

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt

– Phase 3 –

Januar 2008 bis Dezember 2008

– Vorläufiger Abschlussbericht –

Prof. Dr.-Ing. Nicole von Lieberman
Dipl.-Ing. Thorsten Albers

13. Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1 Einleitung | 5 |
| 2 Durchführung des Messprogramms | 7 |
| 2.1 Untersuchungsgebiet | 7 |
| 2.2 Messfahrten | 8 |
| 2.3 Stationäre Messungen | 11 |
| 2.4 Fächerecholotvermessungen | 12 |
| 3 Fortschreibung des Messkonzeptes | 13 |
| 3.1 Strömungsmessungen | 13 |
| 3.2 Trübungsmessgeräte | 13 |
| 3.3 Drucksonden | 14 |
| 3.4 Fächerecholot | 14 |
| 4 Auswertung der Messergebnisse | 15 |
| 4.1 Veränderungen der Bathymetrie | 15 |
| 4.1.1 Analyse anhand von Fächerecholotaufnahmen | 15 |
| 4.1.2 Vergleich mit Messungen aus den Jahren 2006 und 2007 | 26 |
| 4.2 Stationäre Messungen | 30 |
| 4.2.1 Position 13 | 30 |
| 4.2.2 Position 15 | 37 |
| 4.2.3 Position 17 | 41 |
| 4.3 Schwebstoffproben | 47 |
| 4.4 Laboruntersuchungen | 48 |
| 5 Aufbau eines morphodynamisch-hydrodynamischen numerischen Modells | 53 |
| 5.1 Konzeption | 53 |
| 5.2 Abgrenzung der Modellgebiete | 54 |
| 5.2.1 Abgrenzung des großräumigen Detailmodells GREAT | 54 |
| 5.2.2 Abgrenzung des kleinräumigen Detailmodells SMALL | 54 |
| 5.3 Finite Elemente-Netze | 55 |
| 5.3.1 Finite-Elemente-Netz für das großräumige Detailmodell GREAT | 55 |
| 5.3.2 Finite-Elemente-Netz für das kleinräumige Detailmodell SMALL | 57 |
| 5.4 Numerische Berechnung | 58 |
| 5.4.1 Hydrodynamisch-numerische Berechnung des großräumigen Detailmodells GREAT | 58 |
| 5.4.2 Hydro- und morphodynamisch-numerische Berechnung des kleinräumiges Detailmodell SMALL | 62 |
| 5.5 Ausblick | 63 |
| 6 Schlussfolgerungen | 64 |
| 7 Weiteres Vorgehen | 71 |
| 8 Zusammenfassung | 73 |
| 9 Schrifttum | 74 |
| Anhang A – Projektierung eines Messpfahls für das Neufelder Watt | 75 |
| Anhang B – Anwendung der Fernerkundung | 76 |
| Anhang C – Darstellung der Messergebnisse [auf CD-ROM] | 77 |

1 Einleitung

Um strombauliche Maßnahmen im Mündungsbereich von Ästuaren sicher bewerten und Prognosen zu deren Wirkung auf der Basis von Beobachtungen in der Natur sowie numerischer Modelle geben zu können, ist ein verbessertes Prozessverständnis der Morphodynamik von Wattflächen erforderlich.

Das Gesamtprojekt „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ soll auf diesem Gebiet einen Beitrag leisten, indem auf der Fokusfläche im Neufelder Watt im Mündungsbereich der Elbe die hydro- und morphodynamischen Vorgänge im Watt räumlich und zeitlich hochauflösend aufgezeichnet und auf die wesentlichen Wirkungszusammenhänge hin analysiert werden.

Im Auftrag der Hamburg Port Authority (HPA) führte das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) in den Phasen 1 bis 3 des Projektes umfangreiche Naturmessungen im Neufelder Watt durch.

In einer Initialisierungsphase von November 2005 bis März 2006 (Phase 0) wurde für die Felduntersuchungen in enger Absprache mit der HPA ein exemplarisches Untersuchungsgebiet im Watt des Elbmündungsgebietes ausgewählt. In Zusammenarbeit mit der HPA erfolgte die Auswahl von Messgeräten zur Aufzeichnung der Parameter Seegang, Wasserstand, Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration. Die Beschaffung der Geräte wurde von der HPA durchgeführt, die die Geräte dem Institut für Wasserbau für die Dauer der Messkampagnen zu Verfügung stellt. Unter Beachtung der Komplexität der Messgeräte und der exponierten Lage des Untersuchungsgebietes wurde ein detailliertes Messkonzept erstellt, in dem der Betrieb der Geräte, sämtliche Konfigurationen sowie das zeitliche Vorgehen der Messungen und Messfahrten beschrieben wurden. Die besonderen Herausforderungen in Phase 0 lagen darin, ein Messprogramm zu erstellen, das erlaubt, bei zu gewährleistender Sicherheit von eingesetztem Personal und Gerät, die gewünschten Messdaten in der Aufgabenstellung entsprechend guter Qualität zu gewinnen.

Ab Juli 2006 wurden in Phase 1 dem Messkonzept aus Phase 0 folgend kontinuierlich die Wasserstände, die Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen sowie die Konzentrationen suspendierter Sedimente in der Wassersäule in einem Querschnitt der Neufelder Rinne hochauflösend aufgezeichnet. Des Weiteren erfolgten an mehreren Positionen Seegangaufzeichnungen. In regelmäßigen Abständen wurde die Bathymetrie des Untersuchungsgebietes detailliert mit Hilfe eines Fächer-echolotes vermessen, das an Bord des Messbootes des Instituts für Wasserbau zur Verfügung steht. Zur Einordnung der Morphodynamik des Untersuchungsgebietes in den Gesamtkomplex der Entwicklung der Elbmündung wurde zudem eine Analyse der morphologischen Veränderungen in größeren Raum- und Zeitskalen vorgenommen. Parallel zum Messprogramm wurde in Phase 1 mit der Erstellung eines numerischen Modells begonnen. Neben einer möglichst genauen Abbildung der Bathymetrie sind dabei die gewählten Randbedingungen von größter Bedeutung.

In Phase 2 des Projektes wurden die Naturmessungen fortgesetzt. Die Standorte der Messgeräte wurden aus dem Messquerschnitt der Neufelder Rinne auf die höher gelegenen Wattflächen nordwestlich und südlich der Neufelder Rinne verlegt. Zunächst erfolgte zu diesem Zweck die Konstruktion einer leichteren Halterung für die ADCP-Geräte, die auch auf höher gelegenen Flächen, welche nicht per Schiff erreichbar sind, flexibel einsetzbar sind sowie in exponierteren Bereichen auf dem südlichen Neufelder Sand installiert werden können. Zudem wurde eine Drucksonde

entwickelt, die es erlaubt, Seegang mit einer Frequenz von 10 Hz auch über längere Zeiträume lückenlos aufzuzeichnen. Die gewonnenen Daten aus dem Messprogramm wurden hinsichtlich morphodynamischer Prozesse untersucht und ausgewertet. In regelmäßigen Abständen wurde die Bathymetrie der Neufelder Rinne und angrenzender Wattflächen vermessen und morphologische Tendenzen dokumentiert. Mit dem Aufbau eines Sedimentinventars im Untersuchungsgebiet wurde begonnen. Das großräumige numerische Modell wurde kalibriert und das verwendete Modell RMA10 um ein Seegangmodul erweitert.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Tätigkeiten und Ergebnisse der Phase 3 des oben genannten Projektes. Zunächst wird im Folgenden die Durchführung des Messprogramms dokumentiert, wobei eine Unterteilung in die Beschreibungen der Messfahrten und der verschiedenen Messpositionen erfolgt. Des Weiteren wurde eine Fortschreibung des Messkonzeptes durchgeführt. In diesem Bericht wird dabei lediglich auf die zu den vorangegangenen Phasen entstandenen Änderungen eingegangen. Es folgt die Beschreibung der Messergebnisse, unterteilt in die Veränderungen der Bathymetrie, die verschiedenen Messpositionen der stationären Messungen sowie die Entnahme der Schwebstoffproben und die ergänzenden Laboruntersuchungen. Im Anschluss werden die bis dato durchgeführten Arbeiten am numerischen Modell erläutert. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen ausgesprochen.

2 Durchführung des Messprogramms

2.1 Untersuchungsgebiet

Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen wurden allesamt auf den Flächen des Neufelder Watts in der Elbmündung durchgeführt (Abb. 1). Für eine ausführliche Beschreibung des Untersuchungsgebietes sowie dessen historische morphologische Entwicklung sei an dieser Stelle auf den der HPA vorliegenden Abschlussbericht der Phase 1 verwiesen.

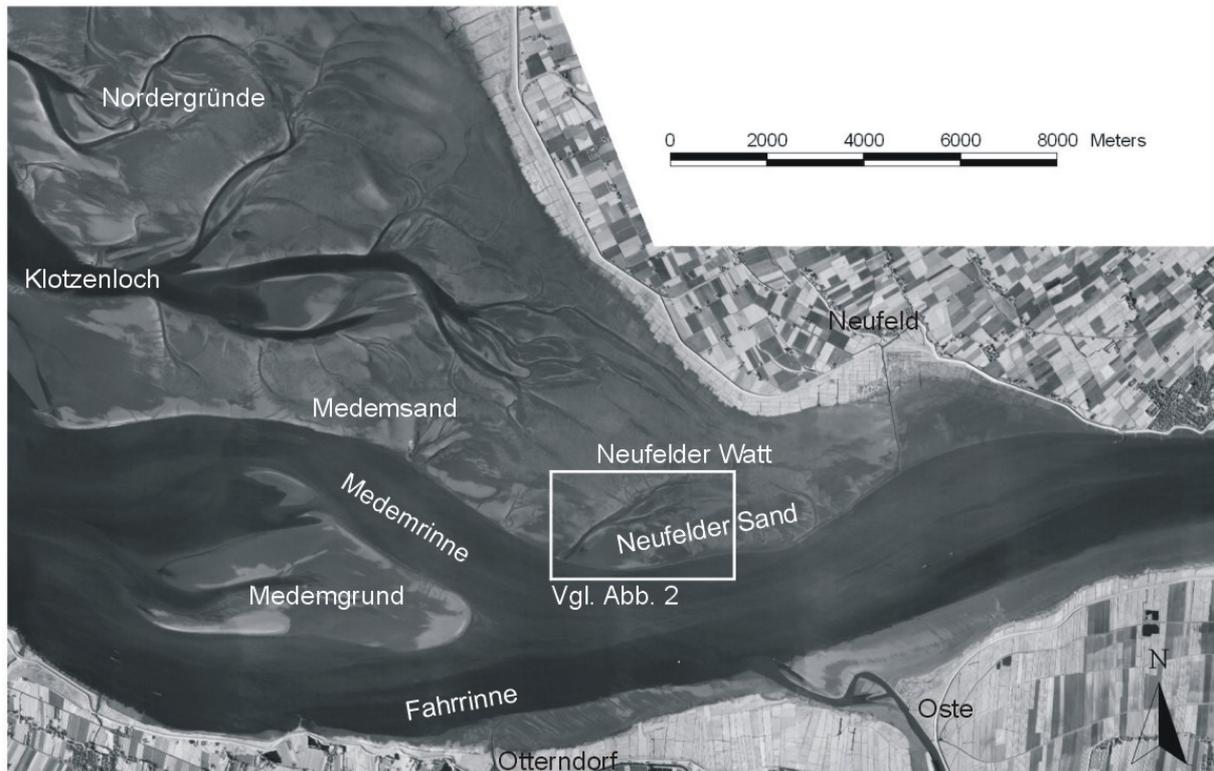


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet in der Elbmündung

Während im Jahr 2006 im Verlauf der Phase 1 des Projektes mit Hilfe der Messgeräte in einem Querschnitt der Neufelder Rinne Strömungsparameter, Sedimentkonzentrationen und Seegang aufgezeichnet wurden, wurden die Messpositionen in Phase 2 im Jahre 2007 auf den Neufelder Sand südöstlich der Neufelder Rinne sowie auf höher gelegene Wattflächen des Neufelder Watts nordwestlich der Neufelder Rinne verlegt. Eine genaue Beschreibung der Messpositionen ist in den jeweiligen Abschlussberichten der Projektphasen zu finden. In Phase 3, die im abgelaufenen Jahr stattfand, wurden die gewonnenen Erfahrungen der letzten Jahre genutzt und jeweils ein Messstandort in der Neufelder Rinne, einer südöstlich davon auf dem Neufelder Sand und einer nordwestlich der Rinne auf dem Neufelder Watt weiterbetrieben (Abb. 2). Durch die Ergebnisse der letzten Jahre konnte aus den Messdaten eines Einzelstandortes auf die Entwicklung der größeren umgebenden Fläche geschlossen werden. Mit Hilfe dreier, an morphodynamisch unterschiedlichen Standorten liegenden Messpositionen konnte somit eine größtmögliche Fläche messtechnisch abgedeckt werden. Eine weitere Beschreibung der im Jahre 2008 untersuchten Positionen ist in Kapitel 2.3 zu finden.

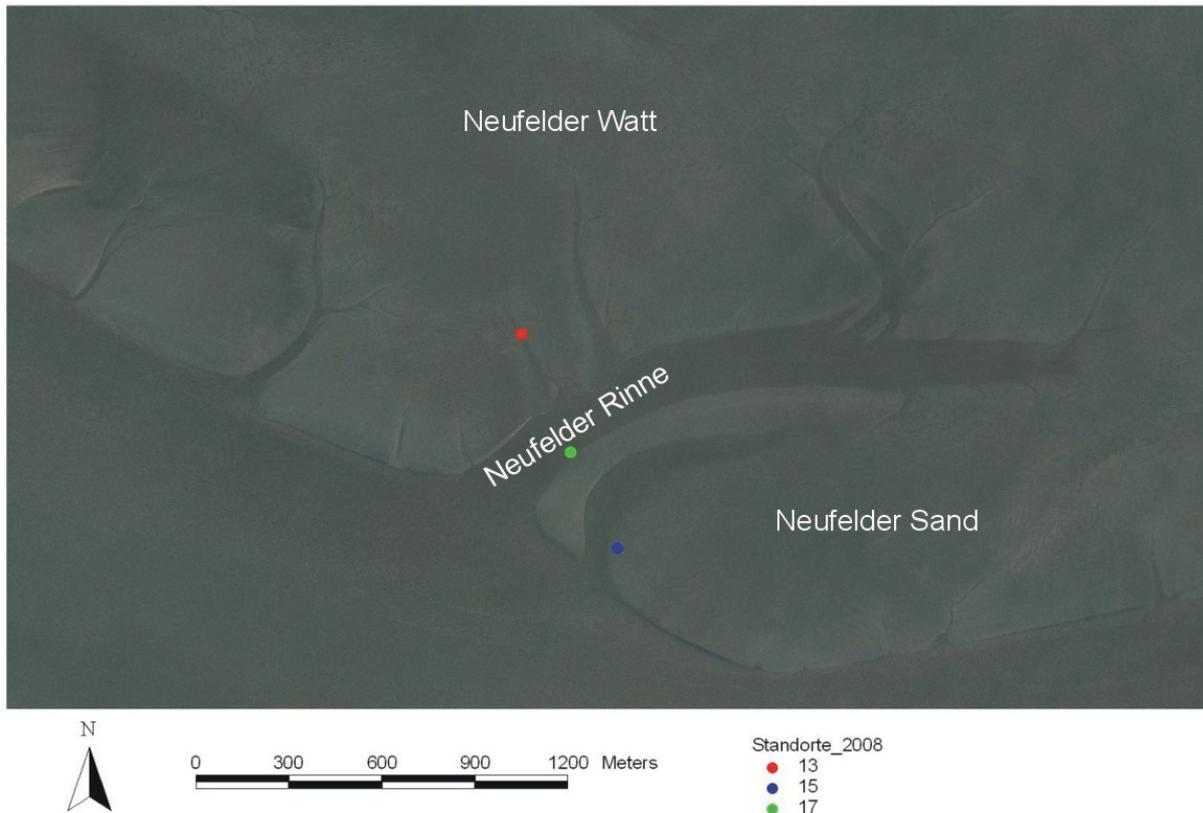


Abbildung 2: Verortung der Messpositionen

Die Fächerecholotaufnahmen wurden analog zu den vorangegangenen Projektphasen entlang der Neufelder Rinne sowie auf den unmittelbar angrenzenden Wattflächen vorgenommen.

2.2 Messfahrten

Zur Durchführung der Naturmessungen wurde das Untersuchungsgebiet bis zum Dezember im Jahr 2008 insgesamt 16 mal mit dem Forschungsboot Nekton angefahren. Ausgangspunkt war dabei wie auch in den vorangegangenen Jahren jedes Mal der Sportboothafen Otterndorf. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Arbeiten.

Am 11. Februar 2008 erfolgte die erste Fächerecholotvermessung der Bathymetrie der Neufelder Rinne des Jahres. Zusätzlich wurde die Lage der alten ADCP-Halterungen kontrolliert und dokumentiert. Des Weiteren wurden mit einem DGPS-Rover Profile in sowie entlang der Neufelder Rinne vermessen. Die ersten Messgeräte wurden während eines Termins am 26. und 27.03.2008 im Untersuchungsgebiet installiert. Die Geräteträger und Messgeräte wurden auf die in Kapitel 2.3 erläuterte Weise installiert und die Messstandorte im Anschluss exakt vermessen und mit einer Tonne gekennzeichnet. Des Weiteren wurden ein an Bord des Messbootes Nekton neu eingebautes Radargerät ausgiebig getestet sowie weitere manuelle DGPS-Vermessungen vorgenommen. Am 23. und 24.04.2008 wurden weitere Messgeräte an einem Messstandort installiert sowie die bereits vorhandenen Geräte gewartet. Die Bathymetrie wurde erneut vermessen. Die nächste Messfahrt fand dann am 06. und 07.05.2008 statt. Am ersten Tag wurden zunächst Fächerecholotmessungen

vorgenommen. Am zweiten Tag wurden die stationären Messgeräte gewartet. Zusätzlich wurden weitere Bodenproben für das Sedimentkataster entnommen und manuelle DGPS-Vermessungen vorgenommen. Während dieses Termins war auch das Forschungsschiff „Ludwig Prandtl“ der GKSS im Untersuchungsgebiet. Mit Hilfe an Bord dieses Schiffes mitgeführter Radartechnik sollten die Strömungsverhältnisse im flachen Wasser des Neufelder Watts und des Neufelder Sandes großräumig abgeschätzt werden. Zur Verifikation dieser Daten wurden am 06.05.2008 mit Hilfe eines ADCP-Gerätes an Bord der „Nekton“ Strömungsmessungen an der Wattkante des Neufelder Sandes und des Neufelder Watt vorgenommen. Aufgrund sehr geringer Windgeschwindigkeiten und damit verbundenen geringen Rauigkeiten an der Wasseroberfläche funktionierte das Radarverfahren der GKSS an diesen beiden Tagen nicht. In der Folgewoche waren die Messungen jedoch erfolgreich. Die Daten der ADCP-Messungen mit der Nekton wurden der GKSS bereitgestellt. Während eines weiteren Termins am 24.06.2008 wurden die Messgeräte gewartet und die aufgezeichneten Daten ausgelesen. Am 15. und 16.07.2008 sollte eine erneute Vermessung der Bathymetrie stattfinden. Die Fächerecholotvermessung musste jedoch an beiden Tagen wegen schlechten Wetters (Windstärke 4-5) aus Sicherheitsgründen abgebrochen werden. Zudem war die Qualität der aufgezeichneten Daten wegen der sehr starken Bootsbevewegung nicht ausreichend. Es konnten nur wenige brauchbare Daten aufgezeichnet werden. In den Abendstunden des 15.07.2008 nahm der Wind ein wenig ab (Windstärke 3-4). Dieser Zeitraum wurde genutzt, um die Messgeräte zu warten und Daten auszulesen. Die nächste erfolgreiche Vermessung der Bathymetrie erfolgte am 21.08.2008. Zuvor wurden die Messgeräte wiederum gewartet und Daten ausgelesen. Während dieses Termins war auch Frau Caroline Freitag von der HPA zugegen. An Position 17 wurde der Verlust eines Trübungsmessgerätes festgestellt. Eine Suche blieb erfolglos. Später wurde der Verlust der Polizei sowie der Geräteversicherung des Auftragnehmers angezeigt, so dass entsprechende Schritte eingeleitet wurden und die Sonde jetzt ersetzt werden kann. Des Weiteren wurde am 21.08.2008 ein provisorischer Kameramast installiert und mit einer in festen Intervallen auslösenden Kamera versehen. Die Lage der alten ADCP-Halterungen wurde kontrolliert, eine ursprünglich für diesen Tag angedachte Bergung einer Halterung aber verworfen. Am Folgetag wurde das größere Umfeld der Position 17 noch einmal genau – jedoch ohne Erfolg – nach der verschwundenen Trübungssonde abgesucht. Der Kameramast wurde deinstalliert. Zur Verifizierung der Ergebnisse der Trübungssonden wurden entsprechende Schwebstoffproben entnommen. Weiterhin wurden bei einsetzender Flut Versuche zur Sichttiefe in der Neufelder Rinne durchgeführt und eine größere Menge Sediment zur Durchführung von Laboruntersuchungen in der Sedimentrinne des Instituts für Wasserbau entnommen. Die nächste Wartung der Messgeräte fand am 24.09.2008 statt. Ergänzend wurden wiederum kurzzeitig Videosequenzen aufgezeichnet. Zur Untersuchung morphodynamischer Prozesse bei einsetzendem Flutstrom und sehr geringen Wasserständen (< 0,30 m) auf den Wattflächen, wurde ebenfalls kurzzeitig eine ADV-Sonde installiert. Am Folgetag wurde die Bathymetrie der Neufelder Rinne vermessen. Zusätzlich wurden erneut Schwebstoffproben zur Verifizierung der Messergebnisse der Trübungssonden entnommen. Am 6. November erfolgte die nächste Wartung der Messgeräte. Mit Hilfe einer magnetisch-induktiven Strömungssonde wurden Strömungsgeschwindigkeiten unmittelbar nach Einsetzen des Flutstroms im verlandeten Bereich der ehemaligen Einfahrt zur Neufelder Rinne bei sehr geringen Wasserstände vorgenommen. Parallel hierzu wurden Schwebstoffproben entnommen. Eine für den nächsten Morgen geplante Fahrt zur Vermessung der Bathymetrie der Rinne musste kurzfristig wegen sehr un-sichtigen Wetters abgebrochen werden.

Des Weiteren wurden während jeder Fahrt Auffälligkeiten im Untersuchungsgebiet, wie z.B. Ablagerungen sehr wenig konsolidierter Sedimente oder Abbruchkanten an der Neufelder Rinne, mit Hilfe von Fotos und kurzer Videosequenzen dokumentiert.

Tabelle 1: Übersicht über die Messfahrten und die ausgeführten Arbeiten

| Datum | Beschreibung der Arbeiten |
|--------------|--|
| 11.02.2008 | Fächerecholotvermessung, manuelle DGPS-Vermessung, Kontrolle und Dokumentation alter Standorte |
| 26.03.2008 | Test Radaranlage |
| 27.03.2008 | Geräteinstallation, Einmessung der Messstandorte, manuelle DGPS-Vermessung, Kennzeichnung der Standorte |
| 23.04.2008 | Fächerecholotvermessung |
| 24.04.2008 | Geräteinstallation, Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten, Kennzeichnung des Standortes |
| 06.05.2008 | Fächerecholotvermessung, mobile ADCP-Messungen |
| 07.05.2008 | Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten, Entnahme von Bodenproben, manuelle DGPS-Vermessung |
| 24.06.2008 | Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten |
| 15.07.2008 | Fächerecholotvermessung, Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten |
| 16.07.2008 | Fächerecholotvermessung (abgebrochen), Entnahme von Schwebstoffproben |
| 21.08.2008 | Fächerecholotvermessung, Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten, Installation einer Kamera, Kontrolle der Lage der alten ADCP-Halterungen inkl. Versuch einer Bergung, Feststellung des Verlustes eines Trübungsmessgerätes, Suche |
| 22.08.2008 | Deinstallation der Kamera, Begehung des Untersuchungsgebietes zur Suche des Trübungsmessgerätes, Versuche zur Ermittlung der Sichttiefe, Sedimentprobenentnahme für Laborversuche, Entnahme von Schwebstoffproben |
| 24.09.2008 | Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten, ADV-Messungen, Videoaufnahmen, Entnahme weiterer Sedimentprobenentnahme für Laborversuche |
| 25.09.2008 | Fächerecholotvermessung, Entnahme von Schwebstoffproben |
| 06.11.2008 | Wartung der Messgeräte, Auslesen von Daten, Entnahme von Schwebstoffproben, magnetisch-induktive Strömungsmessungen während des einsetzenden Flutstroms |
| 07.11.2008 | Fächerecholotvermessungen wegen unsichtigen Wetters abgebrochen |
| 17.12.2008 | Bergung der Messgeräte und Tonnen, manuelle DGPS-Vermessung |

Nach einer längeren Schlechtwetterphase von Anfang November bis Mitte Dezember wurden die Messgeräte und Tonnen am 17.12.2008 geborgen. Eine WIDL-Drucksonde sowie eine eigenkonstruierte optische Backscattersonde wurden installiert und sollen bis ca. zum März in einem Langzeittest Daten aufzeichnen. Die Position der Sonden sowie die Lage der Einfahrt zur Neufelder Rinne wurden mit einem DGPS-Rover eingemessen.

2.3 Stationäre Messungen

Wie auch in der vorangegangenen Phase des Projektes, wurden an jeder Messposition jeweils ein ADCP-Gerät, ein Trübungsmessgerät (ARGUS Surface Meter - ASM) sowie zwei Drucksonden installiert. In Abbildung 3 ist die Installation der Messgeräte im Untersuchungsgebiet dargestellt. Neu im Vergleich zur Phase 2 des Projektes im Jahr 2007 ist die Befestigung von jeweils zwei Drucksonden des Instituts für Wasserbau am Rahmen des ADCP-Trägers mit Hilfe dafür erstellter Halterungen. Bei jeder Wartung der Messgeräte wurde die exakte Lage aller Sonden erneut eingemessen. Dies diente zum einen der späteren wasserstandsabhängigen Auswertung der Messdaten, zum anderen dem Auffinden der Geräte im Falle der Überlagerung mit Sedimenten. Dies gilt insbesondere für die ADCP-Geräte.



Abbildung 3: Installation der Messgeräte im Untersuchungsgebiet

Die Koordinaten der Positionen, an denen die stationären Messungen im Jahre 2008 durchgeführt wurden und die in Abbildung 2 visualisiert sind, sind in Tabelle 2 aufgeführt. Dabei können die Standorte in drei Kategorien eingeordnet werden.

Die Position 13 liegt nordwestlich der Neufelder Rinne auf höher gelegenen Flächen des Neufelder Watts. Im Jahr 2007 waren in diesem Bereich neben dem Standort 13 die Positionen 11 und 12 installiert. Dabei wiesen alle Standorte gering zeitversetzt nahezu die gleichen Messergebnisse auf. Position 13 liegt ca. 300 m von der Neufelder Rinne entfernt. In größerer Umgebung gibt es keinen nennenswerten Prielverlauf, so dass die Position auf einer nahezu ebenen Wattfläche installiert ist, auf der nur sehr geringe morphologische Veränderungen im Laufe des Jahres 2008 auftraten.

Tabelle 2: Koordinaten der Messpositionen

| Position | Rechtswert | Hochwert | Höhe [m NN] ¹ |
|----------|------------|-----------|--------------------------|
| 13 | 3.494.751 | 5.971.210 | 0,39 |
| 17 | 3.494.910 | 5.970.831 | -0,40 |
| 15 | 3.495.059 | 5.970.522 | -0,33 |

Position 17 liegt an der südöstlichen Böschung der Neufelder Rinne. Durch die Verschiebung der Rinnenachse in diesem Bereich, kann kein unmittelbarer Vergleich der Lage mit den Positionen 1 bis 5 des Messquerschnittes des Jahres 2006 erfolgen. Im Jahr 2006 lag Position 3 am südlichen Ende des Messquerschnittes und entspricht am ehesten der jetzigen Position 17.

Position 15 liegt ca. 360 m südsüdöstlich von der Position 17 auf dem Neufelder Sand. Gegenüber der vorangegangenen Projektphase wurde die Lage der Position 15 geringfügig verändert. Allgemein traten in diesem Bereich größere morphodynamische Aktivitäten auf. Ab dem Frühjahr überzog eine bis zu 20 Zentimeter dicke Schicht sehr schwach konsolidierter Sedimente den festeren Wattboden. Teilweise traten prielähnliche Strukturen auf. Um zu vermeiden, dass die Messgeräte in solch einer Struktur installiert werden und sehr schnell versanden, wurde die Position 15 leicht versetzt. Im Jahr 2007 lag zusätzlich die Position 8 in diesem Bereich.

2.4 Fächerecholotvermessungen

Zwischen Februar und Dezember wurde die Bathymetrie der Neufelder Rinne und der unmittelbar angrenzenden Wattflächen insgesamt 7 mal vermessen. Zweimal mussten die Messungen wegen starken Wellenganges bzw. unsichtigen Wetters abgebrochen werden. Als Grenzkriterium konnten Windgeschwindigkeiten von 10 bis 12 Knoten bestätigt werden; eine Abhängigkeit von der Windrichtung muss jedoch auch weiterhin beachtet werden. Gerade bei Winden aus östlichen Richtungen mit Geschwindigkeiten von mehr als 10 Knoten und einsetzendem Flutstrom ergeben sich welleninduziert zu starke Bootsbewegungen, die qualitative Messungen verhindern. Sinnvoll ist es, Messungen ab einer Wassertiefe von 1,50 m durchzuführen. Dementsprechend eng ist das Zeitfenster, in dem Messungen in der Neufelder Rinne sowie insbesondere auf den Wattflächen durchgeführt werden können.

Während einer Messung wurde stets versucht, den Verlauf der Neufelder Rinne, den Übergangsbereich zu tieferem Wasser und die Kanten der Neufelder Rinne zu vermessen. Aufgrund der hohen Dynamik der Rinne war es nicht möglich, immer den gleichen Bereich abzudecken. Vielmehr musste der stattfindenden Verschiebung gefolgt werden. So war es allerdings möglich, die Bewegungen der Rinne zu dokumentieren.

¹ Angegeben ist die Höhe der Wattoberkante unmittelbar am ASM-Gerät

3 Fortschreibung des Messkonzeptes

Bereits in Phase 0 des Projektes wurde ein Messkonzept erstellt, in dem die Messgeräte sowie die möglichen Einstellungen beschrieben wurden. Im Laufe des Einsatzes im Neufelder Watt wurde dieses Messkonzept fortgeschrieben. Erforderliche Änderungen der Gerätekonfigurationen wurden ebenso dokumentiert wie aufgetretene Probleme und Fehler der Messgeräte sowie deren Behebung. Die jeweils zu einer Messreihe gehörenden Geräteeinstellungen sind den Metadaten zu entnehmen. Im Folgenden sind nur die Änderungen und Ergänzungen vermerkt, die sich im Vergleich zu den Phase 1 und 2 im Laufe des Jahres 2008 ergeben haben. Für eine ausführliche Beschreibung der Messgeräte sowie deren Handhabung und Einstellungen sei an dieser Stelle auf die dem Auftraggeber vorliegenden Abschlussberichte der Phasen 0 und 1 (Kapitel 3) verwiesen.

3.1 Strömungsmessungen

Der Einsatz der im Laufe der Phase 2 des Projektes entwickelten leichten und mobilen Gerätehalterungen für die ADCP-Geräte hat sich auch während der Messungen im Jahr 2008 bestens bewährt. In der Regel wurde die Halterungen mitsamt Gerät in einer waagerechten Lage angetroffen. Geringe Schrägstellungen oder Sedimentüberdeckungen konnten relativ schnell behoben werden.

Ein am 24.06.2008 installierter Satz Batteriepacks hatte nur eine geringe Lebensdauer von weniger als 3 Monaten. Dies entspricht zwar in etwa dem vom Hersteller angegebenen Zeitraum, die bisher gewonnenen Erfahrungen zeigten aber, dass die Batterien gerade im Sommer in der Regel deutlich länger halten. Falls die Batteriespannung während einer Messung unter die mindestens notwendige Spannung sinkt, bricht die Messung ab, ohne einen Dateiabschluss zu erzeugen. In diesem Fall können die Daten nur ausgelesen und weiterverwendet werden, wenn eine externe Energieversorgung oder eine neue Batterie eingesetzt wird und die Daten über die serielle Schnittstelle mit Hilfe der mitgelieferten RDI-Software ausgelesen werden. Ein Auslesen über die PCMCIA-Speicherkarte funktioniert in diesem Fall nicht. Des Weiteren wurde festgestellt, dass einige Notebooks nicht den erforderlichen Strom aufbringen, um über die serielle Schnittstelle einen ausreichenden Initialisierungsimpuls zum Ansprechen des Gerätes senden zu können. Im Allgemeinen wird daher die Verwendung eines Desktop-PC's empfohlen, zumindest aber ein Netzanschluss des verwendeten Notebooks.

3.2 Trübungsmessgeräte

Beim Einsatz der Trübungsmessgeräte ASM ergaben sich im Berichtsjahr 2008 keine Änderungen zu den Phasen 1 und 2 des Projektes. An den Positionen, an denen es möglich war, wurden die 1,5 m langen Stangen zur Halterung der Geräte mit Hilfe einer Pumpe eingespült. An Positionen, die mit dem Boot auch bei Tidehochwasser nicht erreichbar waren, wurden die Stangen eingerüttelt bzw. -gedrückt. Die im Sommer 2007 erneuerten Opferanoden sind noch in einem guten Zustand. Im Laufe der Messungen im Jahre 2008 mussten einige Akkus erneuert werden, da ihre Leistung stark nachgelassen hatte.

3.3 Drucksonden

Die eigens entwickelten WIDL-Drucksonden (Winkelbauer-Daten-logger), die mit einer Messfrequenz von 10 Hz aufzeichnen, haben sich über den Einsatz im Jahr 2008 bewährt und in der Regel über den gesamten jeweiligen Messzeitraum von bis zu 7 Wochen Daten aufzeichnen können. Insgesamt ist eine autarke Funktionsweise über einen Zeitraum von etwa 3 Monaten möglich, wobei sich Unsicherheiten hinsichtlich dieser Prognose mit einer Temperaturabhängigkeit der Akkus erklären lassen. Nur vereinzelt kam es bei einigen Sonden zum Abbruch der Messungen nach wenigen Tagen oder bereits unmittelbar nach dem Start der Sonde. Diese Fehler waren jeweils auf durch die Speicherkarten induzierte Spannungsspitzen zurückzuführen. Durch die Verwendung von zwei Sonden an einem Standort wurde ein redundantes System geschaffen, so dass Messausfälle minimiert werden konnten. An der Untersuchung des Einflusses der Speicherkarten wird weiter gearbeitet.

3.4 Fächerecholot

Beim Einsatz des Fächerecholotes an Bord des Forschungsbootes Nekton ergaben sich gegenüber dem Jahr 2007 keine nennenswerten Änderungen. Ein Update der verwendeten Vermessungssoftware Hypack wird in den ersten Monaten des Jahres 2009 vorgenommen. Hauptziel ist die Verbesserung der parallelen Peilung und Strömungsmessung.

Während der Vermessung im Neufelder Watt trat weiterhin in der Mittagszeit wegen tiefstehender Satelliten wiederholt der Verlust der für die Vermessung erforderlichen Genauigkeit auf. Für diese Zeiträume mussten die Messungen unterbrochen werden, konnten jedoch nach 30 bis 45 Minuten wieder aufgenommen werden.

4 Auswertung der Messergebnisse

4.1 Veränderungen der Bathymetrie

4.1.1 Analyse anhand von Fächerecholotaufnahmen

Wie im Kapitel 2.4 beschrieben, erfolgten entsprechende Fächerecholotvermessungen in der Neufelder Rinne und an den angrenzenden Wattflächen. Da der Verlauf der Neufelder Rinne sich auch während des Jahres 2008 verschob, verschoben sich auch die Vermessungsflächen und liegen somit nicht deckungsgleich übereinander. In Abbildung 4 ist die aufgezeichnete Bathymetrie vom 23.10.2007 (in m NN) zu sehen, die einen guten Überblick über die in allen Projektphasen untersuchte Fläche gibt. Im Folgenden sind die Ergebnisse der verschiedenen Vermessungen des Jahres 2008 dargestellt. Im Anschluss daran folgt der Vergleich der zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Bathymetrien anhand von Höhendifferenzbildern, Längs- und Querschnitten. Die Lage der Profile ist in der Abbildung 4 dargestellt. Das Profil „Einfahrt“ verdeutlicht die Migration dieses Bereiches der Rinne. Das Profil „Wattkante“ zeigt die Entwicklung des Überganges zu tieferem Wasser. Des Weiteren wurden Entwicklungen der Neufelder Rinne in einem Längsschnitt sowie an zwei Querschnitten im mittleren („Mitte“) und im hinteren Bereich („Auskolkung“) visualisiert. Die Profile wurde analog zu den vorangegangenen Projektphasen erstellt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

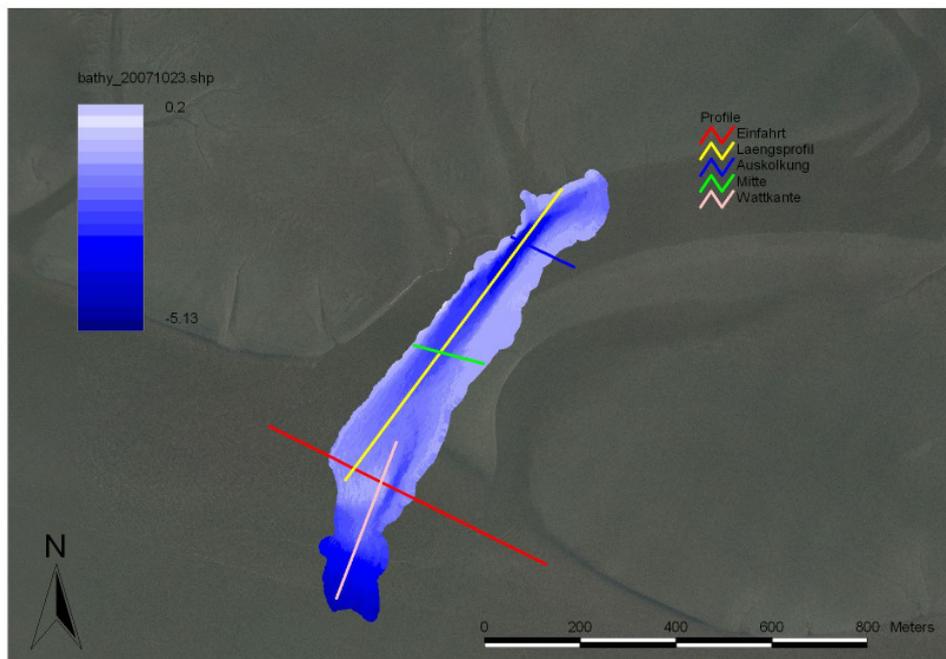


Abbildung 4: Lage der Profile

Die Abbildungen 5 bis 10 zeigen die Ergebnisse der Fächerecholotvermessungen zu verschiedenen Zeitpunkten des Jahres 2008. Bei der Darstellung wurde immer exakt der gleiche Bildausschnitt gewählt, um die Aufnahmen besser miteinander vergleichen zu können. Die zuvor beschriebenen Profile sind in den folgenden Abbildungen in weiß weiterhin als Bezugslinien eingezeichnet, um Veränderungen besser erkennen zu können und um die Lesbarkeit der späteren Profildarstellungen zu vereinfachen.

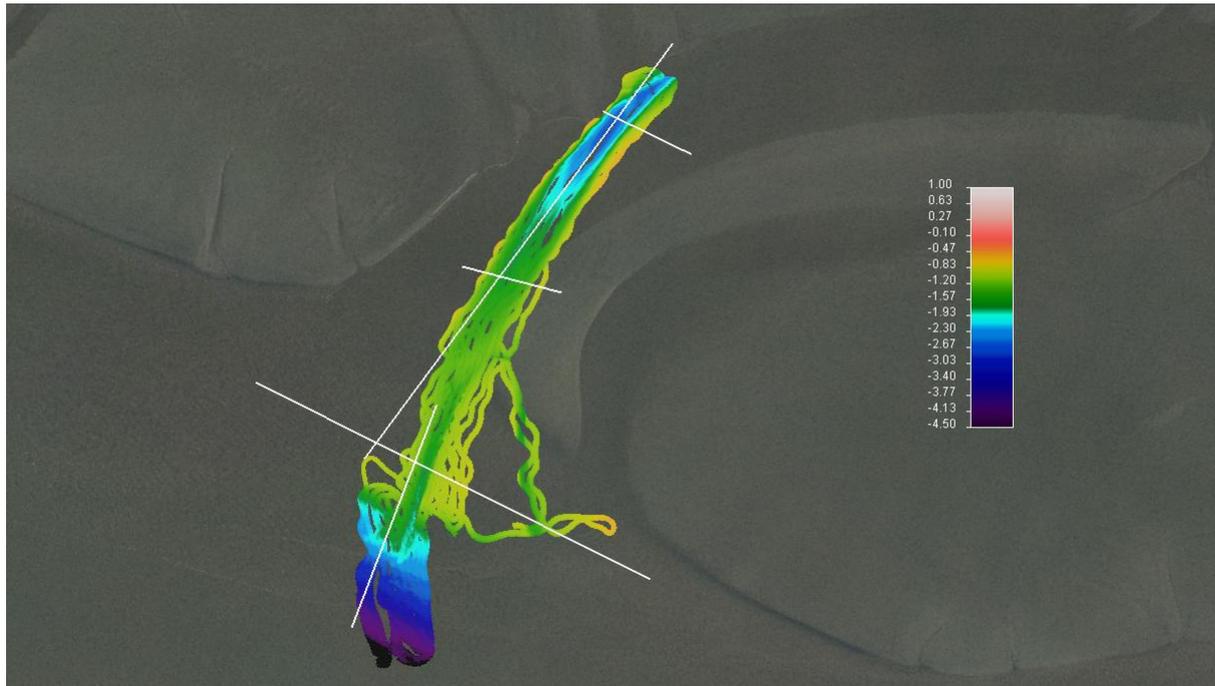


Abbildung 5: Fächerecholotaufnahme vom 11.02.2008

Abbildung 5 zeigt die bathymetrische Vermessung vom 11.02.2008. Der Verlauf des Hauptteils der Neufelder Rinne in nordnordöstliche Richtungen ist deutlich zu erkennen. Am Ende dieses Teils befindet sich weiterhin die Auskolkung, welche aus der Einmündung des von Norden kommenden Priels resultiert. Die Sohle der Auskolkung liegt bei NN -3,0 m und damit nicht mehr so tief wie zum gleichen Zeitpunkt des Vorjahres (NN -4,5 m). Nordöstlich dieser Stelle knickt die Rinne nach Osten ab. Die Wassertiefen reduzieren sich dabei deutlich. Im südöstlichen Anschluss an den Hauptteil der Rinne beginnt der Einfahrtsbereich. Dieser folgt dem Verlauf des Hauptteils und knickt nicht ab. Im Einfahrtsbereich ist die Rinne bis auf weniger als 20 m zusammengeschnürt. Die östliche Böschung wird durch eine steile Abbruchkante gebildet (Abb. 6). Auffällig in diesem Bereich ist das Ebbdelta der Rinne. Die ansonsten parallel zur Wattkante verlaufenden Tiefenlinien sind weit nach Südsüdwesten vorgeschoben. Während der Ebbe aus der Rinne ausgetragenes Sediment lagert sich aufgrund der Profilaufweitung hier ab.

Die Aufnahme aus dem Februar 2008 zeigt zudem einen alten Arm der Einfahrt. Dieser zweigt anschließend an den Hauptteil der Rinne von diesem nahezu in einem Nord-Süd-Verlauf ab. Die Strömungsgeschwindigkeit in diesem alten Prielteil war vor Ort wesentlich geringer als in der neuen Ausfahrt. Der alte Arm verlandet langsam. Diese Aufnahme stützt die im Jahr 2007 gewonnenen Erkenntnisse: Die Einfahrt zur Neufelder Rinne unterliegt einer (süd-)ostwärts gerichteten Verschiebung, die sich so lange fortsetzt, bis die Einfahrt in einem sehr spitzen Winkel vom Hauptteil der Rinne abzweigt. Dann wird der Prallhang der Ebbströmung im Hauptteil der Rinne durchstoßen und eine neue, wesentlich weiter westlich liegende Einfahrt entsteht. Der alter Arm der Einfahrt wird nur noch schwach durchströmt und verlandet langsam. Die neue Einfahrt beginnt, sich wieder ostwärts zu verschieben.



Abbildung 6: Abbruchkante am Ostufer der Einfahrt zur Rinne; Blickrichtung SSW

In der Aufnahme vom 23.04.2008 sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Der tiefere Bereich, der sich an die Auskolkung im Hauptteil der Rinne anschließt hat sich weiter nach Südwesten ausgedehnt. Die Prielachse hat sich nach Nordwesten verlagert, beide Ufer sind dieser Bewegung gefolgt. Die Einfahrt befindet sich weiter östlich als noch im Februar, allerdings nicht so weit, wie der alte Arm der Einfahrt sich am 11.02.2008 befand. Die Sohliefen der Einfahrt lagen im April mit bis zu NN -2,00 etwas tiefer als im Februar. Die Anbindung vom Einfahrtbereich zum Hauptteil der Rinne ist nicht geradlinig, sondern mit zwei nahezu 90° Kurven ausgebildet. Der Verlauf der Rinne im Einfahrtbereich ist durch steile Böschungen gekennzeichnet (Abb. 7).

Am 06.05.2008 ist dieses Bild in ähnlicher Form erhalten. Die Kurven sind allerdings aufgeweicht und es besteht eine flache geradlinige Verbindung zwischen Einfahrtbereich und Hauptteil. Im Vergleich zum April ist die Einfahrt ein wenig nach Osten verschoben. Der Prallhangbereich des Ebbstroms ist im Hauptteil der Rinne stärker ausgeräumt als noch im April. Die Sohliefen in der Einfahrt haben abgenommen (Abb. 8).

Die Fächerecholotvermessung vom 15.07.2008 lieferte wegen starken Wellenganges keine guten Daten. Zudem musste die Vermessung später bei weiter auffrischendem Wind abgebrochen werden. Dennoch lässt Abbildung 9 ein paar interessante Schlüsse zu. Der tiefere Bereich um die Auskolkung herum hat sich weiter nach Südwesten ausgedehnt. Der Hauptteil der Neufelder Rinne hat sich um einen gedachten Drehpunkt, der sich in etwa an der tiefsten Stelle der Auskolkung befindet, im Uhrzeigersinn gedreht. Dies bedeutet, dass die Prielachse südwestlich des Drehpunktes nach Nordwesten verschoben wurde. Beide Böschungen folgten ihr. Nordöstlich des Drehpunktes bewirkte die Drehung eine südwestliche Verschiebung der Prielachse. Über den Verlauf der Einfahrt können nur Vermutungen angestellt werden. Teilweise sind der Verlauf der Einfahrt sowie das Ebbdelta sichtbar. Sie decken sich in etwa mit der Lage der Einfahrt auf der nächsten bathymetrischen Aufnahme. Insgesamt deutet die Vermessung vom 15.07.2008 auf größere Veränderungen hin, die zwischen dem 06.05.2008 und dem 15.07.2008 stattgefunden haben müssen.

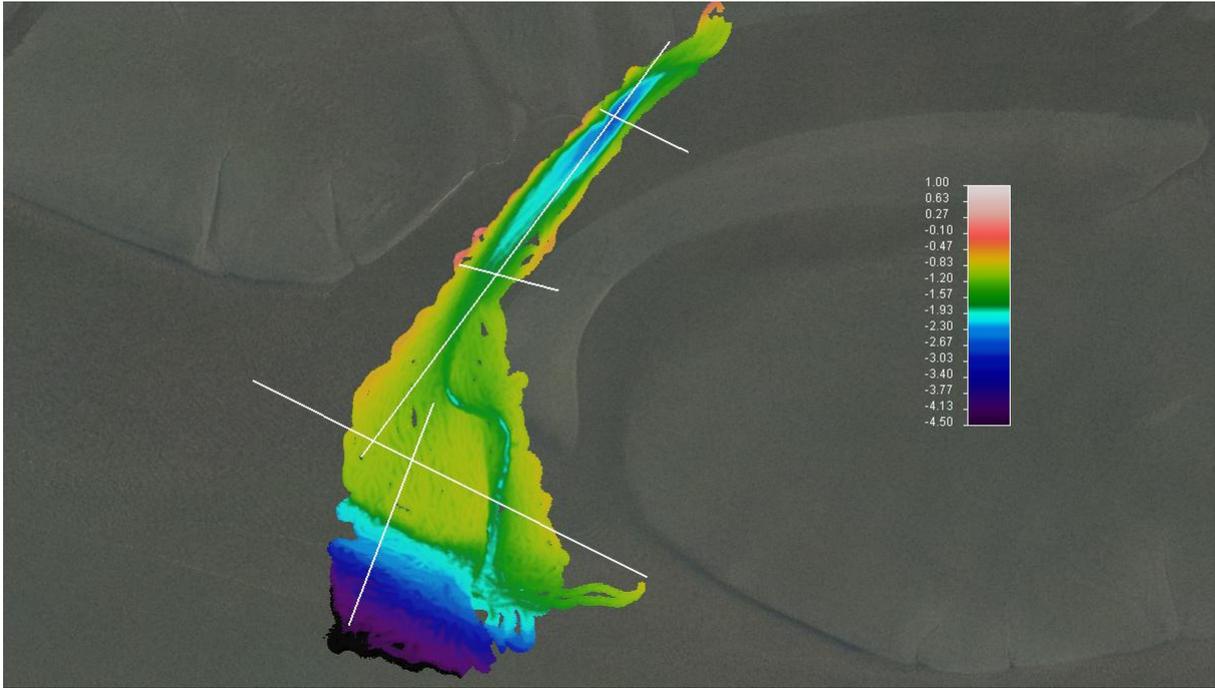


Abbildung 7: Fächerecholotaufnahme vom 23.04.2008

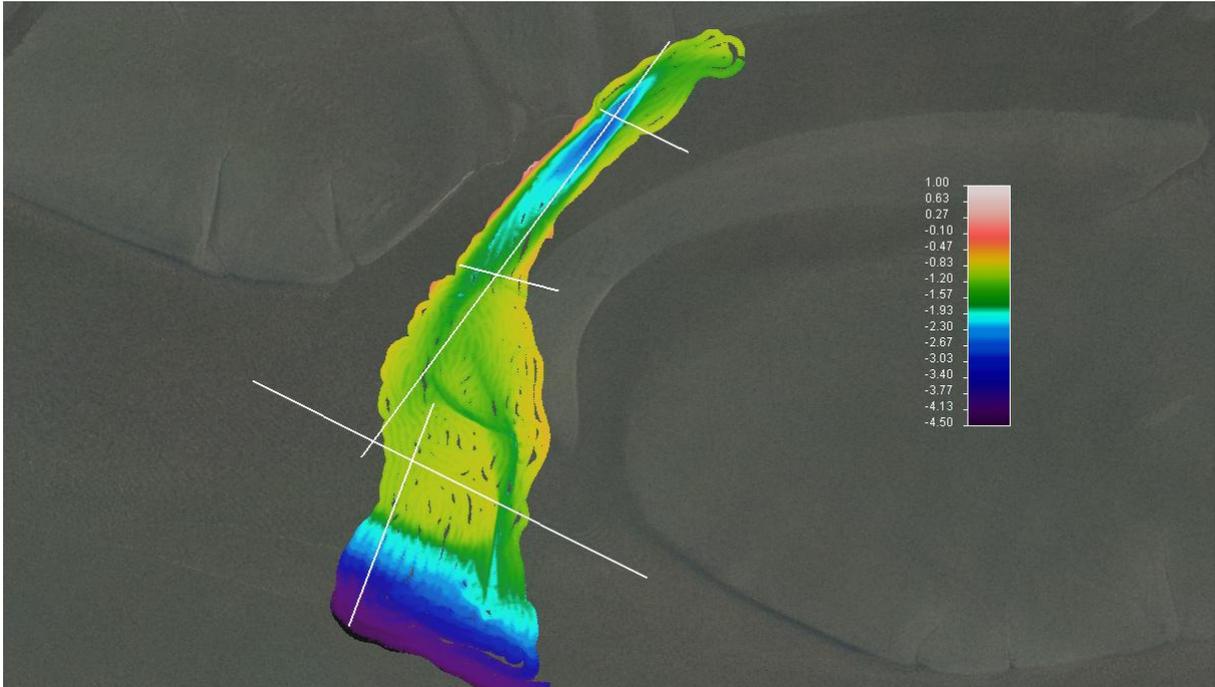


Abbildung 8: Fächerecholotaufnahme vom 06.05.2008

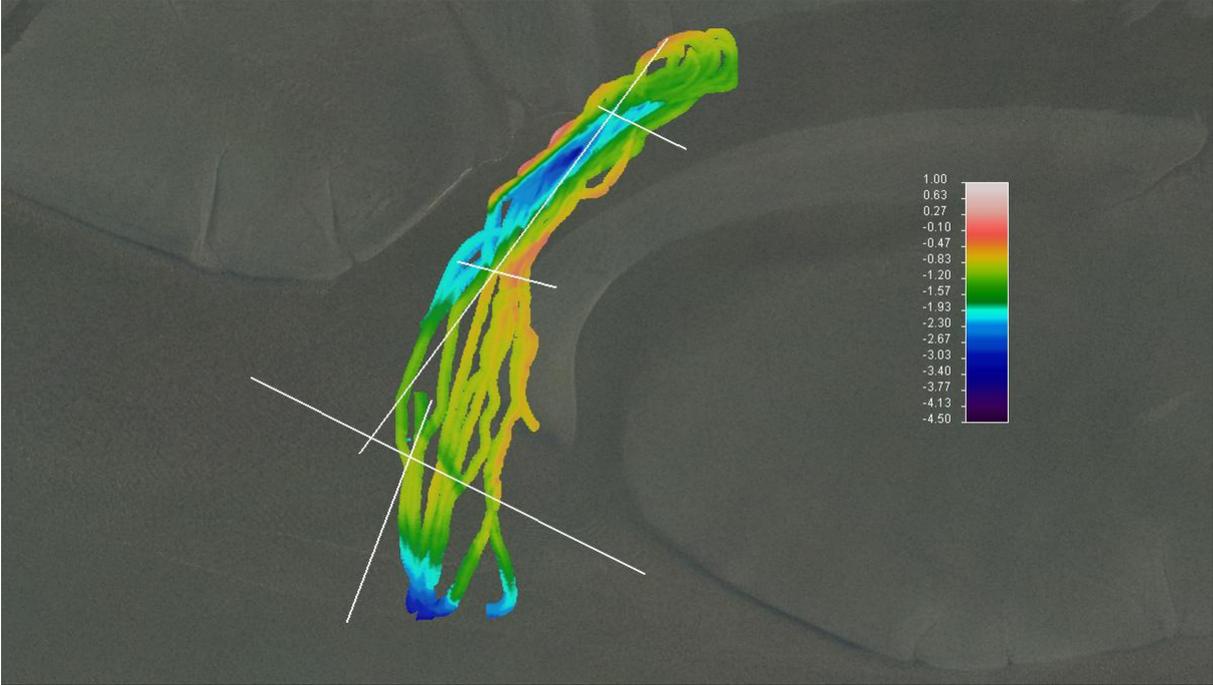


Abbildung 9: Fächerecholotaufnahme vom 15.07.2008

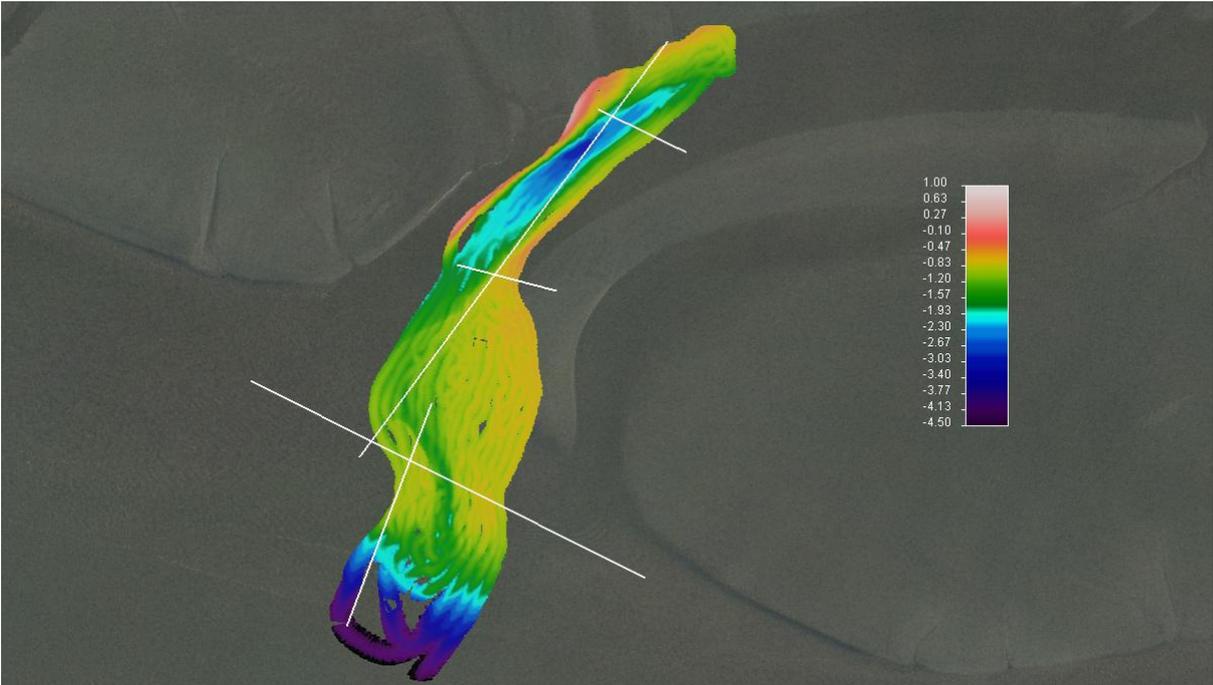


Abbildung 10: Fächerecholotaufnahme vom 21.08.2008

Zwischen dem 15.07.2008 und 21.08.2008 (Abb. 10) lassen sich nur wenige Veränderungen ausmachen. Vielmehr lassen sich viele Vermutungen aus der Aufnahme vom Juli auf der Aufnahme aus dem August bestätigen. Die Achse des Hauptteils der Neufelder Rinne ist wie beschrieben gedreht. Der tiefere Teil um die Auskolkung herum ist ausgedehnter als noch im Mai. Die Einfahrt liegt weiter westlich. In der Zeit von Mai bis August (Juli) muss also ein Durchstoßen des Prallhanges mit einer Ausbildung einer neuen Einfahrt sowie dem Verlanden des Altarms stattgefunden haben. Zwischen Einfahrtbereich und Hauptteil der Rinne hatte sich bis zum 21.08.2008 eine Barre gebildet, so dass bei Niedrigwasser keine Verbindung der Neufelder Rinne zum tieferen Wasser bestand. Am Prallhang des Hauptteils, der mit der Fächerecholotvermessung nicht abgedeckt wurde, nehmen die Sohlhöhen ebenfalls zu, so dass auch hier keine Verbindung besteht. Dies konnte bei Niedrigwasser vor Ort untersucht werden.

Die Fächerecholotaufnahme vom 25.09.2008 zeigt, dass sich die Drehung ein wenig fortgesetzt hat (Abb. 11). Die Nordwestböschung im Hauptteil hat sich weiter nach Nordwesten vorgeschoben. Der tiefere Teil der Rinne hat sich weiter ausgedehnt. Im Einfahrtbereich ist im Vergleich zum August eine Verschiebung nach Osten eingetreten. Insgesamt zeichnet sich der Verlauf insbesondere der Einfahrt deutlicher abgegrenzt ab als am 21.08.2008. Der Prallhangbereich wurde weiter ausgeräumt.

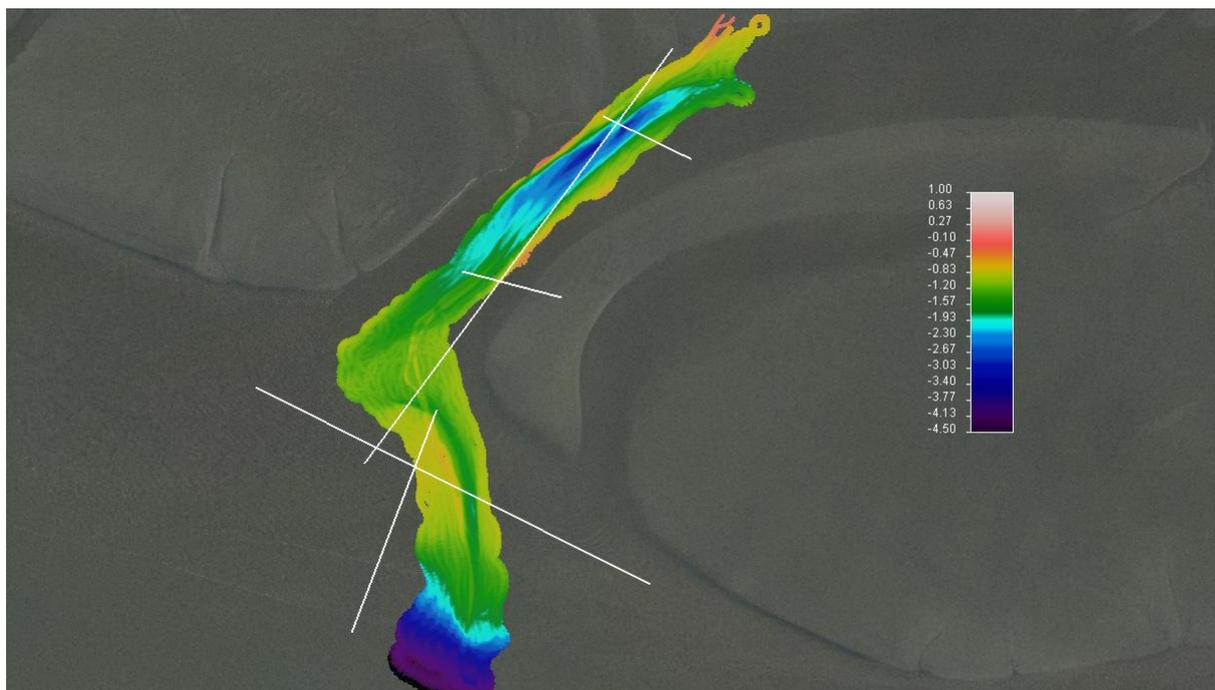


Abbildung 11: Fächerecholotaufnahme vom 25.09.2008

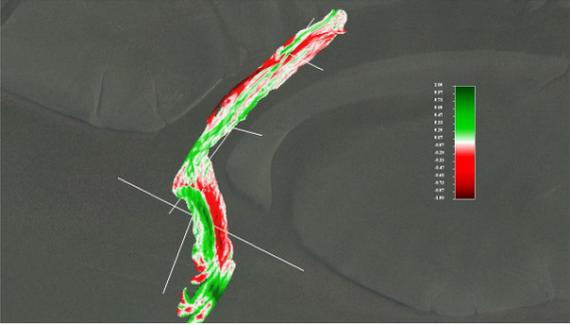
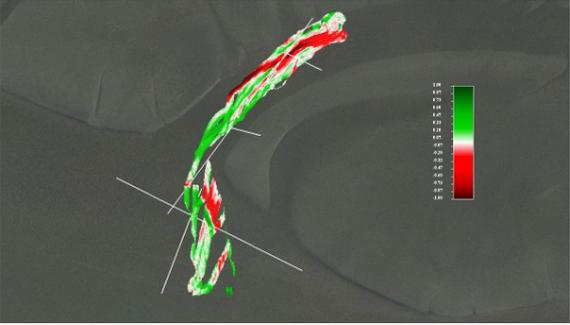
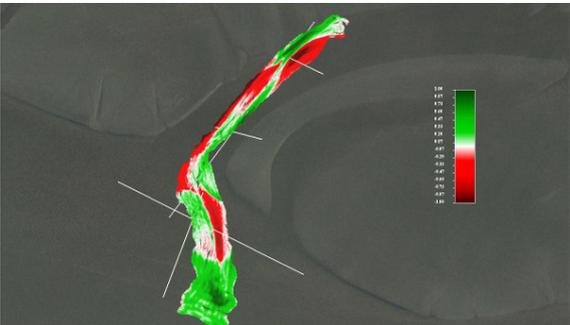
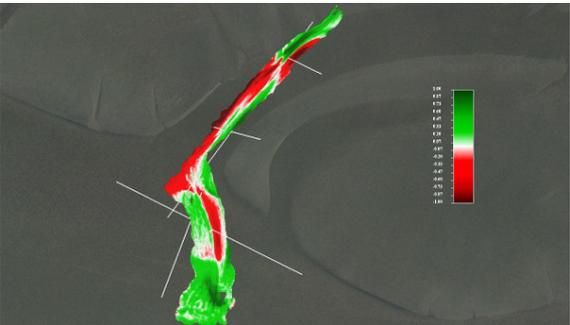
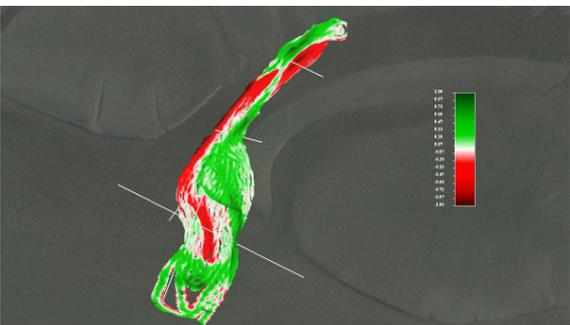
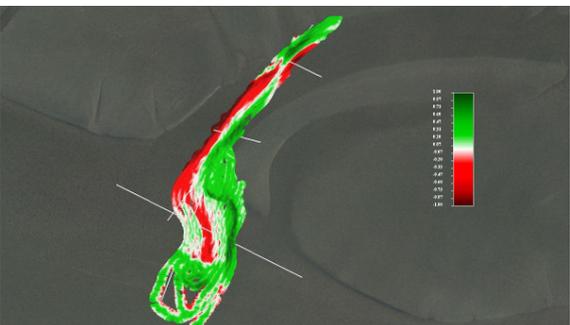
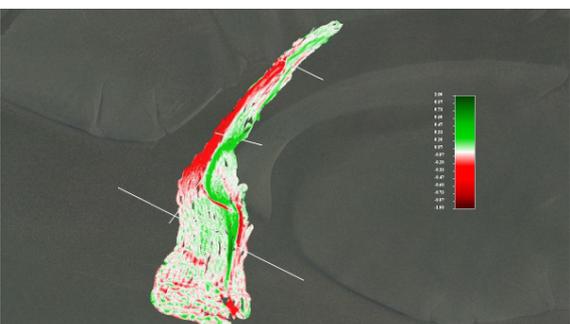
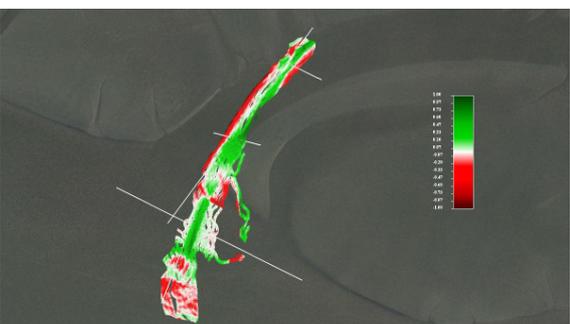
Einige der beschriebenen Entwicklungen über das Jahr 2008 sind in der entsprechenden Höhendifferenzendarstellung deutlicher zu erkennen. Tabelle 3 zeigt die Höhenunterschiede der jeweils sich überschneidenden vermessenen Flächen. In grün ist Sedimentation, in rot Erosion dargestellt. Die Skala reicht dabei von +1 m (Sedimentation) bis -1 m (Erosion).

Alle Höhendifferenzendarstellungen des Jahres 2008 zeigen Erosion (rot) an der nordwestlichen Böschung des Hauptteils der Neufelder Rinne und Deposition (grün) an der südöstlichen Böschung. Im Jahr 2007 war diese Entwicklung genau umgekehrt. Nordöstlich der Auskolkung (des Drehpunktes) kehrt sich dieses um und das nördlich Ufer der Rinne rückt nach Süden vor, das südliche Ufer erodiert. Dieses verdeutlicht die oben beschriebene Drehung. Die größten Veränderungen sind zwischen den Aufnahmen vom 06.05.2008 und dem 21.08.2008 zu sehen. Die aus den wenigen Daten vom 15.07.2008 ableitbaren Informationen weisen jedoch darauf hin, dass diese Veränderung im wesentlichen schon bis zu diesem Zeitpunkt stattgefunden haben. Weitere größere Veränderungen ergaben sich zwischen dem 11.02.2008 und dem 23.04.2008, die sich aber aufgrund der geringen Schnittmenge der Peilungen dieser beiden Daten nicht anhand von Höhendifferenzendarstellungen erläutern lassen.

Die Verschiebung der Einfahrt lässt sich am besten nachvollziehen, wenn die jeweiligen Verläufe nicht zu stark voneinander abweichen. Dann verlaufen die Bereiche von Erosion und Deposition parallel. Südlich der aktuellen Einfahrt (roter Bereich) stellt sich das Ebbdelta als Deposition (grüner Bereich) dar. Südlich des vorherigen Verlaufes der Einfahrt (grüner Bereich) wurde das Ebbdelta bereits wieder erodiert (roter Bereich).

Die Abbildungen 12 bis 16 zeigen die oben beschriebenen Profile zu verschiedenen Zeitpunkten. In Abbildung 12 ist die Verschiebung der Prielachse im Einfahrtbereich der Neufelder Rinne zu erkennen. Zum Vergleich ist noch einmal das Profil vom 02.10.2007 dargestellt. Am 11.02.2008 liegt die Einfahrt etwa 20 m östlich davon. Dies bedeutet jedoch nicht, dass in der Zwischenzeit keine weiteren Veränderungen stattgefunden haben, wie weiter unten im näheren Vergleich mit den Daten der Jahre 2006 und 2007 zu sehen sein wird. Zusätzlich zur aktuellen Einfahrt vom 21. Februar ist der Altarm bei einer Distanz von etwa 500 m zu sehen. Bis zum 23. April ergibt sich eine ostwärtige Verschiebung der Einfahrt von 130 m. Die Tiefe bleibt in etwa konstant. Bis zum 06.05.2008 verschiebt sich die Einfahrt nur um ca. 20 m nach Osten. Bis zum 21.08.2008 hat dann bereits ein Durchstoß des Prallhanges stattgefunden. Die Einfahrt liegt etwa 80 m westlich der Einfahrt vom Mai und verlagert sich schon wieder Richtung Osten. Die Daten vom 15. Juli deuten darauf hin, dass die Einfahrt sich zu diesem Zeitpunkt an einer ähnlich Position befunden haben muss. Bis zum 25.09.2008 verschob sich die Einfahrt um weitere 40 m. Während eines Termins vor Ort am 6. November, zu dem wetterbedingt keine Peilung stattfinden konnte, existierte ein versandender Altarm des Priels bei einer Distanz von ca. 450 bis 480 m, der keine Verbindung mehr zum Hauptteil der Rinne hatte. Diese Position ergibt sich auch in etwa aus der extrapolierten Bewegungsrate zwischen dem 21.08 und dem 25.09.2008. Die aktuelle Einfahrt bildete im November ein neuer Durchstich deutlich weiter westlich. Eine kritische Position der Einfahrt scheint bei einer Distanz von 480 bis 500 m zu bestehen, wenn der Winkel zum Hauptteil der Rinne zu spitz wird. Im Jahr 2008 erfolgte dreimal ein neuer Durchstich mit einem neuen weiter westlich gelegener Verlauf (Februar, Mai/Juni, November).

Tabelle 3: Höhendifferenzdarstellungen

| | |
|---|--|
| <p>25.09.2008 – 21.08.2008</p> | <p>25.09.2008 – 15.07.2008</p> |
|  |  |
| <p>25.09.2008 – 06.05.2008</p> | <p>25.09.2008 – 23.04.2008</p> |
|  |  |
| <p>21.08.2008 – 06.05.2008</p> | <p>21.08.2008 – 23.04.2008</p> |
|  |  |
| <p>06.05.2008 – 23.04.2008</p> | <p>06.05.2008 – 11.02.2008</p> |
|  |  |

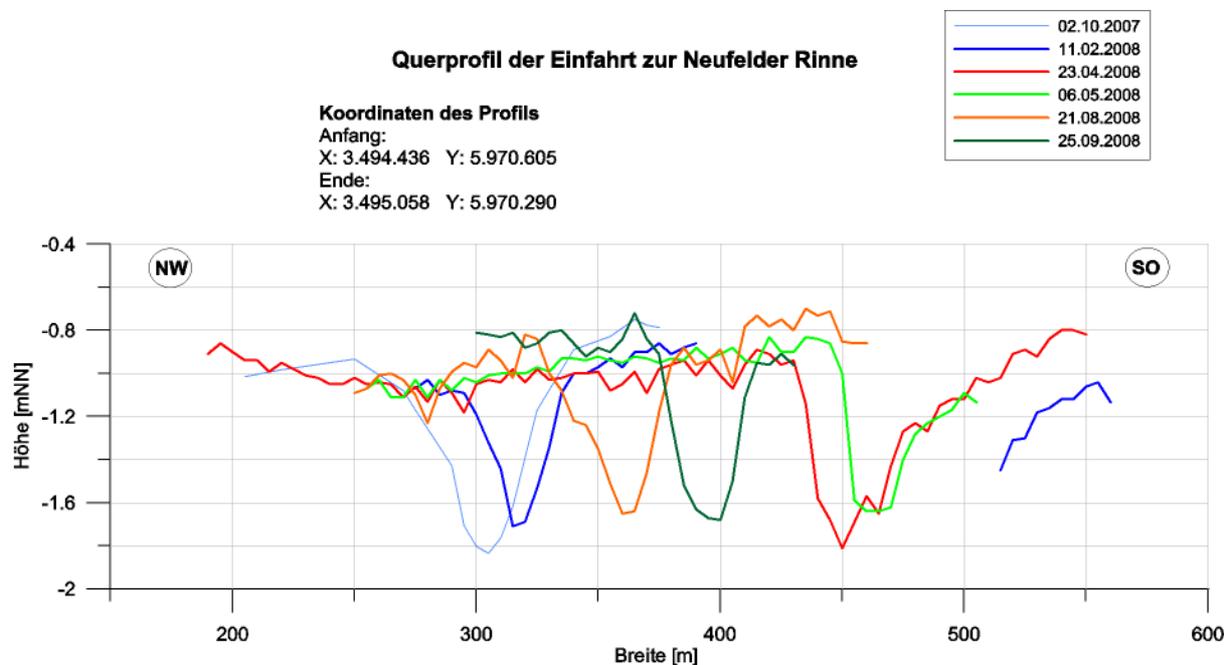
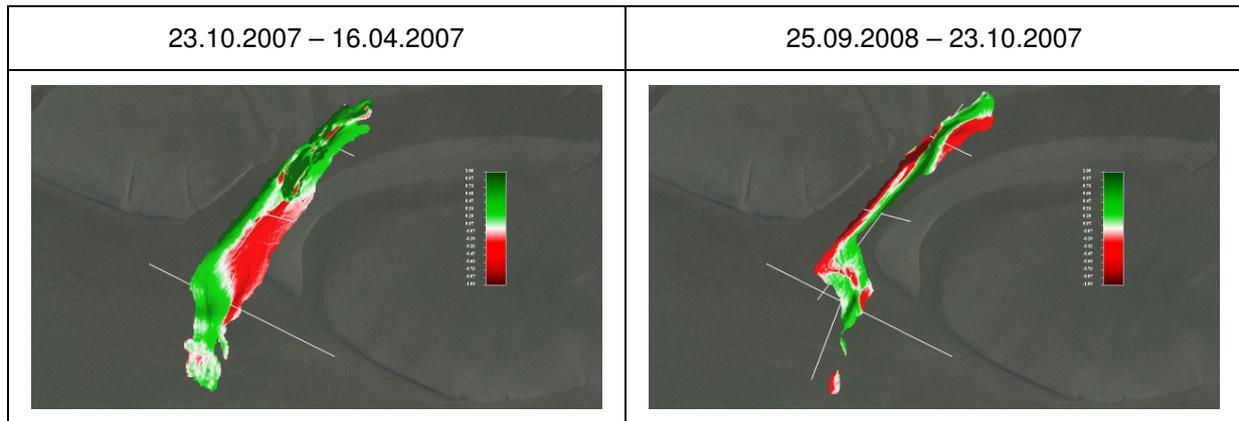


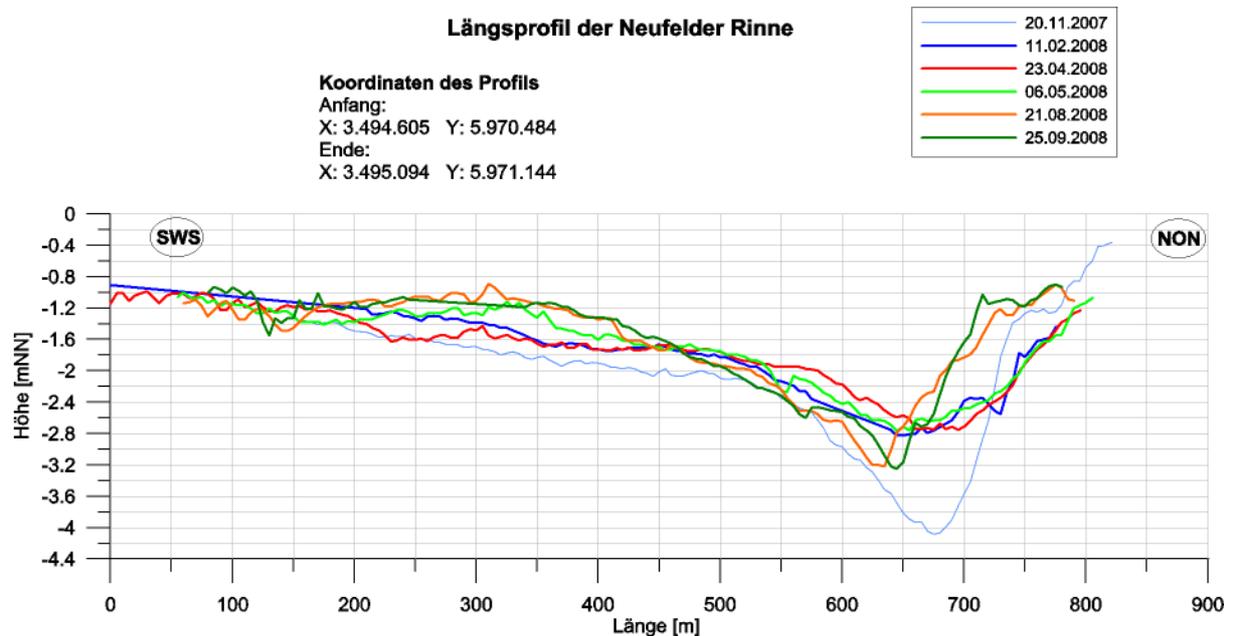
Abbildung 12: Querprofile der Einfahrt zur Neufelder Rinne

In Abbildung 13 ist das Längsprofil der Neufelder Rinne dargestellt. Die auffälligsten Änderungen sind im hinteren Bereich festzustellen, in dem das einmündende Prielsystem im Jahr 2007 eine tiefe Auskolkung hervorrief. Diese Auskolkung entwickelte sich bis zum Februar 2008 deutlich zurück, da auch das Prielsystem in seiner Ausprägung nicht mehr so stark vorhanden ist. Im weiteren Verlauf des Jahres rückte das nordwestliche Ufer gen Süden vor, wobei die deutlichsten Veränderungen zwischen Mai und August auftraten. Die im Mittelteil des Längsschnittes auftretenden ansteigenden Sohlhöhen sind auf die Verschiebung der Prielachse zurückzuführen.

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung des Profils auf Höhe der Auskolkung. Im Februar 2008 ist diese bereits ca. 1,5 m flacher als noch im November 2007. Im weiteren Verlauf des Jahres entwickelte das Nordufer ein flacheres Profil und die Auskolkung ging weiter zurück, bis ein normales Prielprofil mit einer tiefsten Stelle bei NN -2,5 m entstand.

In Abbildung 15 ist die Verschiebung der Prielachse im Hauptteil der Neufelder Rinne zu erkennen. Zwischen dem 20.11.2007 und dem 11.02.2008 reduzierte sich die Sohlhöhe um ca. 0,20 m, der Querschnitt wurde ein wenig eingeeengt und die Prielachse verlagerte sich um wenige Meter nach Südosten. Dann setzte eine Verschiebung in entgegengesetzte Richtung ein. Sie betrug bis zum 23.04.2008 ca. 25 m, bis zum 05.06. noch einmal 10 bis 12 Meter. Bis zum August betrug die Verlagerung noch einmal 10 bis 15 Meter. Zugleich vertiefte sich der Querschnitt wieder um ca. 0,20 m.

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung des Profils der Wattkante am Übergang zu tieferem Wasser. Hier konnten nur Profile berücksichtigt werden, die nicht im Einflussbereich der Einfahrt standen. Der deutlichste Unterschied besteht darin, dass das Profil unterhalb von NN -1,5 m vom Winter 2007 über Frühjahr 2008 bis zum Sommer 2008 immer steiler wird. In diesem Bereich geht scheinbar Material verloren. Ungefähr bei NN -2,0 m schneiden sich alle Profile. Der Bereich, in dem Sediment akkumuliert, ist allerdings nur klein. Weiter nördlich liegen die Profile des Jahres 2008 allesamt ca. 0,20 m unterhalb der Wattsohle vom November 2007. Bei genauerer Betrachtung liegt auch das Profil vom 20.11.2007 noch im Einflussbereich der Einfahrt. Zwar verläuft das Profil nicht unmittelbar durch diese, gerade aber in tieferen Bereichen ab NN -1,5 m spielt der Einfluss des Ebbdeltas eine Rolle für den Verlauf der Bathymetrie. Durch sedimentiertes Material liegt die Sohle an dieser Stelle höher als zu anderen Zeitpunkten, zu denen die Einfahrt weiter vom Profil entfernt ist. Die Erosion, die im Vergleich der Profile vom 20.11.2007 und dem 23.04.2008 zu erkennen ist, ist also auf die Verlagerung des Ebbdeltas der Neufelder Rinne zurückzuführen. Möchte man Aussagen zur Entwicklung des Wattsockels im Bereich des Neufelder Watts/Neufelder Sandes machen, muss ein Profil gewählt werden, das zu jeder Zeit in ausreichender Entfernung zur Neufelder Rinne liegt.



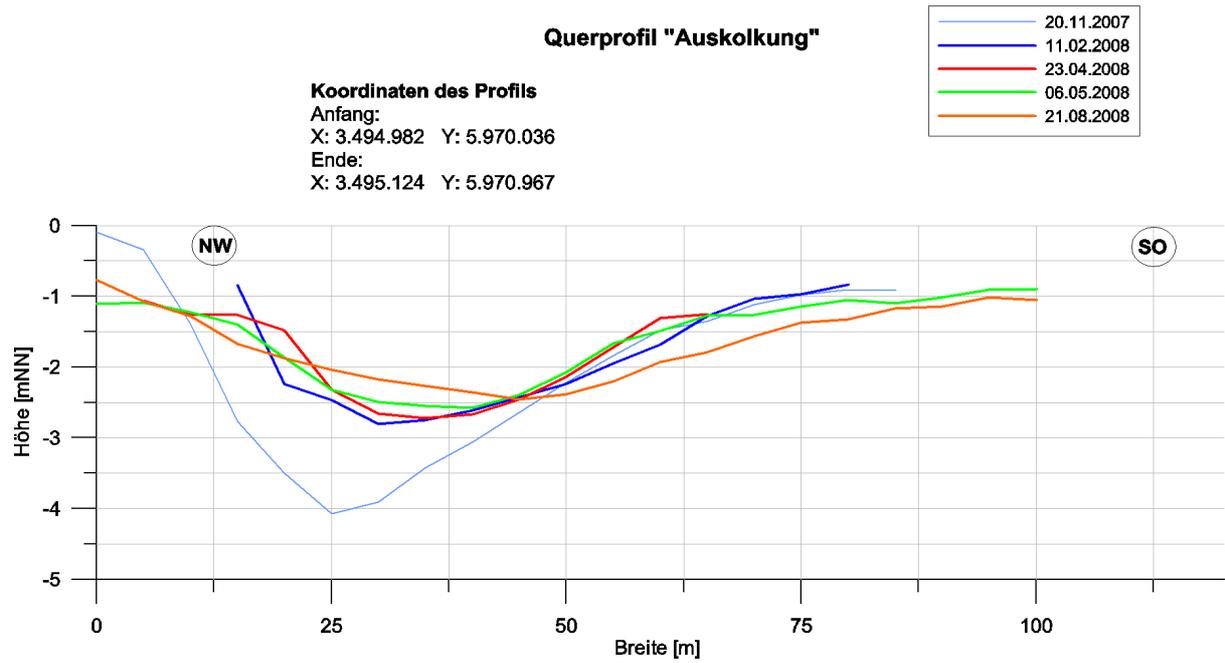


Abbildung 14: Querprofile an der Auskolkung im hinteren Bereich der Neufelder Rinne

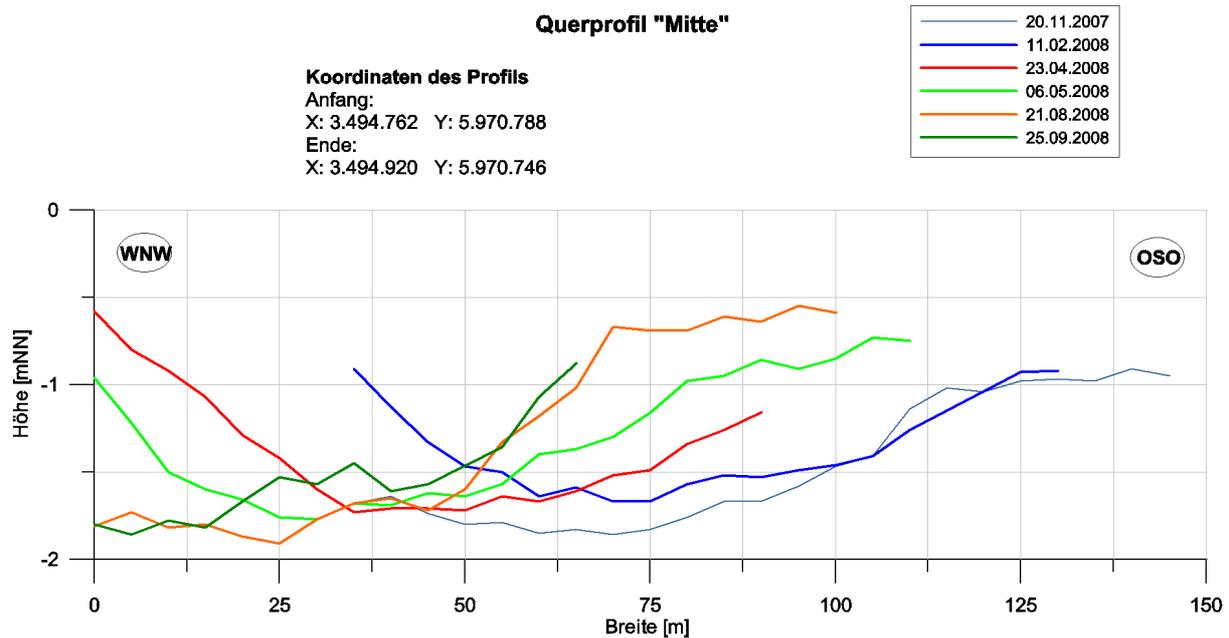


Abbildung 15: Querprofile in der Mitte Neufelder Rinne

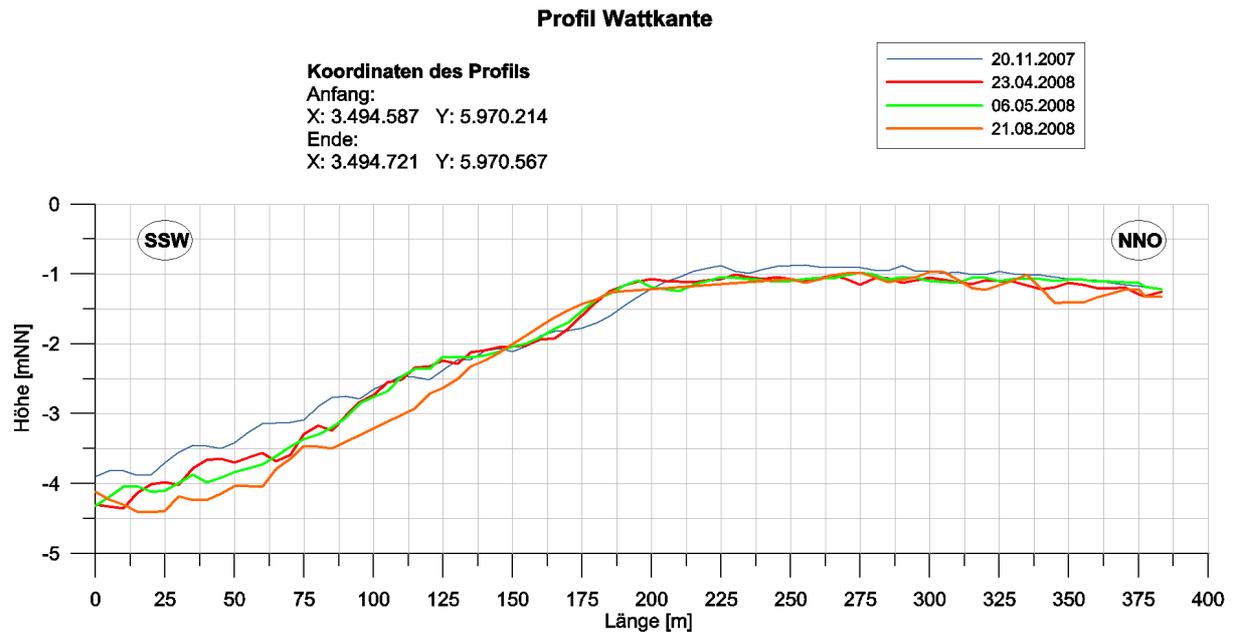


Abbildung 16: Profile an der Wattkante

4.1.2 Vergleich mit Messungen aus den Jahren 2006 und 2007

Um die eben beschriebenen Entwicklungen des Jahres 2008 im Untersuchungsgebiet mit denen der Jahre 2006 und 2007 vergleichen zu können, wurden weitere Profilvergleiche unternommen. In Abbildung 17 ist die Veränderung des Querprofils der Einfahrt zur Neufelder Rinne 2006 und 2007 dargestellt. Es fällt auf, dass die meisten Aufnahmen der Einfahrt aus dem Jahr 2008 wie oben beschrieben weiter östlich liegen als die der beiden vorangegangenen Jahre. Die Profile des Jahres 2006 liegen wesentlich weiter westlich. Nach dem 20.08.2007 fand ebenfalls ein Durchstich des Prallhanges mit Verlandung des Altarms statt. Auch hier lag die Einfahrt zuvor bei einer Distanz von ca. 450 bis 500 m. Durch die Verschiebung der Achse des Hauptteils der Neufelder Rinne nach Südosten von Sommer 2006 bis Winter 2007 werden unter Beibehaltung des kritischen Winkels zwischen Hauptteil und Einfahrt Positionen der Einfahrt möglich, die weiter östlich liegen als noch im Jahr 2006.

In Abbildung 18 sind die Querprofile an der Auskolkung im hinteren Bereich der Neufelder Rinne im Vergleich der Jahre 2006 und 2007 dargestellt. Zieht man Abbildung 14 zum Vergleich heran, ist zu erkennen, dass das Profil der Rinne mittlerweile wieder die Position eingenommen hat, die bereits Ende des Jahres 2006, bevor das von Norden einmündende Prielsystem sich stark ausweitete, bestand.

Um im Mittelteil der Neufelder Rinne Profile aus den Jahren 2006 bis 2008 miteinander vergleichen zu können, musste der oben verwendete Querschnitt ein wenig verlagert werden, charakterisiert aber weiterhin den gleichen Bereich. Abbildung 19 zeigt sämtliche hier verfügbaren Aufnahmen. Anhand der Profile von 2008 lässt sich die Rückverschiebung nach Nordwesten mit größeren Veränderungen zwischen Februar und April sowie Mai und August gut ablesen. Während des gesamten Jahres 2007 bis zum Februar 2008 konnte eine Südost-Verschiebung festgestellt werden. Die Profile des Jahres 2006 lagen allesamt weiter nordwestlich wobei am 25.09.2008 die Lage vom 03.11.2006 bis auf 20 m bereits wieder erreicht wurde.

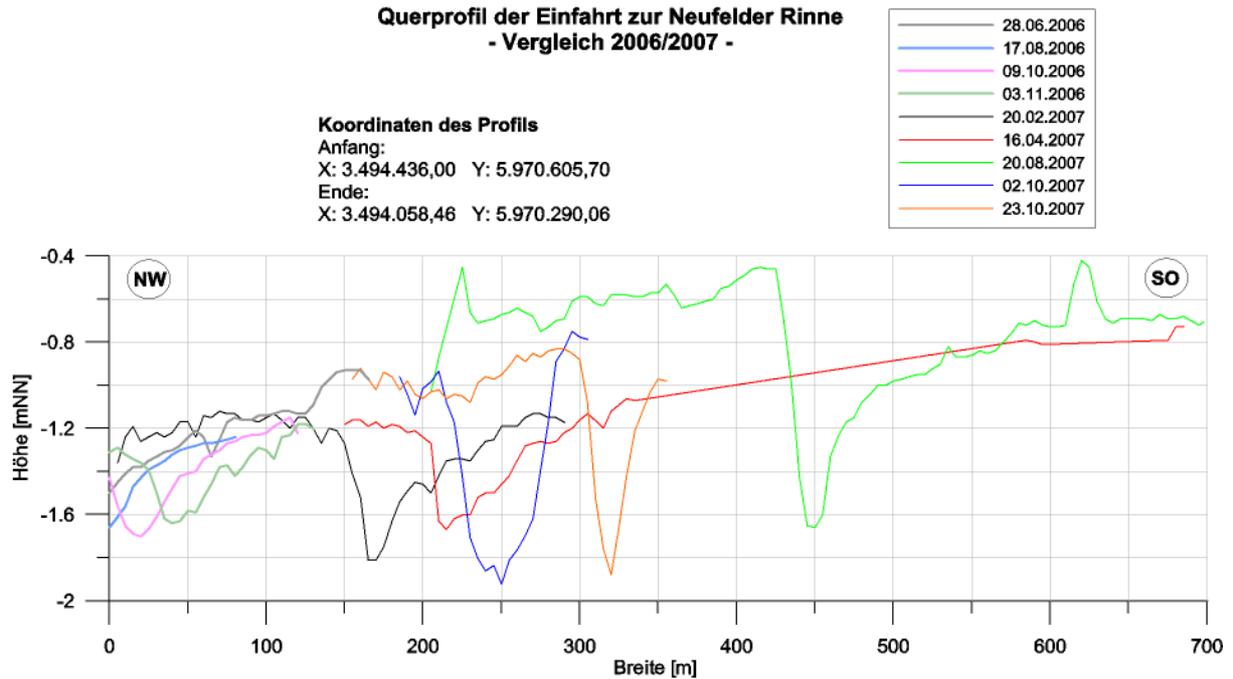


Abbildung 17: Querprofile der Einfahrt zur Neufelder Rinne im Vergleich 2006/2007

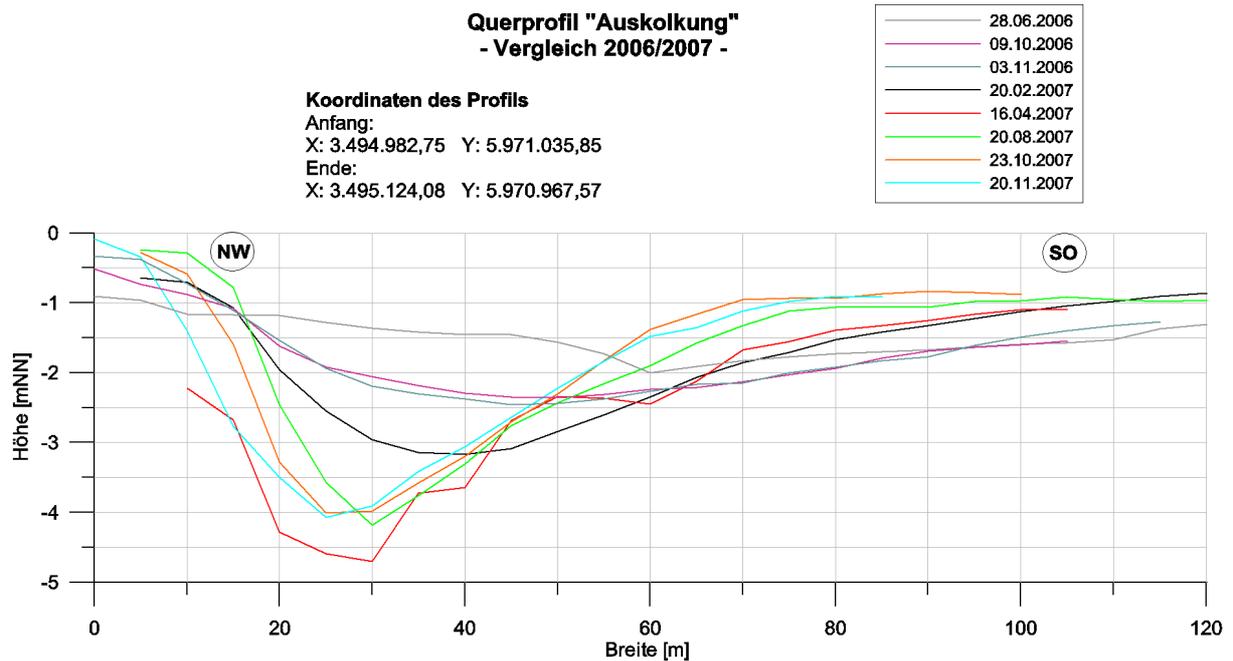


Abbildung 18: Querprofile an der Auskoklung im hinteren Bereich der Neufelder Rinne im Vergleich 2006/2007

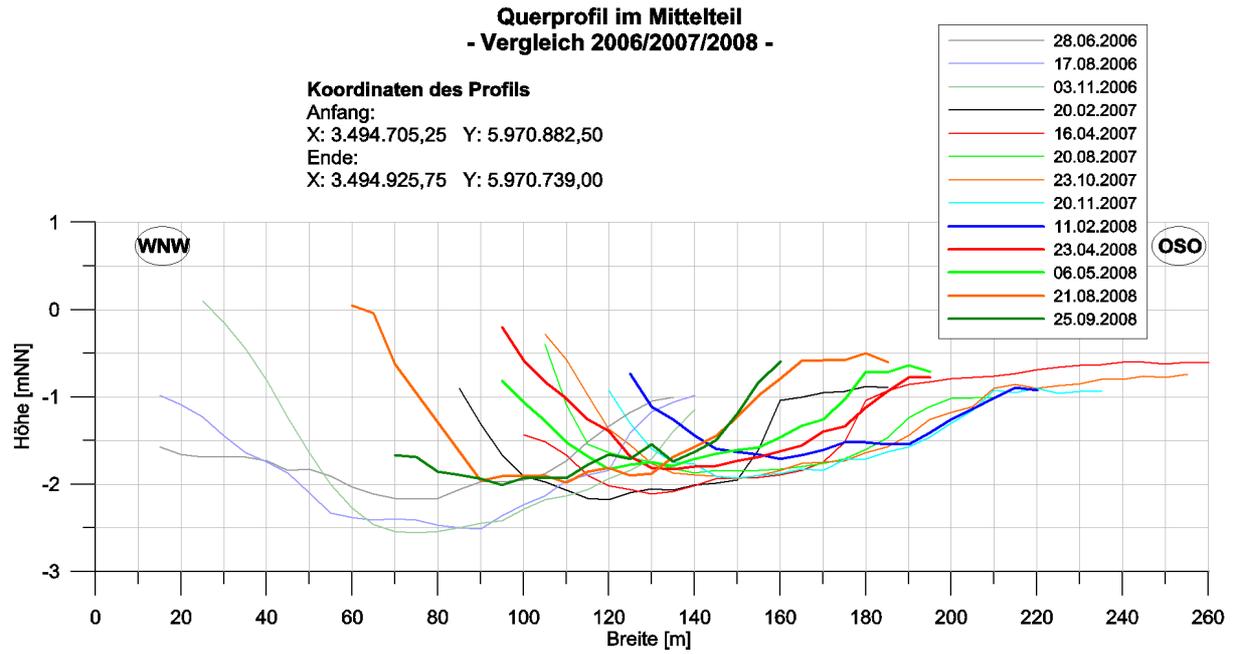


Abbildung 19: Querprofile in der im Mittelteil der Neufelder Rinne im Vergleich 2006/2007/2008

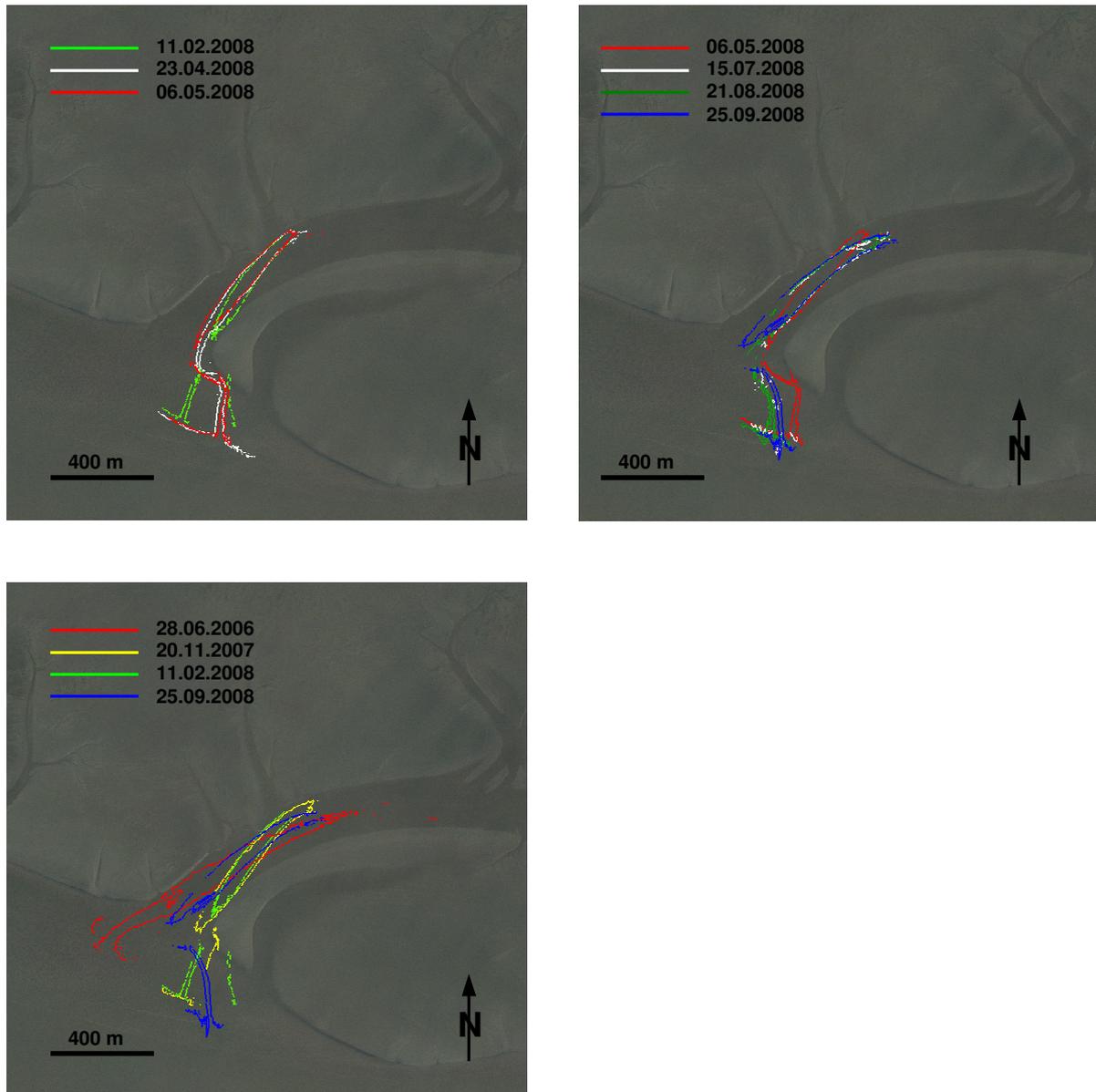


Abbildung 20: Isohypsen der Neufelder Rinne bei NN -1,50 m

Abbildung 20 verdeutlicht die Verschiebung der Neufelder Rinne mit Hilfe der NN -1,50 m-Isohypse. Die Verlagerung der Einfahrt wurde bereits weiter oben ausführlich erläutert, ist aber auch hier deutlich erkennbar. Besonders klar wird die Drehung des Hauptteils der Rinne, mit größeren Veränderungen zwischen Februar und September 2008. Mittlerweile nähert sich der Hauptteil der Rinne einer Position, die bereits im Juni 2006 einmal vorlag. Lediglich der Einfahrtbereich sieht in der Momentaufnahme deutlich anders aus.

4.2 Stationäre Messungen

4.2.1 Position 13

Position 13 liegt nordwestlich der Neufelder Rinne auf dem Neufelder Watt. Im größeren Umfeld des Messstandortes gibt es keine nennenswerten Prielstrukturen. Die Wattfläche in diesem Gebiet ist sehr eben, die Wattoberkante am Trübungsmessgerät liegt bei NN +0,30 m. Der Wattboden ist in diesem Bereich sehr fest. Über den Verlauf des Jahres 2008 wurden an der Position 13 keine signifikanten Veränderungen der Morphologie festgestellt.

Abbildung 21 zeigt den Verlauf der Sedimentkonzentration an Position 13 bei Tiden mit einem mittleren Tidehochwasserstand. Dieser dargestellte Verlauf ist charakteristisch für eine ruhige Wettersituation mit mittleren Tideverhältnissen. Zu Beginn der Aufzeichnung werden mit einlaufender Flut zunächst kurzzeitig höhere Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,4 m/s erreicht. Im Anschluss liegen die Strömungsgeschwindigkeiten für 1 bis 2 Stunden relativ konstant bei ca. 0,30 m/s. Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit weist in der Regel einen breiten Sattelpunkt auf, über den diese Geschwindigkeit für bis zu 2 Stunden relativ konstant anhält. Bis zum Zeitpunkt des Stauwassers sinkt die Strömungsgeschwindigkeit auf etwa 0,1 bis 0,15 m/s ab. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit während der Ebbephase liegt dann bei 0,3 bis 0,4 m/s. Zu Beginn der Aufzeichnung liegt die Strömungsrichtung bei 80 bis 90° (Richtung Osten). Anschließend dreht sie über die Dauer von 2,5 bis 3 Stunden auf 120 bis 130°, bevor in ca. einer Stunde der Strömungsumkehr auf etwa 230° erfolgt. Nachdem diese Richtung für weniger als eine Stunde gehalten wurde, dreht die Strömungsrichtung gegen Ende der Aufzeichnung noch einmal zurück auf etwa 180°. In dieser Zeit folgt die Strömungsrichtung des restlichen entwässernden Wassers dem natürlichen Gefälle zur Neufelder Rinne. Während der beschriebenen Situation weist die Sedimentkonzentration etwa in der Mitte des Sattelpunktes der Flutstromgeschwindigkeit ein auffälliges Maximum auf. Anschließend bleibt sie auf einem relativ konstanten Niveau von etwa 500 mg/l.

Abbildung 22 zeigt einen Verlauf der Sedimentkonzentration während Tiden mit erhöhten Tidewasserständen. In diesem Falle verursacht Wind mit Geschwindigkeiten von bis 10 m/s aus Richtung Nordwest einen Tidehochwasserstand von einem Meter über dem Mittleren Tidehochwasser. Die Strömungsgeschwindigkeiten weisen einen Peak mit bis zu 0,70 m/s auf. Zu Beginn der Aufzeichnung werden in der ersten Phase des Auflaufens der Flut kurzzeitig noch höhere Werte aufgezeichnet. Die maximale Ebbstromgeschwindigkeit liegt weiterhin bei etwa 0,40 m/s. Die Strömungsrichtung dreht in etwa 1,5 Stunden von 50° auf 100° und bleibt dann im Gegensatz zum oben beschriebenen Verlauf für ca. 2 Stunden konstant bei 100°. Während des Ebbstroms werden Strömungsrichtungen von bis zu 200° erreicht. Im Verlauf der Sedimentkonzentration entstehen sowohl in der Flut- als auch in der Ebbephase jeweils ein Sattelpunkt mit zwei kleineren weniger ausgeprägten Peaks. Die Konzentrationen in der Flutphase überwiegen leicht und liegen bei etwa 1000 bis 1500 mg/l.

Abbildung 23 stellt den Verlauf der Sedimentkonzentration bei Tiden mit geringen bis leicht erhöhten Wasserständen und steigendem Seegang dar. Die Strömungsgeschwindigkeit liegt für eine Dauer von etwa 2,5 Stunden bei relativ geringen Werten von 0,10 m/s. Zu Beginn und gegen Ende der Aufzeichnung werden Maximalwerte von ca. 0,30 m/s erreicht. Die Strömungsrichtung dreht von 50° auf 250°, konstanten Werte werden dabei nicht erreicht. Die Sedimentkonzentrationen liegen auf einem höheren Niveau als bei den zuvor beschriebenen Fällen. Es werden Maximalwerte

von 2000 bis 2500 mg/l erreicht. Während der nachfolgenden Tiden mit mittleren bis leicht erhöhten Tidehochwasserständen bleibt das Niveau der Sedimentkonzentration erhöht. Zunehmend gewinnt der Einfluss von Seegang an Bedeutung. Es bildet sich wieder der oben beschriebene Verlauf mit einem signifikanten Peak während der Flutphase (ca. 2500 mg/l) und einer anschließenden relativ konstanten Konzentration (ca. 1500 mg/l) mit einem kleineren Peak in der Ebbephase (ca. 2000 mg/l). Die Sedimentkonzentrationen bleiben vergleichsweise hoch. Vor dem 01.04.2008 herrschte ab dem 20. Februar eine Wettersituation mit relativ vielen Windereignissen mit mehr als 10 m/s Windgeschwindigkeit (Windstärke 6). Dies könnte zu einer länger anhaltenden erhöhten Sedimentkonzentration im Wasser geführt haben, deren Auswirkungen man im beschriebenen Diagramm noch sieht.

Abbildung 24 zeigt ebenfalls einen Fall mit geringen Wasserständen allerdings ohne nennenswerten Seegangseinfluss. In den vorangegangenen Wochen gab es keine Windereignisse mit höheren Windgeschwindigkeiten. Die Wasserstände betragen zum Teil nur 0,40 bis 0,60 m über der Wattoberkante. Entsprechend kurz sind die Phasen, in denen überhaupt Daten zur Strömung aufgezeichnet werden können. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen – soweit sie ermittelt werden konnten – bei ca. 0,20 bis 0,25 m/s. Die Sedimentkonzentrationen liegen allesamt deutlich geringer als während der zuvor beschriebenen Phase geringer Wasserstände. Das allgemeine Niveau liegt bei etwa 500 mg/l mit Peaks bis zu 1000 mg/l.

Abbildung 25 zeigt eine weitere Situation aus dem April 2008 mit allgemein höheren Sedimentkonzentrationen. Die Strömungsgeschwindigkeiten folgen dem oben beschriebenen Verlauf. Allerdings ist in diesen Fällen das Maximum während der Ebbephase mit bis zu 0,50 m/s etwas größer als das Maximum während der Flutphase. Die mittlere Konzentration liegt bei etwa 1500 mg/l mit Peaks bis zu 3000 mg/l, an der Sohle sogar bis 4000 mg/l. Windgeschwindigkeiten um 5 m/s aus Nordwest führen zu signifikanten Wellenhöhen von bis zu 0,40 m bei Wasserständen von 1,60 m über der Wattoberkante. Betrachtet man die Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Seegang, sind die Sedimentkonzentrationen für diese Situation außergewöhnlich hoch für Position 13.

Ab einem Wasserstand von etwa 1,50 m über der Wattoberfläche kommen die Maxima im Verlauf der Sedimentkonzentration deutlicher hervor und unterliegen dabei einem strömungsabhängigen Muster:

1. Maximum zu Beginn des Sattelpunktes der maximalen Flutstromgeschwindigkeit
2. Maximum gegen Ende des Sattelpunktes der maximalen Flutstromgeschwindigkeit bei sinkenden Strömungsgeschwindigkeiten; besonders hohe Konzentrationen an der Sohle
3. Maximum nach Stauwasser bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten
4. Maximum gegen Ende des Sattelpunktes der maximalen Ebbstromgeschwindigkeit bei sinkenden Strömungsgeschwindigkeiten

Häufig gibt es vor dem ersten Maximum bereits sehr hohe Konzentrationen, die aus der Resuspendierung von während der letzten Phase der vorherigen Ebbe abgelagerten Sedimenten bei sehr geringen Wasserständen resultieren. Diese beruhen auf nur wenigen OBS-Sensoren und werden daher nicht als eigenes Maximum definiert.

Position 13; Watt, Nord-Nord; 28.06.-30.06.2008

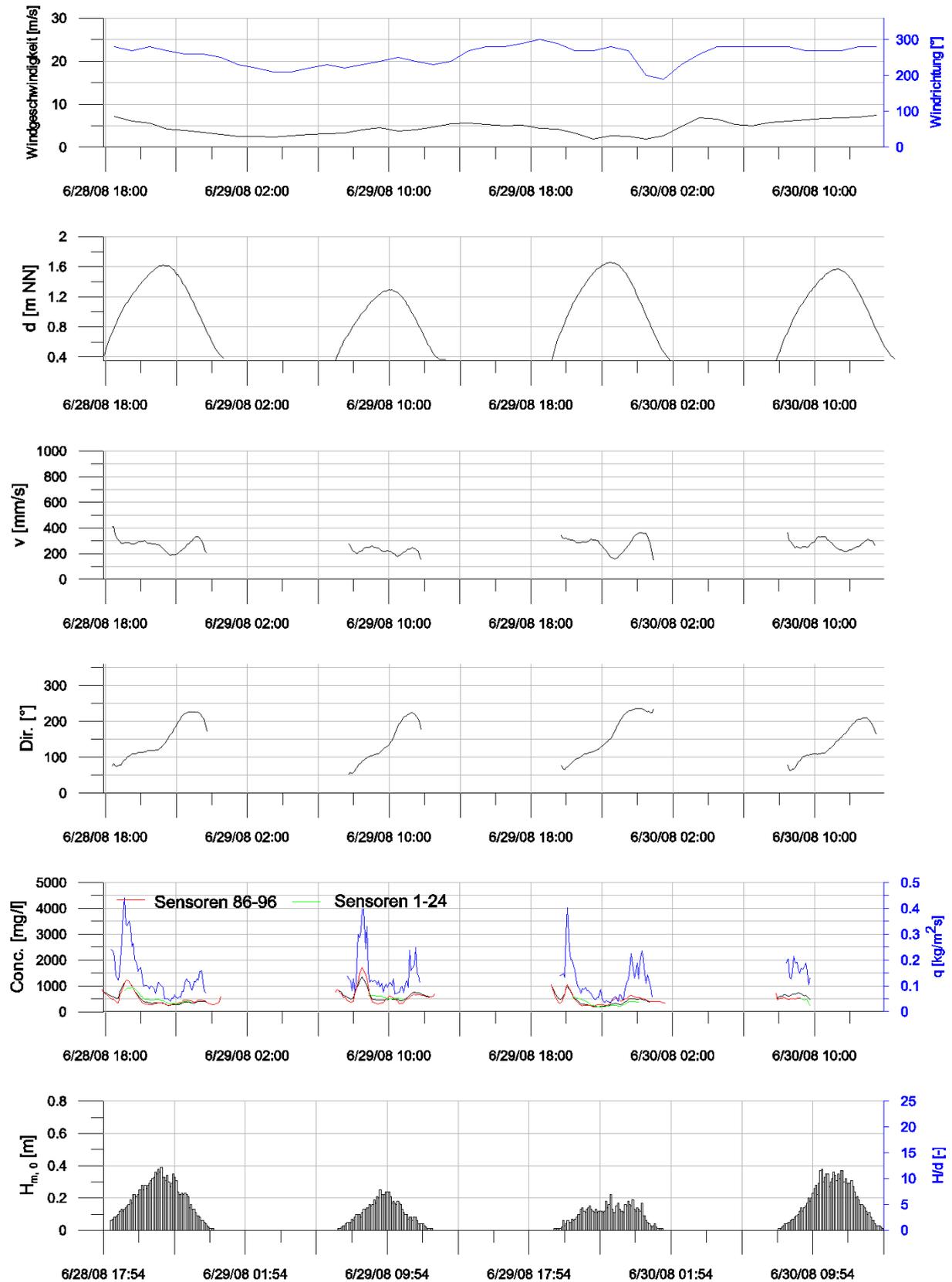


Abbildung 21: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 13 bei Tiden mit einem mittleren Tidehochwasser

Position 13; 20.07./21.07.2008

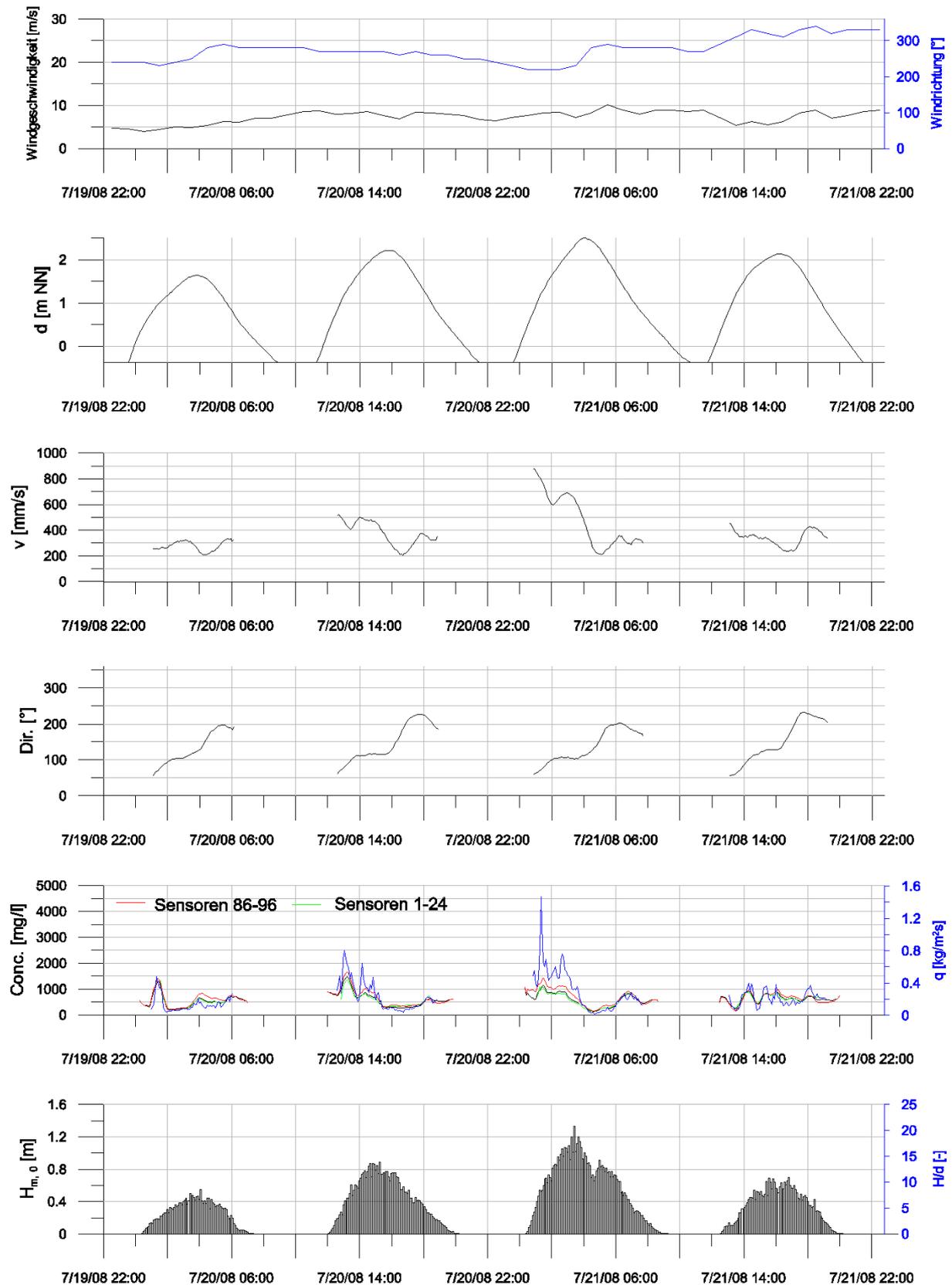


Abbildung 22: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 13 bei Tiden mit einem erhöhten Tidehochwasserstand

Position 13; Watt, Nord-Nord; 01.04./02.04.2008

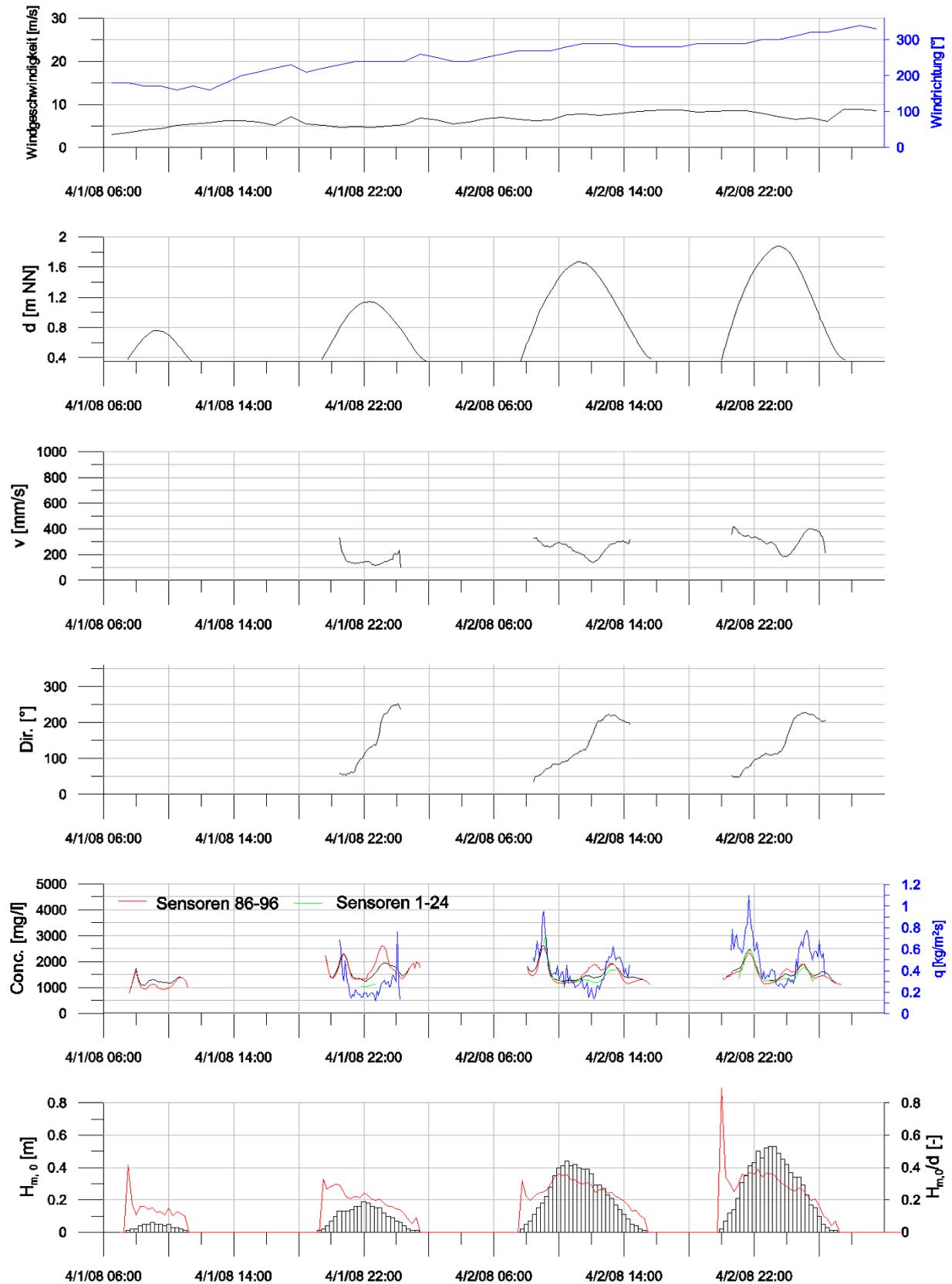


Abbildung 23: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 13 bei Tiden mit steigenden Tidehochwasserständen und steigendem Seegangseinfluss

Position 13; 09.-11.09.2008

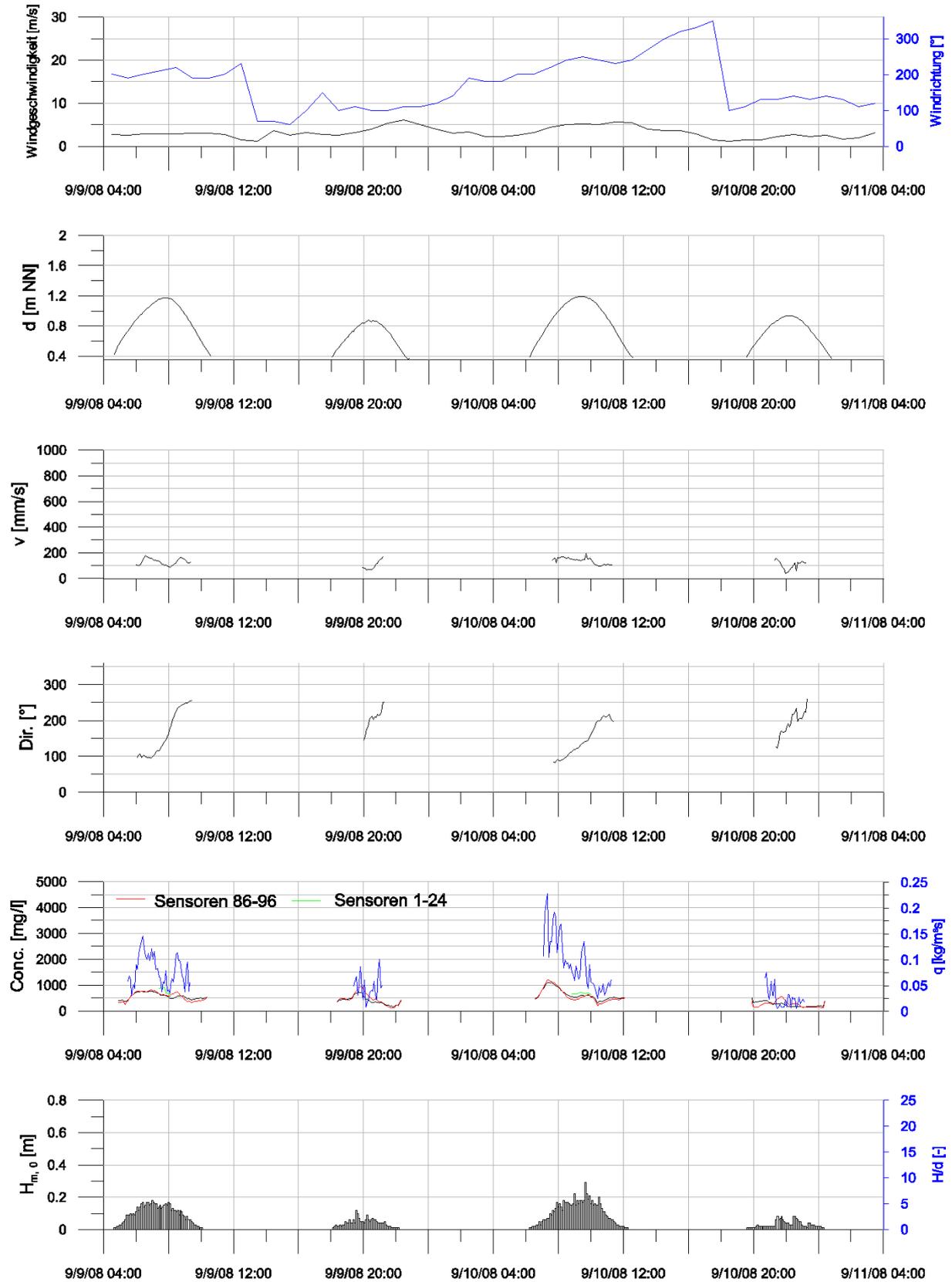


Abbildung 24: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 13 bei geringen Wasserständen ohne nennenswerten Seegang

Position 13; Watt, Nord-Nord; 05.04./06.04.2008

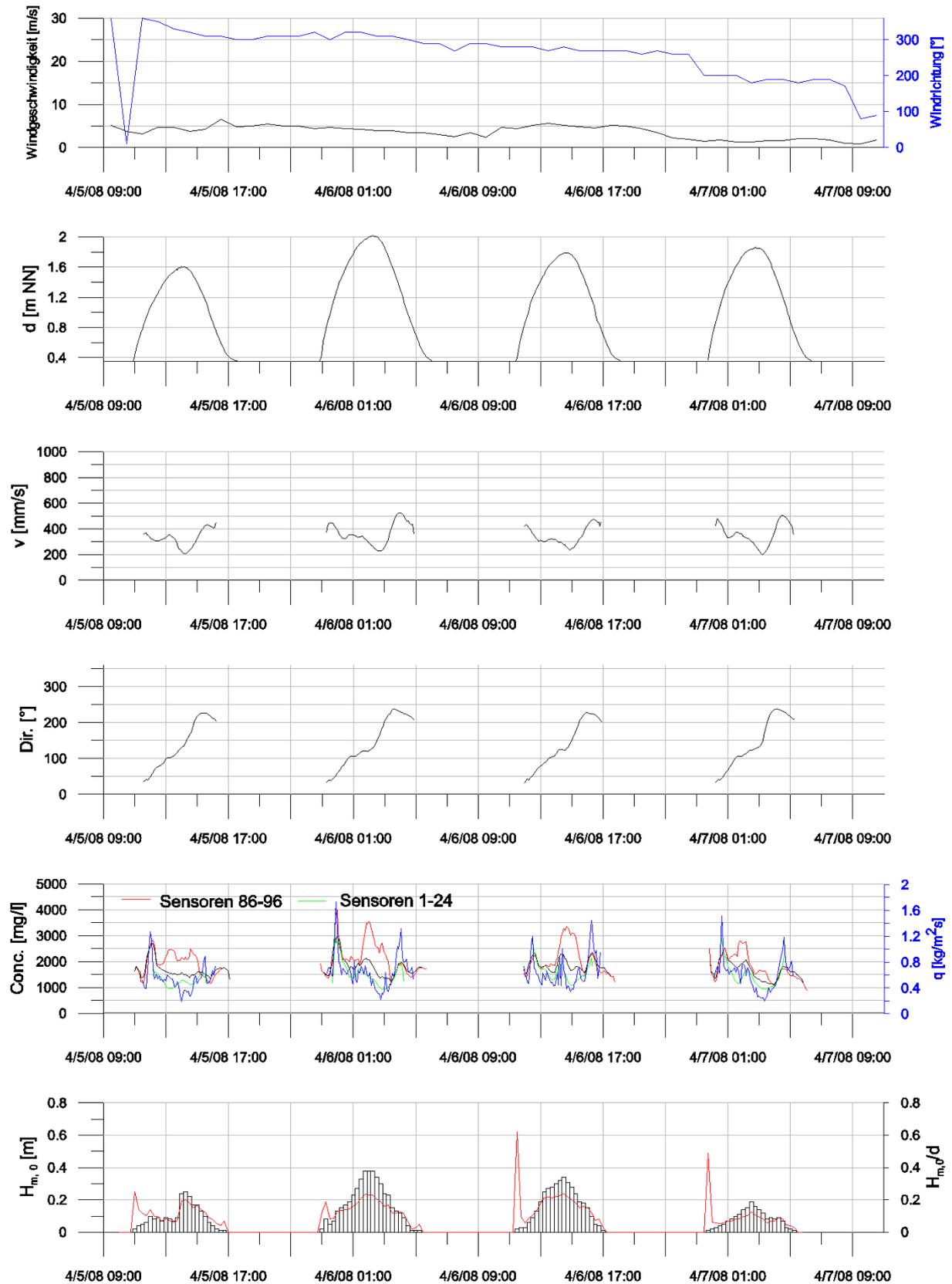


Abbildung 25: Erhöhte Sedimentkonzentrationen an Pos. 13 im April

4.2.2 Position 15

Position 15 liegt südlich der Neufelder Rinne auf dem Neufelder Sand bei NN -0,33 m. Der Messstandort liegt somit in der Nähe des Wattsockels an der Grenze zu größeren Wassertiefen. Nachdem der Wattboden im Jahr 2007 in diesem Bereich noch sehr fest war, konnte nach dem Frühjahr 2008 eine etwa 20 cm dicke Schicht mit sehr locker gelagerten Sedimenten festgestellt werden. Bei jeder Wartung musste das ADCP-Gerät sowie die Drucksonden von einer Sandschicht befreit werden.

Abbildung 26 zeigt den Verlauf der Sedimentkonzentration während Tiden mit mittleren Tidehochwasserständen. Die Strömungsgeschwindigkeiten weisen in der Flutphase in der Regel in signifikantes Maximum mit einem dahinter liegenden Sattel auf. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit liegt bei ca. 0,80 bis 0,90 m/s. Während der Ebephase existiert ein Sattelpunkt mit einem länger anhaltenden maximalen Wert von etwa 0,40 m/s, der damit eine deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeit aufweist als das Maximum in der Flutphase. Die Strömungsrichtung dreht von Beginn der Aufzeichnung von 50° in etwa 2,5 bis 3 Stunden auf 100°, dann relativ schnell in 1 Stunde auf 250°. Bis zum Ende der Aufzeichnung dreht die Richtung zurück auf 200°, dem Gefälle des Watts an dieser Stelle folgend. Die Sedimentkonzentrationen während der Flutphase sind an Position 15 bei mittleren Tideverläufen deutlich höher als während der Ebephase. In der Flutphase existieren zwei Maxima, dem oben beschriebenen Schema zufolge bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit sowie am Ende des Sattelpunktes bei sinkenden Strömungsgeschwindigkeiten. Das Niveau dieser Peaks liegt bei 2500 bis 3500 mg/l. Anschließend sinkt die Konzentration auf 500-1000 mg/l. Mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten während der Ebephase steigt auch die Sedimentkonzentration wieder, erreicht aber lediglich Werte von bis zu 1500 mg/l. Die großen Ausschläge der Sedimentkonzentration in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit sind typisch für Position 15 mit den sehr locker gelagerten Sedimenten.

Diese Ausschläge sind auch in Abbildung 27 zu erkennen, die den Verlauf der Sedimentkonzentrationen bei Tiden mit niedrigeren Tidewasserständen zeigt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind mit 0,60 - 0,70 m/s deutlich geringer als bei Tiden mit mittlerem Verlauf, wobei die Flutstromgeschwindigkeit höher ist als die Ebbstromgeschwindigkeit. Bei sehr geringen Wasserständen (0,70 m niedriger als MTnw) sinken die Strömungsgeschwindigkeiten auf 0,40 m/s, Ebb- und Flutstromgeschwindigkeit liegen dann auf einem Niveau. Der Verlauf der Sedimentkonzentration ist analog zu dem bei mittleren Tiden. Die Ausschläge sind jedoch deutlich größer. Es werden Maxima von 4500 mg/l erreicht. Auch hier sind die Konzentrationen in der Flutphase höher. Besonders deutlich heben sich die Ausschläge hervor, wenn der Einfluss von Seegang zunimmt.

Abbildung 28 zeigt den Verlauf der Sedimentkonzentrationen bei Tiden mit leicht erhöhten Tidewasserständen. Die Strömungsgeschwindigkeiten erreicht Höchstwerte von bis zu 1,1 m/s, die deutlich größer sind als die maximale Ebbstromgeschwindigkeit, die dann bei etwa 0,50 m/s liegt. Östlich gerichtete Strömungsrichtungen (50-120°) werden länger gehalten, bevor die Strömungsrichtung auf etwa 230° dreht. Mit steigenden Wasserständen sinkt der Einfluss der Ausschläge in den Sedimentkonzentrationen. Das allgemeine Muster mit zwei Maxima in der Flutphase, die die weniger stark ausgeprägten Maxima in der Ebephase überragen, bleibt erhalten.

Position 15; Neufelder Sand; 01.06.-02.06.2008

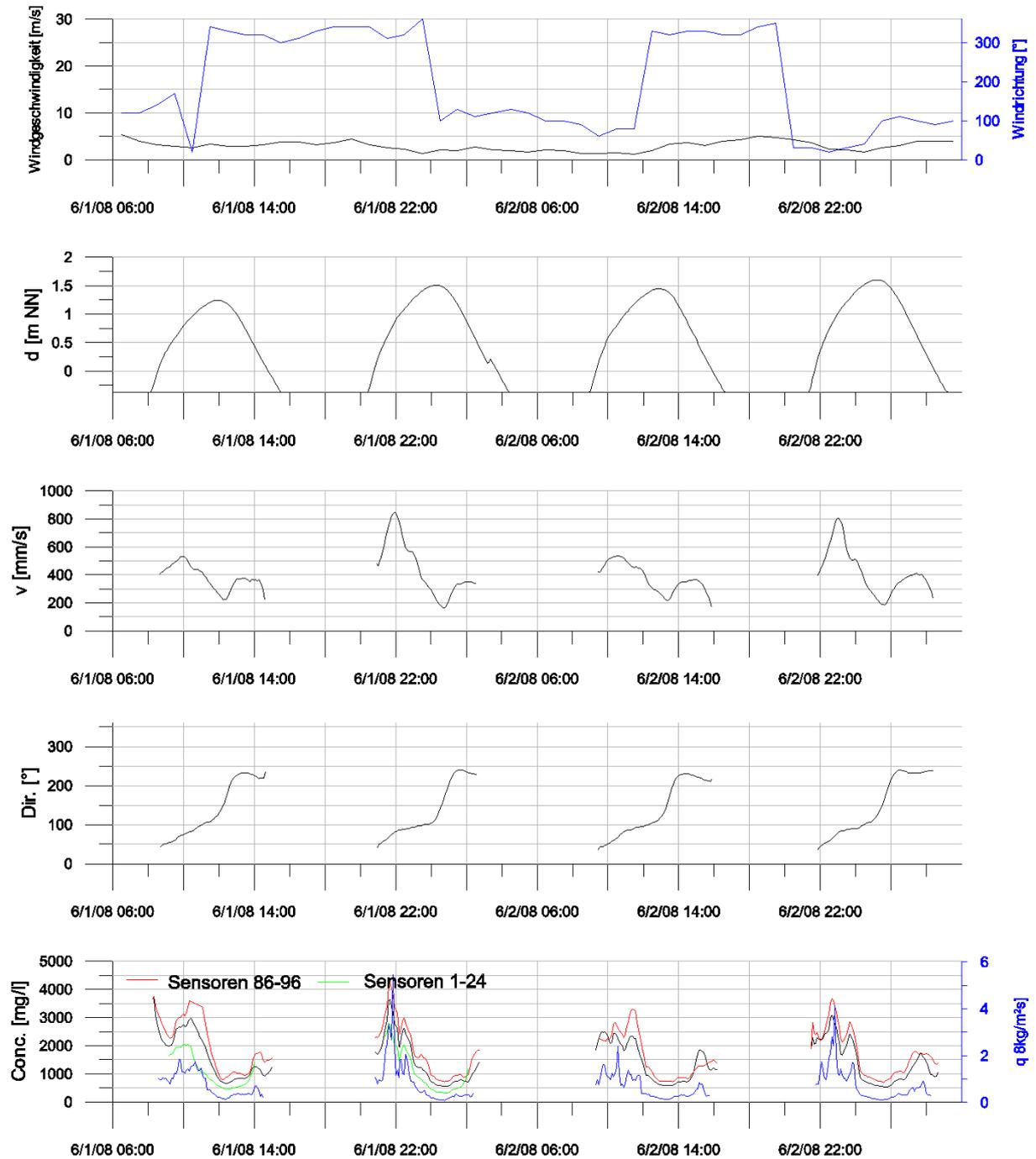


Abbildung 26: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 15 bei Tiden mit mittleren Tidehochwasserständen

Position 15; Neufelder Sand; 13.05.-15.05.2008

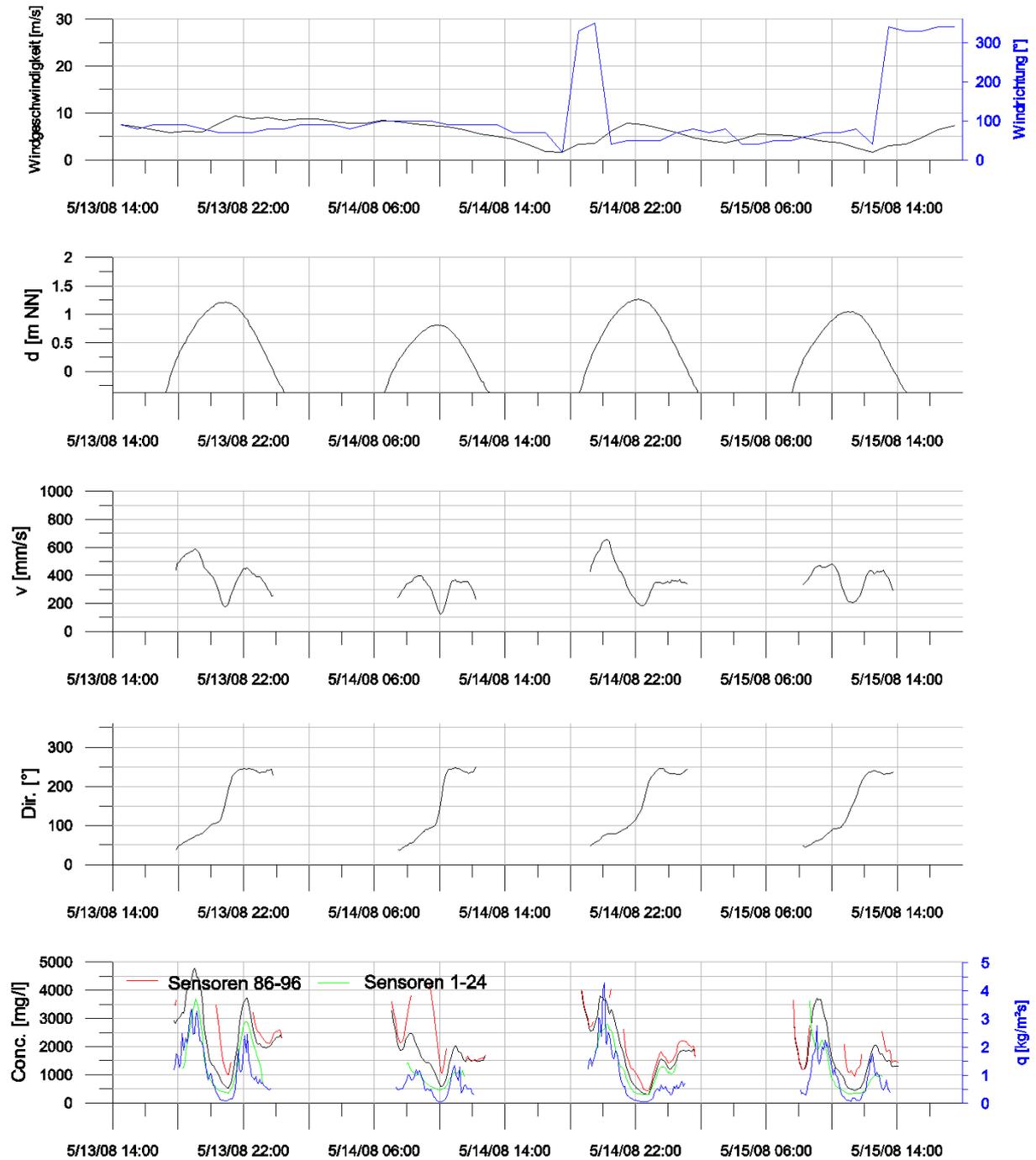


Abbildung 27: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 15 bei Tiden mit niedrigen Tidehochwasserständen

Position 15; Neufelder Sand; 03.07.-05.07.2008

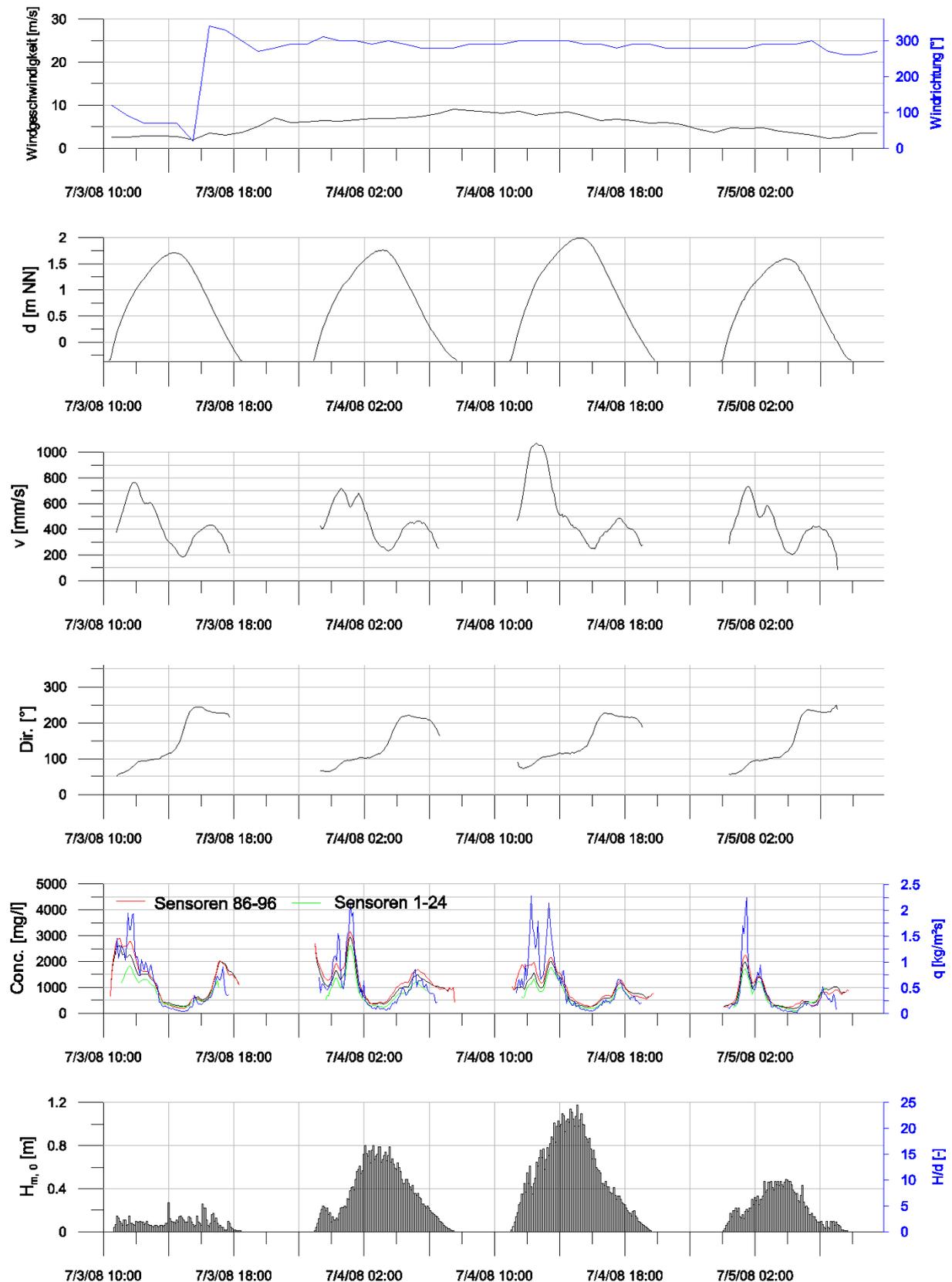


Abbildung 28: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 15 bei Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen

4.2.3 Position 17

Position 17 liegt im Querschnitt der Neufelder Rinne. Der Messstandort befindet sich an der südlichen Böschung bei NN -0,40 m. Der Wattboden in diesem Bereich ist in der Regel fest gelagert. Während einiger Phasen der Verschiebung der Prielachse traten hier Sedimentumlagerungen auf.

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der aufgezeichneten Daten bei mittleren Wasserständen. Das Flutstrom- und Ebbstrommaximum in der Strömungsgeschwindigkeit sind deutlich erkennbar. Im Flutstrom werden Werte von 0,60-0,70 m/s erreicht. Die Maxima während des Ebbstroms liegen mit 0,80-0,90 m/s in der Regel darüber. Es handelt sich mehr um echte Peaks als um Sattelpunkte. Die Aufzeichnung der Strömungsgeschwindigkeit beginnt bei 30-40°. Für 3-4 Stunden dreht die Strömungsrichtung auf 100°, anschließend kentert die Strömung. In der Flutphase folgt die Strömung nur kurze Zeit dem Verlauf der Neufelder Rinne (etwa Südwest-Nordost-Verlauf). In der Ebbphase folgt die Strömung für ca. 3 Stunden sehr konstant dem Verlauf der Rinne bei einer Strömungsrichtung von etwa 230°. Im Verlauf der Sedimentkonzentration sind Schwankungen mit mehreren Peaks erkennbar. Generell folgen die Maxima auch hier dem oben beschriebenen Schema. Maximalwerte erreichen 1500-2000 mg/l. Um das Stauwasser herum treten Grundkonzentrationen von 500 mg/l auf. Das Niveau der Konzentration bei Ebbe und Flut ist ungefähr ausgeglichen.

Abbildung 30 stellt die aufgezeichneten Daten an Position 17 während einer Tide mit erhöhten Wasserständen dar (MThw + 1 m). Hier werden Flutstromgeschwindigkeiten erreicht, die mit bis zu 1,1 m/s deutlich über den Ebbstromgeschwindigkeiten liegen. Die Sedimentkonzentrationen weisen ein deutliches Maximum in der Flutphase auf (1500-2000 mg/l). Während der Ebbphase werden über die gesamte Dauer Konzentrationen von etwa 500-1000 mg/l erreicht. Besonders auffällig sind die durchweg deutlich höheren Konzentrationen an den untersten zehn Sensoren. Dieser Verlauf folgt dem der tiefengemittelten Sedimentkonzentration, liegt jedoch deutlich höher, die Peaks erreichen Werte von bis zu 3500 mg/l. Zu Beginn einer Flutphase werden an den untersten Sensoren kurzzeitig sehr hohe Konzentrationen gemessen, was auf eine größere Menge während der letzten Phase der vorangegangenen Ebbe abgelagerter Sedimente hindeutet.

Abbildung 31 zeigt den Verlauf der Sedimentkonzentration bei Tiden mit niedrigeren Tidewasserständen (MTnw -0,50 m). Hier überragt die Ebbstromgeschwindigkeit (bis zu 1,2 m/s) die Flutstromgeschwindigkeit (0,5-0,7 m/s) deutlich. Sehr prägnant ist wiederum die konstante dem Verlauf der Neufelder Rinne folgende Ebbströmungsrichtung. Im Verlauf der Sedimentkonzentration ist das oben beschriebene Schema mit den vier Maxima deutlich erkennbar. Auffällig sind auch die Absinkprozesse der Sedimente vor Tidehochwasser, die sich durch erhöhte Sedimentkonzentrationen an den untersten Sensoren bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten auszeichnen. Die Maxima während der Ebbphase erreichen Werte von 2500-4000 mg/l, die damit über den Maxima der Flutphase liegen (bis zu 2000 mg/l).

Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Sedimentkonzentration bei Tiden mit niedrigeren Wasserständen und Seegangseinfluss. Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s aus östlichen Richtungen (90-100°) verursachen Wasserstände von bis zu 1,1 m unter dem mittleren Tideniedrigwasser. Entsprechend kurz sind die Phasen, in denen überhaupt Daten aufgezeichnet werden können. Sehr deutlich ist jedoch der enorme Anstieg der Sedimentkonzentration mit Grundkonzentrationen von bis zu 2000 mg/l

und Peaks von 3000 mg/l. Die Strömungsgeschwindigkeiten erreichen nur relativ geringe Werte von 0,60 m/s in der Ebbephase.

Position 17; Rinne; 25.06./26.06.2008

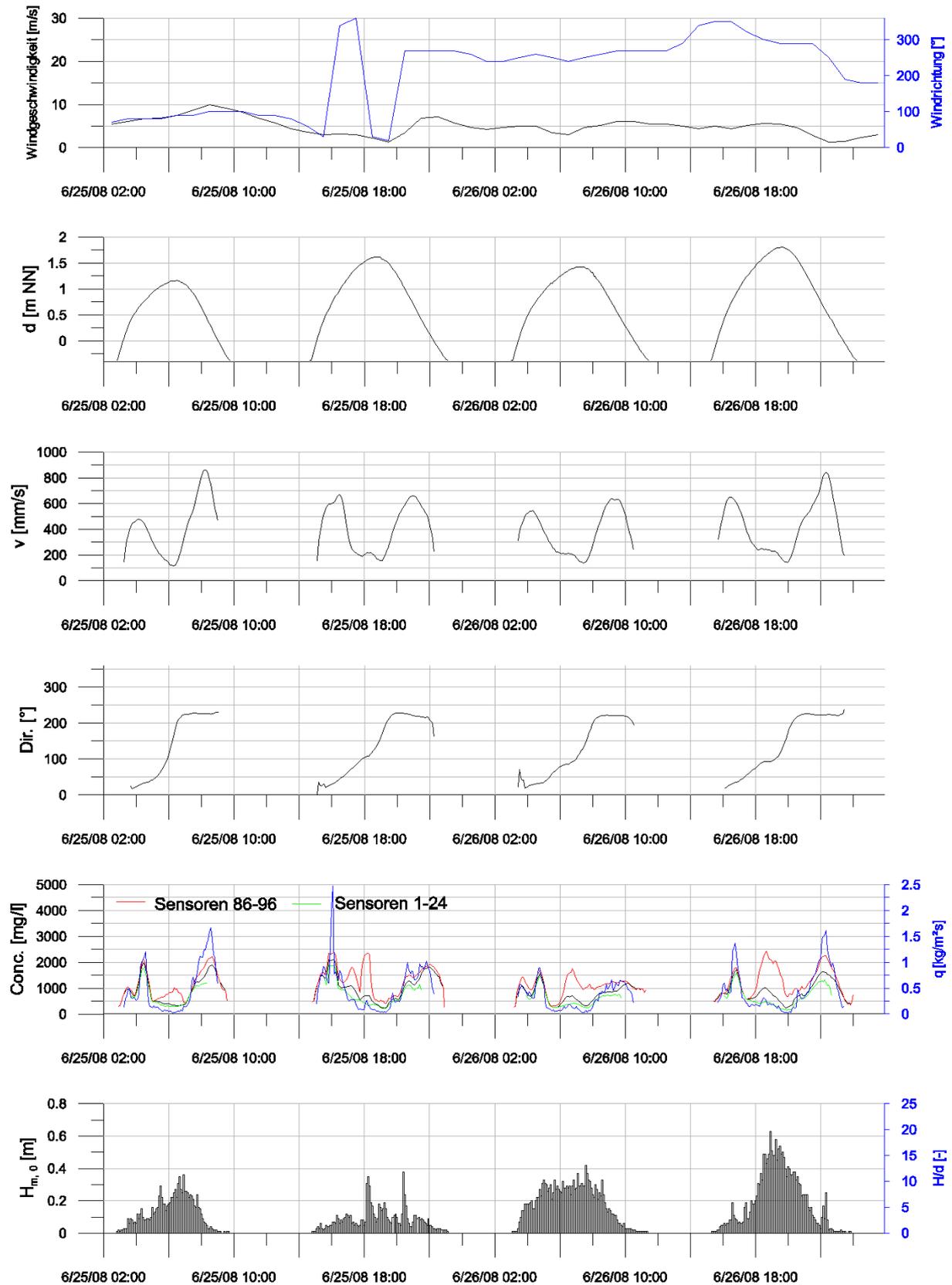


Abbildung 29: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 17 bei mittleren Wasserständen

Position 17; Rinne; 20.07./21.07.2008

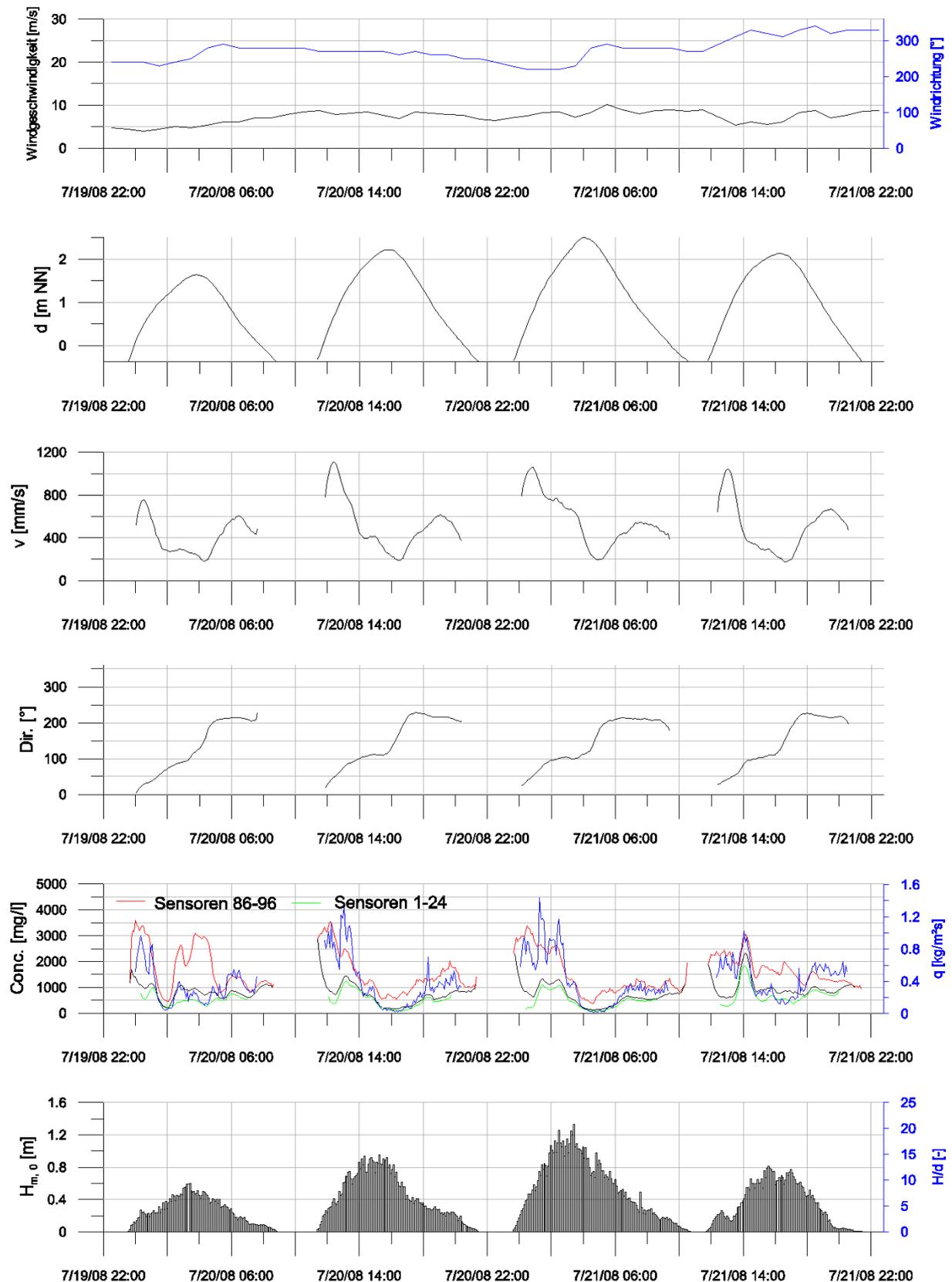


Abbildung 30: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 17 bei erhöhten Wasserständen

Position 17; Rinne; 24.07./25.07.2008

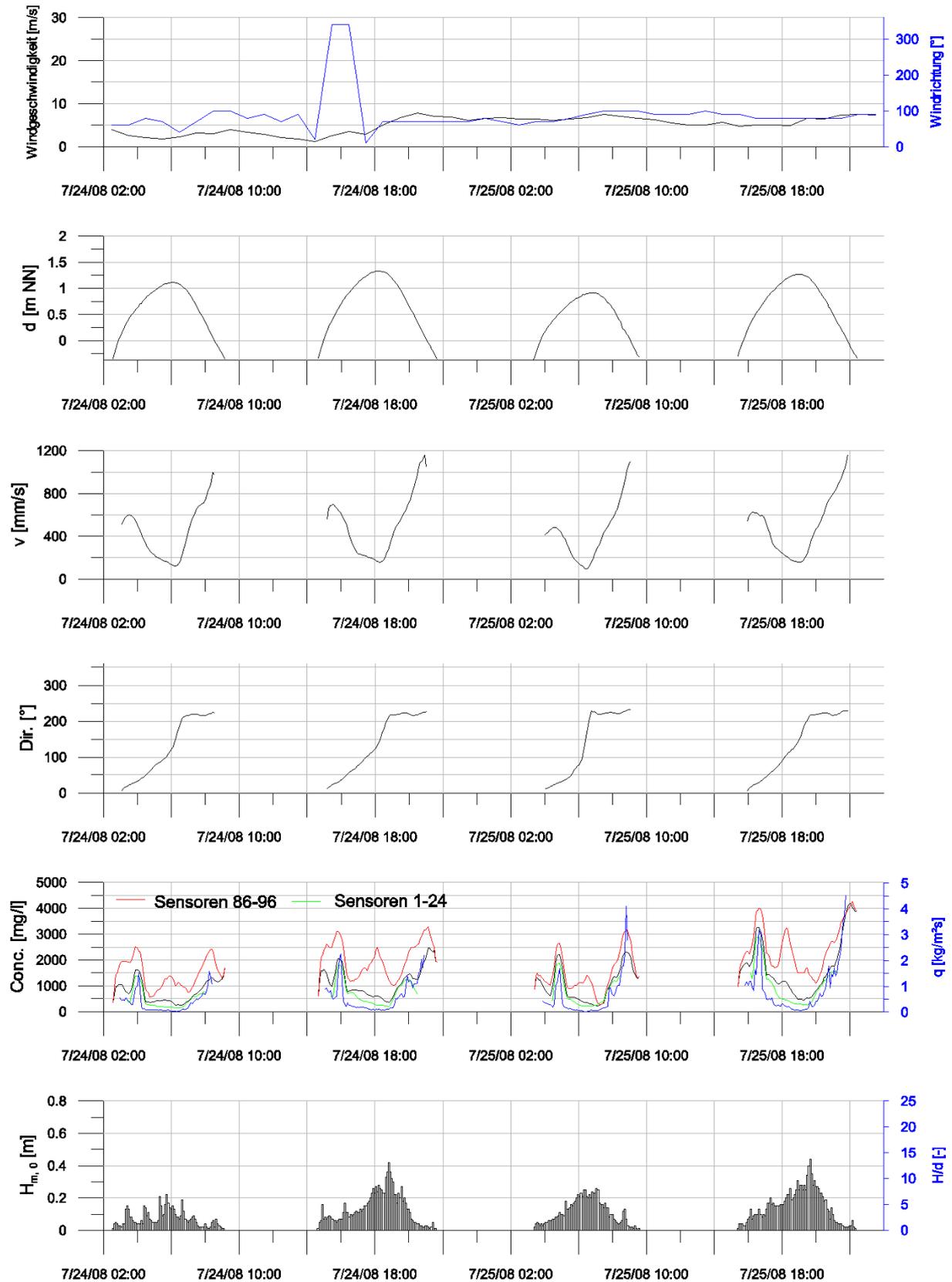


Abbildung 31: Verlauf der Sedimentkonzentration an Pos. 17 bei Tiden mit niedrigeren Wasserständen

Position 17; Rinne; 11.-13.09.2008

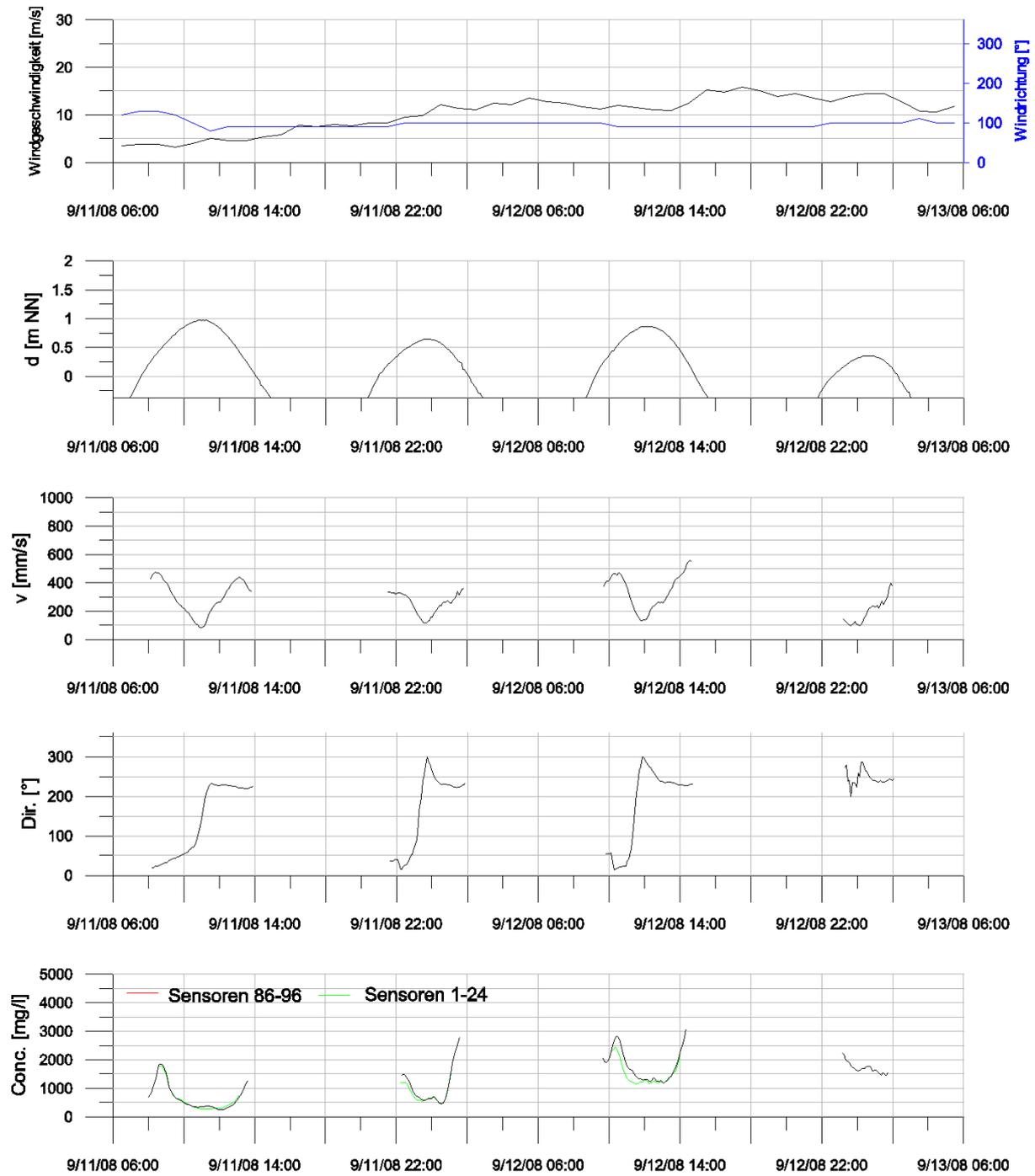


Abbildung 32: Verlauf der Sedimentkonzentration bei Tiden mit niedrigeren Wasserständen und Seegangseinfluss

4.3 Schwebstoffproben

Um die Messdaten der Trübungsmessgeräte zu verifizieren, wurden in regelmäßigen Abständen Schwebstoffmessungen durchgeführt und anschließend im Labor gemäß DIN 38409, Teil 1 analysiert. Zur Optimierung der Probenentnahme im Watt wurde eigens ein entsprechendes Gerät konstruiert (Abb. 34). Der Probekörper wird durch einen an beiden Enden offenen Zylinder gebildet. Dieser wird durchströmt und in eine fest definierte Position am Trübungsmessgerät gebracht. Zu einem bestimmten Zeitpunkt werden über ein Fallgewicht zwei Klappen ausgelöst, die den Zylinder fest verschließen. So gelingt es, zeitlich und räumlich eindeutige, ungestörte Proben zu gewinnen. Die aus den entsprechenden Proben ermittelten Sedimentkonzentrationen werden mit den Ergebnissen der korrespondierenden Sensoren des Trübungsmessgerätes verglichen. Gegebenenfalls könnten die Sensoren im Postprocessing an die aus den Proben resultierenden Ergebnisse angeglichen werden. Dieses Vorgehen wird vom Hersteller ARGUS vorgeschlagen, um die jeweilige Kalibrierung zu verbessern. Die Ergebnisse (Tab. 4 und Abb. 33) zeigen, dass die aus den Schwebstoffproben ermittelten Sedimentkonzentrationen sehr gut mit den aus den Trübungsmessgeräten erhaltenen Konzentrationen übereinstimmen. Abweichungen resultieren daraus, dass in der Praxis das Trübungsmessgerät in der Regel nicht genau dann aufzeichnet (5-Minuten-Messungen), wenn die Probe entnommen wird. Kurzfristig kann es immer wieder zu größeren Abweichungen von den 5-Minuten-Werten kommen. Darüber hinaus deckt der Probennehmer mehrere Sensoren des Trübungsmessgerätes ab. Es muss daher mit einem Mittelwert über mehrere Sensoren gerechnet werden. Die Ergebnisse der Schwebstoffproben wurden verwendet, um die Resultate der Trübungsmessgeräte zu verifizieren. Auf eine Nachkalibrierung einzelner Sensoren auf der Basis der Proben wurde aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten verzichtet.

Tabelle 4: Vergleich der Schwebstoffproben mit den Ergebnissen der ASM

| Datum | Höhe über Grund [m] | Ergebnis der Schwebstoffprobe [mg/l] | Ergebnis der ASM [mg/l] |
|-----------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 22.08.2008, 08:50 Uhr | 0,05 | 1495 | 1280 |
| 22.08.2008, 08:54 Uhr | 0,10 | 581 | 612 |
| 22.08.2008, 08:57 Uhr | 0,20 | 535 | 692 |
| 25.09.2008; 09:11 Uhr | 0,05 | 883 | 615 |
| 25.09.2008; 09:13 Uhr | 0,50 | 534 | 649 |
| 25.09.2008; 09:15 Uhr | 1,00 | 375 | 479 |

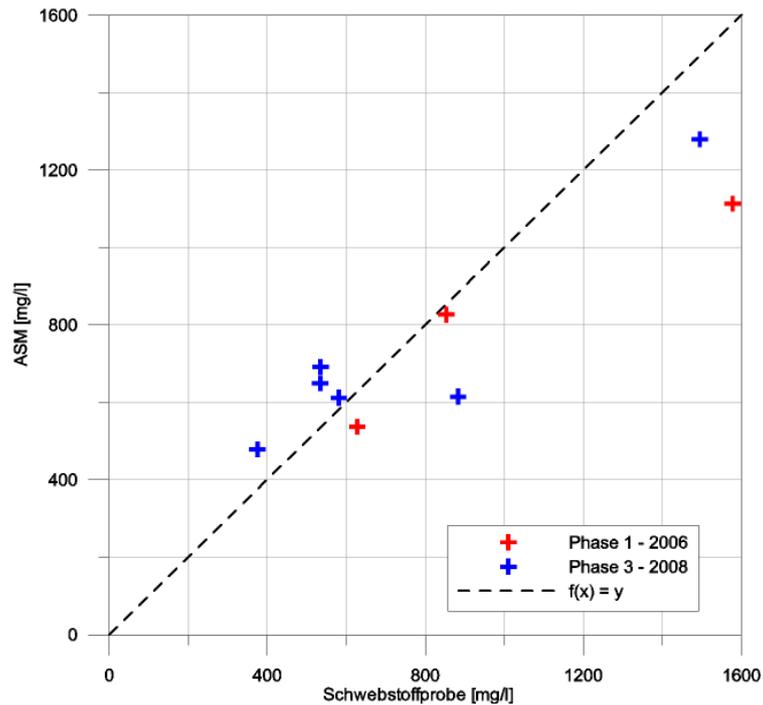


Abbildung 33: Scatterplot der Schwebstoffmessungen und der Ergebnisse der ASM

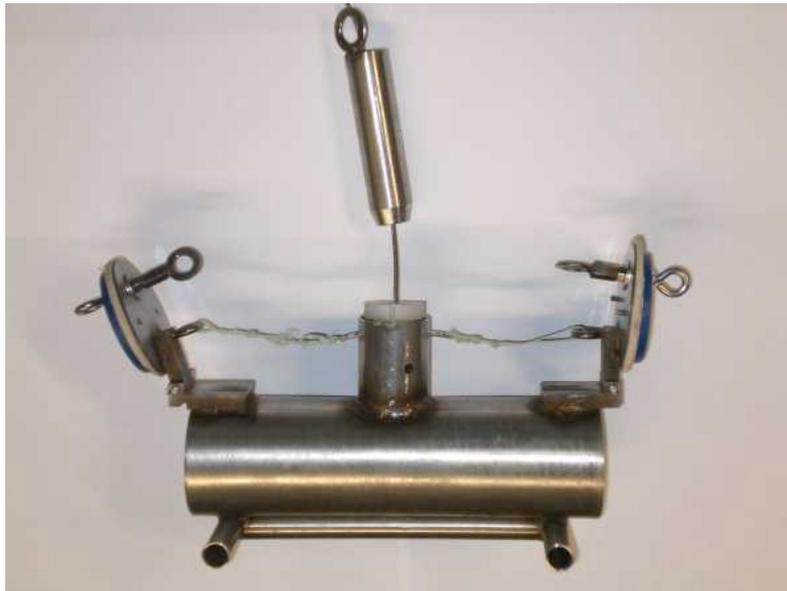


Abbildung 34: Gerät zur Entnahme von Schwebstoffproben

4.4 Laboruntersuchungen

In Phase 3 des Projektes sollte zudem geprüft werden, in wieweit zeitweilige Kameraaufnahmen dazu beitragen können, bestimmte Phänomene an den Trübungsmessgeräten, z.B. der Einfluss von Treibgut oder Geschwemmsel sowie von Schaumkronen, zu überprüfen. Die zeitliche und optische Auflösung handelsüblicher Kameras reicht nicht aus, um dauerhaft das gesamte Gerät zu filmen. Um etwas zu erkennen, müsste man auf einen Teilausschnitt der Sensoren fokussieren, wodurch schon viele Informationen verloren gehen. Dadurch, dass die Kamera hochwassersicher stehen muss, ist die Distanz zu groß, um Detailaufnahmen in Zentimeterauflö-

sung zu machen. Die Aufnahmen können allerdings verwendet werden, großräumigere Be- und Entwässerungsvorgänge auf den Wattflächen bzw. durch die Neufelder Rinne zu dokumentieren. Verschiedene Aufnahmen zeigen, mit welcher großen Geschwindigkeit die Wattflächen ab einem bestimmten Zeitpunkt wieder bewässert werden. Gerade diese erste Phase der Flut auf dem Watt kann aber durch die Strömungsmessgeräte nicht aufgezeichnet werden (Blanking-Bereich der Geräte). Verlässliche Werte werden erst ab Wasserständen von ca. 0,30 m über Wattoberkante ermittelt.



Abbildung 35: Installation von Kamera und ADV-Sonde

Um einen Überblick über die Strömungsgeschwindigkeiten auf den Wattflächen bei einsetzender Flut zu bekommen, wurde temporär eine ADV-Sonde im Untersuchungsgebiet installiert (Abb. 35). Diese misst punktuell die Strömungsparameter ca. 10 Zentimeter unter den Sensoren. Möchte man etwa 5 cm über der Sohle messen und berücksichtigt kleinere Wellenbewegungen, so benötigt man wieder mindestens 20 cm Wasser für sinnvolle Messungen. Zudem ist der Aufwand der Installation einer ADV-Sonde im Watt (Batterie-Behälter, Verbindung zum Messrechner an Bord der Nekton) verhältnismäßig groß. Während der Messung am 24.09.2008 stiegen die Wasserstände wegen Ostwinds nur sehr langsam an. An der ausgewählten Stelle betrug die maximalen aufgezeichneten Strömungsgeschwindigkeiten lediglich 0,10 m/s. Ein zuvor schon beobachtetes Einlaufen einer ersten Flutwelle auf das Watt konnte an diesem Tag nicht festgestellt oder gar aufgezeichnet werden. Aufgrund des hohen Installationsaufwandes wird zukünftig auf den temporären Einsatz der ADV-Sonde verzichtet. Am 06.11.2008 kam erstmals eine vollständig mobile magnetisch-induktive Strömungssonde zum Einsatz (Abb. 36). Mit diesem Gerät kann punktuell ab einer Wassertiefe von 3 bis 4 cm die Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Als Weiterentwicklung herkömmlicher Messflügel kann diese Sonde eingesetzt werden, um an verschiedensten Stellen auf dem Watt sowie in der Neufelder Rinne inkl. der Einfahrt zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Strömungsgeschwindigkeit zu messen. Am 06.11.2008 wurden im versandenden Altarm der Einfahrt Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,60 m/s festgestellt. Parallel wurden Schwebstoffproben entnommen, die später ausgewertet wurden.



Abbildung 36: Magnetisch-induktives Strömungsmessgerät

Zukünftig ist es geplant, an der Position des Trübungsmessgerätes die Strömungsgeschwindigkeiten während der einsetzenden Flut mit Hilfe des magnetisch-induktiven Messgerätes aufzuzeichnen.

Um die Prozesse, die auf den Wattflächen bei einsetzender Flut ablaufen, näher zu analysieren, wurde auf Laboruntersuchungen zurückgegriffen. Während mehrerer Messfahrten wurden ausreichende Mengen Sediment aus dem Neufelder Watt gesammelt und in die Versuchsrinne des Instituts für Wasserbau eingebaut. Ziel der Untersuchung war es, den Bewegungsbeginn bzw. Suspensionsbeginn sowie die Sedimentkonzentrationen bei geringen Wasserständen und verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten zu ermitteln. Eine genaue Versuchsbeschreibung sowie eine detaillierte Ergebnisdarstellung ist in TREUEL (2008) zu finden. An dieser Stelle seien lediglich die wichtigsten Ergebnisse dieser Studienarbeit wiedergegeben.

Der in Abbildung 37 dargestellte Anstieg der normierten Sedimentkonzentration im markierten Bereich bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,18 m/s und 0,22 m/s ist deutlich erkennbar. Der Versuch wurde mit gleichmäßiger Strömung ohne Welleneinfluss durchgeführt. Durch diese Randbedingung kann der primäre Anstieg der Sedimentkonzentration mit dem Moment des Bewegungsbeginns gleichgesetzt werden. Die in diesem Moment wirkende Strömungsgeschwindigkeit ist die kritische Strömungsgeschwindigkeit. Die experimentellen Ergebnisse lassen daher den Schluss zu, dass der Bewegungsbeginn der Sedimente bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,21 m/s einsetzt.

In Abbildung 38 ist ein besonders deutlicher Anstieg der Relativkonzentration bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,26 m/s zu verzeichnen. Die Relativkonzentration nimmt hier eine Größenordnung ein, die um das Fünffache höher ist, als die Konzentration zu Bewegungsbeginn. Dieser starke Anstieg der relativen Sedimentkonzentration in diesem Bereich lässt auf den Moment des Übergangs vom sohnahen in den suspendierten Transport schließen. Aus diesem Schluss resultiert der Suspensionsbeginn bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,26 m/s.

Bei einem Vergleich dieser experimentell ermittelten Werte mit Angaben in einschlägiger Literatur lassen sich sehr gute Parallelen zu NIKURADSE (1932), NEILL (1968) und MAYNORD (1978) – alle in VAN RIJN (1993) – finden (vgl. Tabelle 5).

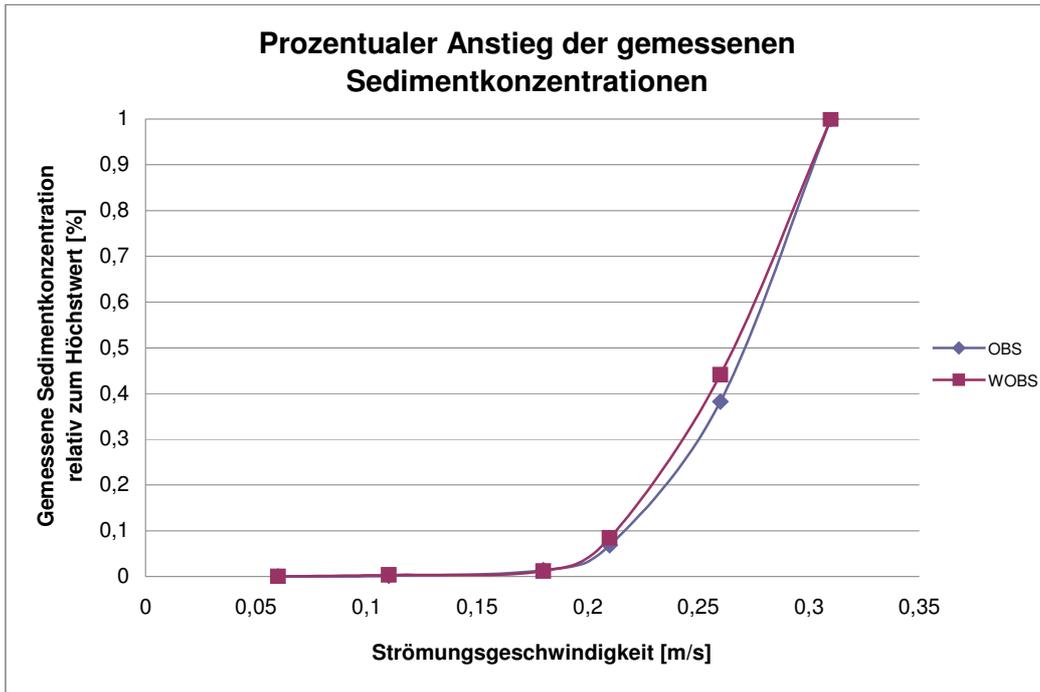


Abbildung 37: Normierter Anstieg der Sedimentkonzentration bei 11cm Wasserstand

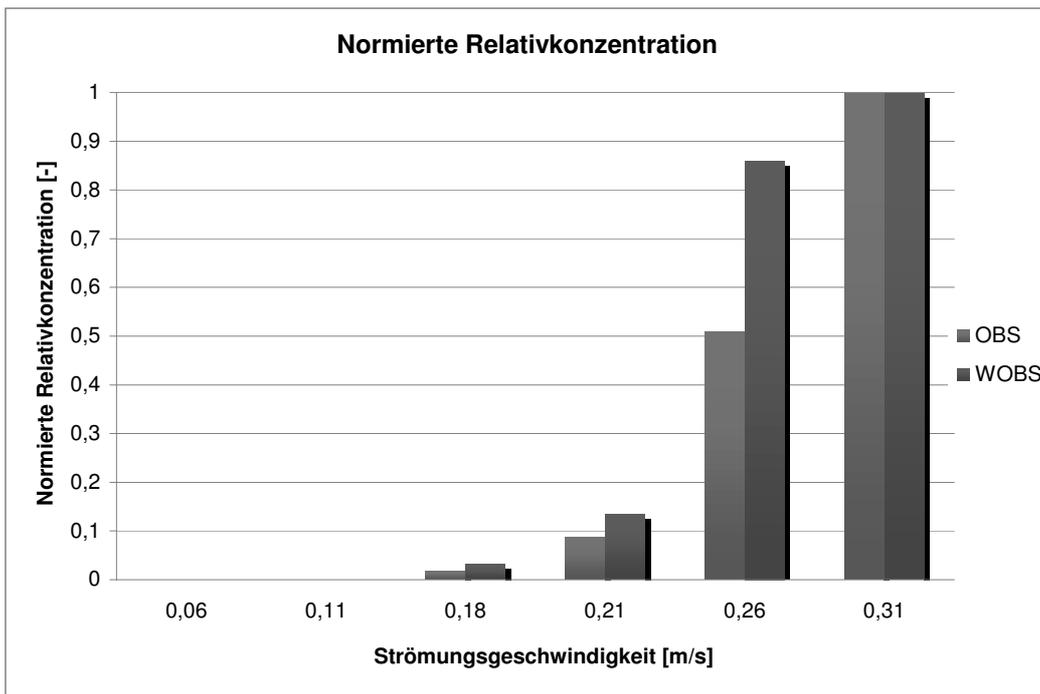


Abbildung 38: Normierte relative Sedimentkonzentrationen bei 11 cm Wasserstand

Tabelle 5: Vergleich von theoretischen und experimentellen Ergebnissen in Bezug auf den Bewegungsbeginn

| Parameter | | Ergebnis | | |
|---|---------|---------------|-------------|------------------|
| | Einheit | Experimentell | Theoretisch | |
| | | | NIKURADSE | NEILL & MAY-NORD |
| Kritische Strömungsgeschwindigkeit (Bewegungsbeginn) | [m/s] | 0,21 | 0,21 | 0,20 - 0,25 |
| Kritische Strömungsgeschwindigkeit (Suspensionsbeginn) | [m/s] | 0,26 | - | 0,25 - 0,30 |

5 Aufbau eines morphodynamisch-hydrodynamischen numerischen Modells

Der in diesem Kapitel beschriebene Stand der Arbeiten ist als vorläufig anzusehen. In den ersten Wochen des Jahres 2009 sind umfassende weitere Testläufe der Modelle und entsprechende Weiterentwicklungen vorgesehen, die in einer aktualisierten Version dieses Berichtes berücksichtigt werden.

Es wurden zwei zweidimensional tiefengemittelte numerische Modelle auf Basis der Höhendaten aus den Peilungen im Jahr 2006 und einer Laserscanbefliegung im Jahr 2007 aufgebaut. Ein großräumiges Modell bildet die Hydrodynamik der gesamten Elbmündung ab, während ein kleinräumiges Modell neben der Hydrodynamik auch die Morphodynamik im Bereich des Neufelder Watts erfassen soll.

Folgend werden die Abgrenzungen der Modellgebiete, die Netzgenerierungen sowie die numerischen Berechnungen dargestellt. Es wird ein Ausblick auf die weitere Vorgehensweise bei der numerischen Modellierung des Untersuchungsgebietes gegeben.

5.1 Konzeption

In Phase 2 wurde ein hydrodynamisch-numerisches Modell entwickelt. Dieses Modell wurde auf Grundlage der 20 m-Rasterdaten aus der Laserscanbefliegung sowie den Peilungen in der Elbmündung im Jahr 2004 gebildet. Da es für erste Testrechnungen konzipiert wurde, ist die Abbildung des Untersuchungsgebietes grob. Die Oberwasserränder befindet sich in Brunsbüttel und für den Zufluss der Oste in Belum, der Unterwasserrand liegt bei Cuxhaven-Steubenhöft. Die geschlossenen Ränder werden durch die Deichlinien entlang des Stroms gebildet.

Aus den auch im Anschluss an Phase 2 vorgenommenen Berechnungsläufen an diesem Grobmodell der Elbmündung ist ersichtlich, dass die Steuerung des instationären, hydrodynamisch-numerischen Modells über die Vorgabe von Wasserständen an allen offenen Rändern möglich ist. Weiterhin ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass die Auflösung des Finiten-Elemente-Netzes (FE-Netzes) für die Be- und Entwässerung der Wattflächen über die Prielsysteme nicht ausreichend ist.

In Phase 3 des Projektes war somit eine Neuerstellung des Modells zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Watt erforderlich. Eine feinere FE-Netzstruktur war notwendig, um die Strömungen und Sedimenttransportprozesse im Neufelder Watt realistisch abbilden zu können. Da es keine Naturmessungen im Untersuchungsgebiet bei Neufeld gibt, die als Randbedingungen für das hydrodynamisch-numerische Modell nutzbar sind, war die Verringerung der Größe des Modellgebietes wegen der Lage der vorhandenen Pegelmessstationen nicht möglich. Ein Detaillierungsgrad des Modells, welcher eine morphodynamische Berechnung zuließe, war in dieser Größenordnung mit den verfügbaren Rechenressourcen nicht umsetzbar.

Stattdessen wurden in Phase 3 zwei FE-Modelle eingesetzt. In dem großräumigen Detailmodell GREAT werden nur hydrodynamisch-numerische Berechnungen durchgeführt. Diese haben den Zweck die, hydrodynamischen Randbedingungen für das kleinräumige Detailmodell SMALL zu generieren. Dieses bildet nur einen Teil des Neufelder Watts ab; eine für die morphodynamische Betrachtung notwendige feinere Auflösung ist deswegen möglich. Die Randbedingungen für den Sedimenttransport im Neufelder Watt können aus den Feldmessungen generiert werden.

5.2 Abgrenzung der Modellgebiete

Die geographische Abgrenzung der numerischen Modelle erfolgte unter Berücksichtigung der vorhandenen Topographie, des Strömungsfeldes im Untersuchungsgebiet Neufelder Watt und der Lage kontinuierlich aufzeichnender Strömungs- und Wasserstandsdaten sowie der vorliegenden Trübungsmessungen.

5.2.1 Abgrenzung des großräumigen Detailmodells GREAT

Das großräumige Detailmodell GREAT hat im Wesentlichen die gleichen Abgrenzungen wie das Grobmodell in Phase 2. Erläuterungen dazu sind dem Abschlussbericht, Phase 2 zu entnehmen. Lediglich der Unterwasserrand bei Cuxhaven ist verändert: die Richtungsänderung innerhalb der Randlinie ist von der nördlichen Begrenzung der Fahrrinne nordostwärts auf die nördliche Begrenzung des Klotzenlochs verschoben (Abb. 39). Diese Veränderung ergab sich aus der Auswertung der hydrodynamisch-numerischen Berechnungen am Grobmodell in Phase 2, wonach eine nicht annähernd orthogonale Lage des Unterwasserrandes zur Ein-/Ausströmungsrichtung im Bereich des Klotzenlochs zu großen Instabilitäten in den Berechnungen führte. Das Modell GREAT umfasst rund 220 km².

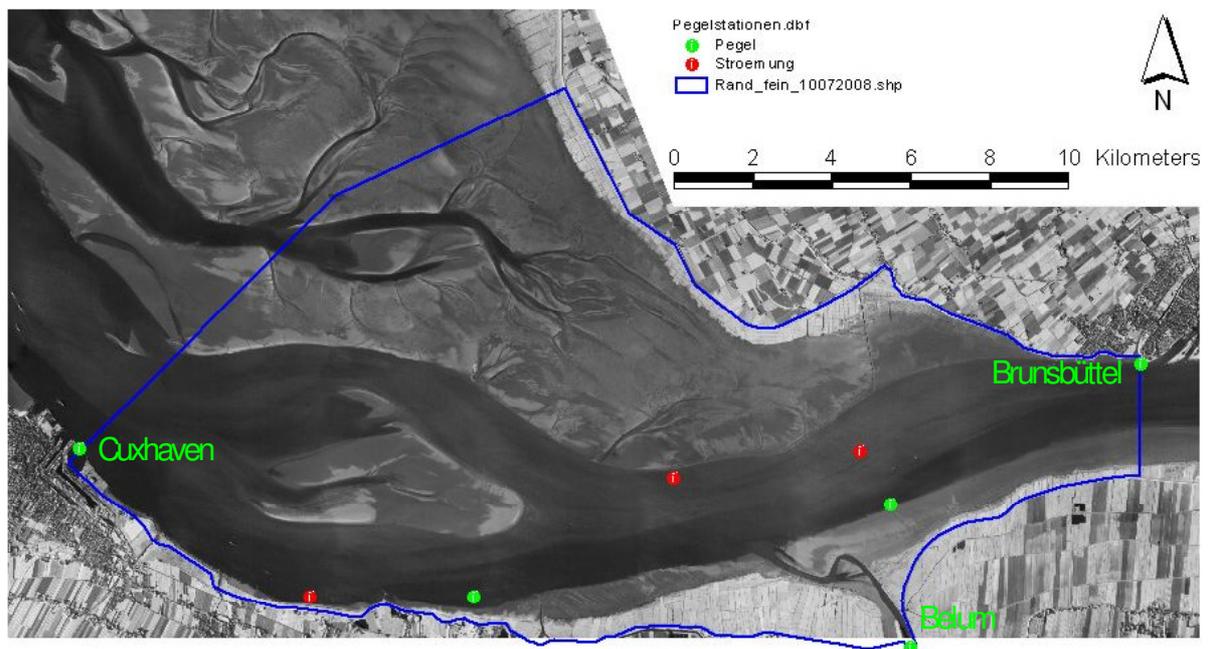


Abbildung 39: Abgrenzung des großräumigen Detailmodell GREAT

5.2.2 Abgrenzung des kleinräumigen Detailmodells SMALL

Die Abgrenzungen des kleinräumigen Detailmodell SMALL erfolgten aufgrund der Bathymetrie, der temporären Messstationen und der von der Bundesanstalt für Wasserbau berechneten Strömungsfelder im Neufelder Watt (Quelle: <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Projekte/Elbe/index-de.html>).

Das Modell hat nur offene Ränder (Abb. 40); vier davon werden über die im großräumigen Detailmodell ermittelten Durchflüsse gesteuert. Der fünfte Rand wird über die Aufzeichnungen des Wasserstandes in der Mündung der Neufelder Rinne ge-

steuert. Die über den Durchfluss definierten Modellränder sind so gewählt, dass sich alle für die Neufelder Rinne entscheidenden Strömungen in den Durchflussrandbedingungen wiederfinden.

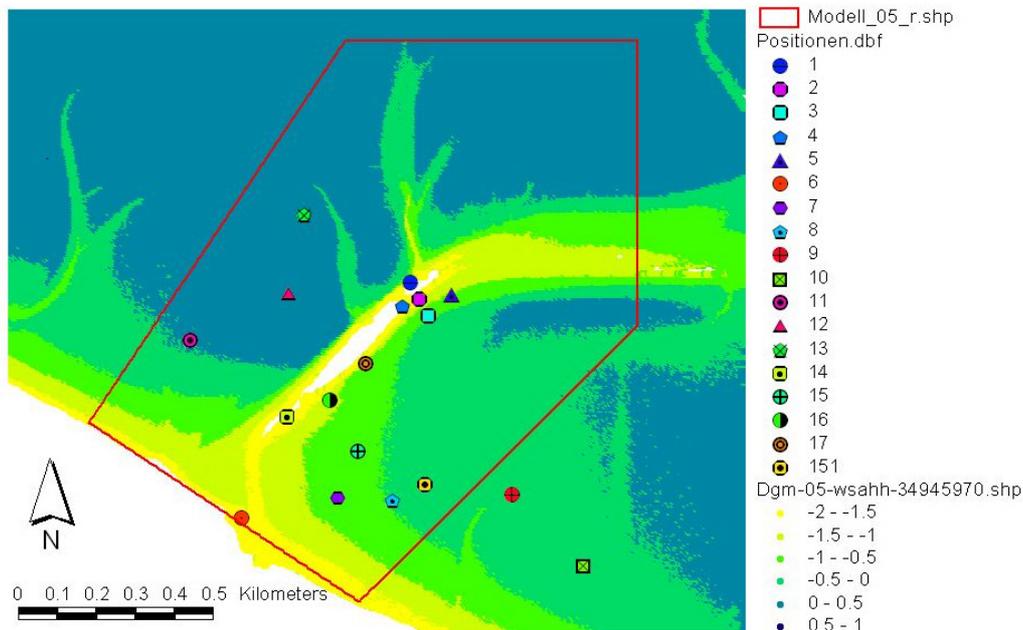


Abbildung 40: Abgrenzung des kleinräumigen Detailmodell SMALL

5.3 Finite Elemente-Netze

Entsprechend zur Konzeption wurden in Phase 3 zwei Finite-Elemente-Netze erzeugt. Für das Detailmodell GREAT wurde dabei der Netzgenerator Gaja3D weiterentwickelt und verwendet. Das FE-Netz des Detailmodell SMALL wurde mit einem Tool für eine automatische Generierung eines regelmäßigen Rechteckgitters erzeugt.

5.3.1 Finite-Elemente-Netz für das großräumige Detailmodell GREAT

Das FE-Netz des großräumigen Detailmodell GREAT wurde mit dem automatischen Netzgenerator Gaja3D erstellt. Dieser erzeugt aus vorhandenen Höhendaten und einem zugehörigen Randpolygon des Modellgebiets (Abb. 41) durch automatische Triangulation ein zweidimensionales, unstrukturiertes FE-Netz. Dabei berücksichtigt der Generator nicht nur Bruchkanten in den Höhendaten, sondern auch weitere Voreinstellungen, wie beispielsweise die maximale und minimale Elementgröße.

Die Geländehöhen entstammen der vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg beauftragten Laserscanbefliegung (5 m-Raster) aus dem Jahr 2007 sowie aus den Peilungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie von 2006. Diese Daten wurden zusammengefügt und an einigen Stellen bearbeitet. Die Hafeneinfahrten bei Cuxhaven-Steubenhöft und Brunsbüttel wurden geschlossen, indem die Höhen denen ihrer Umgebung angepasst wurden. Das Siel in Neufeld wurde ebenso aus den Höhendaten entfernt wie der Zufluss bei Otterndorf und einige Buhnen bei Brunsbüttel sowie östlich von Cuxhaven. Dieses Vorgehen dient der Stabilität der

numerischen Berechnung, ohne sich auf die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet auszuwirken.

Eine Erweiterung des Programms Gaja3D ermöglicht die automatisch generierten Bruchkanten zu bearbeiten, zu entfernen und neue hinzuzufügen, bevor mit der Netzerstellung fortgefahren wird. Für das großräumige Detailmodell war diese Entwicklung notwendig, um den unterschiedlichen Geländeformen innerhalb des Modellgebietes gerecht zu werden. So mussten im Bereich der Wattflächen die Prielsysteme hinreichend genau abgebildet werden. Hier mussten kleine Änderungen in der Geländeneigung als Bruchkante erfasst werden, während für den Übergang vom Fluss-schlauch auf die Wattflächen erst weitaus größere Neigungsänderungen als Bruchkante erkannt werden sollten. Für die Erkennung von Böschungsfuß und -kopf der Deiche waren noch größere Neigungsänderungen ausschlaggebend. Durch die Neuerungen in Gaja3D konnten die Bruchkanten des großräumigen Modellgebietes mit unterschiedlichen, an den verschiedenen Geländeformen optimierten, Einstellungen generiert und anschließend entsprechend zusammengefügt werden.

Neben den Bruchkanten erlaubte die in beliebigen Abschnitten mögliche Zuordnung der Einstellungen für die Elementbeschaffenheit eine Fokussierung auf Teilabschnitte des Modellgebietes.

Für das Detailmodell GREAT waren das Klotzenloch sowie alle für die Be- und Entwässerung der Wattflächen und des Medemgrundes entscheidenden Priele so fein zu diskretisieren, dass die Tideströmungen realistisch berechnet werden können. Eine noch feinere Auflösung war im Bereich der Neufelder Rinne erforderlich, um ausreichend genaue Randbedingungen für das Detailmodell SMALL generieren zu können. Die Ränder des Detailmodell SMALL wurden als Bruchkanten berücksichtigt, so dass dort entsprechende Elementkanten generiert worden sind (Abb. 42). Auch die Oste wurde so abgebildet, dass der Zustrom auch bei Ebbe den Weg in die Elbe findet.

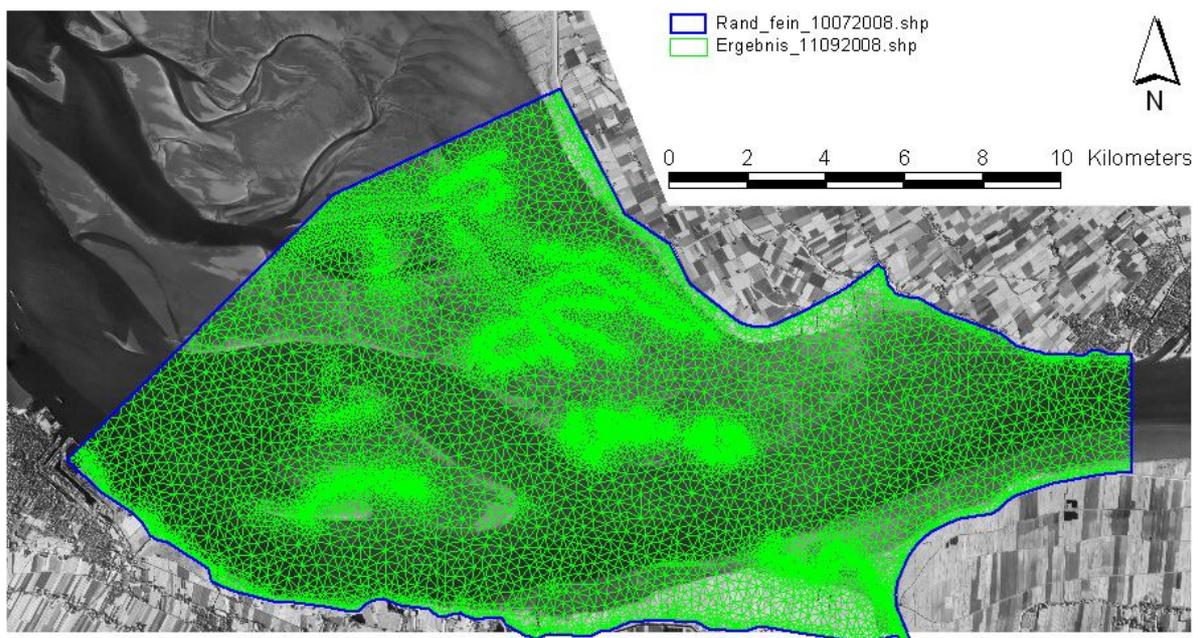


Abbildung 41: FE-Netz des großräumigen Detailmodell GREAT

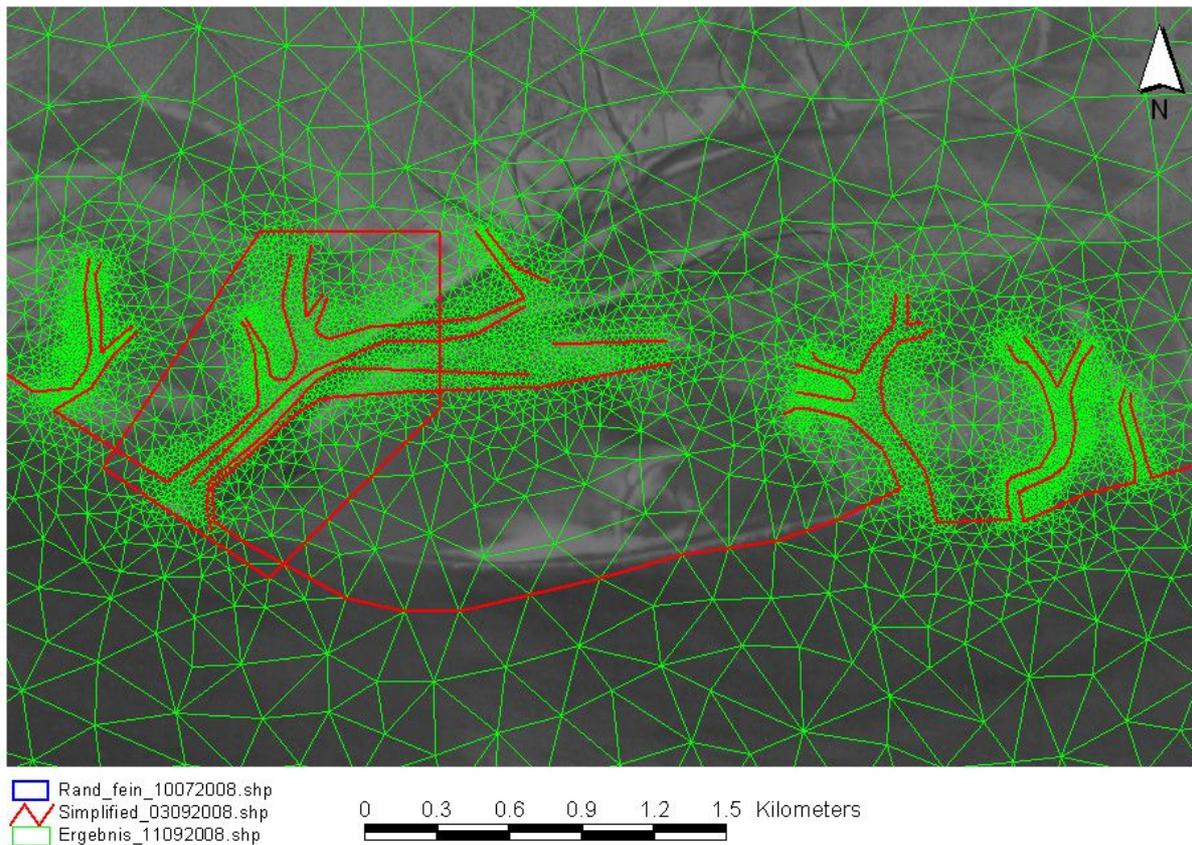


Abbildung 42: FE-Netz des großräumigen Detailmodell GREAT – Neufelder Watt und Abgrenzung Detailmodell SMALL

Das mit Gaja3D automatisch generierte FE-Netz besteht aus knapp 34.500 Finiten Elementen. Die feiner vernetzten Gebiete sind in Abbildung 42 gut zu erkennen.

Im Anschluss an die Vermaschung wurden die bearbeiteten Höhendaten auf die FE-Knoten übertragen.

Die Zuweisung der Elementklassen erfolgte in BCE2D. Das Modellgebiet weist über nahezu den gesamten Bereich eine feinsandige Flusssohle auf. Eine Unterscheidung bezüglich der Rauigkeiten formte drei Klassen: feinsandige Bathymetrie, Vorland und Deich. Eine weitere Aufteilung ergab sich unter dem Aspekt der Turbulenz, welche neben der Fließgeschwindigkeit im Wesentlichen von der Elementgröße und der Wassertiefe abhängig ist. Dieser Betrachtungsweise bezweckte eine Unterteilung der Elemente mit feinsandigem Untergrund in vier Klassen, so dass im Detailmodell GREAT insgesamt sechs Elementklassen vorliegen.

5.3.2 Finite-Elemente-Netz für das kleinräumige Detailmodell SMALL

Im Gegensatz zum großräumigen Detailmodell GREAT wurde für das kleinräumige Detailmodell SMALL ein strukturiertes FE-Netz erstellt. Dieses besteht aus Quadraten mit einer Kantenlänge von 10 m. An den Ränder wurde das regelmäßige Netz mit Trapezen bzw. Dreiecken an die Randlinien angeschlossen (Abb. 43).

Abschließend besteht das FE-Netz aus rund 13.000 Finiten Elementen. Den Elementknoten wurden die 5 m-Rasterdaten der Laserscanbefliegung von 2007 zugewiesen.

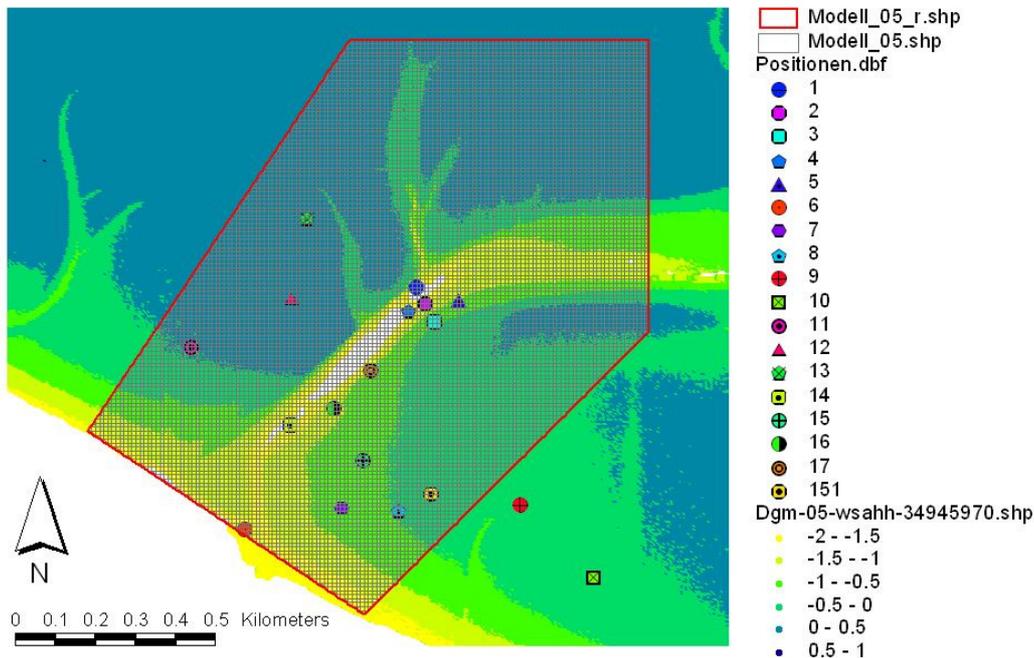


Abbildung 43: FE-Netz des kleinräumigen Detailmodell SMALL

5.4 Numerische Berechnung

Mit den erstellten FE-Netzen wurde hydrodynamisch-numerische Berechnungen mit dem Strömungsmodell RMA-Kalypso vorgenommen. Hauptsächlich wurde das Modell GREAT den realen Randbedingungen des Sommers 2007 zum Zwecke der Kalibrierung unterzogen. Die Strömungsmodellierung am Modell SMALL beschränkte sich bisher auf erste Testläufe unter der Annahme nicht-realer Randbedingungen. Der Sedimenttransport wurde noch nicht abgebildet.

5.4.1 Hydrodynamisch-numerische Berechnung des großräumigen Detailmodells GREAT

Das großräumige Detailmodell GREAT bildet die gesamte Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel ab. Wie in Abschnitt 5.1 erläutert, dient der Einsatz dieses Modells der Generierung der hydrodynamischen Randbedingungen für das kleinräumige Detailmodell SMALL. Es wurden instationäre Berechnungen der Hydrodynamik an dem Modell GREAT durchgeführt. Zur Steuerung wurden die Pegelaufzeichnungen der Dauermessstationen Cuxhaven-Steubenhöft, Brunsbüttel Mole 4 sowie Belum aus den Monaten Juni und Juli 2007 eingesetzt. Dieser Zeitraum wurde gewählt, weil gleichzeitig im Rahmen dieses Projektes temporär Trübung, Geschwindigkeit und Wasserstand im Bereich der Neufelder Rinne und den höher gelegenen Wattflächen aufgezeichnet wurden.

Für die Ausgabe der Randbedingungen für das kleinräumige Detailmodell wurde RMA-Kalypso so erweitert, dass an definierten Linien (Kontinuitätslinien) entlang der

Elementkanten die gewichteten Wasserstände, die Durchflüsse sowie die Fließrichtungen berechnet und ausgegeben werden.

Die Kalibrierung des Modells umfasste neben den Bodenkennwerten und der Abbildung der Turbulenz über die Definition konstanter Wirbelviskositäten entsprechend der Elementklassen im wesentlichen die Darstellung des Trocknens und Wiederbenetzens der Knoten bzw. Elemente. Hierfür wurde der Marsch-Algorithmus eingesetzt. Dieser definiert eine endliche poröse Zone unterhalb der Geländeoberkante, und eine Übergangszone im Bereich der Geländeoberkante, in welchem der Wechsel von freier Strömung im Gewässer auf die Grundwasserströmung im Boden erfolgt. Die tatsächliche Fließtiefe wird entsprechend dieser Zonen in eine rechnerische Fließtiefe umgerechnet.

Ohne Marsch-Algorithmus wird ein Element deaktiviert, sobald ein Knoten trocken fällt. Der Marsch-Algorithmus generiert hingegen eine rechnerische Fließtiefe an einem solchen Knoten und das Element wird erst deaktiviert, wenn diese unterhalb einer definierten Grenze (Deaktivierungstiefe) sinkt. Steigt das Wasser wieder an, so wird ein Element wieder aktiviert, sobald die rechnerische Fließtiefe an dem Knoten die Aktivierungstiefe wieder übersteigt. Dieses Vorgehen stabilisiert die numerische Berechnung insbesondere bei der Abbildung der Tide auf den Wattflächen und in den Prielen.

Die Definition der Marschparameter sowie der Deaktivierungs- und Aktivierungstiefen stellte sich bei der Kalibrierung des Modells als entscheidend heraus. Diese Werte sind in einem solch hohen Maße systemabhängig, dass die Erkenntnisse aus einer diesbezüglich durchgeführten Parameterstudie an einem Trapezgerinne nur sehr unzureichend übertragen werden konnte.

Es wurde eine Berechnung über einen Simulationszeitraum von 48 Stunden durchgeführt. Als Randbedingungen wurden Pegelaufzeichnungen aus dem Juni 2007 eingesetzt (Abb. 44). Die Simulation konnte die Be- und Entwässerung der Wattflächen abbilden. Abbildung 45 zeigt die Wasserspiegellage für einen kurz vor Beginn des Niedrigwassers (Simulationszeit 8 Stunden). Es ist zu erkennen, dass sich nicht nur ein Gefälle des Wasserstandes von Oberwasser nach Unterwasser einstellt, sondern zudem auch weitaus stärkere Gefälle von den Prielen auf den Wattflächen hin zum Unterwasserrand bei Cuxhaven. Diese treten auf, weil mit sinkendem Wasserspiegel die Verbindung von der Elbe zu den Prielen abreißt und infolge dessen kein Strömungsdruck von Oberwasser mehr in die Priele drückt.

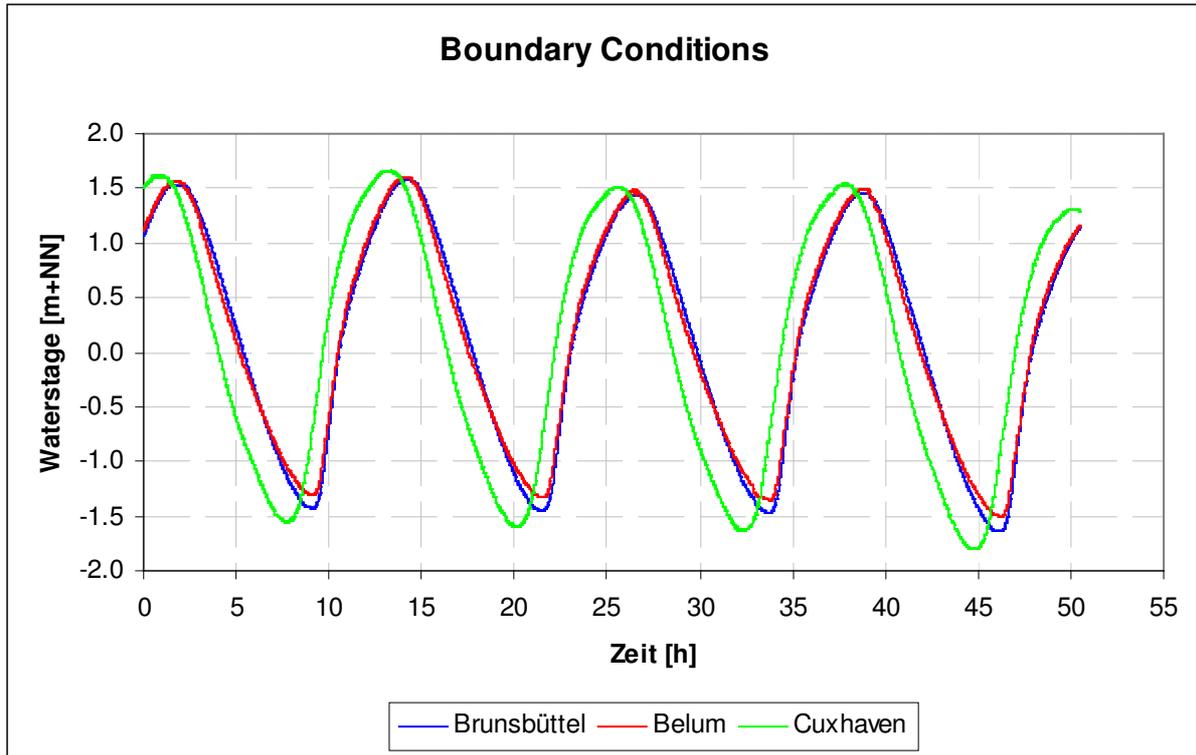


Abbildung 44: Randbedingungen Detailmodell GREAT

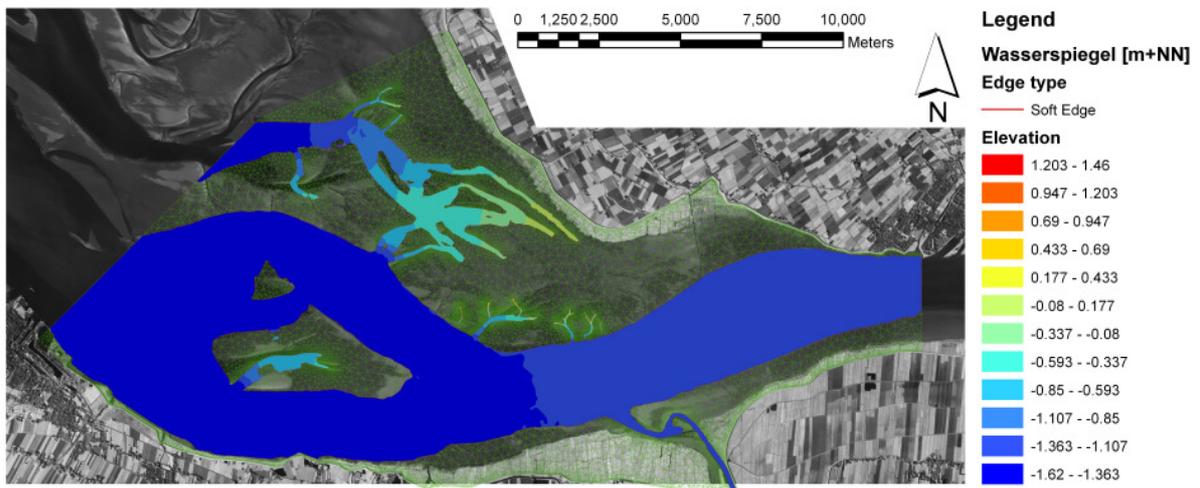


Abbildung 45: Wasserspiegellage Detailmodell GREAT

Die Lage des Wasserspiegels und das Strömungsbild im Bereich der Neufelder Rinne sind in Abbildung 46 dargestellt. Auch hier ist der Gradient des Wasserstandes vom Watt zur Mündung der Rinne ersichtlich. Die Strömung folgt kurz vor Eintreten des Tideniedrigwassers dem Verlauf der Neufelder Rinne.

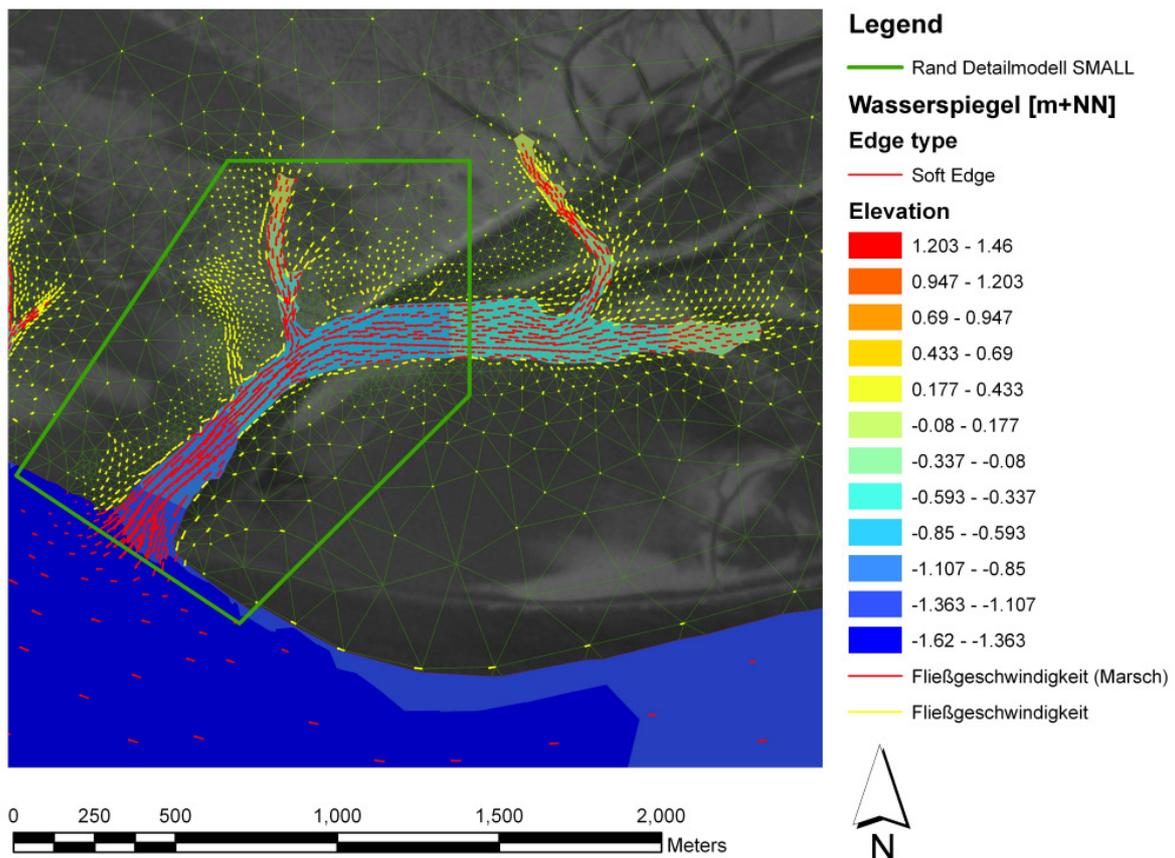


Abbildung 46: Wasserspiegellage und Strömungsbild in der Neufelder Rinne

Während der Simulation des Detailmodells GREAT wurden an der Berandung des Modells SMALL (Abb. 46) die Wasserstände und Durchflüsse ermittelt und herausgeschrieben. Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen die so generierten Randbedingungen für das kleinräumige Detailmodell an der Mündung der Neufelder Rinne in die Elbe (Kontinuitätslinie 5). Der Verlauf der Tidekurve findet sich sowohl in den Wasserständen als auch in den Durchflüssen wieder. Die Maxima der Durchströmung werden bei auflaufendem und ablaufendem Wasser erreicht; bei Niedrigwasser und Hochwasser erfolgt die Strömungsumkehr. Die Fließrichtung bei steigendem Wasserstand entspricht der allgemeinen Strömungsrichtung gen Osten. Bei ablaufendem Wasser ist zu beobachten, dass die Strömungsrichtung zunächst bei noch hohem Wasserstand der allgemeinen Fließrichtung nach Westen folgt und dann mit sinkendem Fließtiefe immer weiter in Richtung der Neufelder Rinne gen Südwesten abdreht.

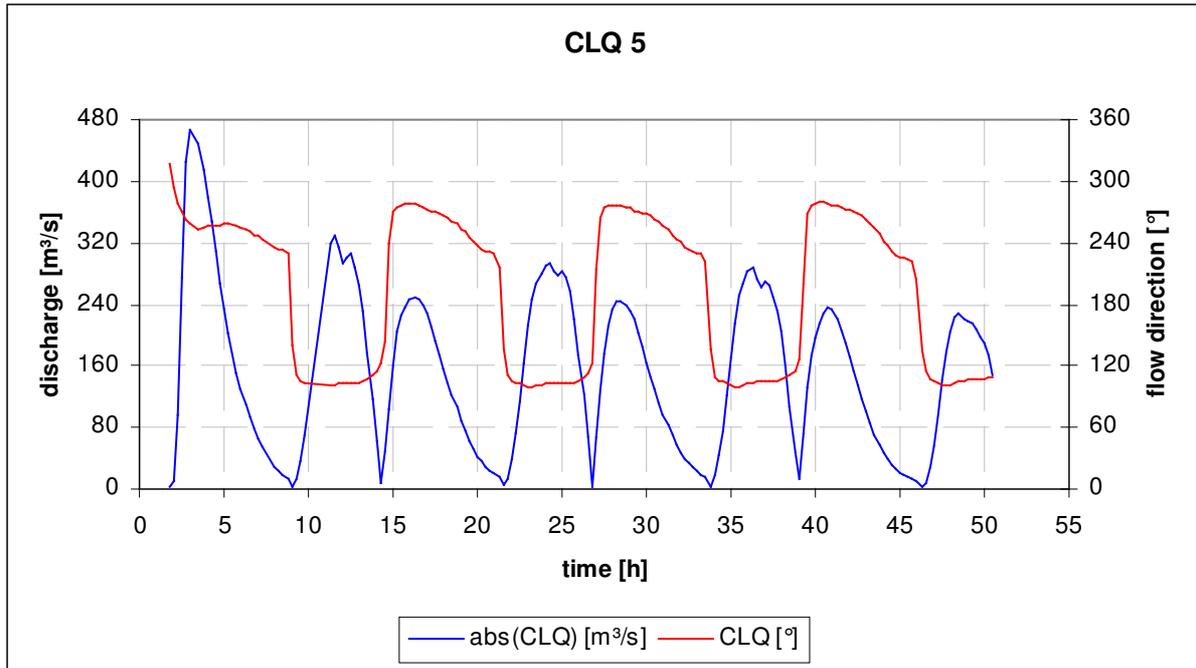


Abbildung 47: Generierte Durchflussrandbedingung für das Detailmodell SMALL, Kontinuitätslinie 5

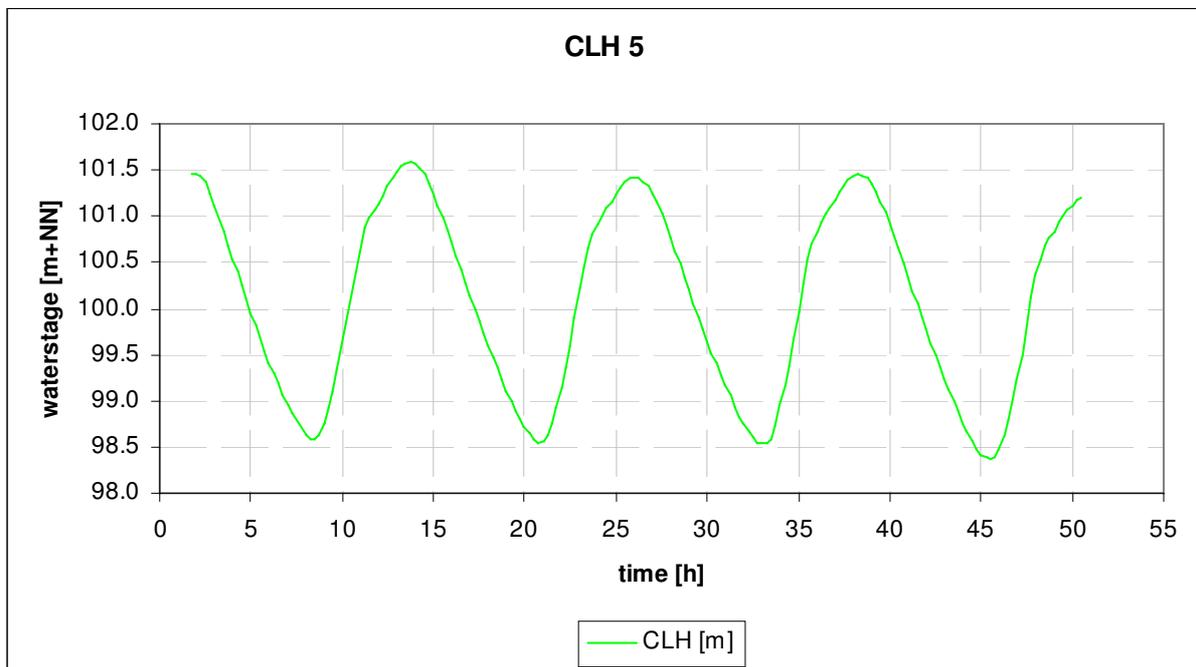


Abbildung 48: Generierte Wasserstandsrandbedingung für das Detailmodell SMALL, Kontinuitätslinie 5

5.4.2 Hydro- und morphodynamisch-numerische Berechnung des kleinräumiges Detailmodell SMALL

Das kleinräumige Detailmodell SMALL bildet einen Teil der Neufelder Rinne mit der umliegenden Wattfläche ab. Die Steuerung des Modells erfolgt über die Vorgabe der

Durchflüsse an vier offenen Rändern und der Definition der Wasserspiegellage am fünften offenen Rand.

Bisher erfolgten ausschließlich hydrodynamisch-numerische Testrechnungen mit nicht-realen Randbedingungen. Sie zeigen, dass das generierte FE-Netz für eine Strömungssimulation geeignet ist. Morphodynamische Berechnungen wurden an dem Modell noch nicht durchgeführt.

Vorbereitend wurde die Berücksichtigung spezifischer Seegangparameter an externen Koordinaten in das Strömungsmodell implementiert.

5.5 Ausblick

Die hydrodynamisch-numerischen Berechnungen am Detailmodell GREAT befinden sich aktuell in der Endphase der Kalibrierung. Anschließend soll das Modell anhand der Messdaten des Juli 2007 validiert werden. Mit dem validierten Modell können dann die realen Randbedingungen für das kleinräumige Detailmodell SMALL generiert werden. Diese müssen geprüft und gegebenenfalls aufbereitet werden.

Das Modell SMALL soll zunächst hydrodynamisch und später morphodynamisch kalibriert und validiert werden. Dabei bilden die im Rahmen des Projektes im Neufelder Watt gemessenen Schwebstoffkonzentrationen die Basis für die Berechnung des Sedimenttransportes. Der für die morphodynamische Betrachtung nicht zu vernachlässigende Seegang wird ebenfalls den Feldmessungen entnommen und soll in Form der signifikanten Wellenparameter in der Berechnung berücksichtigt werden.

6 Schlussfolgerungen

Die in Phase 3 des Projektes „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ erzielten Messergebnisse lassen bestimmte Aussagen über die morphologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes sowie über Prozesse des Sedimenttransports auf den Wattflächen zu.

Aus den Ergebnissen der Fächerecholotvermessungen geht weiterhin eine Zweiteilung der untersuchten Fläche in den dynamischen Bereich der Einfahrt und den stabileren aber dennoch sich verändernden Hauptteil der Neufelder Rinne hervor. Über einen Zeitraum von mehreren Wochen findet eine ostwärts gerichtete Verschiebung der Einfahrt statt, bis der Einfahrtsbereich nahezu rechtwinklig vom Verlauf des Hauptteils abzweigt und nicht mehr durch den Ebbstrom durchströmt wird. Der Prallhang des Ebbstroms wird mehr und mehr ausgeräumt, bis sich ein neuer Durchstich bildet, der westlich der zuvor aufgezeichneten Einfahrt liegt. Anschließend setzt wieder eine Bewegung nach Osten ein. Der alte Verlauf der Einfahrt verlandet in der Folgezeit. Dieser Vorgang konnte im Jahr 2008 dreimal beobachtet werden. In einigen Fächerecholotaufnahmen sind sowohl die neue Einfahrt als auch der Altarm zu sehen. Die Einfahrt erreicht dabei jeweils eine kritische Position, bevor der neue Durchstich erfolgte. Diese kritische Position konnte auch im Jahr 2007 bereits einmal beobachtet werden.

Am nordöstlichen Ende des Hauptteils der Neufelder Rinne knickt der Verlauf Richtung Osten ab. Dieser Bereich wurde aufgrund der dortigen sehr geringen Wassertiefen nicht weiter untersucht. Vor diesem Bereich mündete im Jahr 2008 ein Priel aus Norden kommend in die Neufelder Rinne, über den die Restentwässerung der Wattflächen nördlich der Neufelder Rinne stattfindet. Im Jahr 2007 war dieses Prielsystem im Vergleich zu Untersuchungen im Jahr 2006 stark ausgedehnt und beeinflusste insbesondere während der Ebbphase die Strömung in der Neufelder Rinne entscheidend. Es verursachte eine tiefe Auskolkung in diesem Bereich, die im Jahr 2008 deutlich zurückging, bis sie eine Ausdehnung erreichte, die bereits 2006 einmal aufgezeichnet werden konnte. Dieser Rückgang ist auf eine deutliche Verkleinerung des Prielsystems zurückzuführen.

Der Hauptteil der Neufelder Rinne war 2008 im Vergleich zum Einfahrtsbereich relativ lagestabil. Dennoch fand eine langsame aber kontinuierliche Verschiebung der Prielachse nach Nordwesten statt, die als eine Drehung um einen Punkt im Nordosten des Hauptteils der Rinne, in etwa an der tiefsten Stelle, gesehen werden kann. Westlich dieses Punktes wurde die Nordwestböschung der Rinne durch den Ebbstrom erodiert und die Achse der Rinne verschob sich. Die Südostböschung schob sich vor in Richtung Nordwesten. Östlich des Punktes verschob sich das Nordufer in Richtung Süden. Das Südufer wurde erodiert. Diese Entwicklung steht im genauen Gegensatz zur Entwicklung des Jahres 2007 und steht dem ostwärts gerichteten Sedimenttransport auf den Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne sowie auf dem Neufelder Sand entgegen. Die Rückverschiebung des Hauptteils der Neufelder Rinne tendiert zu einer Lage der Rinne, die bereits gegen Ende des Jahres 2006 vorlag. Im Jahr 2007 bewirkte der ostwärts gerichtete Sedimenttransport westlich und nordwestlich der Rinne eine langsame Verschiebung des Hauptteils nach Osten. Dabei war die Verlagerung umso größer, je mehr die Ausrichtung von einer West-Ost-Lage in eine Nord-Süd-Lage überging. Anfang des Jahres 2008 war die Ausrichtung des Hauptteils der Rinne so stark in eine Nord-Süd-Lage übergegangen, dass der aus den Messungen hervorgehende starke Einfluss der Ebbströmung am (nördli-

chen) Prallhang vermutlich Erosionen hervorrief, die eine Rückverschiebung nach Nordwesten induzierten. Die Ausrichtung des Hauptteils der Rinne nähert sich wieder einer stärkeren West-Ost-Lage. Es ist möglich, dass der erodierende Einfluss der Ebbströmung in der Rinne in diesem Zuge abnimmt und der ostwärts gerichtete Sedimenttransport wieder an Bedeutung gewinnt. Denkbar ist auch, dass die Rückbildung des von Norden in die Neufelder Rinne mündenden Prielsystems Auswirkungen auf die Entwicklung insbesondere der südlichen Böschung an dieser Stelle hat.

Bei der Auswertung der bathymetrischen Veränderungen konnten im Jahr 2008 zwei Phasen ausgemacht werden, in denen relativ starke Veränderungen im Hauptteil der Neufelder Rinne auftraten. Zwischen den Aufnahmen vom 11.02.2008 und dem 23.04.2008 sowie vom 06.05.2008 und dem 15.07.2008 liegen vergleichsweise dynamische Phasen. Abbildung 49 zeigt quartalsweise die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen des Jahres 2008. Es fällt auf, dass zwischen dem 12.02.2008 und dem 31.03.2008 acht Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s (Windstärke 6) liegen. Die vorherrschende Windrichtung war dabei jeweils Nordwest. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese relativ lange Phase größerer Windstärken zu größeren Veränderungen geführt hat. Noch bis nach dem Ostwindereignis vom 18.-24.04.2008 mit Windgeschwindigkeiten von teilweise 10 m/s konnten an Position 13 ungewöhnlich hohe Sedimentkonzentrationen festgestellt werden. Zwischen dem 06.05.2008 und dem 15.07.2008 liegt lediglich ein auffälliger Zeitraum vom 24.-29.05.2008 mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 14 m/s aus östlichen Richtungen. Auch hier können an allen drei Messpositionen erhöhte Sedimentkonzentrationen festgestellt werden.

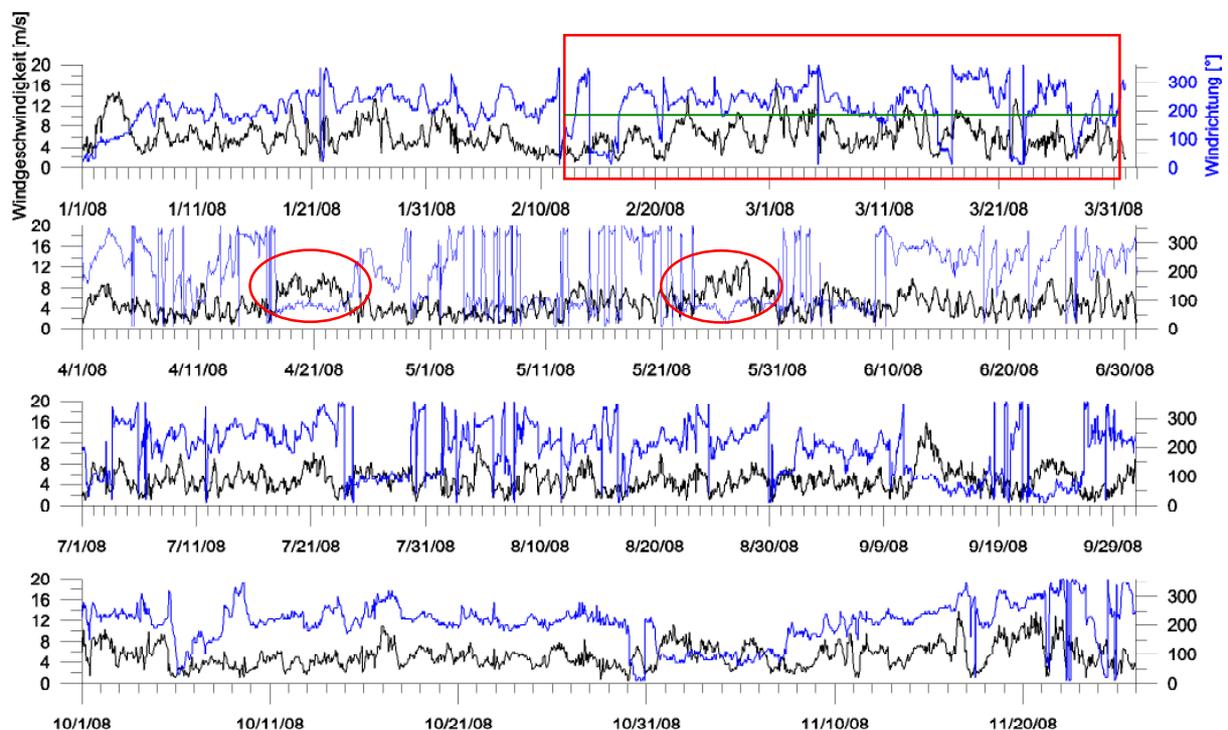


Abbildung 49: Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen im Jahr 2008

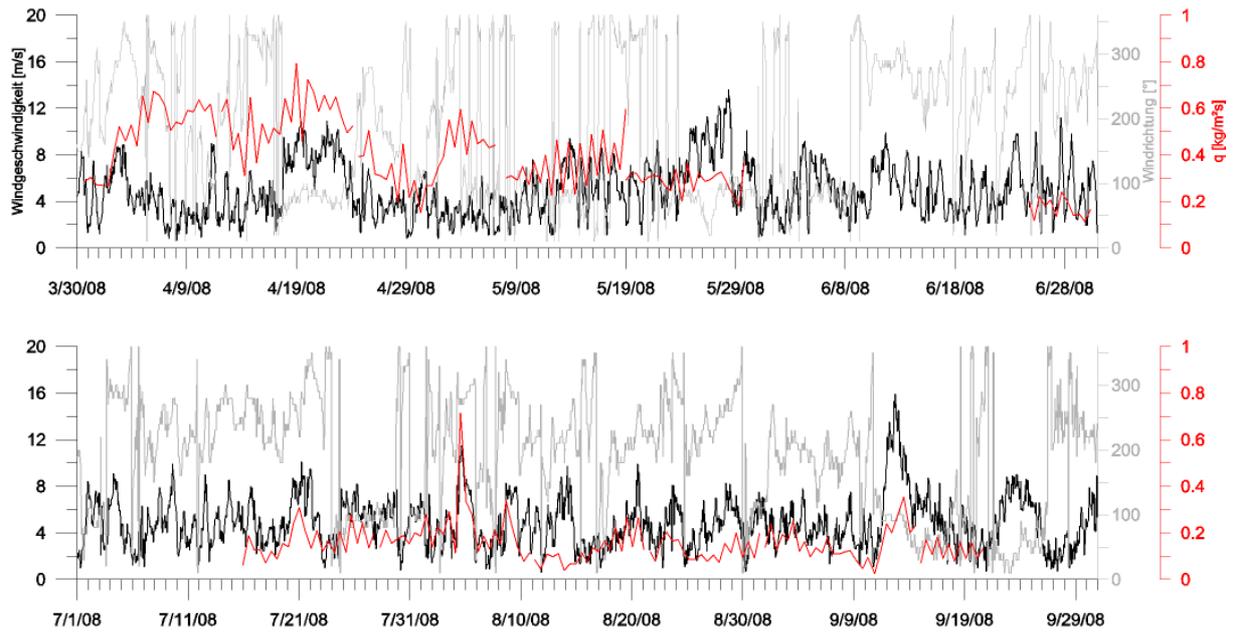


Abbildung 50: Sedimenttransportkapazität an Position 13; zusammen dargestellt mit Windparametern von April bis Oktober 2008

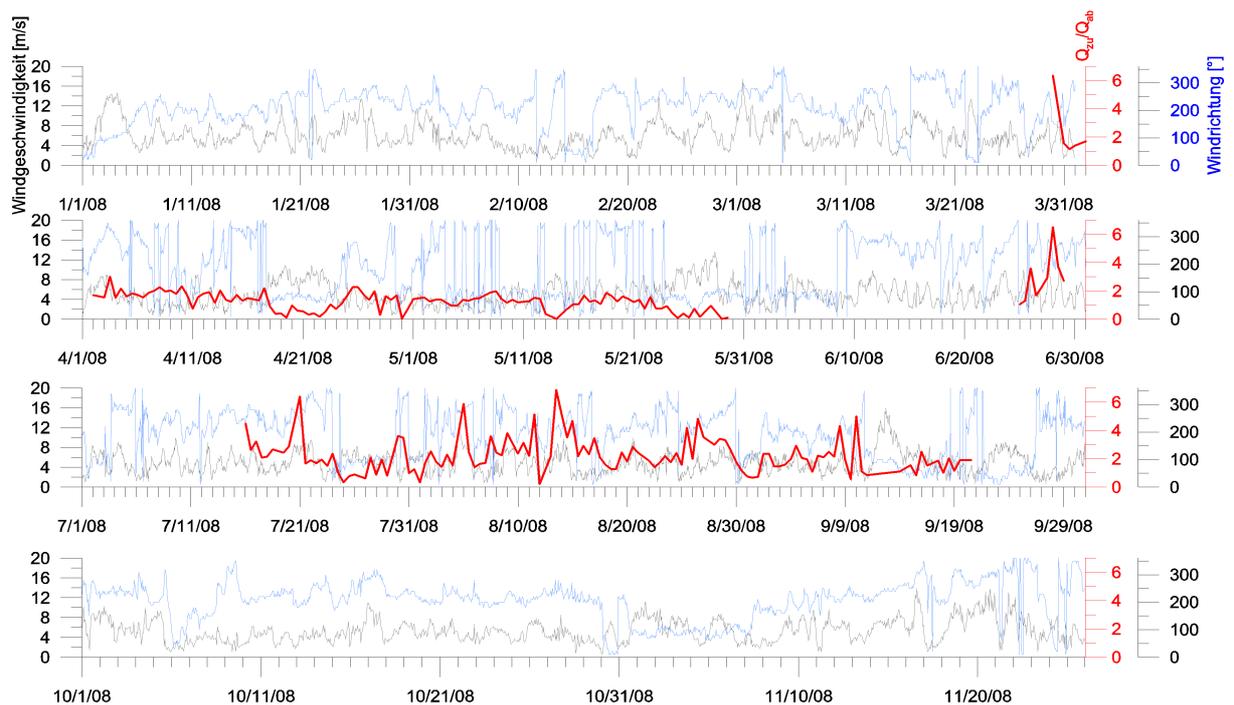


Abbildung 51: Quotient des residuellen Transportes (Q_{Flut}/Q_{Ebbe}) an Position 13; zusammen dargestellt mit Windparametern von April bis Oktober 2008

Stärkere morphologische Veränderungen werden vermutlich einerseits durch Ostwindereignisse mit Windstärken ab 5-6 Beaufort induziert, während denen bei niedrigeren Wasserständen verstärkt Erosion stattfindet, die sich durch höhere Sedimentkonzentrationen äußert. Des Weiteren treten höhere Sedimentkonzentrationen während länger anhaltender Starkwindereignisse auch aus westlichen Richtungen auf.

Beim Verlauf der Sedimentkonzentration über einen Tidezyklus auf den Wattflächen sowie in der Rinne konnte das bereits in Phase 2 postulierte strömungsabhängige Muster bestätigt werden. Ein erstes Maximum liegt zu Beginn der Aufzeichnung der Trübungsmessgeräte, wenn Sedimente, die während der vorangegangenen Ebbe-phase auf dem Watt abgelagert wurden, wieder re-mobilisiert werden. Dieser Vorgang findet unmittelbar nach Benetzung des Watts bei Wasserständen von wenigen Zentimetern statt und dauert nicht lange an. Er wird nur durch sehr wenige Sensoren bestimmt und wird nicht als eigenes Maximum definiert. Das erste Maximum entsteht bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten während der Flutphase. Weist der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit ein Peak auf, liegt das Maximum der Sedimentkonzentration in der Regel schon vor diesem Peak. Weist der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit einen Sattelpunkt auf, liegt das Maximum in der Regel zu Beginn dieses Sattels. Das zweite Maximum der Sedimentkonzentration entsteht anschließend bei sinkenden Strömungsgeschwindigkeiten in der Regel am Ende des Sattelpunktes, wobei erhöhte Konzentrationen insbesondere an den unteren Sensoren des Messgerätes registriert werden. Während des Zeitraumes geringer Strömungsgeschwindigkeiten zeichnen sich die Absinkprozesse der suspendierten Sedimente durch erhöhte Konzentrationen an den untersten Sensoren ab. Nach dem Kenterpunkt werden die zuvor sedimentierten Partikel bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten wieder re-mobilisiert und verursachen das dritte Maximum, welches in der Regel zu Beginn des Sattelpunktes der Strömungsgeschwindigkeit während der Ebbe-phase liegt. Am Ende dieses Sattels bei sinkenden Strömungsgeschwindigkeiten entsteht das fünfte Maximum der Sedimentkonzentration.

Dieses beschriebene Muster ist je nach Messposition, Wasserstand und Seegangsverhältnissen mehr oder weniger stark ausgeprägt. Am deutlichsten tritt es bei Wasserständen ab 1,50 m über dem Wattboden auf. Bei geringeren oder höheren Wasserständen (ab 2,50 m über Wattboden) schwächen sich die Peaks ab. An besonders exponierten Positionen mit locker gelagertem Boden (Position 15) treten die Maxima sehr deutlich hervor. Zum Teil lösen sich explosionsartig Sedimentwolken und verursachen kurzzeitig sehr hohe Sedimentkonzentrationen. Auch größere Wellenhöhen können stärkere Maxima verursachen. Besonders groß ist dieser Effekt bei geringeren Wasserständen und einem steigenden Verhältnis der Wellenhöhe zur Wassertiefe.

Allgemein steigt die Sedimentkonzentration im Wasser während stärkerer Winder-eignisse aus östlichen Richtungen mit dadurch induzierten geringeren Wasserständen deutlich an. Starkwindereignisse aus westlichen Richtungen haben diesen Effekt nur, wenn sie über einen längeren Zeitraum anhalten.

Abbildung 50 zeigt die Sedimenttransportkapazität an Position 13 zusammen dargestellt mit Windparametern von April bis Oktober 2008. Deutlich erkennbar sind die erhöhten Transportkapazitäten im April bis in den Mai hinein, die den über einen langen Zeitraum sehr hohen Sedimentkonzentrationen geschuldet sind. Besonders ausgeprägt ist ein Maximum der Transportkapazität zwischen dem 18. und dem 24.04.2008, welches durch eine Ostwindwetterlage entsteht, während der geringe Wasserstände und noch einmal erhöhte Sedimentkonzentrationen vorherrschen. Während des Mais sinken die Sedimentkonzentrationen und damit auch die Transportkapazitäten und erreichen zwischen Juli und September ein durchschnittliches Niveau, das mit etwa 0,1 bis 0,2 kg/m²·s nur noch ein Drittel der Transportkapazität aus dem April beträgt. Das Niveau liegt allgemein niedriger, und die Transportkapazität reagiert empfindlicher auf wind- oder strömungsbedingte Änderungen. Besonders

auffällig sind die durch zwei Starkwindereignisse hervorgerufenen Veränderungen der Transportkapazität am 04.08.2008 und am 13.09.2008. Während des ersten Ereignisses verursachen Windgeschwindigkeiten von bis zu 12 m/s aus westlichen Richtungen Wasserstände von einem Meter über dem Mittleren Tidehochwasser und Strömungsgeschwindigkeiten des Flutstroms von bis zu 1 m/s. Insbesondere diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten rufen die sehr hohe Transportkapazität hervor. Am 13.09.2008 liegen die Windgeschwindigkeiten mit bis zu 16 m/s höher. Der Wind weht jedoch aus östlichen Richtungen und induziert Wasserstände von bis zu einem Meter unter dem Mittleren Tidehochwasser. Die Sedimentkonzentration im Wasser steigt zwar an, durch die geringen Strömungsgeschwindigkeiten liegt die Transportkapazität allerdings geringer als während des zuvor beschriebenen Westwindereignisses.

Der Einfluss von Seegang auf die Sedimentkonzentration wird am deutlichsten um den Zeitraum des Tidehochwassers herum (vgl. Abb. 26) sichtbar. Hier erreichen die höchsten Wellen die Messpositionen und fallen mit dem Zeitpunkt geringerer Sedimentkonzentration zusammen (bedingt durch geringe Strömungsgeschwindigkeiten). Die Orbitalgeschwindigkeiten der Wellen verursachen erhöhte Sedimentkonzentrationen an den untersten Sensoren, die das 1,5 bis 2fache der tiefengemittelten Konzentration und das 3 bis 4fache der Konzentration an den obersten Sensoren betragen kann. Bei einem größeren Verhältnis von Wellenhöhe zu Wassertiefe liegen die Sedimentkonzentrationen generell höher, die Ausprägung der Maxima geht zurück und der Einfluss der Wellen wird nicht mehr unmittelbar erkennbar.

Aus den Messungen der Sedimentkonzentrationen und der Strömungsparameter kann die Transportkapazität q [kg/m²·s] berechnet werden. Dieser Wert wurde für alle Positionen errechnet und mit dem jeweiligen Wasserstand multipliziert, um die Sedimentmenge Q zu bestimmen, die pro Zeiteinheit über die Breite von einem Meter transportiert wird. Lag der Wasserstand oberhalb des obersten Sensors des Trübungsmessgerätes, wurde nur der Bereich in der Berechnung berücksichtigt, in dem auch wirklich Daten zur Sedimentkonzentration aufgezeichnet wurden. Anschließend wurde die Bilanz des Sedimenttransportes über die gesamte Höhe des Trübungsmessgerätes über den Tideverlauf berechnet und somit der residuelle Transport an der jeweiligen Position bestimmt.

Abbildung 51 zeigt den Quotienten des residuellen Transportes ($Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$) an Position 13 zusammen dargestellt mit den Windparametern von April bis Oktober 2008. In Zeiten relativ hoher Sedimentkonzentrationen (s. April) liegt das Verhältnis zwischen 1 und 2, das heißt, es wird bis zu zweimal soviel Sediment Richtung Osten transportiert als nach Westen. Liegt die Sedimentkonzentration allgemein auf einem geringen Niveau (s. windarme Zeiträume im Juli und August) genügt bereits das etwas deutlicher ausgeprägtere Maximum der Sedimentkonzentration in der Flutphase, um ein großes Verhältnis von $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ herzustellen. Die während dieser Phasen bewegten Sedimentmengen sind allerdings gering. Deutlich erkennbar sind drei Ostwindwetterlagen zwischen dem 18.04.2008 und dem 25.04.2008, dem 13.05.2008 und dem 15.05.2008 sowie zwischen dem 24.05.2008 und dem 31.05.2008. Hier sinkt der Quotient unter 1; Sediment wird vermehrt Richtung Westen transportiert. Aufgrund der hohen Sedimentkonzentrationen während dieses Zeitraumes sind auch die transportierten Nettomengen relativ groß.

An Position 13 betrug im Jahr 2008 das mittlere Verhältnis von Q_{Flut} zu Q_{Ebbe} 1,86, das heißt, dass nahezu doppelt soviel Material während der Flutphase in östliche Richtungen transportiert wird, wie während der Ebbephase in westliche Richtungen.

Dabei gibt es jedoch auch kurzzeitige Phasen (17.04.-24.04. und 23.05.-30.05.), in denen $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ auf 0,5 bis 0,7 sinkt. Diese Phasen fallen mit stärkeren Ostwindperioden zusammen, in denen insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit während der Ebbephase größer ist als die der Flutphase. In einigen Phase steigt das Verhältnis auf 2,83 an (11.08.-21.08.), dann werden allerdings insgesamt nur geringe Menge transportiert. Das Übergewicht während der Flutphase entsteht durch den beschriebenen Peak zum Zeitpunkt des Maximums der Flutstromgeschwindigkeit, der die konstant geringen Sedimentkonzentrationen in der Ebbephase deutlich überragt.

An Position 15 beträgt das Verhältnis $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ im Mittel des Jahres 3,83. Bedingt ist dieses deutliche Übergewicht durch die höheren Flutstromgeschwindigkeiten bei gleichzeitigem Auftreten einer maximalen Sedimentkonzentration. Größere Abweichungen von diesem Mittelwert nach oben ergaben sich nur in Phasen, in denen die Peaks in der Sedimentkonzentration besonders deutlich hervortraten (vgl. 16.05.-26.05.).

In der Neufelder Rinne an Position 17 liegt das Verhältnis $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ bei 0,80. Es wird mehr Sediment aus der Rinne ausgetragen, welches südlich der Einfahrt teilweise sedimentiert und das oben beschriebene Ebbdelta bildet. Das in der Neufelder Rinne während der Ebbephase transportierte Material stammt von den westlich der Rinne liegenden Wattflächen, auf denen der Sedimenttransport während der Flutphase überwiegt. Während kurzzeitiger Phasen kann $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ auch in der Rinne positiv werden. Dies gilt dann, wenn die Strömungsgeschwindigkeit in der Flutphase deutlich größer wird als in der Ebbephase. Als Beispiel ist hier der 20./21.07.2008 mit Wasserständen von einem Meter über dem Mittleren Tidehochwasser zu nennen, wenn $Q_{\text{Flut}}/Q_{\text{Ebbe}}$ bei 1,3 liegt.

Insgesamt überwiegt der Sedimenttransport während der Flutphase entlang der Wattkante deutlich. Dieser ostwärts gerichtete Transport bewirkt die dynamische Verschiebung der Einfahrt zur Neufelder Rinne. Durch die größeren Wassertiefen in der Rinne als auf den Wattflächen sinken ostwärts transportierte Sedimente im Bereich der Rinne ab. Ein Teil wird während der folgenden Ebbe aus der Rinne ausgetragen und formt das Ebbdelta an der Ausfahrt. Der andere Teil der Sedimente lagert sich an der westlichen Böschung an und bewirkt eine Verschiebung der Prielachse. Auch auf den Wattflächen nördlich der Neufelder Rinne überwiegt der Transport in östlich Richtungen während der Flutphase. Die Ablagerung der Sedimente an der Westböschung der Neufelder Rinne besitzt solange dominierende Bedeutung, bis durch die Lage der Rinnenachse bedingt Erosion während der Ebbephase deutlich größeren Einfluss erhält.

Im Rahmen der Phase 3 wurde die Möglichkeit des Einsatzes von Methoden der optischen Fernerkundung zur Bestimmung der großflächigen, oberflächennahen Sedimentkonzentration sowie bei der Beurteilung der Messergebnisse geprüft. Im Anhang B sind umfassende Erläuterungen zu diesem Thema zu finden. Insgesamt ist das Verfahren mit Hilfe von MERIS-Daten, das hier Anwendung fand, nicht hochauflösend und genau genug, um die Naturmessungen quantitativ zu ergänzen. Die punktuellen Messungen mit den Trübungsmessgeräten können nicht dazu genutzt werden, die MERIS-Aufnahmen im Wattbereich zu kalibrieren. Falls für einen interessanten Zeitraum allerdings geeignete Satellitenaufnahmen vorliegen, können diese verwendet werden, um bestimmte Systemzustände in der Elbmündung zu untersuchen. Treten beispielsweise unter bestimmten Randbedingungen über einen bestimmten Zeitraum höhere Sedimentkonzentrationen auf: Wird dies durch eine aus-

geprägtere Sedimentfahne der Elbe bei ablaufendem Wasser auch großräumig sichtbar?

Im Anhang sind einige der Satellitenaufnahmen dargestellt, die die Sedimentverteilung in der Elbmündung sowie die Sedimentfahne bei ablaufendem Wasser zeigen. Leider lagen für die Zeiträume, für die eine Überprüfung der großräumigen Situation als Ergänzung der Naturmessungen interessant gewesen wäre, keine geeigneten Aufnahmen vor. Aufnahmen guter Qualität werden auch weiterhin gesichtet und in die Überlegungen einbezogen.

7 Weiteres Vorgehen

Die bisherigen Fächerecholotaufnahmen zeigen bestimmte morphodynamische Entwicklungen und Tendenzen im Untersuchungsgebiet auf. Es können Schlussfolgerungen für die zyklische Verlagerung der Neufelder Rinne inklusive des hochdynamischen Einfahrtbereiches gezogen werden. Die Prognosen für die zukünftige Entwicklung des untersuchten Bereiches sollen anhand fortgesetzter Fächerecholotaufnahmen überprüft werden.

Durch eine höhere zeitliche Auflösung der Trübungs- und Strömungsmessungen sollen der Einfluss von Seegang auf Erosion von Sedimenten sowie Absinkprozesse näher untersucht werden. Dies bedeutet, dass keine kontinuierlichen Messungen mehr stattfinden. Vielmehr werden in Messkampagnen Daten über kürzere Messzeiträume mit höherer zeitliche Auflösung aufgezeichnet.

In Phase 3 wurde in Laboruntersuchungen der Bewegungsbeginn bzw. Suspensionsbeginn der Wattsedimente untersucht. Die ermittelten Werte erscheinen zu gering. Logistisch bedingt verging zwischen der Entnahme der Proben und dem Einbau in die Rinne bzw. den Versuchen ein längerer Zeitraum. Biologische Einflüsse wurden somit in den Versuchen nicht berücksichtigt. Ziel im Jahr 2009 ist es, den Bewegungs- bzw. Suspensionsbeginn mittels einer Versuchsstrecke, bestehend aus magnetisch-induktivem Strömungsmessgerät und OBS-Sensoren, die für kurze Zeiträume im Watt installiert wird, zu ermitteln.

Sämtliche Daten und Ergebnisse des Gesamtprojektes „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ (Phase 1 bis 3) sollen in einer zusammenfassenden Auswertung ganzheitlich analysiert werden. Dabei sollen sowohl die kleinskaligen morphodynamischen Prozesse als auch die großräumigen Transport- und Verlagerungstendenzen im Untersuchungsgebiet thematisiert werden.

Im Rahmen der Arbeiten am numerischen Modell sollen die in Kapitel 5.5 beschriebenen Schritte durchgeführt werden.

In Phase 3 wurde die Projektierung für einen Messpfahl inklusive einer Messplattform erstellt (s. Anhang A). Diese sollte als Basis für meteorologische Aufzeichnungen im Untersuchungsgebiet sowie für die Aufzeichnung flächenhafter Daten dienen. Gleichzeitig sollte der Standort für die Datenerfassung, -speicherung und -datenfernübertragung genutzt werden. Des Weiteren sollten weitere punktuelle hydrologische Daten am Messpfahl bzw. in der Nähe des Messpfahls aufgezeichnet werden. Technische Herausforderungen wie Konstruktion und Installation sind relativ einfach zu lösen. Auch die Genehmigung für den Betrieb eines solchen Messpfahls liegt mit der erteilten strom- und schiffahrtspolizeilichen Genehmigung bis auf wenige Details bereits vor. Die Einrichtung einer solchen Messstation ist allerdings mit erheblichen Investitionskosten verbunden. Diese können reduziert werden, wenn so viele Arbeiten wie möglich in Eigenleistung der verschiedenen Beteiligten durchgeführt werden. Auch bei der Installation der Messtechnik können die Kosten erheblich gesenkt werden, wenn auf Eigenkonstruktionen zurückgegriffen wird. Mit einer Grundausstattung des Messpfahls, die um einige Neuanschaffungen ergänzt werden muss, könnte im Neufelder Watt eine Messstation eingerichtet werden, die die im Zuge dieses Projektes durchgeführten Arbeit sinnvoll fortsetzt. Durch die hohen Investitionskosten muss allerdings ein Betrieb über mehrere Jahre angestrebt sowie das entsprechende betreuende Personal bereitgestellt werden. Dies erscheint nur im Zusammenspiel mehrerer Beteiligten sinnvoll.

Das Institut für Wasserbau entwickelte im Laufe des Jahres 2008 eine eigene Trübungsmesssonde (Abb. 52). Das Messprinzip der optischen Rückstreuung von Laserlicht ist analog zur Funktionsweise der ASM Trübungsmessgeräte der Firma ARGUS. Als Basis der Sonde dienen das Gehäuse sowie die Platine, die auch für die WIDL-Drucksonden verwendet werden. Zunächst wurde zwei Sensoren in einem Abstand von 3 cm montiert. Der Anschluss weiterer Sensoren ist möglich. Die Daten werden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet und auf eine MMC-Speicherkarte geschrieben. Der Akkupack bestehend aus 3 AAA-Batterien ermöglicht einen ununterbrochenen Einsatz von bis zu 3 Monaten. Die Eigenkonstruktion wurde im Labor anhand von Sedimenten aus dem Neufelder Watt kalibriert, wobei sämtliche Kalibrierpunkte auf einer Geraden liegen. Dies spricht deutlich für die Qualität der Sensoren und ermöglicht einen erfolgreichen Einsatz der Sensoren in der Natur.

Ein erster Einsatz im Neufelder Watt vom 21. bis zum 22.08.2008 lieferte vielversprechende Ergebnisse. Qualitativ wurde die vom ASM aufgezeichnete Kurve sehr gut getroffen. Abweichungen ergaben sich zum einen durch die deutlich höhere Messfrequenz, die auch kurzfristige Anstiege der Sedimentkonzentration registrierte, und die dann verwendete Mittelung der Daten. Unterschiede in der Größe der berechneten Sedimentkonzentrationen sind auf die Kalibrierung zurückzuführen. In den kommenden Monaten wird weiter an der Methode der Kalibrierung gearbeitet und die Sonden werden Langzeittests (ggf. im Neufelder Watt) unterzogen. Im Jahr 2009 kann dann der dauerhafte Einsatz im Neufelder Watt inklusive eines Vergleiches der Daten mit den ASM-Sonden erfolgen.



Abbildung 52: Entwickelte OBS-Sonde

8 Zusammenfassung

Im Jahr 2008 wurde die Phase 3 des Gesamtprojektes „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ durchgeführt. Ab dem 26. März wurden dabei Messdaten im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet. In regelmäßigen Abständen wurde die Bathymetrie des Verlaufes der Neufelder Rinne vermessen. Bei den Naturmessungen wurde auf das bewährte System von Gerätehalterungen, Messgeräten und Geräteeinstellungen zurückgegriffen. Die am Institut für Wasserbau konstruierten Drucksonden kamen dauerhaft erfolgreich zum Einsatz. Ergänzt wurde das Messprogramm um kurzzeitige ADV-Messungen sowie um magnetisch-induktive Strömungsmessungen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten bei sehr geringen Wasserständen. Eine eigens entwickelte OBS-Sonde wurde kalibriert und während einer ersten Testphase im Watt installiert.

Mit Hilfe von Laboruntersuchungen wurden der Bewegungsbeginn sowie der Suspensionsbeginn der Wattsedimente untersucht.

Aus den Fächerecholotmessungen konnten bestimmte Entwicklungstendenzen des Einfahrtbereiches sowie des Hauptteils der Neufelder Rinne abgeleitet werden. Diese wurden in einem Vergleich mit den Daten der Jahre 2006 und 2007 eingeordnet.

Aus den Naturmessungen konnte ein strömungsabhängiges Muster des Verlaufes der Sedimentkonzentration abgeleitet werden. Die Ausprägung des Musters bzw. der Maxima ist abhängig vom Wasserstand und von den Bodeneigenschaften der jeweiligen Messposition. Das Niveau der Sedimentkonzentration ist stark von der vorherrschenden Windrichtung und den resultierenden Wasserständen und Seegangsbedingungen abhängig. Allgemein steigen die Sedimentkonzentrationen während Ostwindwetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten an und liegen auf einem höheren Niveau als üblich. Gleiches gilt für bzw. nach längeren Phasen größerer Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen.

Der residuelle Sedimenttransport ist auf den Flächen des Neufelder Watts (bis auf wenige Ausnahmen während Ostwindwetterlagen) sowie auf dem Neufelder Sand flutstromdominiert und weist in Richtung Osten. In der Neufelder Rinne ist der Transport durch den Ebbstrom dominiert.

Kurzzeitig über eine bzw. zwei Tiden wurde eine Kamera auf einem mobilen Mast im Untersuchungsgebiet installiert. Die Aufnahmen können genutzt werden, um großräumigere Vorgänge der Be- und Entwässerung der Wattflächen durch die Neufelder Rinne zu beobachten.

9 Schrifttum

Treuel, F. (2008): Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung morphodynamischer Parameter von Wattsedimenten des Neufelder Sandes. Studienarbeit an der TU Hamburg-Harburg, unveröffentlicht.

Van Rijn, L. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Anhang A – Projektierung eines Messpfahls für das Neufelder Watt

- Allgemeine Anforderungen
- Standort
- Messtechnik
- Energieversorgung
- Dimensionierung
- Kostenschätzung
- Genehmigungen

Anhang B – Anwendung der Fernerkundung

- Hintergrund
- Trägersystem und Aufnahmegerät
- BEAM Toolbox
- Anwendung in der Küstenzone
- Datenverfügbarkeit
- Ausblick
- Literatur

Anhang C – Darstellung der Messergebnisse [auf CD-ROM]

- Position 13
- Position 15
- Position 17