algal concentration above mussel beds. *Journal of Sea Research*, 43:113–119.
- Figueiras, F., Labarta, U., und Reiriz, M. F. (2002). Coastal upwelling, primary production and mussel growth in the Rías Baixas of Galicia. *Hydrobiologia*, 484:121–131.
- Förstner, U., Hinrich, H., Maniak, U., Richter, G., Schröder, W., Tippner, M., Tönsmann, F., Vollmers, H.-J., Weiß, F.-H., und Wismer, H. (1986). *Regeln zur Wasserwirtschaft, Schwebstoffmessungen*. DVWK, 5 pp.
- Gameiro, C., Cartaxana, P., Cabrita, M., und Brotas, V. (2004). Variability in chlorophyll and phytoplankton composition in an estuarine system. *Hydrobiologia*, 525:113–124.
- Günther, D., Kalle, K., Kraus, W., und Siedler, G. (1992). *Allgemeine Meereskunde - Eine Einführung in die Ozeanographie*. Gebr. Borntraeger Verlag, Science Publisher, 221 pp.

- Gordon, R. (1996). *Acoustic doppler current profilers: Principles of Operation - A practical primer*. RD Instruments, 2. Auflage, <http://www.rdinstruments.com>.
- Green, M. O. und Boon, J. D. (1993). The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspension using optical backscatter. *Marine Geology*, 110:73–81.
- Hill, D., Jones, S., und Prandle, D. (2003). Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters. *Continental Shelf Research*, 23:19–40.
- Hoitink, A. (2005). Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in mud-sediment environment. *Coastal Engineering*, 2:103–118.
- Holdaway, G., Thorne, P., Flatt, D., Jones, S., und Prandle, D. (1999). Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment matter. *Continental Shelf Research*, 19:421–441.
- Jespersen, A. und Christofersen, K. (1987). Measurements of chlorophyll a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Arch. Hydrobiol.*, 109:445–454.
- Joint, I., Rees, A. P., Malcolm, E., und Woodward, S. (2001). Primary production and nutrient upwelling in the Iberian upwelling in August 1998. *Progress in Oceanography*, 51:303–320.
- Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., und Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an Acoustic Doppler Current Profiler. *Geomorphology*, 68:25–37.
- Maxwell, K. und Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 345:659–668.
- Meerestechnik-Elektronik (1989). *User Manual, Transmissiometer*. Meerestechnik Elektronik, <http://www.sea-sun-tech.com>.
- Nusch, E. A. (1980). Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih.*, 14:14–36.
- Ott, J. (1996). *Meereskunde*. Ulmer Verlag, 2. Auflage, 109 pp.
- Prinz, K. (2003). ADCP-Vermessung über Sandwellen im Lister Tief. Diplomarbeit, GKSS Forschungszentrum, 32 pp.
- Rybaczek, P. (1992). Schwebstoffkalibration für die Meta2- und SFB-Ponton-Messungen für die Jahre 1990 und 1991. GKSS 92/I/17 Manuskript, unveröffentlicht.
- Seepoint (1988). *User Manual, Seapoint Turbidity Meter*. Seapoint, <http://www.seapoint.com>.

- Sindlinger, L. R., Biggs, B. C., und DiMarco, S. F. (2005). Temporal and spatial variability of ADCP-backscatter on a continental slope. *Continental Shelf Research*, 25:259–275.
- Smyth, T., Miller, P., Groom, A., und Lavender, S. (2001). Remote sensing of sea surface temperature and chlorophyll during Lagrangian experiments at the Iberian margin. *Progress in Oceanography*, 51:269–281.
- Thorne, P., Vincent, C., Hardcastle, P., Rehman, S., und Pearson, N. (1991). Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 98(1):7–16.
- Tipler, P. A. (1994). *Physik*. Spektrum Akademischer Verlag, 487-490.
- Tweddle, J., Simpson, J., und Janzen, C. (2005). Physical controls of food supply to benthic filter feeders in the Menai Strait, UK. *Marine Ecology*, 289:79–88.
- UNESCO (1981). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. *Unesco technical paper in marine science*, 1:25pp.
- URL1 (2005). Turner Designs: Fluorometer. URL: <http://www.turnerdesigns.com>.
- URL2 (2005). MaBenE, homepage. URL: <http://www.nioo.knaw.nl/projects/mabene>.
- URL3 (2005). RDInstruments, homepage. URL: <http://www.rdinstruments.com>.
- Walter, U. (2003). Langleinen-Aquakultur von Miesmuscheln: eine Chance für die Zukunft? Technical report, DGM-Mitteilung 3-4/2003, 11-14.
- Wiles, P., van Duren, L., Häse, C., Larsen, J., und Simpson, J. (2006). Stratification and mixing in the Limfjorden in relation to mussel culture. *Journal of marine systems*, submitted.
- Wren, D., Barkdoll, B., Kuhnle, R., und Derrow, R. (2000). Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126:97–104.
- Zee, H. V. (2002). *WET Star User's Guide*. Wet Labs, Inc., <http://www.wetlabs.com>.

# A Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## A.1 Abkürzungen

|               |                                      |
|---------------|--------------------------------------|
| <i>ADCP</i>   | Acoustic Doppler Current Profiler    |
| <i>Att</i>    | Attenuation                          |
| <i>FTU</i>    | Formazin Turbidity Standard          |
| <i>dB</i>     | Dezibel                              |
| <i>Hz</i>     | Hertz                                |
| <i>HW</i>     | Hochwasser                           |
| <i>KG</i>     | Korngröße                            |
| <i>LoI</i>    | Loss on Ignition                     |
| <i>NW</i>     | Niedrigwasser                        |
| <i>MaBenE</i> | Managing Benthic Ecosystems          |
| <i>Mohid</i>  | Water Modelling System               |
| <i>MS</i>     | Motorschiff                          |
| <i>OA</i>     | Objektive Analyse                    |
| <i>POM</i>    | Partikuläres organisches Material    |
| <i>raft</i>   | Floß                                 |
| <i>Sek</i>    | Sekunden                             |
| <i>SPM</i>    | Suspended particulate matter         |
| <i>SSC</i>    | Anorganisches suspendiertes Material |
| <i>UTC</i>    | Coordinated Universal Time           |

## A.2 Symbole

|               |   |
|---------------|---|
| $A$ :         | Fläche [ $m^2$ ]  |
| $B$           | Winkel zw. relativem Geschwindigkeitsvektor und Strecke zwischen ADCP und reflektierenden Partikeln |
| $C$           | Schallgeschwindigkeit [ $m s^{-1}$ ]  |
| $Chl - a$ :   | Chlorophyll a [ $\mu g l^{-1}$ ]  |
| $C_x$         | Faktor für das Hintergrundrauschen jedes einzelnen Strahls  |
| $E_r$ :       | Rauschniveau des Schwingers [ $Counts$ ]  |
| $E_{Rt}$ :    | vom radialen Abstand $R_t$ her empfangene Echointensität [ $Counts$ ]                               |
| $F$ :         | Fluoreszenz vor der Ansäuerung [ $V$ ]  |
| $F_a$ :       | Fluoreszenz nach der Ansäuerung [ $V$ ]   |
| $F_D$         | Dopplerfrequenzverschiebung [ $s^{-1}$ ]  |
| $F_m$ :       | Verhältnis $F/F_a$ für reines Chlorophyll   |
| $F_S$         | Schallfrequenz in Ruhe [ $s^{-1}$ ]   |
| $G$ :         | Streuquerschnitt [ $\mu m$ ]  |
| $f$ :         | Kalibrierfaktor [ $g l^{-1}$ ]  |
| $H$ :         | Tiefe, über die integriert werden soll [ $15 m$ ]   |
| $h_{tz}$ :    | Zellentiefe [ $25 cm$ ]   |
| $K$ :         | Attenuationskoeffizient [ $m^{-1}$ ]  |
| $k$ :         | Slitfaktor  |
| $l$ :         | Weglänge [ $m$ ]  |
| $M_r$ :       | Volumenkonzentration [ $mg dm^{-3}$ ]   |
| $n$ :         | Zähler über die Anzahl der „Ensembles“  |
| $\vec{n}_s$ : | Normalenvektor der Strecke  |
| $\vec{n}_v$ : | Normalenvektor des Schiffsgeschwindigkeitsvektors   |
| $p$ :         | Irrtumswahrscheinlichkeit   |
| $Phaeo$ :     | Phaeopigment-Konzentration [ $\mu g l^{-1}$ ]   |
| $R^2$         | erklärte Varianz  |
| $R_t$         | radialer Abstand vom Transducer [ $m$ ]   |
| $s$ :         | Strecke eines Ensembles [ $m$ ]   |

|                  |   |
|------------------|---|
| $S_v$            | Rückstreuintensität [db]  |
| $\vec{s}$ :      | Vektor der Strecke  |
| $T$              | Temperatur [ $^{\circ}C$ ]  |
| $Tr/100$ :       | gemessene Transmission [%]  |
| $t$ :            | Zeitdauer eines Ensembles = 3.26 s  |
| $V$ :            | Volumen des filtrierten Wassers [l]   |
| $V_W$            | Relativgeschwindigkeit [ $m\ s^{-1}$ ]  |
| $V_E$ :          | Extraktvolumen [ml]   |
| $\vec{v}_{BT}$ : | Vektor der Schiffsgeschwindigkeit   |
| $\vec{v}$ :      | Vektor der Strömungsgeschwindigkeit   |
| $z$ :            | Zähler über die Anzahl der Tiefenzellen   |
| $\alpha_w$ :     | Schallabsorptionskoeffizient für die Dämpfung<br>durch das Wasser [ $dB\ m^{-1}$ ]      |
| $\alpha_s$ :     | Schallabsorptionskoeffizient für die Dämpfung<br>durch den Schwebstoff [ $dB\ m^{-1}$ ] |
| $\Phi_{ens}$ :   | Durchfluss durch ein Ensemble [ $m^3\ s^{-1}$ ]   |
| $\Phi_{total}$ : | Gesamter Durchfluss [ $m^3\ s^{-1}$ ]   |

## B Dichte des Meerwassers und Gezeiten

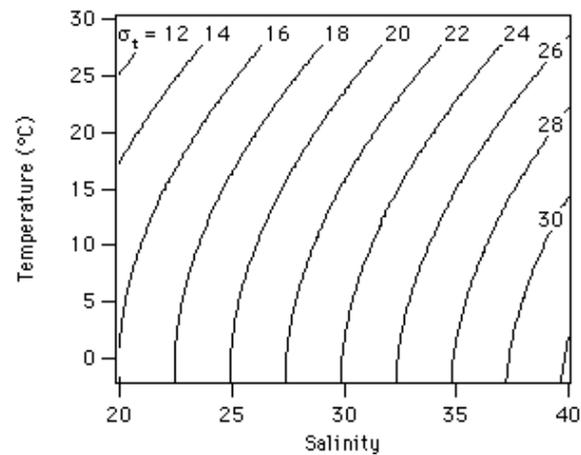


Abbildung B.1: Dichte  $\sigma_t$  des Meerwassers [ $kg\ m^{-3}$ ] in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt (aus [ioc.unesco.org/oceanteacher/](http://ioc.unesco.org/oceanteacher/))

Tabelle B.1: Plan der Gezeiten im Ria de Vigo während der Kampagne in *UTC*

| Tag      | HW [ <i>UTC</i> ] | NW [ <i>UTC</i> ] |
|----------|-------------------|-------------------|
| 19. Juli | 16:10             | 09:56             |
| 20. Juli | 16:47             | 10:31             |
| 21. Juli | 17:24             | 11:07             |
| 22. Juli | 18:04             | 11:46             |
| 23. Juli | 18:47             | 12:29             |
| 24. Juli | 19:38             | 13:19             |
| 25. Juli | 08:15             | 14:17             |
| 26. Juli | 09:20             | 15:28             |
| 27. Juli | 10:32             | 16:47             |
| 28. Juli | 11:43             | 18:01             |
| 29. Juli | 12:46             | 19:05             |

## C Zusätzliche Abbildungen

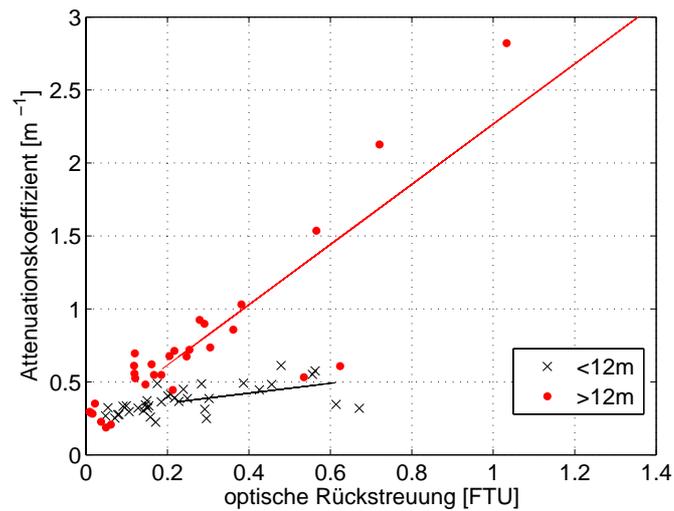


Abbildung C.1: Abhängigkeit der optischen Rückstreuung [FTU] von der Attenuation [ $m^{-1}$ ], aufgeteilt in Tiefenbereiche  $>12 m$  und  $<12 m$

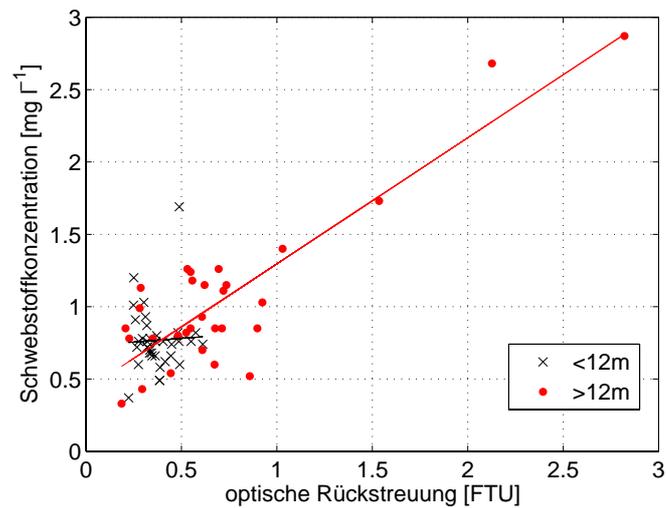


Abbildung C.2: Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration der Proben von der optischen Rückstreuung [FTU], aufgeteilt in Tiefenbereiche  $> 12 m$  und  $< 12 m$  mit Ausgleichsgerade

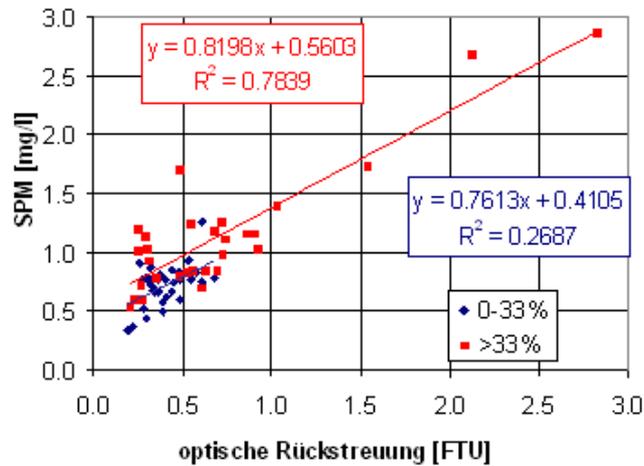


Abbildung C.3: Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration der Proben von der optischen Rückstreuung [FTU], aufgeteilt nach Glühverlust > 30 % und < 30 %

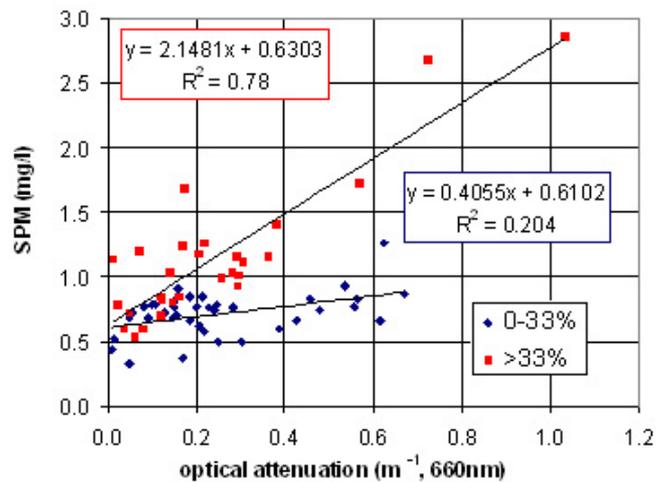


Abbildung C.4: Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration [ $mg\ l^{-1}$ ] von der Attenuation [ $1\ m^{-1}$ ], aufgeteilt in zwei Klassen des Glühverlustes von > 30 % und < 30 %. Zusätzlich sind die beiden Geradengleichungen mit der erklärten Varianz  $R^2$  dargestellt.

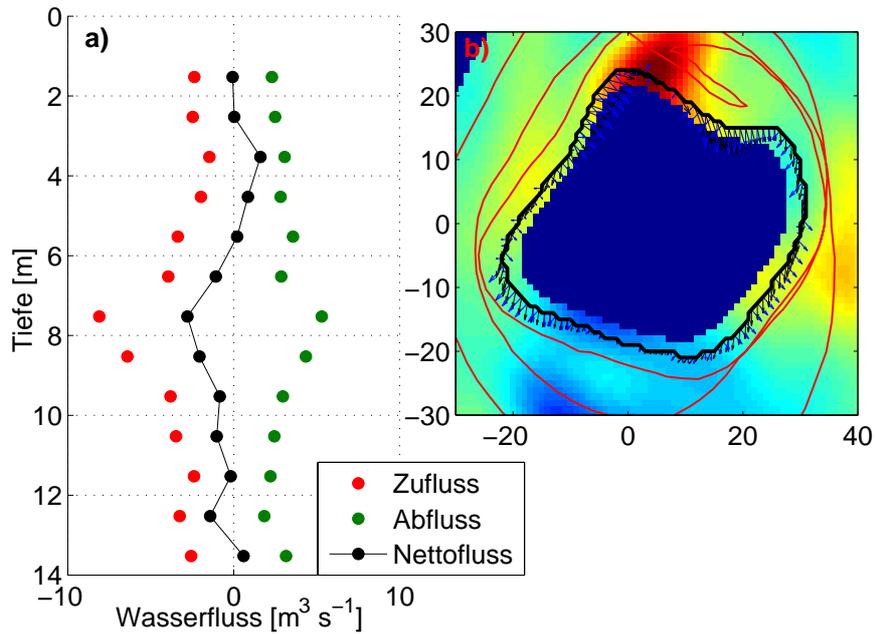


Abbildung C.5: Flüsse um Floß 15, am 24.07., um 10:59 Uhr: a) Flüsse [ $m^3 s^{-1}$ ] mit der Tiefe und b) Floßumrundung mit Darstellung Strömungsvektoren (schwarz) und Flussvektoren (blau) in 8 m Tiefe am inneren Ring der Interpolation (Hintergrund: akustische Rückstreuung, rot: gefahrener Kurs)

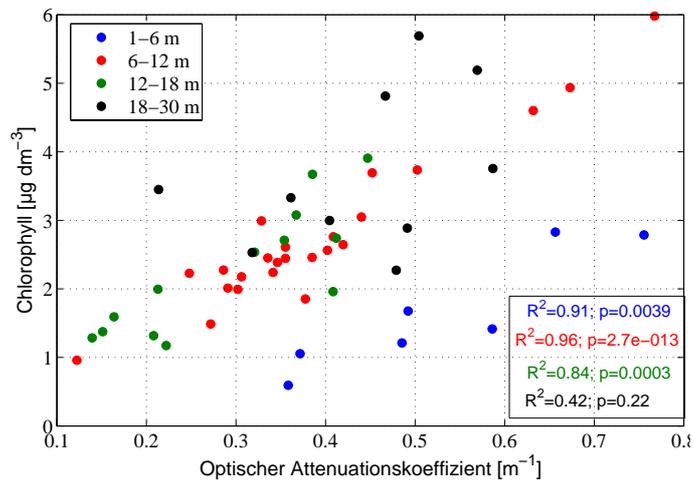


Abbildung C.6: Abhängigkeit der Attenuation [ $m^{-1}$ ] von der Chlorophyllkonzentration [ $\mu g dm^{-3}$ ] mit erklärten Varianzen  $R^2$  und Irrtumswahrscheinlichkeiten  $p$ . Die Werte sind nach Tiefenbereichen aufgeteilt.

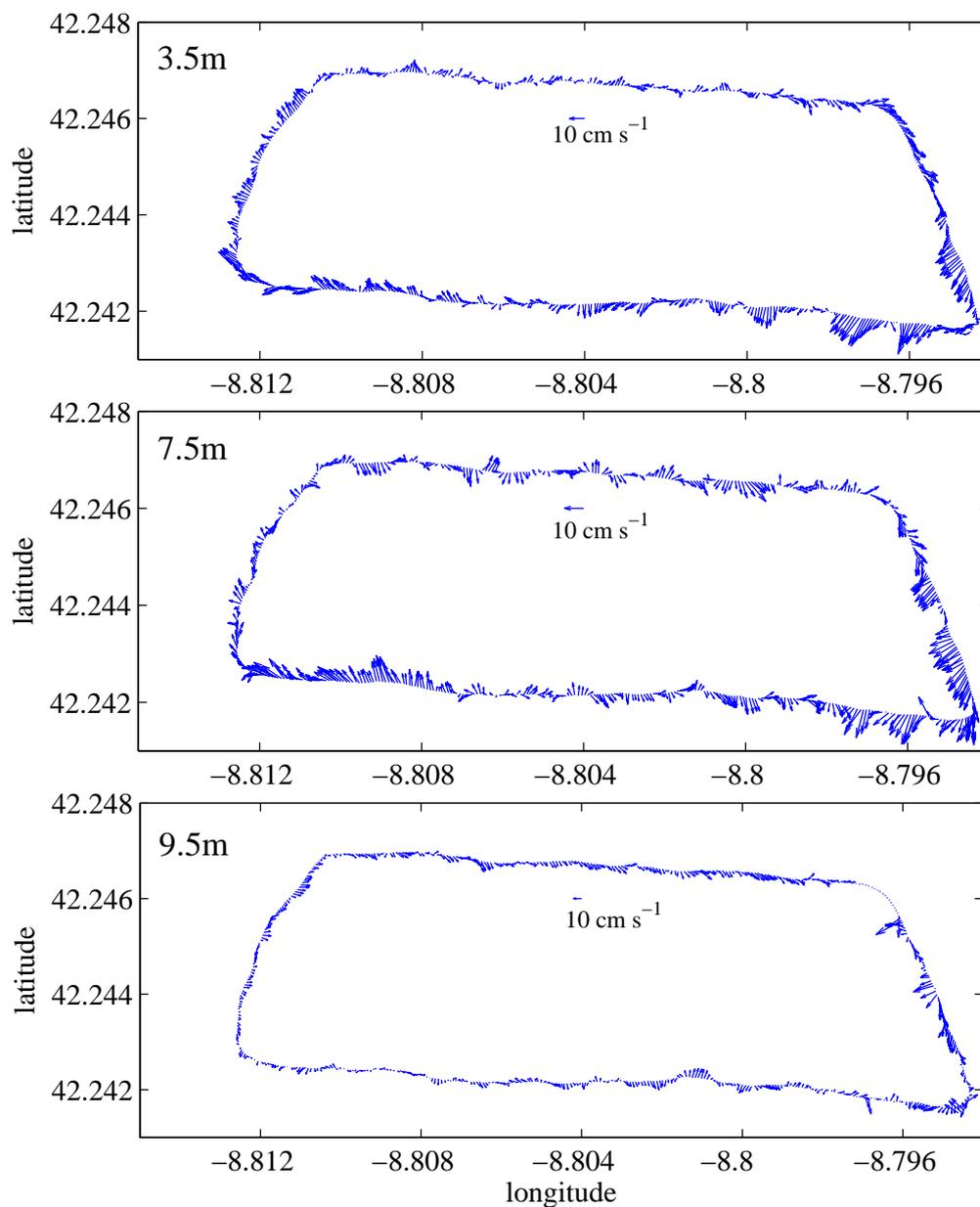


Abbildung C.7: Strömungsmuster um das Polygon in unterschiedlichen Tiefen: 3 - 4 m, 7 - 8 m und 9 - 10 m

## D Fotos



Abbildung D.1: Foto eines Floßes mit dem MS Storch



Abbildung D.2: Foto einer Miesmuschel (*Mytilus galloprovincialis*)



Abbildung D.3: Foto eines Floßes im Ria de Vigo und weiteren Flößen im Hintergrund



Abbildung D.4: Foto der Langleinen unter Wasser

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr Hauhs für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit bedanken. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Bitzer für seine Bereitschaft zur Korrektur.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch der Abteilung KOK des GKSS Forschungszentrums für die Unterstützung während der Messkampagne und danach bei der Auswertung aussprechen. Ganz besonderer Dank geht dabei an Dr. Rolf Riethmüller, der mir stets eine sehr große Hilfe war und für alle Fragen immer sehr hilfsbereit zur Verfügung stand. Des weiteren möchte ich Dr. Clivia Häse für ihre Unterstützung bei biologischen und das Projekt MaBenE betreffenden Fragen danken. Sie fand immer die Zeit, sich mit meinen Fragen auseinander zu setzen. Bernd Vaessen und Dr. Reiner Onken standen mir ebenfalls bei jeglichen Fragestellungen, insbesondere Matlab betreffend, zur Seite. Und auch Martina Heineke möchte ich für ihre große Hilfsbereitschaft danken.

I would like to thank all the participants of the project MaBenE. Sincere thanks are especially given to Luis Fernandes and Francisco G. Figueiras for their support.

Bei meiner Familie möchte ich mich für die finanzielle und moralische Unterstützung, nicht nur während der Diplomarbeit, sondern während des ganzen Studiums, bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Daniela Högerl und allen, die mich während der arbeitsintensiven Zeit der Diplomarbeit unterstützt haben und diese Arbeit Korrektur gelesen haben. Besonders danke ich Christian Clément, der mir in dieser anstrengenden Zeit immer zur Seite stand.