

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt

– Phase 1 –

Mai 2006 bis Dezember 2006

– Abschlussbericht –

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

22. März 2007

Abstract

Die Wattflächen der Deutschen Nordseeküste mit ihren Priel- und Rinnensystemen unterliegen einer intensiven Morphodynamik. Insbesondere in den Mündungstrichtern der Ästuare finden dabei groß- und kleinräumige Sedimentumlagerungen auf unterschiedlichen Zeitskalen statt, die die für die Unterhaltung der Wasserstraßen Verantwortlichen vor wiederkehrende Herausforderungen stellen. Besonders akut präsentiert sich diese Problematik im Mündungsgebiet der Elbe. Um auch zukünftig den Anforderungen der modernen Containerschifffahrt gerecht zu werden und dabei zugleich wirtschaftlich zu handeln, sind neue Sedimentmanagementkonzepte notwendig. Die Hamburg Port Authority (HPA) und die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) stellten jüngst ein Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe vor. Ein Eckpfeiler ist dabei die Dämpfung der einschwingenden Tideenergie durch strombauliche Maßnahmen im Mündungstrichter. Um diese Maßnahmen bewerten und Prognosen zu deren Wirkung auf der Basis numerischer Modelle geben zu können, ist ein verbessertes Prozessverständnis der Morphodynamik von Wattflächen erforderlich.

In Zusammenarbeit mit der HPA führt das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg zur Zeit umfangreiche Naturmessungen im Neufelder Watt in der Elbmündung durch. Seit Juli 2006 werden dabei kontinuierlich der Wasserstand, die Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung sowie die Konzentration suspendierter Sedimente in der Wassersäule in einem Querschnitt der Neufelder Rinne hochauflösend aufgezeichnet. Des Weiteren erfolgen an mehreren Positionen Seegangsaufzeichnungen. In regelmäßigen Abständen wird die Bathymetrie des Untersuchungsgebietes detailliert mit Hilfe eines Fächerecholotes vermessen, das an Bord des Messbootes des Instituts zur Verfügung steht. Ziel der Analyse der Messergebnisse ist es, das Systemverständnis der Morphodynamik von Wattflächen sowie deren Prielsystemen zu verbessern. Als besondere Herausforderung des Messprogramms sind die Lage des Untersuchungsgebietes in der Mitte der Elbe sowie die dortigen sehr geringen Wassertiefen zu nennen. Bei der Untersuchung kommen modernste Messverfahren und Techniken zum Einsatz. Zur Einordnung des Neufelder Sandes in den Gesamtkomplex der Elbmündung wird zudem eine Analyse der morphologischen Veränderungen in größeren Raum- und Zeitskalen vorgenommen.

Die Ergebnisse der Untersuchung fließen in die Erstellung eines Moduls zur Modellierung von Sedimenttransport in Flachwasserbereichen des Wattenmeeres ein. Parallel zum Messprogramm wurde mit der Erstellung eines Detailmodells des Untersuchungsgebietes begonnen, das in ein größeres Umgebungsmodell eingebettet ist. Neben einer möglichst genauen Abbildung der Bathymetrie sind die gewählten Randbedingungen von größter Bedeutung.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Durchführung des Messprogramms	14
2.1 Untersuchungsgebiet	14
2.2 Datenmanagement	16
2.3 Messfahrten	17
3 Fortschreibung des Messkonzeptes	25
3.1 Strömungsmessungen	25
3.1.1 RDI ADCP Workhorse Sentinel.....	25
3.1.2 RDI Mini-ADCP Stream Pro.....	28
3.2 Trübungsmessgeräte	29
3.3 Drucksonden	31
3.4 Fächerecholot.....	34
4 Auswertung der Messergebnisse	36
4.1 Auswertung historischer topografischer Karten des Mündungsgebietes der Elbe	36
4.2 Auswertung der Fächerecholotvermessungen	43
4.3 Auswertung der Bodenproben	49
4.4 Auswertung der stationären Messgeräte.....	50
4.4.1 Strömungsmessungen	50
4.4.2 Messungen der Konzentrationen suspendierter Sedimente	53
4.4.3 Seegangsmessungen	54
4.4.4 Wasserstandsaufzeichnungen	65
4.4.5 Darstellung der Messergebnisse	65
4.5 Interpretation der Messergebnisse	73
5 Aufbau eines hydronumerisch-morphodynamischen Modells	75
5.1 Hydrodynamische Strömungsgleichungen	75
5.2 Morphodynamische Grundlagen	77
5.2.1 Sedimenttransport.....	80
5.2.2 Einfluss der Tide auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden	84
5.2.3 Einfluss des Seegangs auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden	86
5.2.4 Sedimentation und Erosion.....	86
5.2.5 Sedimentationsprozess.....	87
5.2.6 Erosionsprozess	95
5.3 Numerische Modelle von Küstengewässern.....	97
5.4 Das Modellsystem RMA	101
5.5 Modellerstellung für das Projektgebiet.....	102
6 Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise	107
7 Zusammenfassung und Ausblick	110
8 Schrifttum	113
Anhang A – Darstellung der Ergebnisse der stationären Messgeräte	117
Anhang B – Ergebnisse der Seegangsaufzeichnungen	181
Anhang C – Geotechnische Auswertung der Bodenproben	185
Anhang D – Entnahme und Auswertung von Schwebstoffproben	193
Anhang E – Auswertung topographischer Karten	195

1 Einleitung

Die Nordsee ist als Nebenmeer des Atlantischen Ozeans dem Einfluss der Tide ausgesetzt. Daher unterliegt die Deutsche Nordseeküste ständigen Veränderungen und ist durch große Wattflächen, langgestreckte Priel- und Rinnensysteme, Riffeln und Dünen, groß- und kleinräumige Sedimentumlagerungen sowie einen Tidehub von rund 2 bis 4 Metern gekennzeichnet. Die bedeutendsten Wasserstraßen sind die Ästuarsysteme von Elbe, Weser, Jade und Ems. Trotz einzelner das Fahrwasser stabilisierender Maßnahmen unterliegen diese Ästuare noch starken morphodynamischen Veränderungen, die besonders im tidebeeinflussten Elbdelta die für die Unterhaltung der Wasserstraßen und der Häfen Verantwortlichen vor immer wiederkehrende Probleme stellen. Insbesondere die Migration der mäanderförmigen Fahrrinne mit dem Medemgrund als bedeutendste Untiefe erfordert ständig beachtliche Unterhaltungs- und Stabilisierungsmaßnahmen. Neben diesen aktuellen Problemstellungen sind in der Zukunft weitere Belastungen zu erwarten, die bislang in ihrer Wirkung auf die Morphodynamik nur schwer abschätzbar sind, wie z.B. der Meeresspiegelanstieg sowie die Intensivierung von Sturmfluten als Folge der prognostizierten Klimaänderung und eine erneute Vertiefung des Fahrwassers.

Morphodynamische Vorgänge mit Sedimentations- und Erosionsprozessen werden sich parallel zu veränderten Strömungs- und Transportverhältnissen im Küstengebiet aus dem geschilderten Gesamtzusammenhang ebenfalls signifikant verändern.

Die Tideelbe wird als Lebensader einer ganzen Region bezeichnet und in ihrer Funktion als Bundeswasserstraße eingestuft. Der Einfluss der Tideelbe geht dabei weit über die angrenzenden Landkreise hinaus. Der Hamburger Hafen ist als internationale Drehscheibe der größte Hafen Deutschlands und der zweitgrößte Europas. Gemeinsam mit den Elbeseehäfen Niedersachsens und Schleswig-Holsteins sind die Untereelbehäfen die größten Arbeitgeber Norddeutschlands und somit auch unverzichtbar für die wirtschaftliche Entwicklung Hamburg, Niedersachsens und Schleswig-Holsteins.

Wissenschaftliche Erkenntnisse und die Beobachtungen der Menschen vor Ort deuten jedoch darauf hin, dass die hydromorphologische Entwicklung der Tideelbe in eine unerwünschte Richtung weist. Die Aktivitäten der Menschen sowie natürliche dynamische Prozesse haben dazu geführt, dass die Flut mit zunehmender Energie in das Elbeästuar vordringt. Gleichzeitig hat die Fähigkeit des Ästuars, diese Energie durch eine vielfältige Struktur in einem breiten, sich ständig verändernden für ungestörte Ästuare typischen Strombett abzuf puffern, immer weiter abgenommen.

In einem gemeinsam von der Hamburg Port Authority (HPA) und der Bundeswasserstraßenverwaltung entwickelten und jüngst vorgestellten Strategiepapier werden Konzepte zur Erstellung eines Aktionsplans erarbeitet, die ein zukünftiges Leitbild der Tideelbe in einem ganzheitlichen und themenübergreifenden Bezug prägen sollen (HPA & WSDN, 2006).

Aus den Erkenntnissen der heutigen Situation und ihrer Entwicklung lassen sich drei Eckpfeiler für einen zukünftigen Aktionsplan zur nachhaltigen Entwicklung der Tideelbe ableiten:

1. Dämpfung der einschwingenden Tideenergie durch strombauliche Maßnahmen insbesondere im Mündungstrichter,
2. Schaffung von Flutraum im Bereich zwischen Glückstadt und Geesthacht,
3. Optimierung des Sedimentmanagements unter Berücksichtigung des Gesamtsystems der Elbe.

Ohne entsprechende Maßnahmen wird das System Elbe zunehmend verlanden, wodurch neben den ökologischen Nachteilen auch eine Unterhaltung des Gewässers und des Hamburger Hafens immer aufwendiger würde. Bei der Planung geeigneter Maßnahmen können numerische Modelle eingesetzt werden, welche die o.g. Prozesse simulieren und eine Beurteilung der Wirkung erleichtern. Hierdurch können auch Erkenntnisse für eine naturschutzfachliche Entwicklung der Tideelbe gewonnen werden.

Definiertes Ziel aller zukünftigen wasserbaulichen Maßnahmen im Bereich der Tideelbe sollte es daher sein, den Prozess fortschreitender Veränderungen im Sinne der Eckpfeiler des Aktionsplanes zu optimieren.

Das neue Sedimentmanagementkonzept sieht die Umlagerung von frischen wenig belasteten Elbsedimenten in Bereiche vor, bei denen ein Rücktransport in die Tideelbe ausgeschlossen ist. Im Einvernehmen mit dem Land Schleswig-Holstein werden daher Teilmengen aus dem Hamburger Hafen in die Nordsee umgelagert. Durch dieses allerdings bis zum Jahr 2008 begrenztes Vorgehen werden bisherige Kreislaufbaggerungen von Sedimenten wirksam reduziert. Des Weiteren können auch Unterwasserablagerungsflächen oder subaquatische Ablagerungen eventuell auch in Verbindung mit Strombaumaßnahmen zukünftige Bausteine eines Sedimentmanagementkonzeptes sein. Durch eine Kombination können sowohl Synergien mit strombaulichen Maßnahmen zur Verkleinerung des Mündungsquerschnitts erzeugt, als auch eine sichere, dauerhafte und lagestabile Festlegung von Schlicksand unterhalb des Wasserspiegels und unterhalb des natürlichen Sedimenthorizontes erreicht werden (HPA & WSDN, 2006).

Zur Wahrung der Zukunftschancen für den Standort Deutschland ist die freie Zufahrt der Seeschifffahrt zu den internationalen Seehäfen an der Deutschen Küste zu garantieren. Aufgrund der Entwicklung in der Containerschifffahrt hat diese gesellschaftliche Vorgabe mindestens den Erhalt der bestehenden Fahrwasser in den Ästuaren zur Folge. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Schifffahrtswege wird für die Tideelbe als Lebensader der Region verstanden. Dieses schließt an der Tideelbe neben der allgemeinen großen Bedeutung für ihren maritimen und touristischen Wert insbesondere den Standort eines der größten Seehäfen der Welt mit ein.

Um die sich daraus ableitenden Risiken sicher abschätzen und einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Nutzungsansprüchen und der naturräumlichen Bedeutung der betroffenen Küstenzonen finden zu können, ist ein umfassendes Prozessverständnis erforderlich. Aufgrund ihrer hohen Sensitivität gegenüber hydro- und morphodynamischen Veränderungen rücken dabei Wattgebiete – insbesondere im Mündungsgebiet von Tideflächen – in das Zentrum wissenschaftlicher Aktivitäten.

Trotz großer Erfolge in der numerischen Modellierung ist es bisher noch nicht gelungen, zuverlässige Prognosen morphodynamischer Veränderungen als Folge langfristiger sowie kurzfristiger Einwirkungen rechnerisch zu erzeugen. Dies ist nicht nur in der mangelnden Auflösung der Modelle, sondern vor allem in einem noch nicht ausreichenden Prozessverständnis begründet. So fehlen sichere Erkenntnisse über die Wirkung von Wattflächen als Sedimentreservoir von Tidegewässern. Auf den Wattflächen selbst ist ungeklärt, welche Bedeutung seegangsinduzierte Prozesse in Priel- und Rinnen und erhöhte Springtiden oder leichte Sturmfluten bei den Umlagerungsprozessen einnehmen und welche Rolle dabei die Bodenstruktur besitzt. Häufig wechseln Auflagerungs- und Erosionsphasen auf dem Watt patchworkartig über die Jahreszeit, ohne dass Ursachen für das sich ständig verändernde Mosaik erkennbar sind. Ähnlich verhält es sich mit der Entwicklung von Schlick- und Sandwatt, die auf den Wattflächen keineswegs standortstabil sind.

Das „Naturmessprogramm zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“, das seitens der HPA mit dem Institut für Wasserbau initiiert und durch die HPA finanziert wird, setzt hier an und soll auf der Basis umfassender Felduntersuchungen im Neufelder Watt in der Elbmündung das Prozessverständnis auf Wattflächen verbessern und eine sichere theoretische Grundlage für die mathematische mehrdimensionale Modellierung morphodynamischer Prozesse bereitstellen. Die Ergebnisse können unmittelbar in die Modellwerkzeuge der Bundesanstalt für Wasserbau einfließen und durch pilotartige Anwendung am Elbmodell erste Szenarien für ein künftiges Sediment- und Fahrwassermanagement studiert werden.

Ziel des Gesamtprojektes ist es, an der Fokusfläche Neufelder Watt und seiner Umgebung im Mündungsbereich der Elbe die hydro- und morphodynamischen Vorgänge im Watt zu analysieren und eine verfeinerte Theorie zur besseren Prognose morphodynamischer Entwicklungen als Folge von Klimaeinwirkungen und anthropogen bedingten Veränderungen zu entwickeln. Unter besonderer Betrachtung stehen dabei die Schubspannungsbelastungen infolge Seegang und Kantenfluten an den Übergängen des Prielsystems sowie des Hauptstromes. Sie sollen Erkenntnisse über die für die Morphodynamik relevanten Strömungszustände liefern und deren Abhängigkeit von den bodenphysikalischen, geohydraulischen und biogenen Oberflächenstrukturen darlegen.

Weiterhin soll die exemplarische Anwendung des erweiterten Modellsystems an dem Elbmodell zur Wirkungsanalyse verschiedener Maßnahmenszenarien zur naturnahen Weiterentwicklung der Flachwassergebiete sowie zur Integration bzw. Nutzung einer subaquatischen Baggergutfestlegung und weiterer stromstabilisierender Wasserbaumaßnahmen eingesetzt werden.

Die Felduntersuchungen finden im Neufelder Watt mit dem Neufelder Sand statt (Abbildung 1.1). Das Untersuchungsgebiet liegt im Mündungsgebiet der Elbe und steht in hydro- und morphodynamisch enger Wechselwirkung mit dem Elbestrom. Eine Prozessanalyse dieses Gebietes wird neben den allgemeinen Fragestellungen der Morphodynamik von Wattflächen auch wichtige, auf diesen Naturraum bezogene Erkenntnisse über die kurz- und mittelfristigen Umlagerungsprozesse liefern. Sie sollen einen ergänzenden Beitrag zu den zur Zeit in der Untersuchung befindlichen Auswirkungen von Strombaumaßnahmen und neuer Methoden zum Sedimentmanagement im Tideflusssystem der Elbe liefern.

Zur Prozessanalyse und zur Verifizierung des morphodynamisch-hydrnumerischen Modells werden gezielte, weiträumige Messungen von Wasserständen, Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, Konzentrationen suspendierter Sedimente, Sohlstrukturen sowie Seegang vorgenommen. Sie sollen kontinuierlich über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr aufgenommen werden. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Wattstrukturen gelegt. Zur Analyse der Veränderungen der Wattflächen in größeren Raum- und Zeitskalen wird auf vorliegende Daten aus Laserscanbefliegungen, die z.B. durch das ALR Husum oder das WSA Cuxhaven beauftragt wurden, zurückgegriffen. Des Weiteren erfolgt eine Auswertung historischen Karten und Datenmaterials, um Aussagen über die morphologische Entwicklung der Elbmündung im Laufe des vergangenen Jahrhunderts vornehmen zu können. Zur Erfassung der Veränderungen der Wattstrukturen im Untersuchungsgebiet in kleinen Raum- und Zeitskalen werden in regelmäßigen zeitlichen Abständen Fächerecholotvermessungen mit dem Messboot „Nekton“ des Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg durchgeführt. Für die Aufnahme physikalischer Größen wie Sedimentkonzentration, Strömungsparameter, Seegang und Wasserstand wurden entsprechende stationäre, autarke Messgeräte in das Untersuchungsgebiet integriert. Zusätzlich können die Daten der vom WSA Cuxhaven betriebenen Dauermessstationen (Messpfähle) Altenbrucher Bogen und Neufelder Sand berück-

sichtigt werden, die im Zuge der Beweissicherung in einer Datenbank online zur Verfügung stehen.



Abbildung 1.1: Luftaufnahme des Untersuchungsgebietes (Quelle: ALR Husum, 2005)

Aufbauend auf die Struktur des Sedimentkatasters der BAW wird eine Sedimentdatenbank auf Basis der Auswertung der vorhandenen Datensätze der Wasser- und Schifffahrtsämter Hamburg und Cuxhaven erstellt. Unter Berücksichtigung vorhandenen Karten- und Datenmaterials erfolgen zusätzlich Beprobungen zur Bestimmung des Sedimentvorkommens, die in einer Datenbank zusammengefasst werden.

Bei der Auswertung sollen die Wirkungen morphologischer Prozesse beschrieben und Kernfragen nach zu erwartenden sedimentologischen Veränderungen sowie nach Gründen für Schlickbildung in bestimmten Gebieten beantwortet werden. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse wird eine Theorie entwickelt, die insbesondere das Wissen und die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung von Belastungen aus Seegang, Bodenschubspannungen und von Transportkörpern in Abhängigkeit von Sohlmaterial und Porenwasserbewegung in der oberen Bodenzone erweitert. In enger Abstimmung mit der BAW wird im weiteren Verlaufe des Projektes (**Phase 2**) das mathematische Feinmodell ausgearbeitet. Dazu wird auf das Programmsystem RMA10 von Professor Ian King zurückgegriffen. Es setzt sich aus einem 3-dimensionalen hydrodynamischen Modell und einem Sedimenttransportmodell mit integrierter Bodenevolutionsgleichung zusammen.

In den Jahren 2000 bis 2002 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung das Projekt „Vorhersage mittelskaliger Morphodynamik - PROMORPH“ finanziert. Das übergeordnete Ziel des Projektes lag darin, auf der Basis vorhandener Module prozessorientierte Modellsysteme zur Simulation der mittelskaligen Morphodynamik in Küstengebieten zu entwickeln, zu kalibrieren und zu validieren. Arbeitsgebiet war die zentrale Dithmarscher Bucht zwischen Elbe- und Eiderästuar und der Nordsee. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Integration von Naturmessungen und numerischen Modellsimulationen gelegt. Ein wesentlicher Unterschied zum Naturmessprogramm und zur Modellbildung, die Bestandteil dieses Berichtes sind, liegt

in der Beschaffenheit des Untersuchungsgebietes. Die Untersuchungen im Rahmen von PROMORPH wurden im Rinnensystem der Norder- und Süderpiep durchgeführt, das sich mit Wassertiefen mit bis zu 20 Meter deutlich vom Neufelder Watt unterscheidet (MAYERLE & ZIELKE, 2005). Ähnliches gilt für das Projekt ESTPROC, das den Transport feiner Sedimente im Humber Ästuar in East Yorkshire, Großbritannien thematisiert (DEFRA & ENVIRONMENT AGENCY, 2005). Zwar lassen sich aus anderen Projekten Teilergebnisse zu Sedimentations- und Erosionsprozessen im Allgemeinen auf die hier vorgestellte Fragestellung übertragen, als besondere und neue Herausforderungen für das „Naturmessprogramm und die Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ sind aber eindeutig die Lage und die Wassertiefen des Untersuchungsgebietes zu nennen. Derartige Naturmessungen im Flachwasserbereich und eine entsprechende Analyse existieren bis dato nicht.

In einer Initialisierungsphase von November 2005 bis März 2006 (in der Folge **Phase 0** genannt) wurde für die Felduntersuchungen in enger Absprache mit der HPA ein exemplarisches Untersuchungsgebiet im Watt des Elbmündungsgebietes gewählt. So wurde in einem Querschnitt der Neufelder Rinne im Neufelder Watt ein Profil vor dem Hintergrund bisheriger wissenschaftlicher und praktischer Erkenntnisse ausgewählt und vermessen, in dem Messgeräte zur Aufzeichnung verschiedener Belastungsgrößen installiert werden können. In **Phase 0** wurde zunächst – soweit vorhanden – Datenmaterial (analoge und digitale Höheninformationen, Luftbildaufnahmen, Daten des Pegels Otterndorf, Informationen zu Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Salinität, Wassertemperatur am Messpfahl „Neufelder Sand“) des Untersuchungsgebiets und seiner Umgebung gesammelt und gesichtet. Zur Aufzeichnung von Seegangs-, Wasserstands-, Strömungs- und Trübungsgrößen erfolgten die Auswahl, Beschaffung (durch HPA), Kalibrierung im Labor und in der Natur sowie die Konfiguration geeigneter Messgeräte. Zahlreiche Termine im Untersuchungsgebiet veranschaulichten und klärten die vorhandenen und zu berücksichtigenden Randbedingungen und zeigten deutlich, in welchem hochdynamischen System hier wissenschaftliche Untersuchungen mit entsprechend sensiblen und komplexen Messgeräten erfolgen würden. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein detailliertes Messkonzept (Dokument, 40 Seiten, Stand 31.03.2006) erstellt, in dem der Betrieb der Geräte, sämtliche Konfigurationen sowie das zeitliche Vorgehen der Messungen beschrieben wurden. Die besonderen Herausforderungen in **Phase 0** lagen darin, unter Beachtung der Komplexität der Messgeräte und der exponierten Lage des Untersuchungsgebietes 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.

Gegenstand dieses Berichtes ist die **Phase 1** des Gesamtvorhabens. Während dieser Phase wurden kontinuierliche Messungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt, begrenzt bis zu dem Zeitpunkt, der ein Bergen der Messgeräte vor dem Auftreten von Eisgang nicht mehr garantieren ließ. Eine Auswertung der Messdaten erfolgte vor dem Hintergrund, das Verständnis der hydrologischen Bedingungen sowie der morphodynamischen Prozesse im Untersuchungsgebiet zu verbessern. Parallel erfolgte der Aufbau eines numerischen Modells.

Zur Prozessanalyse und zur Verifizierung des morphodynamisch-hydrodynamischen Modells sind gezielte Messungen von Wasserständen, Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen, Sohlstrukturen, Sedimentkonzentrationen sowie des Seegangs notwendig. In dem in enger Absprache mit der HPA im Untersuchungsgebiet Neufelder Watt ausgewählten Detailgebiet wurden zunächst in einem Querschnitt der Neufelder Rinne alle oben genannten Parameter gemessen. In Prielmitte, an einer Böschung sowie auf dem Neufelder Sand in Prielnähe wurden dabei die auftretenden

Belastungsgrößen aufgezeichnet. Zwei weitere Pegellogger zur Messung des Seegangs wurden ober- und unterhalb des Messquerschnittes in der Neufelder Rinne installiert.

Die Messung von Wasserständen und Seegang erfolgte mit fünf Pegelloggern der Firma *Driesen und Kern*. Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen wurden mittels dreier ADCP-Geräte *Workhorse Sentinel* der Firma *RD Instruments* aufgezeichnet, die Konzentration suspendierter Sedimente mit Hilfe von drei Trübungsmessgeräten der Firma *ARGUS* bestimmt. Die Beschaffung der Geräte führte die HPA durch und stellt diese dem Institut für Wasserbau auf Leihbasis für die Dauer der Messungen zur Verfügung. Die Gerätekonfigurationen aller Messgeräte wurden in **Phase 0** an die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Randbedingungen angepasst.

Von Seiten der HPA wurde die Konstruktion der Geräteträger übernommen. Nach Fertigstellung erfolgte eine Installation im Untersuchungsgebiet mit Hilfe des Tonnenlegers „Störort“ sowie dreier Taucher der HPA. Nach Installation der Geräteträger wurden mit den kontinuierlichen Messungen am 18. Juli 2006 begonnen. Zum Auslesen der Daten und zur Wartung der Geräte wurde das Untersuchungsgebiet in regelmäßigen Abständen aufgesucht.

Neben diesen stationären Messungen im Neufelder Watt wurden in regelmäßigen Abständen Vermessungen der Bathymetrie im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Mit Hilfe des Messbootes „Nekton“ und des Fächerecholotes des Instituts für Wasserbau wurden mit einer hohen Auflösung die Wattstrukturen erfasst, wobei mittels modernster DGPS-Technik eine exakte Verortung der gemessenen Punkte möglich war. Durch ein wiederholtes Befahren des Untersuchungsgebietes sind Aussagen über die Veränderungen und Umlagerungen der Neufelder Rinne sowie der einmündenden Priele möglich.

Begleitend zu den stationären Messungen und den Messfahrten wurde mit dem Aufbau einer Sedimentkartierung begonnen. Dabei wurden das anstehende Material im gewählten Detailgebiet regelmäßig untersucht und Beobachtungen biogener Verfestigungen dokumentiert und interpretiert.

In **Phase 0** wurde seitens des Instituts für Wasserbau ein Messkonzept erstellt, in dem die Randbedingungen im Untersuchungsgebiet, die vorgesehenen Gerätekonfigurationen, die Handlungsanweisungen zum Betrieb der Messgeräte, die zeitlichen Abläufe und die nächsten Schritte festgehalten wurden. Dieses Konzept diente zur Koordination, Kommunikation und Diskussion der Arbeiten mit den Verantwortlichen der HPA. Im Rahmen der **Phase 1** wurde eine Fortschreibung dieses Konzeptes vorgenommen. Dabei wurden sämtliche für die Messungen verwendeten Einstellungen und Konfigurationen dokumentiert, wobei auch Änderungen, die sich während des Betriebs der Geräte ergaben, festgehalten wurden.

Nach Wartung der Messgeräte und Auslesen der Daten in regelmäßigen Abständen erfolgte eine unmittelbare Kontrolle der Messwerte auf Plausibilität sowie eine Auswertung und Analyse der Feldarbeiten. Die Messergebnisse wurden graphisch aufbereitet und hinsichtlich hydrologischer Bedingungen und morphodynamischer Prozesse untersucht.

Zur Bearbeitung und Auswertung der Fächerecholotmessungen mit dem Messboot des Instituts wurde das Programmsystem „Hypack“ für diesen Einsatz optimiert. Die visuelle Aufbereitung der Messdaten sowie die weitere Bearbeitung, z.B. in Form von der Erstellung von Höhendifferenzendarstellungen erfolgte mit dem Programm „Fleidermaus“, das speziell für die Erstellung von digitalen Geländemodellen sowie deren Bearbeitung und Visualisierung konzipiert ist. Eine erste Kontrolle der Daten der sta-

tionären ADCP-Geräte, der Pegelloger und der Trübungsmessgeräte erfolgte mit der vom jeweiligen Hersteller den Geräten beigefügten Software. Anschließend wurden die Binärdaten in ASCII-Daten umgewandelt. Die weitere Bearbeitung und Auswertung der Strömungsdaten und Sedimentkonzentrationen wurden mit dem Programm „MS Excel“ vorgenommen, für das spezielle Vorlagen und Makros erstellt wurden. Zur Auswertung der Seegangsmessungen wurde zunächst eine Programmroutine für das Programm „Matlab“ geschrieben, die die Ausgabe der den Seegang charakterisierenden Parameter ermöglicht. Zudem wurde Kontakt zur Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock hergestellt, die eine Modifikation des dort zur Seengangs auswerten verwendeten Programms vornahm, so dass dieses auch zur Auswertung der Daten im Neufelder Watt herangezogen werden kann.

Begleitend zu den Auswertungen der jeweils aktuellen Messungen erfolgte eine Analyse der makroskaligen Entwicklungen des Untersuchungsgebietes Neufelder Watt. Zu diesem Zweck wurden vorhandene historische Karten, Peildaten und Ergebnisse von Laserscanbefliegungen ausgewertet und anhand von Umsatz- und Bilanzanalysen untersucht.

Parallel zur Vermessung der Bathymetrie und zum Messprogramm wurde mit dem Aufbau eines hydronumerischen Modells begonnen. Zur Anwendung kommt das am Institut für Wasserbau eingesetzte Programmsystem RMA 10 von Professor Ian King, das in zahlreichen Anwendungen weltweit sehr gute Ergebnisse lieferte. Nach Generierung eines geometrischen Modells wurde im Rahmen von **Phase 1** zunächst ein numerisches Strömungsmodell ohne Berücksichtigung von Seegang aufgebaut. Es ist ein zweigliedriger Aufbau mit einem großflächigeren Umgebungsmodell und einem Detailmodell vorgesehen. Das Detailmodell mit dem Neufelder Sand und dem Neufelder Watt wird hierbei in ein größeres Modell, das die Elbe von Brunsbüttel bis Cuxhaven einschließt und die Randbedingungen für das Detailmodell liefert, eingebettet.

In **Phase 2**, die im Jahr 2007 vorgesehen ist, soll das in **Phase 1** erstellte Modell um ein Seegangmodell erweitert werden. Zudem soll die Validierung anhand der im Feld gewonnenen Messdaten erfolgen. Des Weiteren gilt es, Ansätze zu entwickeln, um physikalische Prozesse in Priel- und Rinnensystemen sowie auf Wattflächen – soweit dies mathematisch bisher nicht möglich ist – zu beschreiben.

Der vorliegende Bericht über die **Phase 1** des Projektes „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ beschreibt nach dieser Einleitung zunächst die Durchführung des Messprogramms. Dabei wird der Messpriel samt Untersuchungsgebiet beschrieben, und sämtliche Schritte von der Installation der Messgeräte bis hin zur Wartung und zum Auslesen der Daten werden dokumentiert. Es wird ein Überblick über die Messfahrten gegeben, wobei alle vorherrschenden meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen Erwähnung finden. Anschließend erfolgt die Fortschreibung des Messkonzeptes. Alle während der Messungen verwendeten Einstellungen werden aufgeführt. Aufgetretene Probleme sowie deren Lösung werden beschrieben. Im darauffolgenden Abschnitt erfolgt die Auswertung der vorhandenen Daten und Messergebnisse, wobei zunächst die Analyse der morphologischen Veränderungen in großen Raum- und Zeitskalen stattfindet. Nach der Auswertung der Fächerecholotmessungen folgt dann die Analyse der Daten der stationären Messgeräte. Im Anschluss wird der Aufbau des numerischen Modells beschrieben, bevor Empfehlungen für das weitere Vorgehen ausgesprochen werden. Abschließend findet sich eine Zusammenfassung dieses Berichtes und ein Ausblick auf weitere Arbeiten.

2 Durchführung des Messprogramms

2.1 Untersuchungsgebiet

Der Neufelder Sand entstand in der Zeit nach 1926, als sich südlich des Neufelder Watts zunächst eine Barre bildete, die die Anfänge des Neufelder Sandes bedeutete. Der Ebbstrom verlief entlang des Nordufers der Elbe bis Neufelderkoog und orientierte sich dann am südlichen Rand des Neufelder Watts und des Medemsandes. Während die Erosion der Neufelder Rinne voranschritt und diese sich immer tiefer in das Neufelder Watt grub, schritt auch die Entstehung des Neufelder Sandes weiter fort. Abbildung 2.1 zeigt die Strömungsverläufe aus dem Jahr 1957.

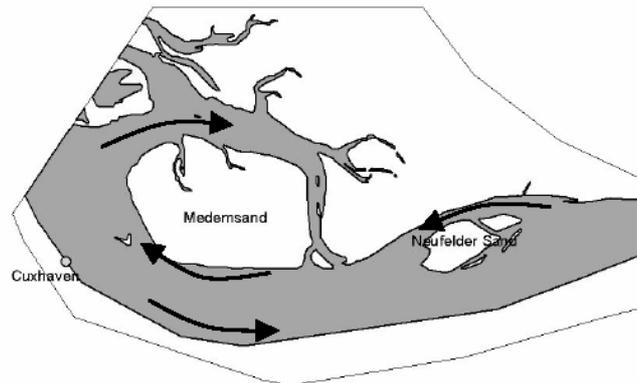


Abbildung 2.1: Strömungsverläufe 1957 (THUMM, 2003)

Bis etwa um das Jahr 1960 herum ist der Neufelder Sand zu einer Wattfläche angewachsen. In den Folgejahren wurde an seiner Südflanke durch den Bau des Leitdamms „Hermannshof“ in die Entwicklung dieses Wattgebietes eingegriffen. Der Leitdamm lenkte den Ebbestrom von der Neufelder Rinne hin zur Fahrrinne, was eine zunehmende Sedimentation der Rinne nach sich zog. In Abbildung 2.2 sind die Strömungsverläufe des Jahres 1965 abgebildet. In der Folge des Baus stabilisierte sich zudem die Wattkante im unmittelbaren Umfeld des Leitdamms, während die großräumigen Strukturen des Neufelder Sandes starken Veränderungen unterworfen waren. Der Neufelder Sand wurde durch den Leitdamm vor den Angriffen des Ebbestromes und damit einem Durchstechen geschützt. Heute ist die Neufelder Rinne nur noch ein Priel mit einer tiefsten Stelle bei etwa 2 m unterhalb NN ist. Dennoch ist die Neufelder Rinne für den Gesamtkomplex des Neufelder Watts von großer Bedeutung, da sie eindeutig der dominierende Priel in diesem Gebiet ist und somit wesentlich für die Be- und Entwässerung des Wattkomplexes verantwortlich ist.

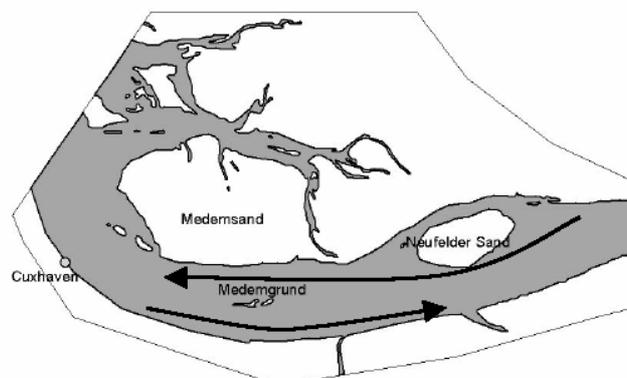


Abbildung 2.2: Strömungsverläufe 1965 (THUMM, 2003)

In der Neufelder Rinne wurde im Rahmen eines Ortstermins in enger Absprache mit der HPA ein Messquerschnitt ausgewählt, in welchem in der Prielmitte sowie an beiden Prielböschungen jeweils Strömungsparameter, Sedimentkonzentrationen und Seegang aufgezeichnet werden sollten. Die Lage des Messquerschnittes ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Zudem sollten in Prielmitte die Wasserstände sowie an zwei Punkten ober- bzw. unterhalb des Messquerschnittes ebenfalls der Seegang gemessen werden. Durch die Auswertung der Messungen sollte das Systemverständnis für die Neufelder Rinne verbessert werden. Da diese eine der wichtigsten Steuerungsgrößen für die Entwicklung des gesamten Wattkomplexes ist, lag es nahe, möglichst detailliert und kontinuierlich in einem Querschnitt (Abbildung 2.4) die entscheidenden physikalischen Größen aufzuzeichnen. Positiver Nebeneffekt war, dass somit alle Messgeräte räumlich eng zusammen lagen, was die erforderlichen Wartungs- und Auslesearbeiten gerade in der ersten Projektphase erleichterte.

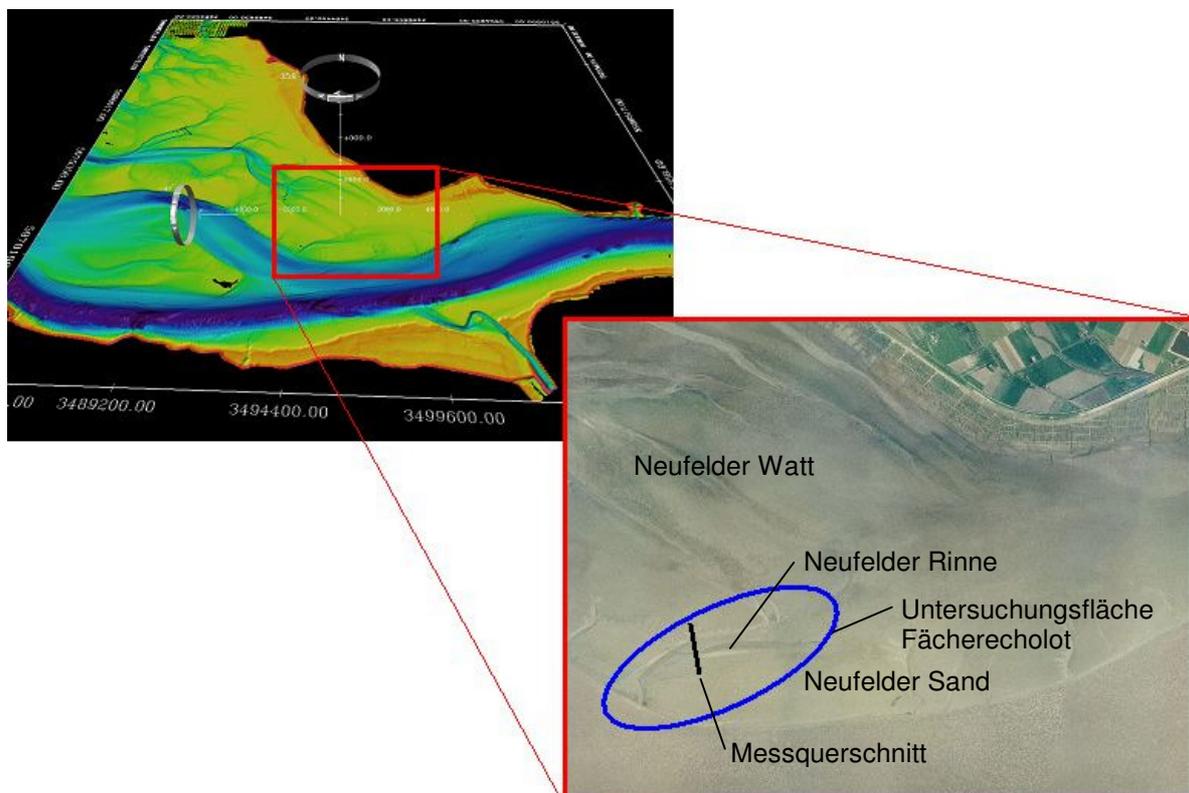


Abbildung 2.3: Lage des Messquerschnittes in der Neufelder Rinne im Untersuchungsgebiet

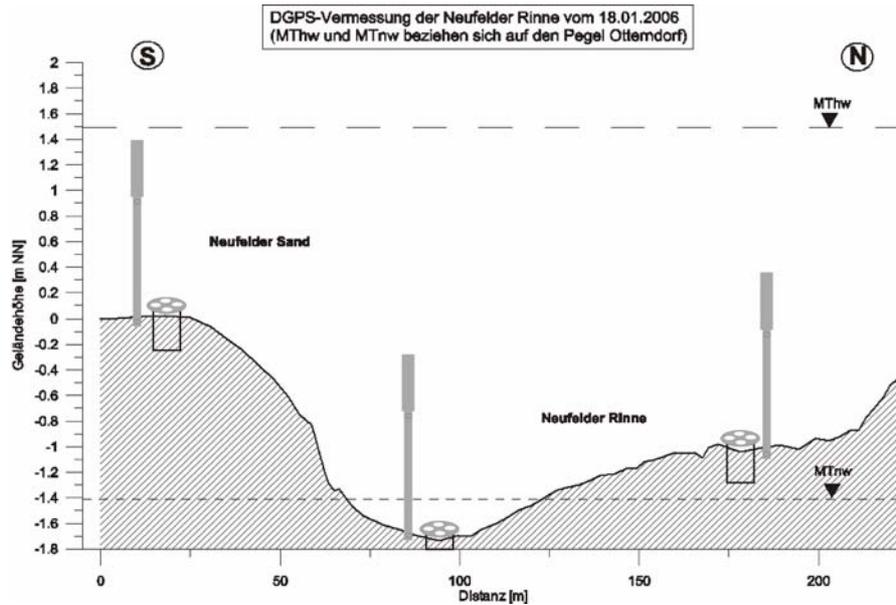


Abbildung 2.4: Verteilung der Messgeräte im Messquerschnitt

2.2 Datenmanagement

Vor Beginn der Messungen galt es, ein Konzept zum Datenmanagement sowie zur Erstellung von Metadaten zu kreieren. Insgesamt wurden an drei Positionen innerhalb des Messquerschnittes sowie an drei weiteren Positionen Geräte installiert. Insgesamt stehen dabei drei ADCP-Geräte, drei Trübungsmessgeräte sowie fünf Drucksonden und ein Barometer zur Verfügung. Aus logistischen Gründen konnte nicht immer das gleiche Gerät auf die vorherige Position zurückgesetzt werden. Direkt nach dem Auslesen der Daten muss der entsprechenden Datei also eine eindeutige Bezeichnung zugewiesen werden, die Auskunft über die Geräteposition und die Seriennummer des Gerätes gibt. Zudem ist es sinnvoll, die Datei zusätzlich mit dem Datum des Auslesetages zu versehen. Das entsprechende Datumsformat wurde gewählt, um eine Sortierung auch über einen Jahreswechsel hinweg vornehmen zu können. Die in Abbildung 2.5 dargestellte Ordnerstruktur hat sich im Laufe der Projektarbeit als vorteilhaft herausgestellt.

Neben der Datenverwaltung ist auch die Erstellung von Metadaten wichtig. In einem Logbuch wurden alle notwendigen Informationen zu den Messwertdateien zusammengefasst. Neben dem Zeitraum, den eine Messung abdeckt, sind die gewählten Einstellungen des jeweiligen Gerätes beschrieben. Die genaue Position der Messstelle ist in Gauß-Krüger-Koordinaten und zusätzlich in Worten beschrieben. Batteriewechsel sind ebenso dokumentiert, wie der Pfad der gespeicherten Datei. Zusätzlich sind in dem Logbuch alle Messfahrten und Fahrten zur Wartung und zum Auslesen der Daten genau beschrieben. Neben der zeitlichen Einordnung (Beginn, Ende, Tidehochwasser, Tideniedrigwasser) sind Wetterdaten, Informationen zum Seegang und weitere beobachtete Besonderheiten vermerkt. Diese Daten können genutzt werden, um Rückschlüsse für kommende Messfahrten zu ziehen. Beispielsweise kann die Güte der aufgenommenen Fächerecholotmessungen mit den entsprechenden Winddaten verglichen werden.

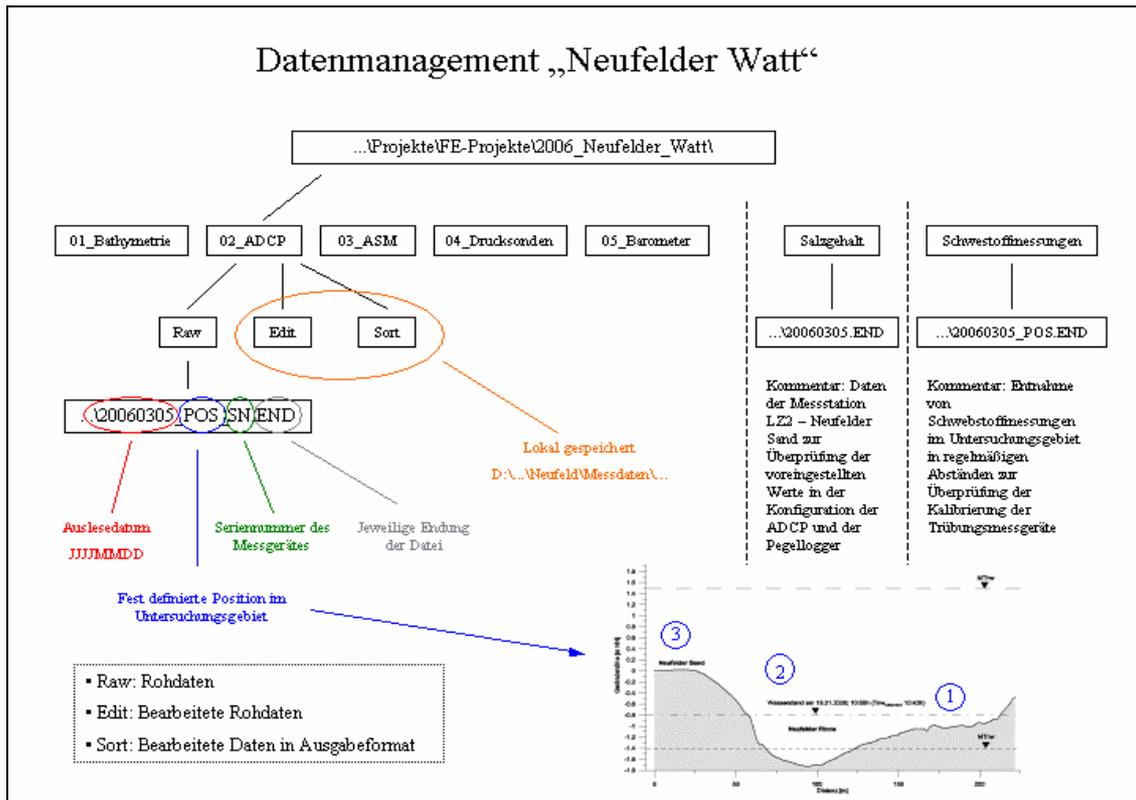


Abbildung 2.5: Schaubild des Datenmanagements

2.3 Messfahrten

Ab dem 13. Februar 2006 wurde das Untersuchungsgebiet 17 mal im Rahmen von Messfahrten aufgesucht. Wegen des günstigen Anfahrtsweges zur Neufelder Rinne war der Ausgangspunkt der Fahrten der Otterndorfer Sportboothafen (Abbildung 2.6).



Abbildung 2.6: Slipanlage im Sportboothafen Otterndorf

Nach Erreichen der Hafenausfahrt wird das Elbefahrwasser zwischen den beiden Fahrwassertonnen 45 und 46 in nördliche Richtung gekreuzt und Kurs auf die Untiefentonne südlich des Neufelder Sandes genommen (Abbildung 2.7). Dank der guten Kennzeichnung des Fahrwassers und der Untiefen in diesem Gebiet ist eine Navigation auch ohne technische Hilfsmittel möglich. Die Erreichbarkeit des Otterndorfer Hafens ist allgemein sehr gut, so dass lediglich in einem Zeitraum von zwei Stunden

vor und nach Tideniedrigwasser ein Slippen des Messbootes nicht möglich sowie die Zufahrt zum Hafen nicht gegeben ist. Dieser Zeitraum kann sich je nach Windverhältnissen vergrößern oder verkleinern. Durch die Kennzeichnung der Hafenausfahrt durch Pricken ist die Zu- und Ausfahrt auch bei geringen Wasserständen gut möglich. Zudem wurde auf dem Weg in das Untersuchungsgebiet die Hafenausfahrt mit Hilfe des Fächerecholotes der „Nekton“ vermessen und eine eigene digitale Seekarte erstellt, die die Navigation in den Wintermonaten, in denen die Pricken oftmals abgetrieben werden, zusätzlich erleichtert. Vor Beginn jeder Messfahrt wird an einem genau eingemessenen und gekennzeichneten Punkt im Hafen eine GPS-Base aufgestellt, die Referenzdaten in das Untersuchungsgebiet sendet und dort eine präzise Positionsbestimmung ermöglicht.

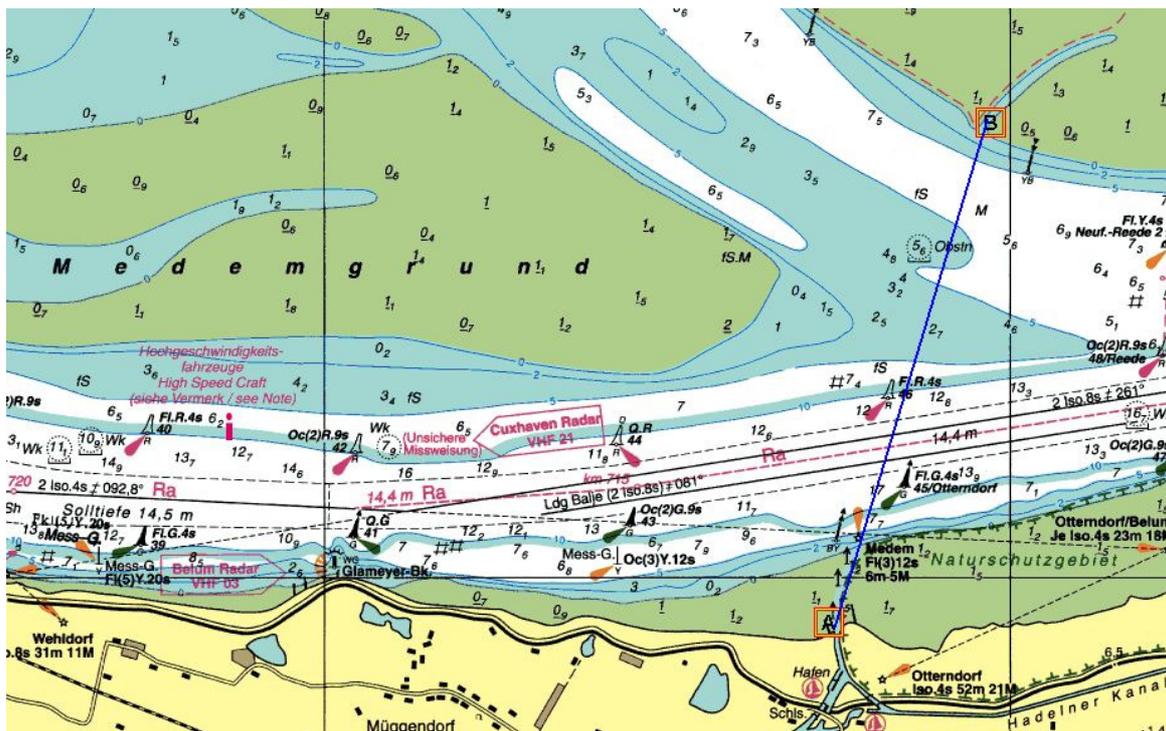


Abbildung 2.7: Seekarte der Elbmündung mit dem Kurs vom Otterndorfer Sportboothafen zur Neufelder Rinne (BSH, 2005)

Die Fahrten gliedern sich in Messfahrten zur Aufnahme der Bathymetrie mit Hilfe des Fächerecholotes und in Fahrten zur Installation und Wartung der stationären Messgeräte sowie zum Auslesen der Daten. Im Messkonzept, das aus **Phase 0** hervorgeht, waren für den Fall einer Nichterreichbarkeit des Messpriels während einer Phase stärkerer Winde Aufenthalte im Untersuchungsgebiet zu Fuß (von Neufeld aus) vorgesehen. Von dieser Variante ist dringend abzuraten, daher findet sie in diesem Bericht keine weitere Erwähnung mehr. Wichtigstes Entscheidungskriterium für oder gegen das Stattfinden einer Messfahrt sind die Windverhältnisse. Es zeigte sich, dass Fahrten bis zu einer Windstärke von 4 Beaufort stattfinden können, in Abhängigkeit von der jeweiligen Windrichtung teilweise auch nur bis 3 Beaufort. Je nachdem, welche Tideverhältnisse an einem geeigneten Tag vorherrschen, wird entweder die Vermessung der Bathymetrie oder die Wartung der stationären Messgeräte vorgenommen. In den Sommermonaten mit ausreichendem Tageslicht konnten oftmals beide Arbeitsvorgänge an einem Tag erfolgen. Ansonsten wurden an einem Tag bei entsprechenden Tideverhältnissen eine Vermessung der Bathymetrie durchgeführt und am darauffolgenden Tag eine Wartung der Messgeräte – oder umgekehrt. In beiden Fällen wurde das Messboot über Nacht im Sportboothafen Otterndorf belassen.

Die Vermessung der Bathymetrie mit Hilfe des Fächerecholotes im Untersuchungsgebiet ist nur im Zeitraum um das Tidehochwasser möglich, denn gerade in Bereichen nördlich der Neufelder Rinne sowie auf dem Neufelder Sand treten bei sehr geringen Wasserständen viele Fehlmessungen auf. Zur Wartung der Geräte sowie zum Auslesen der Daten ist ein Aufenthalt im Untersuchungsgebiet zur Niedrigwasserphase notwendig. Als kritischer Punkt stellte sich dabei die Einfahrt zur Neufelder Rinne heraus, wo sich ein ausgeprägtes Ebbdelta befindet. In der Praxis hat es sich bewährt, rechtzeitig zum Messquerschnitt vorzudringen, dort zu ankern und zu warten, bis die Wasserstände niedrig genug sind, um an die Geräte heranzukommen. Da das Auslesen der Messdaten sowohl bei den Trübungsmessgeräten (ASM) als auch bei den ADCP-Geräten einige Zeit in Anspruch nimmt, empfiehlt es sich, so früh wie möglich mit dem Auslesen zu beginnen und möglichst viele Rechner an Bord der Nekton zu verwenden. Sobald im Messquerschnitt Standtiefe erreicht ist, beginnen zwei mit Neoprenanzügen ausgestattete Mitarbeiter, die Messgeräte einzusammeln und zur Nekton zu bringen. Zunächst können hierbei die Geräte am nördlichen und am südlichen Prielufer erreicht werden. Ein dritter Mitarbeiter an Bord verbindet die Geräte mit den Computern und startet den Auslesevorgang. Hierfür werden der Bordrechner der Nekton sowie zwei Notebooks verwendet. Während die ersten Geräte ausgelesen werden, werden die Akkus der eingesammelten Drucksonden und die MMC-Speicherkarten gewechselt. Hierbei ist auf eine genaue Dokumentation zu achten. Anschließend können die Drucksonden wieder ausgebracht werden. Nach Abschluss des Auslesevorganges werden die Akkus der Trübungsmessgeräte und bei Bedarf die Akkus der ADCP-Geräte gewechselt und die Geräte neu gestartet und installiert. Ist der Wasserstand in Prielmitte niedrig genug, können auch die Geräte auf diesen Positionen zur Wartung geborgen werden. Dabei ist die Einspülstange des ASM mit einem Dummy zu kennzeichnen, da diese dauerhaft unter Wasser liegt. Am kritischsten ist die Wartung des mittleren ADCP-Gerätes. Dieses konnte nur bei extrem niedrigen Wasserständen aus dem Geräteträger entnommen werden, ohne im sonst brusttiefen Wasser zu tauchen. Nach dem Auslesevorgang muss das Gerät während steigender Wasserstände wieder installiert werden, wobei der einsetzende Flutstrom nicht unterschätzt werden darf. Im Zweifelsfall sollte die Aktion abgebrochen werden und das Gerät beim nächsten Einsatz wieder ausgebracht werden. Für den Fall, dass abzusehen war, dass die Zeit nicht ausreicht, um das Gerät über die serielle Schnittstelle auszulesen, wurde die im Gerät integrierte PCMCIA-Karte getauscht. Dazu muss der Edelstahlring des Gerätes gelöst werden und das Gerät geöffnet werden. Da im Anschluss der Dichtungsring des Gehäuses neu gefettet und gegebenenfalls ersetzt werden muss, sollte ein Kartentausch nur im Notfall erfolgen.

Je nach Ankerposition des Messbootes fiel dieses während des Niedrigwassers trocken, was jedoch kein Problem darstellte (Abbildung 2.8). Zudem befindet sich die Nekton dann im Schutz des Neufelder Sandes und ist nur sehr begrenzt Wellenbewegungen ausgesetzt.



Abbildung 2.8: Messboot „Nekton“ im Untersuchungsgebiet

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der Messkampagne.

Tabelle 2.1: Verzeichnis der Messfahrten

Datum	Beschreibung der Arbeiten	Eingesetzte Geräte
13.02.2006	Fächerecholotvermessung	Fächerecholot Seabeam 1180
21.03.2006	Fächerecholotvermessung	Fächerecholot Seabeam 1180
20.04.2006	Erstes Trockenfallen im Neufelder Watt, Kurzzeitmessungen von Strömung und Sedimentkonzentration, Entnahme von Bodenproben, anschließend Fächerecholotvermessung	ADCP 51, ASM 076, Fächerecholot Seabeam 1180
11.05.2006	Kurzzeitmessungen von Strömung und Sedimentkonzentration, anschließend Fächerecholotvermessung	ADCP 51, ASM 076, Fächerecholot Seabeam 1180
28.06.2006	Fächerecholotvermessung	Fächerecholot Seabeam 1180
29.06.2006	Installation der Trübungsmessgeräte und eines ADCP sowie einer Drucksonde, Einspülen der Trägerstangen für die ASM, Einbau der mobilen ADCP-Halterung, manuelle Vermessung des Leitdammes „Hermannshof“ mit DGPS, Einmessen der Positionen der Messgeräte.	DGPS Rover
		ADCP 51, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 1
05.07.2006	Auslesen und Wartung der Messgeräte, anschließend Neuinstallation	
		ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 2
17.07.2006	Auslesen und Wartung der Messgeräte, anschließend Neuinstallation, Vermessung des	Fächerecholot Seabeam 1180

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

	Leitdammes „Hermannshof“ mit dem Fächerecholot	
		ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076
18.07.2006	Gemeinsam mit der HPA: Auslegen der Gefahren tonnen im Messquerschnitt, Installation der ADCP-Geräteträger, anschließend Installation der ADCP und der Drucksonden	
		ADCP 46, ADCP 49, ADCP 51, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 1 bis 5
17.08.2006	Vermessung des Leitdammes „Hermannshof“ sowie der Neufelder Rinne mit dem Fächerecholot, Auslesen und Wartung der Messgeräte	
		ADCP 46, ADCP 49, ADCP 51, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 1 bis 4
31.08.2006	Abbruch der Fächerecholotvermessung wegen starken Seegangs	
09.09.2006	Auslesen und Wartung der Messgeräte Erster Einsatz Mini-ADCP Austausch der Tonne am Leitdamm „Hermannshof“, Installation eines Barometers an der Tonne in Prielmitte	
		ADCP 46, ADCP 49, ADCP 51, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 1 bis 5, STS Barometer
14.09.2006	Auslesen und Wartung der Messgeräte. Bergen des ADCP-Gerätes am nördlichen Prielufer. Verlagerung der nördlichen Tonne zum ADCP-Geräteträger. Vermessung des nördlichen Prielufers mit einem DGPS-Rover. Weiterer Einsatz des Mini-ADCP.	
		ADCP 46, ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 2 bis 5, STS Barometer
09.10.2006	Fächerecholotvermessung der Neufelder Rinne. Zurückschleppen der südlichen Tonne auf die ursprüngliche Position.	Fächerecholot Seabeam 1180
		ADCP 46, ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 2 bis 5, STS Barometer
10.10.2006	Auslesen und Wartung der Messgeräte	
		ADCP 46, ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 2 bis 5, STS Barometer
03.11.2006	Fächerecholotvermessung der Neufelder Rinne und der Hafenausfahrt Otterndorf.	Fächerecholot Seabeam 1180

		ADCP 46, ADCP 49, ASM 074, ASM 075, ASM 076, PLOG 2 bis 5, STS Barometer
28.11.2006	Bergen der Messgeräte. Entnahme von Bodenproben. Erneute DGPS-Vermessung der ADCP-Geräteträger.	

Am 13. Februar und am 21. März 2006 fanden die ersten Fächerecholotvermessungen der Neufelder Rinne statt. Am 20. April erfolgte zum ersten Mal die Einfahrt in die Rinne bei Niedrigwasser. Es wurden Kurzzeitmessungen von Strömungsparametern und Sedimentkonzentrationen sowie die Entnahme von Bodenproben vorgenommen. Während der anschließenden Hochwasserphase wurden erneute Fächerecholotmessungen durchgeführt. Ein ebenso strukturierter Termin fand am 11. Mai statt. Parallel zu den Messfahrten erfolgte die Herstellung der Trägersysteme für die Messgeräte von Seiten der HPA. Es ergaben sich jedoch zeitliche Verzögerungen bei der Erstellung der ADCP-Halterungen und der Halterungen für die Drucksonden. Während eines zweitägigen Einsatzes am 28. und 29. Juni wurde zunächst die Bathymetrie im Untersuchungsgebiet vermessen. Am zweiten Tag erfolgte die Installation der Trübungsmessgeräte. Entgegen der eigentlichen Planung, alle Geräteträger während eines Einsatzes auszubringen, wurde beschlossen, diesen Schritt durchzuführen, um mit den Messungen beginnen zu können. Als Geräteträger standen hier die vom Hersteller *Argus* mitgelieferten Einspüllanzen zur Verfügung. Zudem wurden von Seiten der HPA Verlängerungen dieser Lanzen erstellt. Die Stangen wurden mit Hilfe einer Tauchdruckpumpe in den Wattboden eingespült. Anschließend wurden die jeweiligen Position präzise vermessen und die Messgeräte auf die Gewinde der Geräteträger geschraubt. Im Vorfeld des Einsatzes wurde vom Institut für Wasserbau eine mobile ADCP-Halterung hergestellt, die zur temporären Ausbringung eines Strömungsmessgerätes dient. Diese wurde installiert und vermessen und ermöglichte Messungen, bevor die eigentlichen Halterungen fertiggestellt waren. Zusätzlich wurde am 29. Juni der Leitdamm „Hermannshof“ mit einem DGPS-Rover vermessen. Ein erstes Auslesen und eine Wartung der installierten Geräte erfolgten am 5. Juli. An einem Doppeltermin am 17. und 18. Juli fand eine erneute Wartung der Geräte und eine Vermessung des Neufelder Leitdammes mit dem Fächerecholot statt. Am zweiten Tag erfolgte die Ausbringung der von der HPA fertiggestellten ADCP-Geräteträger sowie von Tonnen zur Kennzeichnung der Messgeräte (Abbildung 2.9). Ab diesem Termin konnten alle Messgeräte kontinuierlich betrieben werden. Ein Bericht über den Einsatz am 18. Juli liegt vor (Dokument, 13 Seiten).



Abbildung 2.9: Einsatz der Störort zum Ausbringen der ADCP-Geräteträger und der Tonnen

In der Folgezeit folgte in regelmäßigen Abständen eine Wartung der Geräte sowie eine Vermessung der Bathymetrie. Am 31. August musste eine Messfahrt wegen starken Seegangs abgebrochen werden. Am 9. September kam zum ersten Mal ein Mini-ADCP zum Einsatz, das kurz zuvor im Rahmen eines Forschungsvorhabens vom Institut für Wasserbau angeschafft wurde. Das Strömungsmessgerät Stream Pro der Firma *RD Instruments* ist speziell für den Einsatz im Flachwasser geeignet und erlaubt auf einem Katamaran montiert auch den Einsatz auf Flächen des hohen Watts. Am 9. September wurde beobachtet, dass große Mengen von Sedimenten von Nordwesten in Richtung der Neufelder Rinne transportiert wurden. Bei einer Kontrolle der Entwicklung der Situation am 14. September wurde festgestellt, dass das ADCP-Gerät am nördlich Prielufer von einer etwa 0,8 m dicken Sedimentschicht bedeckt war. Das Gerät wurde geborgen und die zum Messgerät gehörige Tonne am Geräteträger befestigt, um ein Wiederfinden sowie ein Versetzen des Geräteträgers zu einem späteren Zeitpunkt zu erleichtern. Die Flächen am Nordufer der Neufelder Rinne, die dieser starken Sedimentation unterlagen, wurden mit einem DGPS-Rover vermessen. Bereits zuvor wurde der Verlust der Tonne, die die Einfahrt zur Neufelder Rinne markierte, festgestellt. Am 9. Oktober musste die ebenfalls verdriftete Tonne, die die Messgeräte am südlichen Punkt des Messquerschnittes markierte, zu ihrem ursprünglichen Standort zurückgeschleppt werden.

Unmittelbar nach der Sturmflut vom 31.10./01.11.2006 erfolgte am 3. November eine erneute Vermessung der Bathymetrie. Ein Verdriften von drei Tonnen wurde bereits am 1. November vom WSA Cuxhaven gemeldet, das die Tonnen vor Brunsbüttel an Bord eines Tonnenlegers nahm. Die zwei übrigen Tonnen fanden sich an ihren Positionen im Messquerschnitt wieder. Auch die Trübungsmessgeräte waren an ihren

Positionen verblieben. Am 28. November wurden dann alle Messgeräte nach Rücksprache mit der HPA vorübergehend deinstalliert. Dabei konnten alle Geräte geborgen werden, ohne Verluste beklagen zu müssen. Die Lage der ADCP-Halterungen hatte sich im Laufe der Zeit nach der Installation stabilisiert und der umgebende Boden konsolidiert. Auch die Ringkonstruktion, die die ADCP-Geräte in der Halterung befestigt, hat sich als geeignet herausgestellt. Die aufgrund des hohen Gewichtes schlechte Handlichkeit wurde durch Verwendung von Fendern als Schwimmkörper umgangen. Die ADCP-Halterungen konnten zudem als Trägersysteme auch für die Drucksonden genutzt werden.

Als Herausforderung bei der Vermessung der Bathymetrie mit Hilfe des Fächerecholotes sind die geringen Wassertiefen zu nennen. Zum einen ergeben sich durch die geringe Laufzeit des Signals Fehlmessungen, die im Postprocessing herausgefiltert werden müssen. Zum anderen ist die Fächerbreite des Echolotes bedingt durch die Wassertiefe klein, so dass viele Bahnen abgefahren werden müssen, um eine Fläche zu scannen. Weiterer einschränkender Faktor ist das kleine Zeitfenster, in dem ausreichende Wassertiefen vorhanden sind.

Der Betrieb der stationären Messgeräte funktioniert reibungslos. Während der Wartungsarbeiten muss jedoch verstärkt auf die Zeit geachtet werden. Es stellte sich als sehr wichtig heraus, die entsprechenden Arbeiten mit einem eingespielten Team vorzunehmen und so das Zeitmanagement des Einsatzes zu optimieren.

Messfahrten wurden in regelmäßigen Abständen vorgenommen. Dabei fanden in erster Linie die Wetterbedingungen Berücksichtigung, so dass bei guten Verhältnissen das Untersuchungsgebiet auch in einem wöchentlichen Rhythmus aufgesucht wurde. Zudem wurden unmittelbar nach der Sturmflut vom 1. November eine Vermessung durchgeführt und bei Auftreten der starken Deposition im Norden des Messprieis die Geräte im Wochentakt kontrolliert. Diese Vorgehensweise wird auch für den weiteren Verlauf der Messungen beibehalten.

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 noch einmal die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Messgeräte aufgeführt und die im Einsatz verwendeten Konfigurationen dokumentiert.

3.1 Strömungsmessungen

3.1.1 RDI ADCP Workhorse Sentinel

ADCP-Geräte verwenden den Doppler-Effekt, um Strömungsgeschwindigkeiten im Wasser zu bestimmen. Dabei senden sie ein akustisches Signal einer bestimmten Frequenz aus und nehmen das zurückkehrende Echo auf. Das Signal wird dabei von Plankton oder von kleinen Partikeln reflektiert, die im Wasser treiben und in etwa die gleiche Horizontal- bzw. Vertikalgeschwindigkeit wie das Wasser haben. Bewegen sich die akustischen Reflektoren radial zum Sender des Signals, findet eine Frequenzveränderung statt (Doppler-Effekt), die proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Reflektor ist. ADCP-Geräte erstellen ein dreidimensionales Strömungsprofil, wobei das Geschwindigkeitsprofil in gleichmäßige Tiefenzellen eingeteilt wird, für die jeweils eine gemittelte Geschwindigkeit bestimmt wird. Um Messfehler zu verringern, werden mehrere akustische Signale (*pings*) in definierten Zeitabständen schnell hintereinander gesendet und zu einem Ensemble zusammengefasst. Das Echo der Wasseroberfläche sowie der Sohle sind wesentlich stärker als das von den Reflektoren im Wasser zurückgesendete Signal. Bei einer Neigung der Sensoren von 20° gegenüber der Vertikalen sind 6% der Messungen unterhalb der Wasseroberfläche kontaminiert und müssen aussortiert werden. Als *Ringing* wird ein Effekt bezeichnet, bei dem die Energie des ausgesendeten Signals nachklingt und die eigentlichen Echos überspielt. Tatsächliche Echos können erst ab einer bestimmten Entfernung, die auch als *Blanking* bezeichnet wird, verwertet werden. Gerade bei einem Einsatz des ADCP im Flachwasser sind die Einstellungen so vorzunehmen, dass über ein möglichst großes Profil Messungen stattfinden, die gewonnenen Daten aber auch so wenig wie möglich kontaminiert sind.

Im Neufelder Watt werden drei ADCP-Geräte des Typs „Workhorse Sentinel“ der Firma *RD Instruments* eingesetzt. Die Geräte, die insbesondere für mehrmonatige autonome Einsätze unter anderem im küstennahen Bereich geeignet sind, wurden dem Institut für Wasserbau von der HPA auf Leihbasis zur Verfügung gestellt. Sie arbeiten mit einer Frequenz von 1200 kHz und sind somit speziell für den Einsatz im Flachwasser vorgesehen. Das „WorkHorse Sentinel“ hat eine maximale Reichweite von etwa 20 Metern bei einer vertikalen Zellengröße von 2 m. Optimiert sind die vorhandenen Geräte jedoch für einen hochauflösenden Einsatz mit einer empfohlenen minimalen vertikalen Zellengröße von 5 cm bei einer maximalen Reichweite von 5,00 m. Die Geräte werden mit Alkaline-Batterie-Packs mit einer Kapazität von jeweils 450 Wh betrieben, die nicht aufgeladen werden können. Auf einer Speicherkarte im Gerät stehen 16 MB zur Verfügung, insgesamt gibt es zwei Slots für Speicherkarten, so dass der Speicher ausgeweitet werden kann.

Die HPA konstruierte ein Geräteträgersystem für die drei ADCP-Geräte. Dieses ist in den Abbildungen 3.1 und 3.2 zu sehen. Am Kopf des ADCP-Gerätes wurde ein schwerer Edelstahlring befestigt, an dem an der Unterseite eine zusätzliche Dichtung angebracht ist. Gerät und Ring werden in die Trägervorrichtung eingelassen. Die

Dichtung sorgt dafür, dass keine großen Mengen an Sedimenten in die Fassung der Halterung eindringen. Die Halterung besitzt einen Spülanschluss zum einfacheren Einbringen. Um den Transport der ADCP-Geräte inklusive Edelstahlring während der Wartungsarbeiten zu vereinfachen, werden die Fender des Bootes zu Schwimmkörpern umfunktioniert.



Abbildung 3.1: ADCP-Gerät mit Edelstahlring



Abbildung 3.2: ADCP-Geräteträger

Um die Batterie des *Workhorse Sentinel* zu wechseln, muss das Fußteil des Gerätes, welches durch vier Sechskantschrauben befestigt ist, entfernt werden. Die Batterie ist vom Gerät und anschließend vom Deckel zu entkoppeln. Nach Austausch muss das Gerät wieder wasserdicht verschlossen werden. Dabei ist der O-Ring in die korrekte Position zu bringen, die Schrauben sind über Kreuz mit dem richtigen Drehmoment (5,6 Nm) anzuziehen. Im Gehäuse des Gerätes muss ein Paket Trockenkugeln platziert werden.

Vor dem ersten Betrieb muss die Batterie angeschlossen werden. Bei längeren Lagerzeiten ohne Betrieb des ADCP empfiehlt es sich, die Verbindung der Batterie zur Prozesseinheit des Gerätes zu trennen, um eine Entladung zu verhindern. Das Anschließen bzw. Trennen des Batterie-Packs erfolgt durch Entfernung des Kopfteils.

Um die Speicherkarte zu entfernen bzw. zu tauschen, ist ebenfalls das Kopfteil des Gerätes zu entfernen. Auch hier muss auf einen wasserdichten Wiederverschluss geachtet werden (Achtung: 9,6 Nm, anderes Drehmoment!).

Bei den zuvor beschriebenen Arbeiten liegt sämtliche Elektronik des Gerätes frei. Es ist nicht möglich, diese Arbeiten direkt im Watt durchzuführen. Ein Öffnen des Gerätes zum Wechseln der Speicherkarte oder der Batterie erfolgt an Bord des Messbootes oder im Labor. Ein Öffnen des Gerätes an Bord des Messbootes zum Wechsel der Speicherkarte sollte allerdings nur dann erfolgen, wenn aus Zeitgründen das Auslesen der Messdaten nicht mehr gelingt und auch dann nur mit zwei Mitarbeitern, wobei einer den Kopf des Gerätes entfernt und hochhält und der zweite die Spei-

cherkarten tauscht. Aufgrund der äußeren Verunreinigungen des Gerätes ist die Gefahr sonst zu groß, dass Feuchtigkeit oder Sedimentpartikel in das Gerät geraten oder die erforderliche Dichtigkeit nicht erreicht wird. Ein Wechsel der Batterien sollte ausschließlich in geschlossenen Räumen stattfinden, wobei das Gerät zuvor von außen gereinigt werden muss. Bei einer Gegenüberstellung von Wert des Messgerätes und Häufigkeit eines Batteriewechsels sollte in Kauf genommen werden, dass für einen gewissen Zeitraum dann keine Daten aufgezeichnet werden können. Das Institut für Wasserbau beschaffte im September über die Firma Bornhöft zehn entsprechende Batteriepacks. Ein Wechsel war bis dato jedoch nur bei einem Gerät notwendig, das zuvor für alle durchgeführten Tests eingesetzt wurde und auch vor allen anderen Geräten im mobilen Geräteträger zum Einsatz kam.

Die aufgezeichneten Daten werden wie beschrieben standardmäßig über eine Kabelverbindung und eine serielle Schnittstelle zum PC ausgelesen. Für eine Binärdatei einer Größe von etwa 14 MB, was einer Aufzeichnungsdauer von einem Monat entspricht, dauert der Vorgang des Auslesens ca. 50 Minuten. Zusätzlich zu den standardmäßig installierten Speicherkarten mit einer Größe von 16 MB, wurden Karten mit 128 MB Speicher beschafft und erfolgreich eingesetzt.

Mit Hilfe der mitgelieferten Software PlanADCP wird die Konfiguration eines Gerätes und dessen Start durchgeführt. Es empfiehlt sich, eine entsprechende erstellte Konfigurationsdatei abzuspeichern und diese jeweils zum Gerät zu senden, um nicht immer wieder alle Schritte im Programm PlanADCP zu durchlaufen.

Während der Messungen wurde eine empfohlene kleinstmögliche vertikale Zellengröße von 5 Zentimetern eingestellt. Dies liefert ausreichend detaillierte Ergebnisse, wobei bei der Verwendung von kleineren Zellgrößen zudem das Rauschen des Datensatzes zu stark wird. Für Wassertiefe, Salinität und Temperatur werden erwartete Werte geschätzt. Dabei empfiehlt sich, die größte zu erwartende Wassertiefe vorzugeben, da das Gerät sonst Signale zu geringer Energie aussendet, um auch bei hohen Wasserständen die Strömungsgrößen der gesamten Wassersäule zu erfassen. Nach Schätzungen, die sich auf Aussagen der Planungssoftware beziehen, ergibt sich eine maximal mögliche Messdauer von etwa 50 Tagen bei einer Größe der Speicherkarte von 128 MB, die durch die Batteriekapazität begrenzt wird. Nach bisherigen Erfahrungen bei den Messungen sollte dieser Zeitraum eher größer sein. Dennoch ist es nicht sinnvoll, derart lange Messzeiträume zu verwenden, da die aufgezeichneten Daten in kürzeren Zeitabständen kontrolliert werden sollten.

Der *Blanking*-Bereich sollte so weit wie möglich reduziert werden, um auch bei sehr geringen Wasserständen messen zu können. Dabei wurde ein *Blanking* von 15 cm gewählt, wobei mit dieser Einstellung Daten guter Qualität aufgezeichnet werden konnten. Als Messintervall wurden fünf Minuten gewählt. Dieses Intervall korrespondiert mit dem der Trübungsmessgeräte und der Wasserstandsaufzeichnungen und erleichtert so die Datenauswertung.

ADCP-Geräte berechnen die Schallgeschwindigkeit auf der Basis von abgeschätzter Salinität, Wassertiefe und gemessener Temperatur am Sensor. Diese Schallgeschwindigkeit wird genutzt, um aus den empfangenen Signalen eine Fließgeschwindigkeit zu berechnen. Die verwendete Schallgeschwindigkeit wird zusammen mit den übrigen Daten aufgezeichnet und kann somit im Postprocessing für eventuelle Korrekturen verwendet werden. Bei den im Untersuchungsgebiet auftretenden geringen Wassertiefen ist der Einfluss der beschriebenen Parameter aber sehr gering.

Für die ADCP-Geräte im Untersuchungsgebiet wurden mit Hilfe der Daten der Dauermeßstation Neufelder Sand mögliche Salzgehalte von 15‰ bis 26‰ und Temperaturen von 0 bis 23,5 °C angenommen. Bei den maximal möglichen Wasserstandsschwankungen ergaben sich Abweichungen der einzelnen Schallgeschwindigkeiten

von max. 5‰, die vernachlässigt werden können. Über den größten möglichen Schwankungsbereich der Temperatur ergeben sich Abweichungen der Schallgeschwindigkeit von etwa 6 %. Da das Gerät bereits jeweils die aktuell mit Hilfe des integrierten Sensors gemessenen Temperaturen zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit verwendet, ist eine spätere Korrektur in diesem Fall nicht nötig. Das ADCP-Gerät sieht in seiner Konfiguration die Eingabe eines Salzgehaltes vor, der während der gesamten folgenden Messung verwendet wird. Wird ein über das Jahr gesehener Mittelwert verwendet (hier: 20‰), ergibt sich ein maximaler Fehler von <1%, der insbesondere bei sehr geringen Wassertemperaturen auftritt. Da der Salzgehalt ganzjährig Schwankungen unterlegen ist, wird wie beschrieben mit einem Mittelwert gemessen. Während des Postprocessings werden dann für die Winter- und Frühjahrsmonate mit Hilfe der an der Dauermessstation LZ2 gemessenen Daten extrem hohe oder niedrige Salzgehalte ermittelt. Für solche Phasen wird dann eine Korrektur der Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Die Anzahl der Tiefenzellen wird durch die erwarteten Wasserstände bestimmt. Je nach Position des Gerätes (Prielmitte, Prielböschung) verändert sie sich dementsprechend. Pro Ensemble werden 50 *Pings* gesendet. In den erweiterten Einstellungen können zusätzlich die erwartete Tiefenlage des ADCP, eventuelle magnetische Anomalien im Untersuchungsgebiet, Beginn der Messung und der *Watermode* eingestellt werden. In den Experten-Einstellungen kann das *Blanking* verändert werden. Dabei muss beachtet werden, dass ein zu kleiner Wert die Qualität der Messungen negativ beeinflusst.

Bei der Installation der ADCP-Geräte im Untersuchungsgebiet ist darauf zu achten, dass die Neigung des Gerätes möglichst gering ist. Gerade im flachen Wasser reduziert eine größere Neigung das messbare Profil.

Für die Messungen im Neufelder Watt wird der *Mode 12* verwendet werden, der es erlaubt, in flachen Gewässern Strömungsgeschwindigkeiten über einen größeren Bereich zu messen und durch die kleine Tiefenzellengröße eine hohe Auflösung zu erreichen. Noch höher auflösend ist der *Mode 11*, dessen operationelle Grenze jedoch bei „Geschwindigkeit × Tiefe < 1 m²/s“ liegt und der somit für den Einsatz im Untersuchungsgebiet nur bedingt geeignet ist.

Unmittelbar nach dem Auslesen werden die Geräte wieder im Untersuchungsgebiet installiert. Kleine Auslese- bzw. Wartungsintervalle sind dabei sinnvoll, um eine optimale Kontrolle der gewonnenen Daten zu erhalten und mögliche Verbesserungen an der Einstellung möglichst zeitnah vornehmen zu können. Die volle theoretische Einsatzdauer bietet dennoch genug Zeitpuffer für den Fall einer Schlechtwetterlage, die ein Anlaufen des Untersuchungsgebietes verhindert, sollte aber im Regelfall nicht ausgeschöpft werden. In Phasen mit relativ kurzen Messzeiträumen sind nur geringe Datenmengen auszulesen. Dieses verkürzt die Einsatzdauer und reduziert die Wahrscheinlichkeit, nicht alle Geräte wieder ausbringen zu können. Sind die Batterien zu wechseln, sollte dies wie beschrieben im Labor erfolgen.

3.1.2 RDI Mini-ADCP Stream Pro

Neben den oben beschriebenen stationären Messgeräten kann an Bord des Messbootes ein weiteres ADCP zur Messung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen installiert werden, das jedoch für größere Wassertiefen optimiert ist. Um auch bei den im Untersuchungsgebiet vorhandenen sehr geringen Wassertiefen eine hohe Auflösung zu erzielen, steht seit kurzem am Institut für Wasserbau das ADCP-System Stream Pro der Firma *RDI* zur Verfügung (Abbildung 3.3). Dieses ist geeignet, ein Strömungsprofil bei Wassertiefen bis zu 2 m hochauflösend zu erstellen. Der vom

Hersteller geplante Einsatz sieht vor, das auf einem Katamaran befestigte Gerät manuell über kleinere Gewässer zu ziehen. Die gemessenen Daten werden dabei per Fernübertragung auf einen PDA übertragen und dort gespeichert. Am Institut für Wasserbau wurde ein Trägersystem für das Mini-ADCP entworfen, das für den Einsatz speziell im Watt optimiert ist. So wurde ein Katamaran mit ferngesteuertem Eigenantrieb entwickelt, der auch bei Wassertiefen ab 15 cm einsatzfähig ist. Der PDA wird ebenfalls auf dem Katamaran installiert, um eine größere Reichweite zu erzielen. Zusätzlich wurde der PDA mit einem GPS-Modul ausgestattet, um neben den Strömungsdaten auch die jeweilige Position aufzuzeichnen.



Abbildung 3.3: Stream Pro Mini-ADCP im Einsatz auf einem Katamaran

3.2 Trübungsmessgeräte

Zur Bestimmung der Konzentration suspendierter Sedimente werden drei Trübungsmessgeräte ASM-IVS der Firma Argus verwendet (Abbildung 3.4). Die Geräte arbeiten mit *Optical Backscatter Sensoren* (OBS), die die Konzentration an suspendierten Feststoffen im Wasser bestimmen, indem sie die infrarote Strahlung feststellen, die von suspendierter Materie im Wasser reflektiert wird. Die Sensoren können dabei so kalibriert werden, dass sie direkt die Konzentration an suspendierten Sedimenten (SSC) zurückgeben. Die empfangenen Signale hängen allerdings von der Größe, der Form und der Beschaffenheit der suspendierten Teilchen ab, so dass die OBS Sensoren anhand der im Untersuchungsgebiet im Wasser vorhandenen Sedimente kalibriert werden müssen.



Abbildung 3.4: Trübungsmessgerät ASM im Einsatz

Das ASM IV nimmt die Reflektionen und die dynamischen Parameter auf, die in der Wassersäule von sich bewegendem Feststoff erzeugt werden. Die Aktivierung des Daten-Loggers und der Energieversorgung sowie die Übermittlung der Signale werden von einer batterieversorgten Zentraleinheit im Kopf des Gerätes übernommen. Die wasserdichte Einheit besteht aus einem Mikroprozessor, Datenspeicher, zusätzlichen Sensoren, wie Temperatur- und Drucksensor sowie Inklinometer, und der Energieversorgung. Eingehende Daten werden vom Mikroprozessor verarbeitet und im Datenspeicher gespeichert. Das Gerät arbeitet mit Infrarot-Backscatter-Sensoren, die in Abständen von jeweils 10 mm in einem Stahlpfahl montiert sind (Abbildung 3.5). Die insgesamt 96 Sensoren ergeben somit ein Messprofil von etwa einem Meter. Jeder Sensor besteht aus einem Infrarot-Sender und einem Empfänger. Die Backscatter-Proben werden jeweils aus einem Volumen von ca. $0,5 \text{ cm}^3$ aus einer Distanz zwischen 5 und 10 mm vor dem jeweiligen Sensor gewonnen. Optische Filter verhindern Interferenzen mit anderen Lichtquellen, so dass ein Einsatz des Gerätes in tidebeeinflussten Gebieten mit Perioden, in denen das Gerät trocken fällt, möglich ist. Die Reflektion von Infrarotlicht hängt sehr stark von den Reflektions- und Absorptionseigenschaften der Sedimente ab, weshalb eine sediment- bzw. ortsspezifische Kalibrierung notwendig wird.

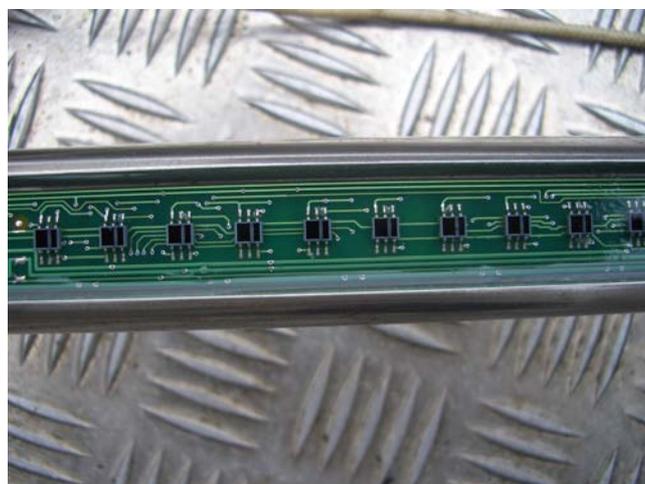


Abbildung 3.5: Optical Backscatter Sensoren des ASM

Die Energieversorgung der Geräte läuft über zwei 9 V Blockbatterien im Kopf des Gerätes. Hier ist ebenfalls ein Speicher mit einer Kapazität von 8 MB eingebaut. Das Auslesen der Daten funktioniert mit Hilfe einer Kommunikationseinheit, die auf den Kopf des Gerätes gesteckt wird, über eine Infrarotschnittstelle. Das Auslesen einer Datenmenge von 8 MB, die in etwa 6 Wochen aufgezeichnet wird, dauert ca. 40 Minuten. Das Auslesen der Daten über die Infrarotschnittstelle kostet sehr viel Energie. Vor dem erneuten Einsatz eines Gerätes sind in jedem Fall voll geladene Akkus einzusetzen. Die Kommunikation mit dem Gerät erfolgt über das Programm ASMA 3.0, das im Lieferumfang enthalten war. Hier können Parameter wie Beginn und Ende der Messkampagne, das Messintervall usw. eingestellt werden. Diese bestimmen die mögliche Dauer der Messung.

Es wird, korrespondierend mit den ADCP-Messungen und den Aufzeichnungen des Wasserstandes, ein Intervall der Messzyklen (*Break between cycles*) von 5 Minuten verwendet. Bei einem *Measurement Intervall* von 1 Sekunde und 3 Messungen pro Messzyklus beträgt die tatsächliche mögliche Dauer einer Messkampagne etwa 42 Tage.

Die ASM-IVS Geräte wurden von der Firma ARGUS vorkalibriert. Eine Kalibrierung für den Einsatz im Watt erfolgte ebenfalls von Seiten der Firma ARGUS, nachdem Sedimentproben aus dem Untersuchungsgebiet entnommen wurden. Weitere in-situ Schwebstoffproben wurden genommen, um die aufgezeichneten Werte zu überprüfen. Jedes Gerät wurde individuell kalibriert. Eine Konfiguration für den Einsatz im Neufelder Watt wird vorgenommen, indem jeweils die gerätespezifische Kalibrierungsdatei, die von der Firma ARGUS erstellt wurde, hinterlegt wird. Diese Datei ermöglicht, die gemessenen Werte der Trübung in eine Sedimentkonzentration umzurechnen.

Die entnommenen Sedimentproben aus dem Untersuchungsgebiet waren sehr homogen über alle Entnahmestellen. Alle Proben enthielten viele organische Einschlüsse sowie Glimmer.

Aufgrund der langen Dauer des Auslesens der Daten des ASM kann diese Arbeit lediglich im Labor oder an Bord des Messbootes während der Niedrigwasserphase erfolgen.

Das ASM kann so installiert werden, dass sich einige Sensoren (bei der Installation etwa die Sensoren 96 bis 85) im Wattboden befinden. Somit ergibt sich zwar nur ein Messprofil von etwa 85 cm, jedoch können Informationen über die Veränderungen der Höhenlage der Sohle an dieser Stelle gewonnen werden. Dies ergibt jedoch Schwierigkeiten, wenn ein Gerät nach dem Auslesen und der Wartung wieder installiert werden soll und das Gewinde der eingespülten Trägerstange schwer wiederzufinden und durch Sedimente verunreinigt ist.

3.3 Drucksonden

Zur Aufzeichnung von Wasserständen und Seegang stehen fünf Pegellogger P-LOG521-MMC der Firma Driesen+Kern zur Verfügung (Abbildung 3.6). Die Datenlogger sind in der Lage, Temperaturen und Drücke in einem Messbereich von 0,2 bis +80 °C bzw. von 0 bis 400 kPa aufzunehmen. Die Geräte messen dabei den absoluten Druck, d.h. die Summe aus Wasserdruck und barometrischem Druck. Um den Pegelstand zu berechnen, muss der barometrische Druck vom Messwert des Pegelloggers abgezogen werden. Der barometrische Druck wird mit Hilfe des „Speichernden Barometers“ P-LOG125-B aus der gleichen Baureihe der Pegellogger in einem Messbereich von 800 bis 1200 hPa aufgezeichnet. Zusätzlich wurde während der Messungen eine weitere Drucksonde der Firma STS verwendet, um die aufgezeich-

neten barometrischen Drücke vergleichen zu können. Zum Auslesen der Daten wird jeweils ein mitgeliefertes Interface sowie die Software InfraLog verwendet bzw. erfolgt bei dem P-LOG521-MMC über den Austausch einer entsprechenden Speicherkarte. Über die Software können ebenfalls sämtliche Einstellungen an den Pegelloggern sowie am Barometer vorgenommen werden.



Abbildung 3.6: Drucksonde P-LOG521-MMC

Der Barometer-Logger P-LOG125-B zeichnet die Umgebungstemperatur und den barometrischen Druck auf. Es steht dabei ein interner Speicher von 2 MB zur Verfügung, der für 500.000 Messwerte pro Kanal ausreicht. Die Intervallzeit kann zwischen 0,05 s und 24 h frei eingestellt werden. Die Energieversorgung des Gerätes erfolgt über eine handelsübliche 9V Blockbatterie. Die durch die Batterie bereitgestellte Energie ist ausreichend, um den Speicher einmal zu füllen. Je nach eingestelltem Messintervall variiert somit die mögliche Messdauer. Das Gerät ist nicht wettertauglich und sollte innen eingesetzt werden.

Um ein Setup des Gerätes vorzunehmen oder Daten auszulesen, ist es über das Interface an einen COM-Port des Rechners anzuschließen. Nach dem Start von InfraLog können über die Funktion *Logger Start* das Messintervall und der Beginn der Messung eingestellt werden. Gespeicherte Daten werden überschrieben. Mit der Funktion *Logger Auslesen* wird die Messung gestoppt und die Daten können auf den Rechner übertragen werden. Eine Umwandlung der Binärdaten in ASCII-Daten kann ebenfalls mit Hilfe von InfraLog vorgenommen werden.

Das Barometer muss wettergeschützt installiert werden. Im Verlauf der Messungen wurde das Gerät beim Hafenmeister des Hafens Otterndorf untergebracht. Das Messintervall wird dem der Pegellogger zur Wasserstandsaufzeichnung angeglichen. Zusätzlich wurde eine Drucksonde der Firma STS, die im Institut für Wasserbau vorhanden war, an der Tonne zur Markierung der Messgeräte in der Mitte des Priels angebracht, um Aussagen über den Unterschied der barometrischen Drücke im Untersuchungsgebiet sowie im Otterndorfer Hafen treffen zu können.

Der Pegellogger P-LOG521-MMC zeichnet den absoluten Druck und die Temperatur auf. Die Intervallzeiten können zwischen 0,1 s und 24 h frei eingestellt werden. Die benötigte Energieversorgung wird durch einen Akkupack aus 8 Mignonzellen gewährleistet, der ausreicht, um den Speicher einmal zu füllen. Die mögliche Messdauer hängt somit vom Messintervall ab. Die Speicherkapazität der mitgelieferten MMC Karte beträgt 128 MB. Diese Kapazität kann allerdings aufgrund der begrenzten Energieversorgung nicht in einer Messkampagne gefüllt werden.

Ein Setup und Auslesen der Daten kann auch über InfraLog erfolgen. Hierzu ist der Pegellogger aufzuschrauben und über ein Interface mit dem Rechner zu verbinden. Im Innern des Gerätes befindet sich auch der Akkupack, der ohne Werkzeug ausge-

wechselt werden kann. Nach dem Start von InfraLog können unter *Einstellungen* verschiedene Parameter festgelegt werden. Wird der barometrische Druck nicht gemessen, kann hier etwa ein konstanter Druck eingegeben werden. Ebenso können die Erdbeschleunigung und die Dichte des Tiefenmediums angegeben werden. Unter *Konfiguration* können u.a. die Anzahl der Nachkommastellen sowie das Dezimaltrennzeichen festgelegt werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die gleiche Konfiguration wie beim Barometer verwendet wird. Mit *Logger Start* können die Intervallzeit sowie die Vorlaufzeit eingestellt werden und der Logger gestartet werden. Außerdem kann eine Messstellenbeschreibung eingegeben werden. Mit Beginn einer neuen Messung werden gespeicherte Daten überschrieben. Über die Schaltfläche *Logger Auslesen* werden die Messdaten auf den Rechner übertragen. Wie auch beim Barometer, können die Binärdaten mit Hilfe einer Grafik dargestellt werden. Anschließend kann eine Umwandlung in ASCII-Daten erfolgen.

Um gespeicherte Daten auszulesen und den Akku zu wechseln, ist der Pegellogger aufzuschrauben. Diese Maßnahme sollte an Bord des Messbootes und nicht im Watt erfolgen. Es muss darauf geachtet werden, dass keine Sedimente in die Dichtung gelangen.

Die Aufzeichnung von Seegang erfolgte mit einer Frequenz von 5 Hz. Die mögliche Messdauer wird dabei von der Energieversorgung durch den Akku begrenzt. Nach Herstellerangaben ist bei einem Messintervall von 5 Hz eine Messdauer von etwa 10 Tagen möglich. Diese Angabe ist aber sehr stark vom Zustand des Akkus und der Umgebungstemperatur abhängig. Mit einem Akku in gutem Ladezustand (vielfach hintereinander ge- und entladen) ergab sich eine maximale Messdauer von 8 Tagen bei einer Frequenz von 5 Hz.

Unter Umständen bedeutet dies, dass interessante Seegangereignisse nicht messtechnisch erfasst werden können. Verschiedene Optimierungsmöglichkeiten der Seegangsmessungen wurden diskutiert. Durch eine Verkürzung der Zeitabstände zwischen den Messfahrten könnte ein höherer Abdeckungsgrad der Seegangsaufzeichnungen erreicht werden. Witterungsbedingt ist dies allerdings nicht grundsätzlich durchführbar. Die zur Zeit eingesetzten Akkus sind mit einer Kapazität von 2400 mAh auf dem neuesten Stand. Akkus, die in den letzten Monaten auf den Markt gekommen sind, besitzen nur wenig mehr Kapazität und eine Umrüstung würde den möglichen Messzeitraum nicht wesentlich verlängern. Durch eine technische Umrüstung der Pegellogger könnten diese über Schwellwerte gesteuert werden, die vor Beginn einer Messung eingestellt werden müssen. Diese Umrüstungen sind mit zusätzlichen Kosten verbunden und ein Einsatz dieser Technik in anderen Projekten des Instituts für Wasserbau zeigten Schwierigkeiten mit dem Einsatz der Schwellwertfunktion. Dadurch, dass die Logger nur bei der Erfüllung bestimmter, durch die Schwellwerte festgelegter, Randbedingungen messen, könnte sich die Messzeit verlängern. Da aber die Abtastrate zur Kontrolle der Schwellwerte ebenfalls sehr hoch sein müsste, ist die Effizienz der Umrüstung begrenzt. Gegen Ende der **Phase 1** des Projektes wurde der Standort am südlichen Prielrand mit zwei Pegelloggern bestückt, wobei der zweite Logger erst am geschätzten Ende des Messzeitraumes des ersten Loggers gestartet wurde. Dadurch konnte eine Verdopplung des Messzeitraumes erreicht werden. Am Institut für Wasserbau sind in den nächsten Monaten weitere Drucksonden verfügbar, die nicht in anderen Projekten eingesetzt sind. Während der Fortsetzung der Naturmessungen im Untersuchungsgebiet ist so weit wie möglich eine Dopplung von Drucksonden an einem Standort zur Seegangsaufzeichnung geplant. Zudem werden die Messgeräte weiterhin so oft wie möglich gewartet, um auf diese Weise eine möglichst lückenlose Aufzeichnung von Seegangdaten zu erreichen. Des Weiteren wird die Entwicklung der Akkukapazitäten beobachtet, um gegebenenfalls durch den Einsatz neuer Akkus die Messdauer zu erhöhen.

Vom Institut für Wasserbau wurde ein Trägersystem zur Installation der Pegelsonden an den Spülanschlüssen der ADCP-Geräteträger entwickelt. Die Geräte sind somit räumlich eng verbunden (Vorteil beim Einsatz vor Ort), was eine Zeitersparnis bei der Wartung der Geräte bedeutete.

3.4 Fächerecholot

Das Tiefenrelief des Neufelder Watts wird mit Hilfe eines Fächerecholotes vermessen, das an Bord des Messbootes Nekton zur Verfügung steht. Neben dem Fächerecholot sind für die Messungen weitere Geräte notwendig: ein DGPS (*Differential Global Positioning System*), ein Bewegungssensor und ein Kreiselkompass. Das DGPS ordnet den gemessenen Tiefen eine genaue Position zu. Der Bewegungssensor und der Kreiselkompass korrigieren die Schiffsbewegungen.

Das Messprinzip von Fächerecholoten basiert auf der Messung der Laufzeit des Schallimpulses durch die Wassersäule und wieder zurück. Um der aus der Laufzeit errechneten Tiefe eine exakte Position zuweisen zu können, muss zusätzlich der Einfallswinkel des zurückkommenden Echos bekannt sein. Das verwendete Multi-beam-Echolot (Fächerecholot) SeaBeam 1185 der Firma L-3 Communications ELAC Nautic GmbH überdeckt einen Öffnungswinkel von 153° . Diese Breite teilt sich in 126 Einzelstrahlen auf, so dass jeder Empfänger im Schwinger einen Strahl von $1,5^\circ$ erfasst und dazwischen ein Abstand von $1,5^\circ$ Grad besteht. Das System erfüllt den internationalen Standard IHO (International Hydrographic Organization) für Fächerecholotsysteme, übersteigt die vorgegebene Genauigkeit sogar deutlich. Genaue Qualitätsmerkmale von Fächerecholotsystemen sind schwierig zu ermitteln, da die einzelnen Komponenten des Systems jeweils ihre eigenen Fehler haben, die in Abhängigkeit von den Randbedingungen variieren. Zudem variiert die Genauigkeit der einzelnen Beams eines Fächerecholotes mit dem Ausstrahlwinkel. Die Genauigkeit der Messung nimmt zu den äußeren Beams hin ab. Dieser Effekt wird durch Beugung der Schallstrahlen an Sprungschichten, die durch eine Änderung des Salzgehaltes oder der Wassertemperatur entstehen, hervorgerufen. Je geringer der Einfallswinkel des Schallstrahls auf die Sprungschicht, desto größer ist die Beugung. Daher sind die Randstrahlen am stärksten von diesem Effekt betroffen. Zusätzlich wirken sich die Bewegungen des Schiffs bzw. die Ungenauigkeiten des Bewegungssensors bei den äußeren Beams wesentlich stärker aus. Werden z.B. bei einer Wassertiefe von 5 m alle nichtstatischen Fehler im ungünstigsten Fall addiert, ist mit einer maximalen Abweichung in Lage und Höhe von ca. 8 cm bei den äußeren Beams und 7 cm bei den Inneren Beams zu rechnen.

Vor Beginn jeder Messung werden mit Hilfe einer Schallsonde die verschiedenen Schallgeschwindigkeiten über die gesamte Wassersäule basierend auf dem Salzgehalt und der Temperatur bestimmt, um so den Beugungseffekt zu korrigieren. Die Genauigkeit der Schallgeschwindigkeitsmessung bestimmt den verbleibenden Restfehler durch die Beugungseffekte. Bei starken Schwankungen der Temperaturverteilung oder Salzgehaltes in einem Gewässer müssen daher mehrere Schallprofile im Verlaufe einer Messung bestimmt werden.

Ein GPS-Empfänger liefert eine dreidimensionale Koordinate in bezug auf den WGS84-Ellipsoiden. Für eine Ortung mittels GPS müssen mindestens vier der 24 nichtstationären Satelliten zur Verfügung stehen. Die vierte Unbekannte, die es zu lösen gilt, ist die Ungenauigkeit der Empfängeruhr. Anhand der bekannten Satellitenkoordinaten und der Entfernung zwischen Satelliten und Empfänger wird die dreidimensionale Koordinate ermittelt. Die Entfernung zwischen Satelliten und Empfänger resultiert aus der Laufzeit des Signals. Die so zu erreichende Genauigkeit liegt in etwa bei mehreren Metern. Die Ungenauigkeit ergibt sich durch Refraktion in der Iono-

sphäre und Troposphäre, die Signalgenerierung und die Genauigkeit der Satelliten. Zur Vermessung morphologischer Strukturen ist diese Genauigkeit nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird ein DGPS verwendet. Bei dieser Methode werden zwei Punkte gleichzeitig betrachtet. Einer der beiden Punkte ist eine an Land betriebene Referenzstation, deren geographische Koordinaten im WGS84-System bekannt sind. Diesen Koordinaten sind die erzeugten Koordinaten der Referenzstation entgegengzustellen. Die Differenzen sind durch den Uhrfehler sowie die Refraktion entstanden. Aus dem Vergleich von Ist- und Soll-Koordinaten können Korrekturwerte errechnet werden, die eine Bestimmung der realen Position des Empfängers ermöglichen. Bei diesem Verfahren wird vorausgesetzt, dass die Refraktion zu beiden Stationen (Referenzstation und Empfänger) gleich ist. Mit wachsender Entfernung zwischen den Stationen trifft dies immer weniger zu und die Genauigkeit der Positionsbestimmung nimmt ab. Es besteht zum einen die Möglichkeit, per GSM-Verbindung die Daten einer Referenzstation an Land abzurufen. Bei diesem Verfahren werden während der gesamten Messung die Referenzdaten über das Mobilfunknetz abgerufen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine eigene temporäre Referenzstation an Land aufzubauen. Dazu wird ein Punkt eingemessen, wobei die genauen Koordinaten wiederum mit Hilfe einer dauerhaften Referenzstation bestimmt werden. Im weiteren Verlauf der Messung sendet dann die temporäre Referenzstation die Referenzdaten zum Empfänger. Dadurch, dass zwischen Base und Rover bei diesem Verfahren in der Regel nur eine geringe Entfernung besteht, ergibt sich eine höhere Genauigkeit.

Während der Vermessung der Bathymetrie im Neufelder Watt wird das GPS System SR 530 (Zweifrequenz-Echtzeit-Empfänger) der Firma Leica verwendet. Eine feste Basisstation an Land liefert die notwendigen Korrekturdaten an den sich an Bord des Messbootes befindenden GPS-Empfänger. Mit dieser Technik wird eine absolute Genauigkeit der Messwerte bis zu 1 cm Genauigkeit in Lage und Höhe ermöglicht.

Der Kurs des Schiffes wird mit einem Kreiselkompass bestimmt. Neben der Schiffsführung ist der Kreiselkompass wichtig, um den Fächer des Fächerecholotes zu korrigieren.

Der Bewegungssensor erfasst Roll-, Pitch- und Heavebewegungen des Messbootes. Die Messungen des Fächerecholotes werden um diese Werte der Schiffsbewegung korrigiert.

An Bord des Messbootes wird der kombinierte Bewegungssensor und Kreiselkompass Octans III der Firma IXSEA verwendet.

Während der Vermessung im Neufelder Watt wird eine Referenzstation im Otterndorfer Sportboothafen aufgebaut. Ein entsprechender Messpunkt wurde eingemessen und seine Position in regelmäßigen Abständen kontrolliert. Die Richtantenne wird zum Untersuchungsgebiet hin ausgerichtet. Nach anfänglichen Problemen wurde eine Antenne mit höherer Sendeleistung verwendet, die ohne jegliche Störungen Referenzdaten über die Elbe sendet. Darüber hinaus ist es ohne weiteres möglich auch wesentlich weiter östlich auf Höhe des Leitdammes Hermannshof zu messen, ohne die Ausrichtung der Antenne zu verändern.

4 Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse erfolgt in Abhängigkeit vom Messverfahren bzw. von den Messgrößen in verschiedenen Formen, die im Folgenden beschrieben werden. Exemplarisch werden jeweils ein oder mehrere Beispiele erläutert. Alle weiteren Auswertungen der in **Phase 1** aufgezeichneten Daten sind im Anhang zu finden.

4.1 Auswertung historischer topografischer Karten des Mündungsgebietes der Elbe

Zur Untersuchung der morphologischen Veränderungen in der Elbmündung in großen Raum- und Zeitskalen liegen einige aktuelle sowie historische Wattgrundkarten und topografische Karten vor. Aus ihnen wurde zunächst ein rein visueller Vergleich der vorliegenden Karten erstellt, um etwa Verlagerungen von Rinnen und die Entstehung von Sänden zu erkennen. Durch Subtraktion der Höhendaten von Punkten gleicher räumlicher Lage wurden exemplarisch Höhendifferenzbilder erstellt, aus denen Erosions- oder Sedimentationstendenzen über den jeweiligen Vergleichszeitraum ersichtlich werden. Gerade bei Vorliegen vieler Karten geht der Überblick schnell verloren. Um alle vorliegenden Karten zu berücksichtigen und die Veränderungen zu quantifizieren, wurden die Höhenänderungen weiter analysiert. Es empfiehlt sich dabei, jeweils nur begrenzte Flächen zu betrachten, die morphologisch zu einer Einheit gehören (z.B. hohes Watt, Randwatt, Brandungswatt, Rinnensysteme). Des Weiteren ist zu beachten, dass nicht alle Aufnahmen das gesamte Gebiet der Elbmündung abdecken.

Zur Auswertung historischer topografischer Karten des Untersuchungsgebietes Neufelder Sand wurden Tiefenänderungspläne erstellt. Dazu wurden über die topografischen Karten sieben Quadrate mit jeweils einem Kilometer Seitenlänge gelegt, deren Eckpunkte beschrieben durch Gauß-Krüger-Koordinaten in Anhang zu finden sind.

Die Lage der Quadrate im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 4.1 erkennbar.

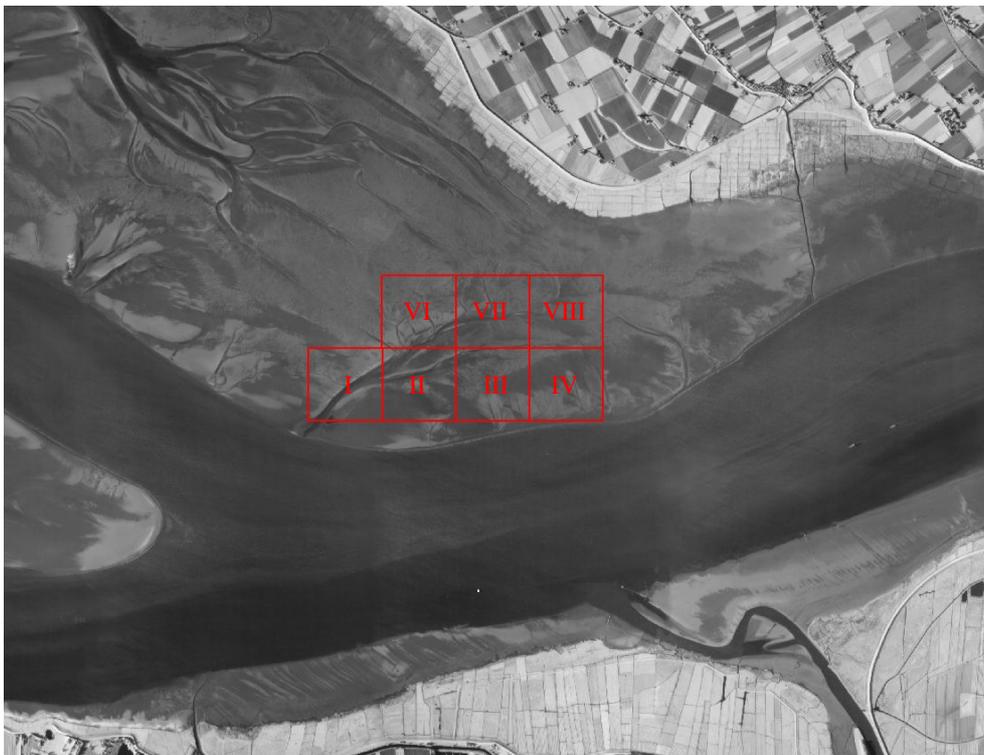


Abbildung 4.1: Übersicht über die Lage der untersuchten Quadrate

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

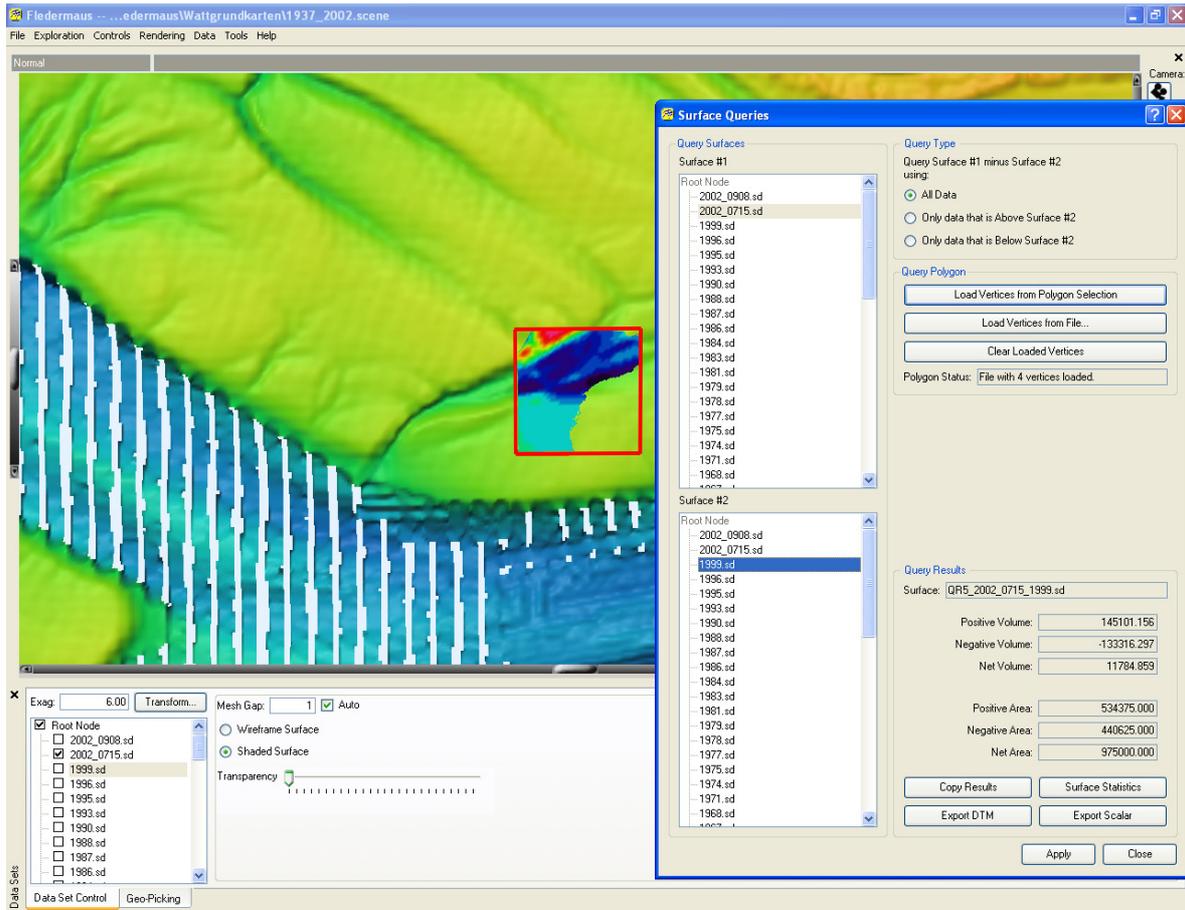


Abbildung 4.2: Erstellung von Volumenbilanzen und Auswertungen mit Hilfe des Programms Fledermaus

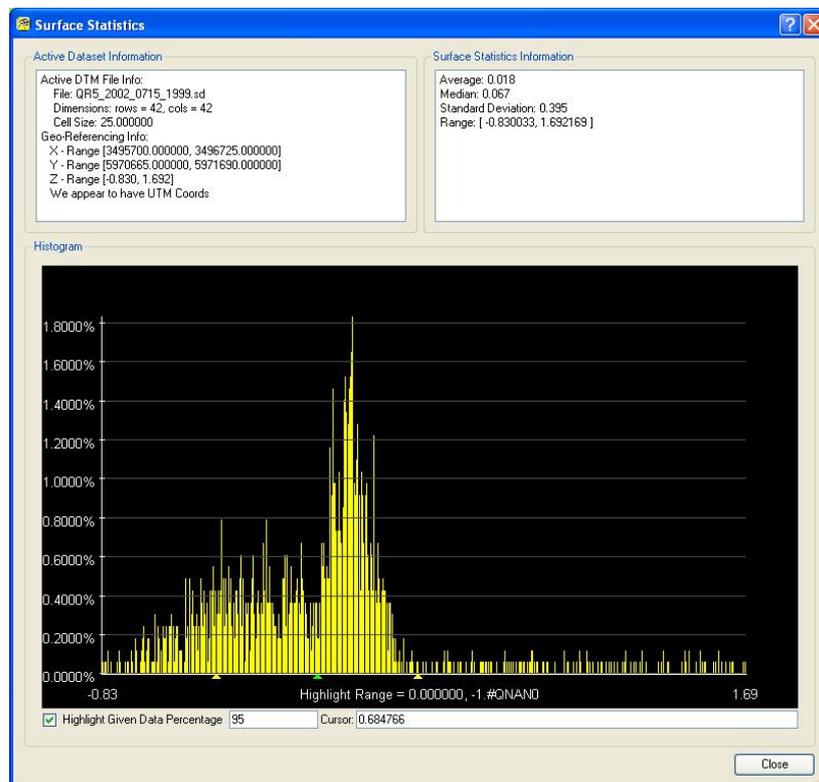


Abbildung 4.3: Statistik des erstellten Höhendifferenzenmodells

Die Quadrate wurde so auf dem heutigen Neufelder Sand positioniert, dass aus möglichst vielen Jahren Höhendaten im betrachteten Bereich vorhanden waren. Aus den vorliegenden Höheninformationen wurden Raster mit Zellen von 25 · 25 Meter Kantenlänge erstellt. Für jede dieser Zellen wurde ein mittlerer Tiefenwert berechnet. Durch einen Vergleich der Karten verschiedener Jahre konnte die Änderung der Tiefenwerte der einzelnen Zellen innerhalb des betrachteten Quadrates bestimmt werden. Mit Hilfe der Software „Fledermaus“ zur Auswertung digitaler Höhendaten, wurden die Gesamtmengen erodierten und sedimentierten Materials sowie die Flächen, auf denen Erosion bzw. Sedimentation stattfindet, berechnet (s. Abbildung 4.2). Die erstellten Höhendifferenzendarstellungen visualisieren das Ergebnis aller natürlichen Höhenänderungen, die während des Vergleichsraumes im betrachteten Gebiet aufgetreten sind. Zusätzliche können statistische Auswertungen der Höhendifferenzmodelle erstellt werden (Abbildung 4.3). Anhand einer Auswertung der Höhendifferenzen lassen sich zwei Kennwerte für die morphologische Aktivität des Gebietes ermitteln: die mittlere Höhenänderung als Differenzwert (Bilanzhöhe) und die mittlere Höhenänderung als Absolutwert (Umsatzhöhe) von Sedimentation und Erosion aller Zellen. Da allerdings die zwischenzeitlich abgelaufenen Umlagerungen nicht erfasst werden, liegt der tatsächliche Materialumsatz vermutlich deutlich über dem der Kartenauswertung. Das Ausmaß dieser Abweichungen nimmt mit der Länge des Vergleichszeitraumes zu.

Für die mittlere Bilanzhöhe

$$h_b = (V_{Sed.} + V_{Ero.}) / A_{Ges.} \quad \text{Gl.4.1}$$

gilt allgemein $0 \leq |h_b| \leq h_u$, wobei

$$h_u = (|V_{Sed.}| + |V_{Ero.}|) / A_{Ges.} \quad \text{Gl.4.2}$$

Im Rahmen des MORAN-Projektes (SIEFERT, 1983) wurde geprüft, ob die Änderung der topografischen Höhe h über die Zeit t für eine Fläche durch eine entsprechende mathematische Funktion

$$h = F(t)$$

formuliert werden können. Diese Formel muss folgende Voraussetzungen erfüllen (SIEFERT, 1983):

1. Für eine Fläche beginnt die Höhenänderung h im Ursprung und läuft mit der Zeit asymptotisch auf einen Höchstwert h_{\max} zu. Die maximalen Höhenunterschiede im Wattengebiet der inneren Deutschen Bucht liegen um 20 m. Die maximalen Höhenänderungen werden normalerweise weit darunter bleiben.
2. Der asymptotische Grenzwert wird, je nach Energiespektrum (Art und Beschaffenheit der Scherbeanspruchung) und nach Art und Beschaffenheit des Sedimentes (Scherfestigkeit), unterschiedlich groß sein.

3. Auch der Zeitraum a bis zum Erreichen des Wertes h_{\max} wird, je nach Energiespektrum, unterschiedlich groß sein. Je schneller h_{\max} erreicht ist, desto stärker überwiegen die kurzfristigen die langfristigen morphologischen Veränderungen, bzw. desto größer ist die morphologische Varianz.
4. Die mittlere Höhenänderung pro Jahr ist eine Funktion der Zeit, d.h. der Anzahl a Jahre des Vergleichszeitraumes. Je länger der Vergleichszeitraum wird, desto kleiner muss die darüber gemittelte jährliche Höhenänderung werden. Sonst wäre es auch unmöglich, zu einem asymptotischen Höchstwert h_{\max} zu gelangen.
5. Wenn eine Analyse von Daten aus unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt wird, müssen eventuelle Änderungen des Energiespektrums berücksichtigt werden.

Die Arbeiten im Rahmen des MORAN-Projektes (SIEFERT, 1987) haben gezeigt, dass die Umsatzhöhe h_u über den Vergleichszeitraum a als Sättigungsfunktion

$$h_u = h_{ua} \left(1 - e^{-a/a_0} \right) \quad \text{Gl.4.3}$$

bestimmt werden kann. Hierbei gibt a als einzige Variable einen Betrachtungszeitraum (den Zeitraum zwischen zwei topografischen Aufnahmen) an, nicht aber die fortlaufende Zeit. Die asymptotische Umsatzhöhe h_{ua} ist ein (theoretisch erst für sehr große a erreichbarer) mittlerer Höchstwert für h_u ; a_0 steht für den Zeitraum, in dem h_{ua} bei gleichmäßiger, linearer Veränderung der Topographie erreicht werden würde. Die Steigung im Ursprung beträgt h_{ua}/a_0 und entspricht somit der Umsatzrate.

Für die Quadrate im Wattkomplex Neufelder Sand wurde versucht, eine Sättigungskurve zu berechnen. Vom Quadrat II liegen beispielsweise 18 topografische Aufnahmen aus den Jahren 1954 bis 2004 vor. Es sind somit insgesamt 152 Kartenvergleiche mit einem Vergleichszeitraum von $a = 1$ Jahr (z.B. 1983/1984), $a = 2$ Jahre (z.B. 1977/1979) bis zu $a = 50$ Jahre (1954/2004) möglich. Es können also 152 Umsatzwerte, die jedes Mal den Mittelwert aus den Daten der Gesamtfläche des Quadrates darstellen, zur Auswertung herangezogen werden. Die 152 Umsatzwerte werden in einem Diagramm gegen den Vergleichszeitraum a aufgetragen. Durch die so entstandene Punktwolke wird versucht, die Funktion $h_u = f(a)$ zu berechnen. In Abbildung 4.4 ist zu sehen, dass kein asymptotischer Grenzwert erreicht wird und es somit auch nicht möglich ist, eine Funktion der oben beschriebenen Art zu bestimmen.

Es lässt sich nämlich nur dann eine Sättigungsfunktion errechnen, wenn die Bilanzhöhe h_b bei Zunahme des Vergleichszeitraumes a gegen Null geht oder sich auf ein bestimmtes Niveau einpendelt. Wenn h_b auch bei zunehmenden a (im Verhältnis zu h_u) wächst, deutet dies auf eine säkulare Hebung (während des Vergleichszeitraumes) hin, bzw. wird Voraussetzung 1 (s.o.) nicht mehr erfüllt. Bei der Darstellung der Bilanzhöhen über die Vergleichszeiträume (Abbildung 4.5) zeigt sich, dass lediglich bei fünf der 152 Kartenvergleiche für das gewählte Quadrat im Untersuchungsgebiet Neufelder Sand über alle Zellen gemittelt Erosion auftrat. In allen übrigen Fällen fand Sedimentation statt: Der Neufelder Sand wuchs im untersuchten Bereich über den Betrachtungszeitraum stetig in die Höhe und die Neufelder Rinne verlandete kontinuierlich. Dabei ergeben sich die größten Bilanzhöhen natürlich bei den größten Vergleichszeiträumen. Um nähere Informationen über die morphologische Änderungsrate des Gebietes zu erhalten, wurden die Bilanzhöhen gleichverteilt über die Dauer

des zugehörigen Vergleichszeitraumes berechnet (Abbildung 4.6) und dann wiederum gegenüber dem Vergleichszeitraum aufgetragen. Je größer dabei der Vergleichszeitraum, desto mehr pendelt sich die Änderung der Bilanzhöhe bei 0,14 m pro Jahr ein. Das bedeutet, dass langfristig in Anwachs der untersuchten Fläche im Neufelder Sand um 0,14 m pro stattfindet. Diese Änderungsrate hat zur Zeit nur eine schwach abnehmende Tendenz. Über kurze Vergleichszeiträume können auf der Untersuchungsfläche jedoch auch wesentlich größere oder kleinere (bzw. negative) Änderungsraten auftreten. Aus dieser Art der Darstellung können ebenfalls Vergleichszeiträume erkannt werden, in denen extreme Umlagerungen stattfanden (z.B. 1984/1983, 1979/1977).

Eine analoge Auswertung wurde ebenfalls für die übrigen 6 Quadrate durchgeführt. Die Ergebnisse, die detailliert in Anhang E zu finden sind, sind hier ähnlich. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse ist in Abbildung 4.7 die Seekarte des Jahres 1965 den betrachteten Quadraten hinterlegt. Weitere Darstellungen dieser Art sind im Anhang E zu finden. Man erkennt deutlich die Verlandung der Neufelder Rinne, die im Untersuchungsgebiet die gravierendste Änderung darstellt, und die Auflandung des Neufelder Sandes. Die Quadrate III und IV liegen komplett auf dem Neufelder Sand. Die Quadrate II und VI liegen zum größten Teil auf dem Neufelder Sand bzw. Neufelder Watt, sind aber auf einem Teilbereich durch die Veränderung der Rinne beeinflusst. Die Quadrate I, VII und VIII sind jeweils zu großen Teil durch die Veränderungen der Rinne gekennzeichnet. Die Quadrate III und IV weisen die geringsten Bilanzhöhen auf, auch die Bilanzraten liegen mit 0,02 m/a bis 0,05 m/a unter den Werten der anderer Quadrate. Konstante Bilanzraten werden schon bei relativ kleinen Betrachtungszeiträumen erreicht und es gibt mehr Vergleichszeiträume mit negativen Bilanzen. Die Quadrate II und VI weisen größere Bilanzhöhen auf. Auch die Bilanzraten sind größer und erreichen erst bei größeren Vergleichszeiträumen einen konstanten Wert. Die Quadrate I und besonders VII und VIII sind sehr stark durch die Veränderungen der Rinne beeinflusst. Es können sehr große Bilanzhöhen festgestellt werden. Konstante Bilanzraten werden erst bei großen Vergleichszeiträumen erreicht. Die Datenlücke im Quadrat VIII ist durch fehlende geeignete Höheninformation auf dem Gebiet dieses Quadrates in den 1960ern und 1970ern zu erklären. Insgesamt findet auf allen betrachteten Teilgebieten ein Höhenzuwachs statt. Besonders stark wird diese Entwicklung durch die Verlandung der Neufelder Rinne in den vergangenen Dekaden geprägt. Aber auch untersuchte Flächen des Neufelder Sandes unterliegen einem, wenn auch geringerem, Höhenzuwachs. Über kürzere oder längere Vergleichszeiträume werden dabei konstante Bilanzraten erreicht. Die beschriebenen Entwicklungen der untersuchten Gebiete sind immer vor dem Hintergrund des anthropogenen Eingriffs in Form des Baus des Leitdammes „Hermannshof“ zu sehen. Ohne den Bau hätte das Untersuchungsgebiet eine andere Entwicklung genommen. Die getroffenen Aussagen gelten nur für die untersuchten Gebiete. Eine Übertragbarkeit auf andere Wattflächen in der Elbmündung ist wegen der Sonderstellung des Untersuchungsgebietes nicht möglich. Schon Flächen, die nordwestlich der Neufelder Rinne auf dem Neufelder Watt liegen, dürften eine geringere Umsatzhöhe besitzen und über mittelfristige Vergleichszeiträume einen Grenzwert erreichen. Entsprechende Gebiete sind im weiteren Verlauf des Projektes zu untersuchen, wobei zunächst die Datenlage verbessert werden muss.

Unter der Voraussetzung, dass sich das Watt in der Deutschen Bucht mindestens seit etwa 1200 AD insgesamt in einem dynamischen Gleichgewicht befindet (HOFSTEDÉ, 1991), wird man bei genügend großem Vergleichszeitraum a immer einen Punkt finden, an dem sich ein neues dynamisches Gleichgewicht auf dem betrachteten Gebiet (begrenzten Ausmaßes) einstellt.

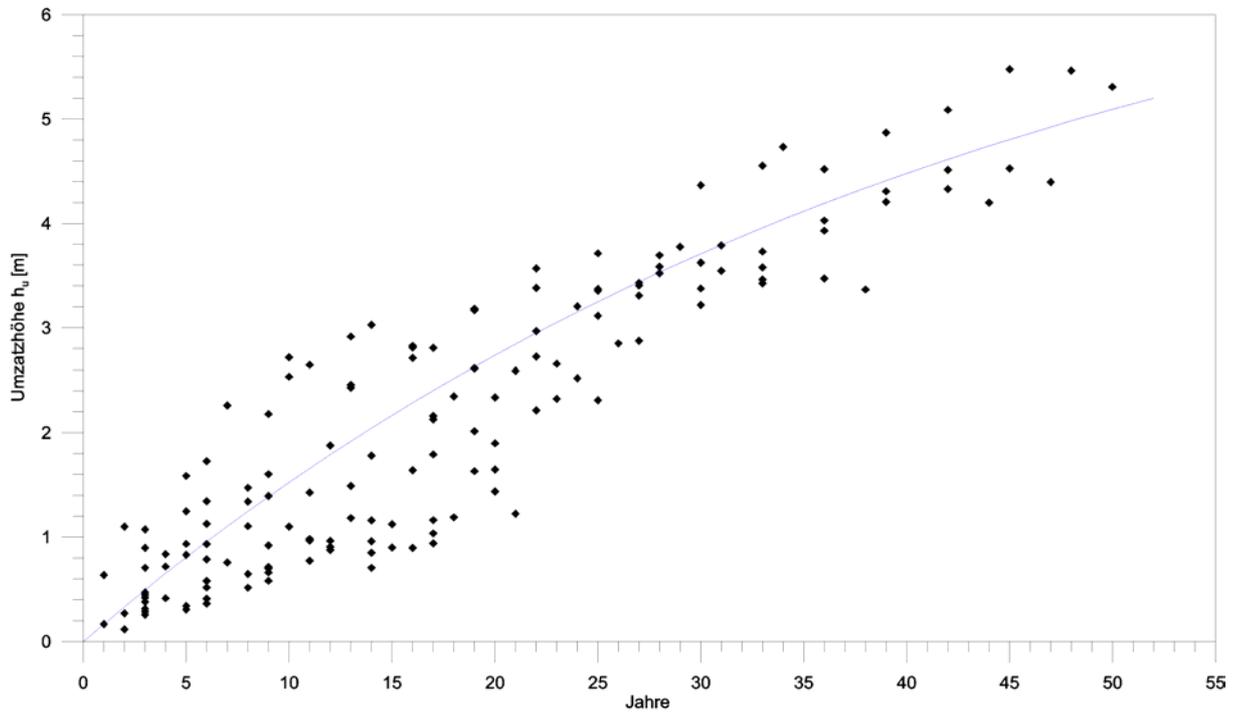


Abbildung 4.4: Funktion $h_u = f(a)$, ohne erkennbaren Grenzwert

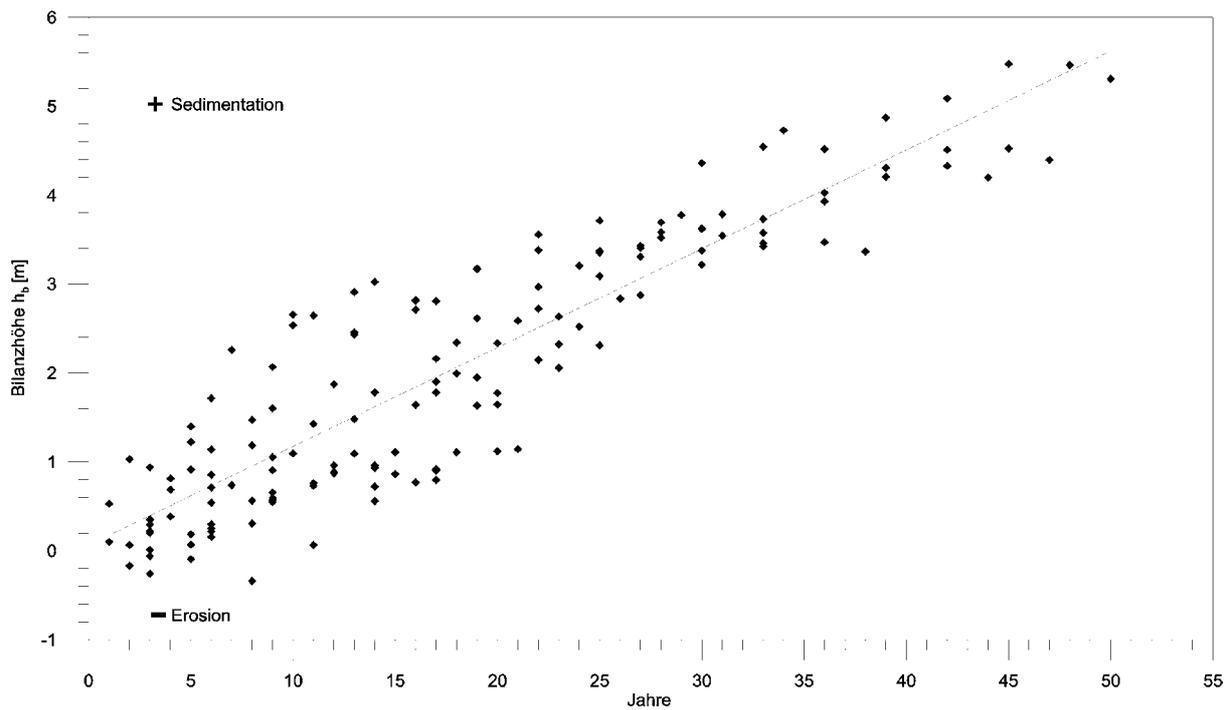


Abbildung 4.5: Bilanzhöhen über die Vergleichszeiträume

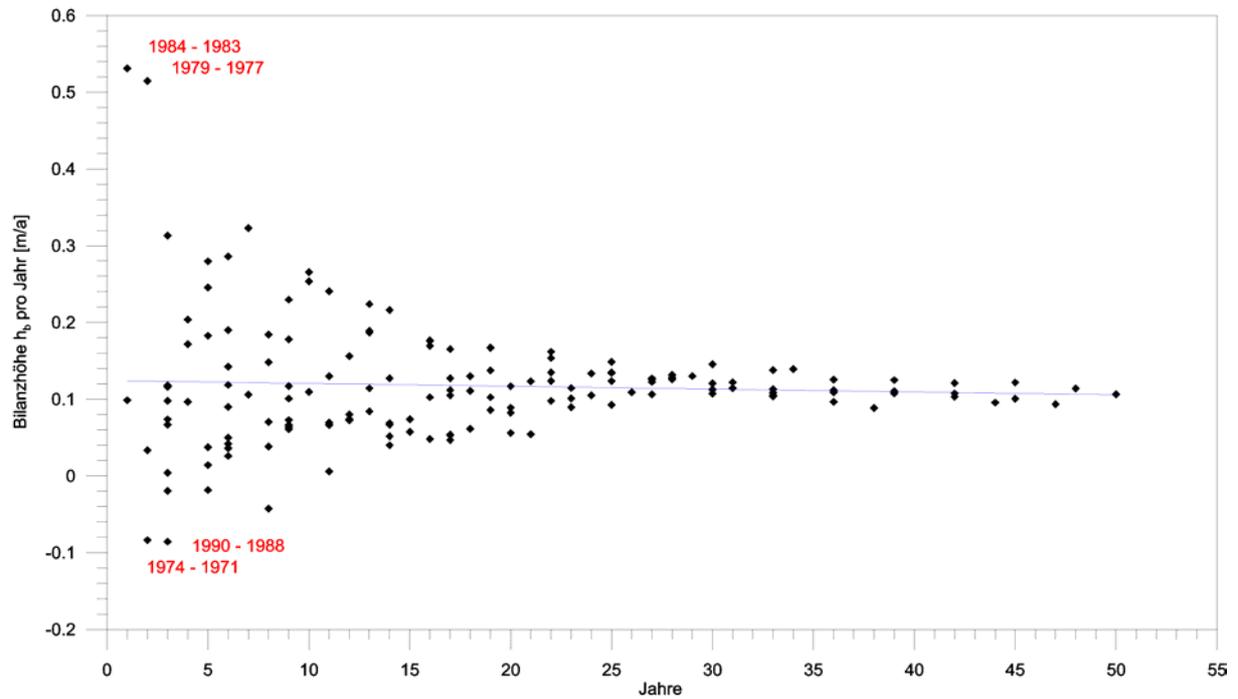


Abbildung 4.6: Bilanzhöhen gleichverteilt über die Dauer des zugehörigen Vergleichszeitraumes

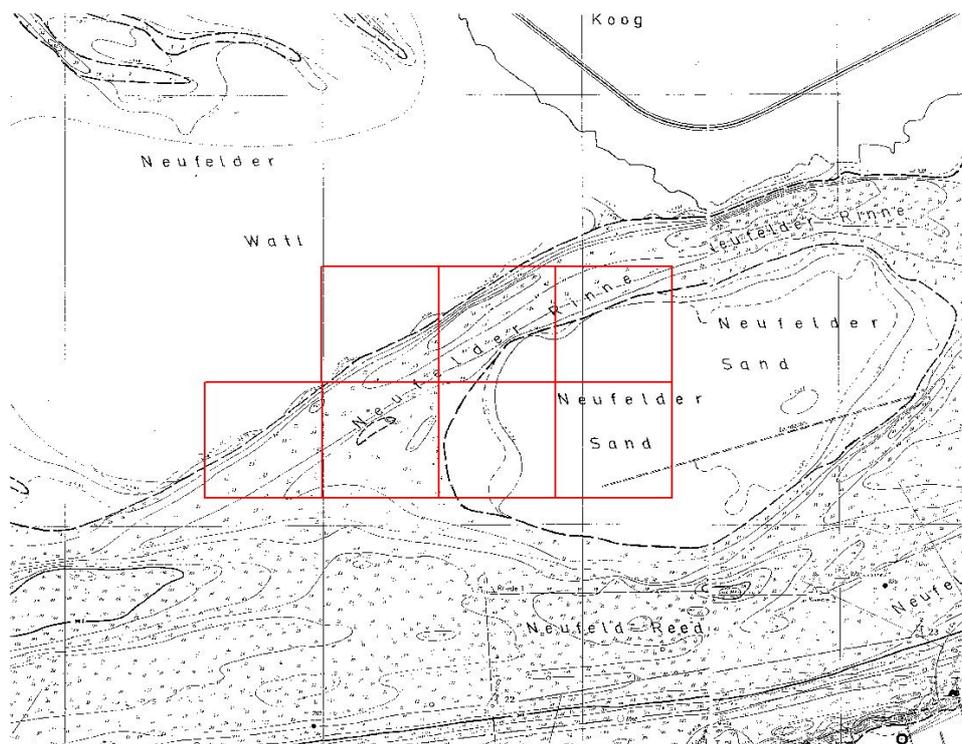


Abbildung 4.7: Seekarte von 1965

4.2 Auswertung der Fächerecholotvermessungen

Nach der Bereinigung der Messdaten der Fächerecholotvermessungen können diese durch Abbildungen der digitalen Geländemodelle entweder 3-dimensional oder 2-dimensional farbcodiert dargestellt werden. Dazu wird die Software „Fledermaus“ verwendet, die für die Darstellung und Auswertung digitaler Geländemodelle optimiert ist und auch große Datenmengen schnell bearbeiten kann. In Abbildung 4.8 ist ein Screenshot des Programms nach Erstellung eines Geländemodells zu sehen. Durch das Modell können Profile gelegt werden, deren Lage und Höhendaten exportiert werden können.

In den Abbildungen 4.9 und 4.10 ist jeweils eine 3-dimensionale Darstellung der Fächerecholotvermessung vom 17. August und vom 9. Oktober zu sehen. In der Darstellung blickt man von der Einfahrt der Neufelder Rinne entlang ihrer Achse. Im Programm können beide Modelle gleichzeitig geöffnet sein, so dass man einen räumlichen Eindruck der Umlagerungen erhalten kann. Auffällig ist das Ebbdelta unmittelbar an der Einfahrt sowie eine Barre, bevor sich die Rinne vertieft. Beide Darstellungen bilden in etwa die gleiche Perspektive ab, so dass man die Verlagerungen schon erahnen kann. Um diese Effekte aber besser erfassen zu können, eignen sich Profile verschiedener Messungen besser.

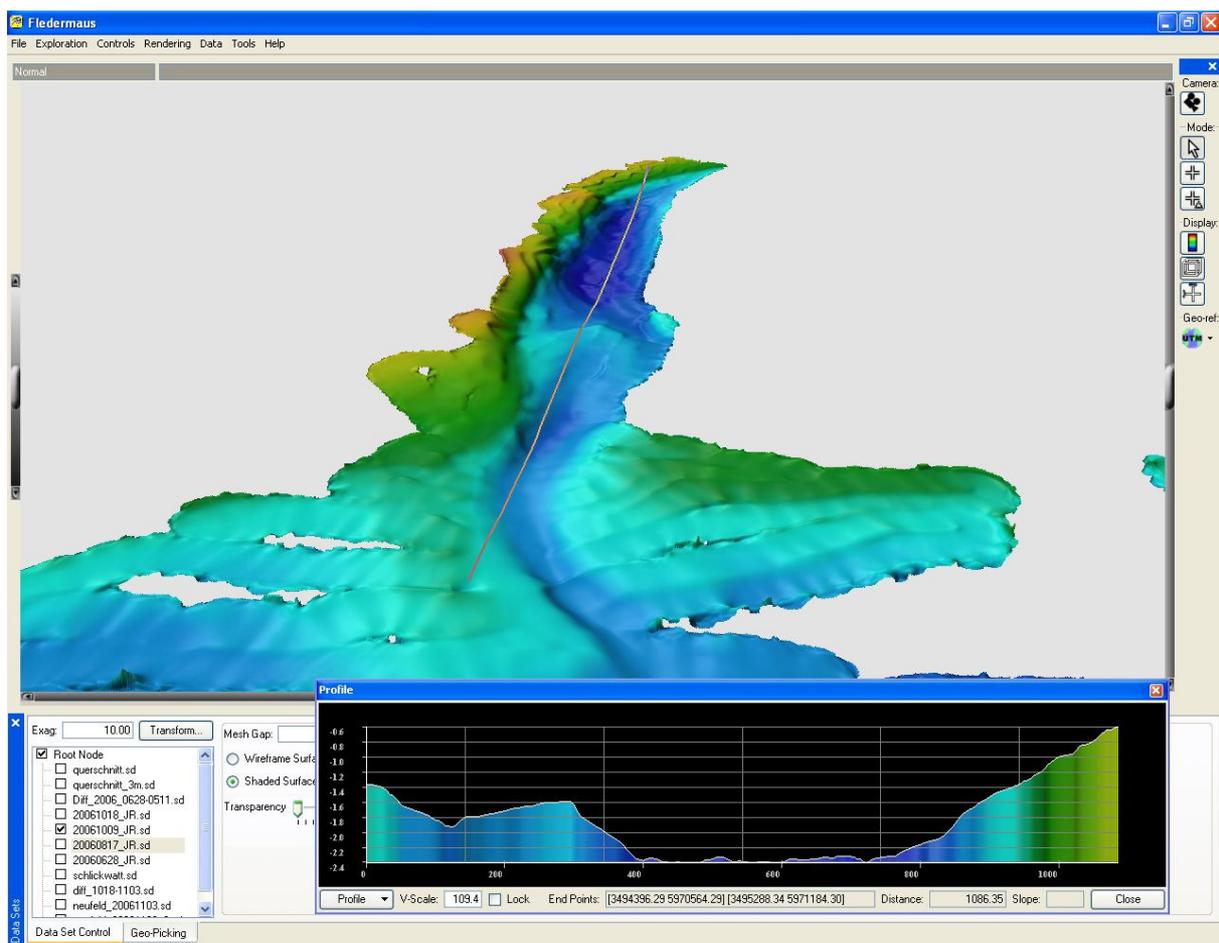


Abbildung 4.8: Screenshot des Programms Fledermaus zur Erstellung von digitalen Geländemodellen und Profilen

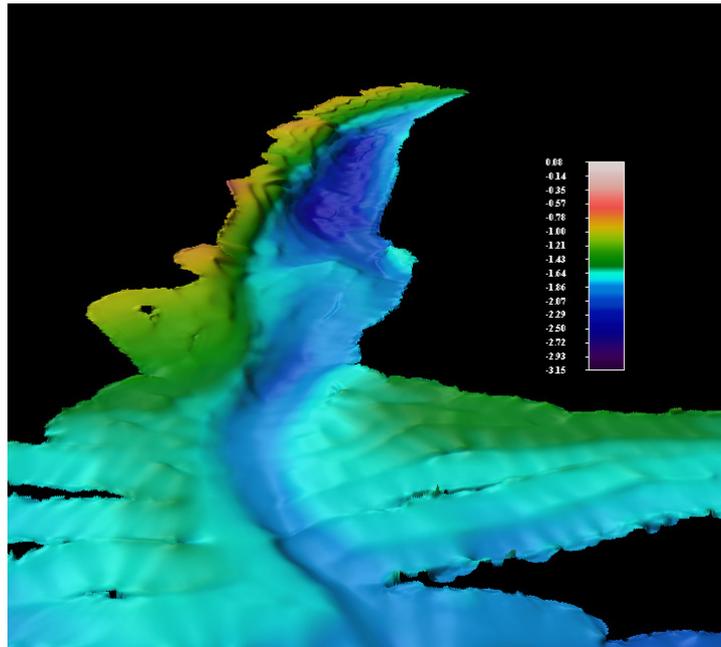


Abbildung 4.9: 3-dimensionalen Darstellung des digitalen Geländemodells der Fächerecholotvermessung vom 9. Oktober 2006. Höhenangaben in m NN.

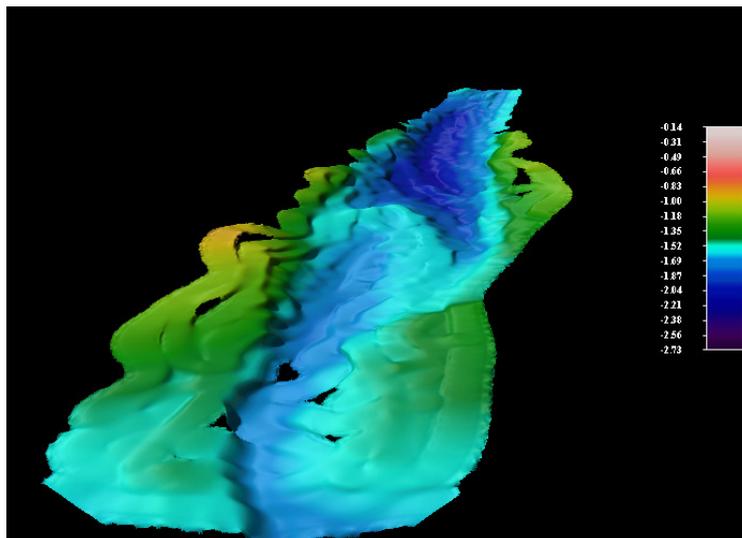


Abbildung 4.10: 3-dimensionalen Darstellung des digitalen Geländemodells der Fächerecholotvermessung vom 17. August 2006. Höhenangaben in m NN.

Anhand von Quer- und Längsprofilen zu verschiedenen Zeitpunkten können die vertikale und horizontale Verschiebung der Neufelder Rinne verdeutlicht werden. Abbildung 4.11 zeigt die Lage der drei im Folgenden betrachteten Profile. Hinterlegt ist in dieser Darstellung das Luftbild aus dem Jahr 2004, um zusätzlich die Verlagerung speziell der Einfahrt der Rinne zu zeigen. In Abbildung 4.12 sind verschiedene Querprofile an der Mündung der Neufelder Rinne dargestellt. Es ist eine ostwärts gerichtete Verschiebung der Prielachse zu beobachten. Das Luftbild aus dem Jahr 2004 zeigt, dass zu diesem Zeitpunkt die Einfahrt noch weiter östlich lag. Mit der Zeit wurde die Einfahrt zunehmend flacher. Die Sturmflut vom 1. November brachte keinen außergewöhnlichen Umlagerungen.

Das in Abbildung 4.13 dargestellte zweite Querprofil befindet sich in einem hinteren Abschnitt der Neufelder Rinne, in dem sich die tiefste Stelle befindet. Hier ist die Rin-

ne relativ lagestabil. Insbesondere die Achse verschiebt sich nur in sehr geringem Maße. Auffällig ist die starke Auflandung an der nord-westlichen Böschung (links in der Abbildung). Hier erhöhten sich die Höhen zwischen dem 17. August und dem 9. Oktober um etwa 0,7 m. Dieses kann durch Beobachtungen während der Messeinsätze bestätigt werden. Am süd-östlichen Prielufer fanden leichte Erosionen statt. Auch in diesem Querschnitt kann kein außergewöhnlicher Einfluss des Extremereignisses vom 1. November festgestellt werden. Insgesamt ist die Materialbilanz an dieser Stelle ausgeglichen.

In Abbildung 4.14 ist ein Längsschnitt der Rinne von der Einfahrt (links in der Abbildung) bis über den Messquerschnitt hinaus gezeigt. An der Einfahrt zeigt sich eine sehr starke Sedimentation, die auf die Verlagerung der Rinnenachse zurückzuführen ist. Im Verlaufe des Längsprofils werden die bathymetrischen Veränderungen immer geringer. Lediglich in etwa in Höhe des zweiten Querprofils ist nach dem 28. Juni eine Vertiefung zu erkennen, die auch in Abbildung 4.13 festzustellen ist. Im hinteren Bereich sind die Veränderungen sehr gering. Ein Einfluss der Sturmflut vom 1. November ist nicht zu sehen.

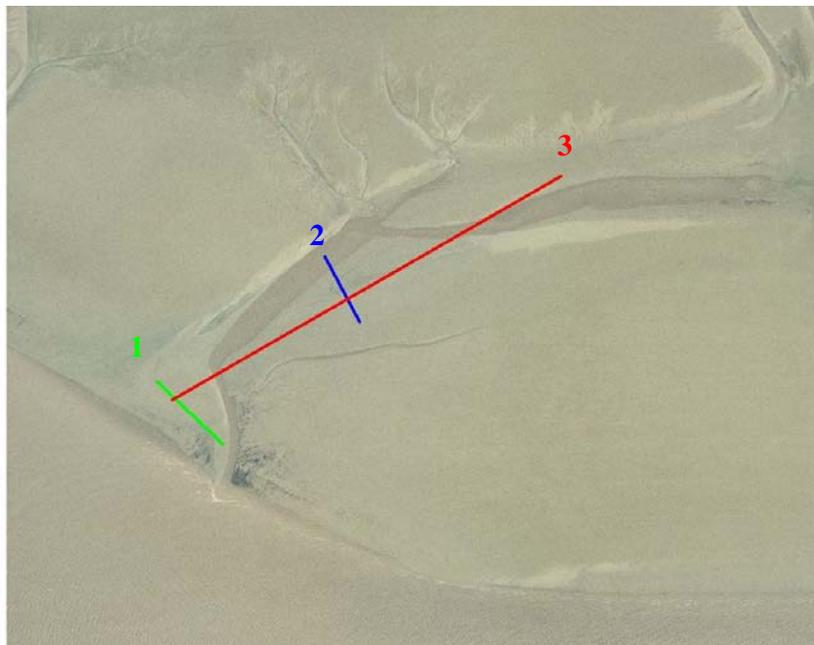


Abbildung 4.11: Lage der Profile im Untersuchungsgebiet

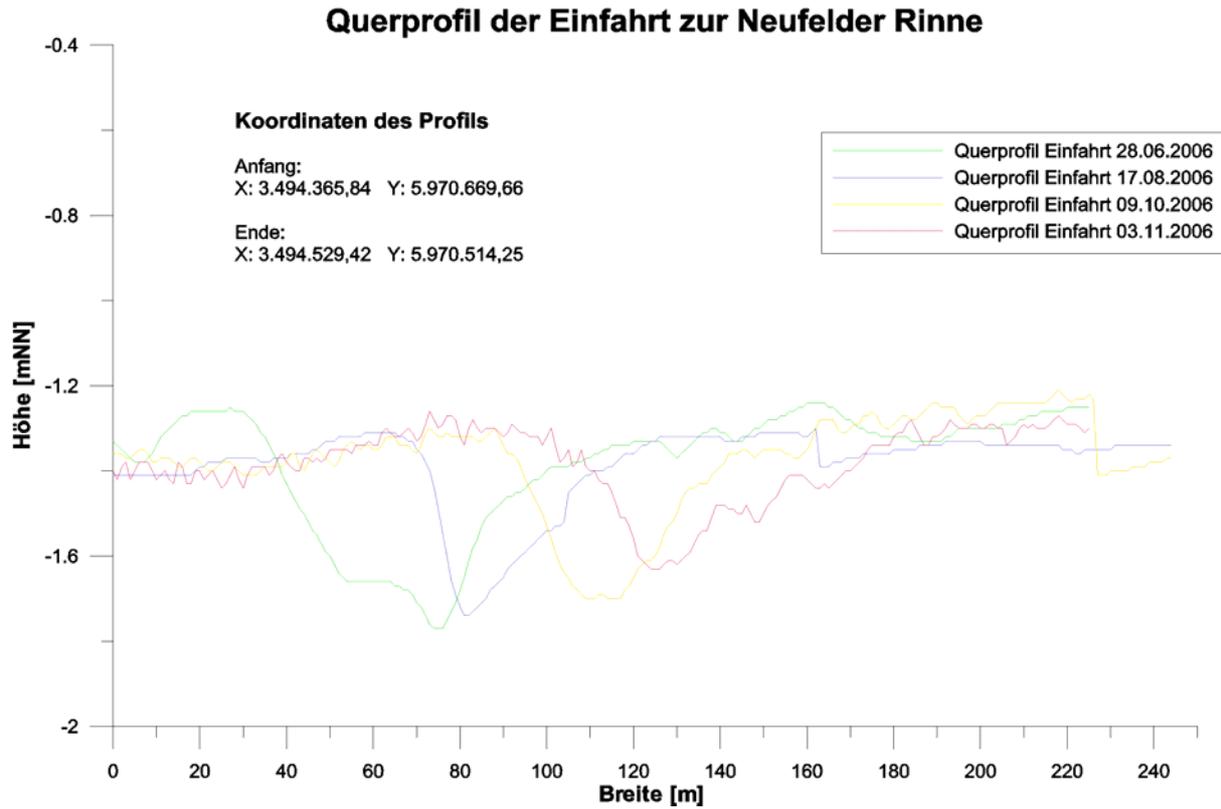


Abbildung 4.12: Querprofile in der Einfahrt zur Neufelder Rinne zu verschiedenen Zeitpunkten

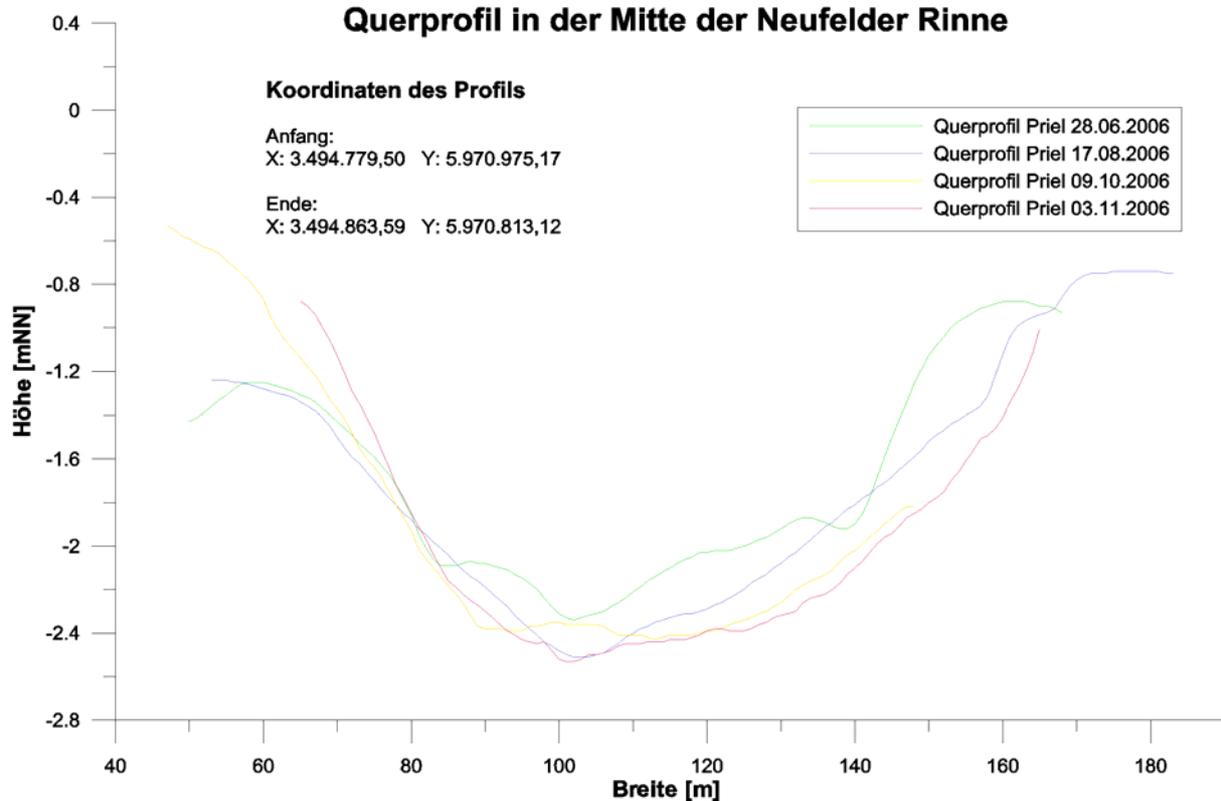


Abbildung 4.13: Querprofile in der Mitte der Neufelder Rinne zu verschiedenen Zeitpunkten

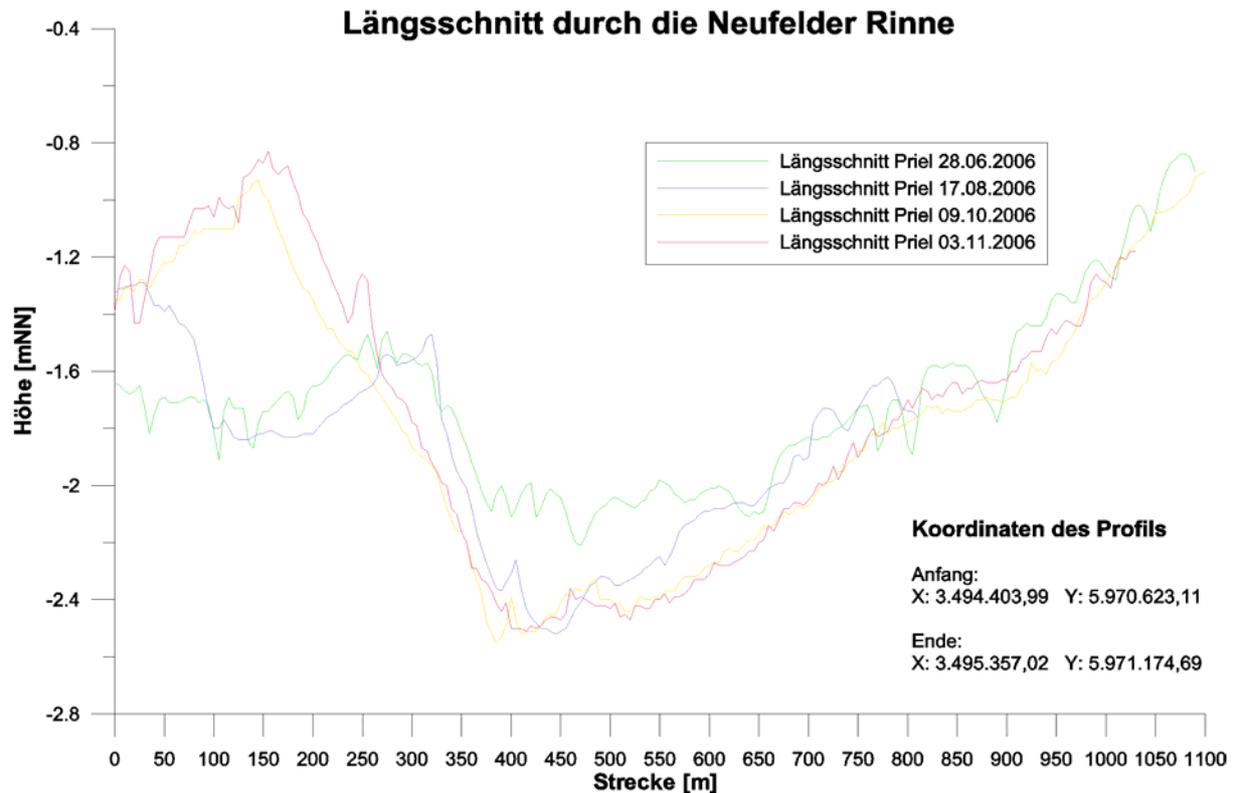


Abbildung 4.14: Längsprofil der Neufelder Rinne zu verschiedenen Zeitpunkten

Ein Vergleich verschiedener Messzeitpunkte kann zudem in der Form von Höhendifferenzendarstellungen erfolgen, in denen Erosion rot und Deposition grün abgebildet sind. Zudem können statistische Parameter von Messungen bzw. Höhendifferenzen dargestellt werden. In Abbildung 4.15 ist die Höhendifferenzendarstellung der Fächerecholotvermessungen vom 9. Oktober 2006 und dem 17. August 2006 zu sehen. Die Blickrichtung ist von der Einfahrt der Rinne entlag ihrer Achse. Deutlich erkennbar ist die Verlagerung der Einfahrt der Rinne, die durch stärkere Sedimentation im westlichen Bereich sowie durch Erosion östlich davon bemerkbar macht. Im hinteren Bereich sind im Betrachtungszeitraum eher erosive Tendenzen zu erkennen, die auch in den Profilen auszumachen sind. Abbildung 4.16 zeigt die Höhendifferenzendarstellung der Fächerecholotvermessungen vom 3. November 2006 und dem 18. Oktober 2006. Die Vermessung der Bathymetrie am 3. November beschränkte sich auf den hinteren Bereich der Rinne. Hier fand durchweg eine schwache Sedimentation statt.

In Abbildung 4.17 ist die Statistik der Höhenverteilung des Höhendifferenzenmodells im Betrachtungszeitraum von August bis Oktober zu sehen und ist somit im Zusammenhang mit Abbildung 4.15 zu betrachten. Die Verteilung der Höhenänderungen zeigt, dass ein Großteil der Änderungen in einem engen Bereich um Null herum liegt.

Aus allen erstellten Höhendifferenzendarstellungen und den entsprechenden Auswertungen ist abzulesen, dass die Materialbilanz trotz örtlich begrenzter Verlagerungen insgesamt ausgeglichen ist. Dies gilt für die untersuchte Fläche im räumlichen Verlauf der Neufelder Rinne und für den untersuchten Zeitraum von Juni bis November. Um diese Ergebnisse in die Entwicklung der Neufelder Rinne einordnen zu können und einen längerfristigen Trend der Entwicklung der Rinne aus den Fächerecholotmessungen ablesen zu können, müssen die Untersuchungen fortgesetzt und län-

gere Zeiträume betrachtet werden. Da die Entwicklung der Neufelder Rinne auf kurzen Zeitskalen durchaus vom allgemeinen Trend der Verlandung abweichen kann, stehen diese Ergebnisse nicht im Gegensatz zu der unter 4.1 beschriebenen Entwicklung. Ob es sich bei den von Juni bis November erhaltenen Resultaten um saisonale Effekte handelt, kann erst nach der Auswertung der nächsten Messphase angedeutet werden.

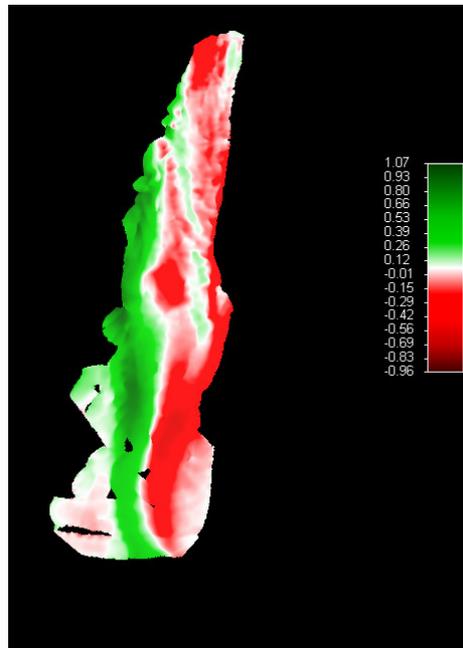


Abbildung 4.15: Höhendifferenzendarstellung der Fächerecholotvermessungen vom 9. Oktober 2006 und vom 17. August 2006. Verlauf in der Längsachse der Neufelder Rinne. Angaben in m.

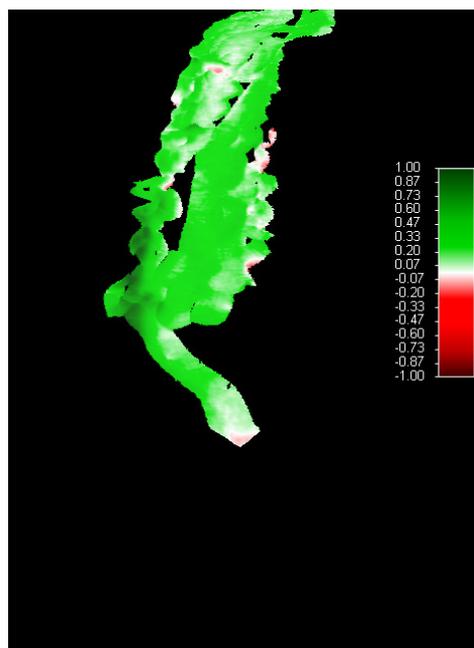


Abbildung 4.16: Höhendifferenzendarstellung der Fächerecholotvermessungen vom 3. November 2006 und dem 18. Oktober 2006. Verlauf in der Längsachse der Neufelder Rinne. Angaben in m.

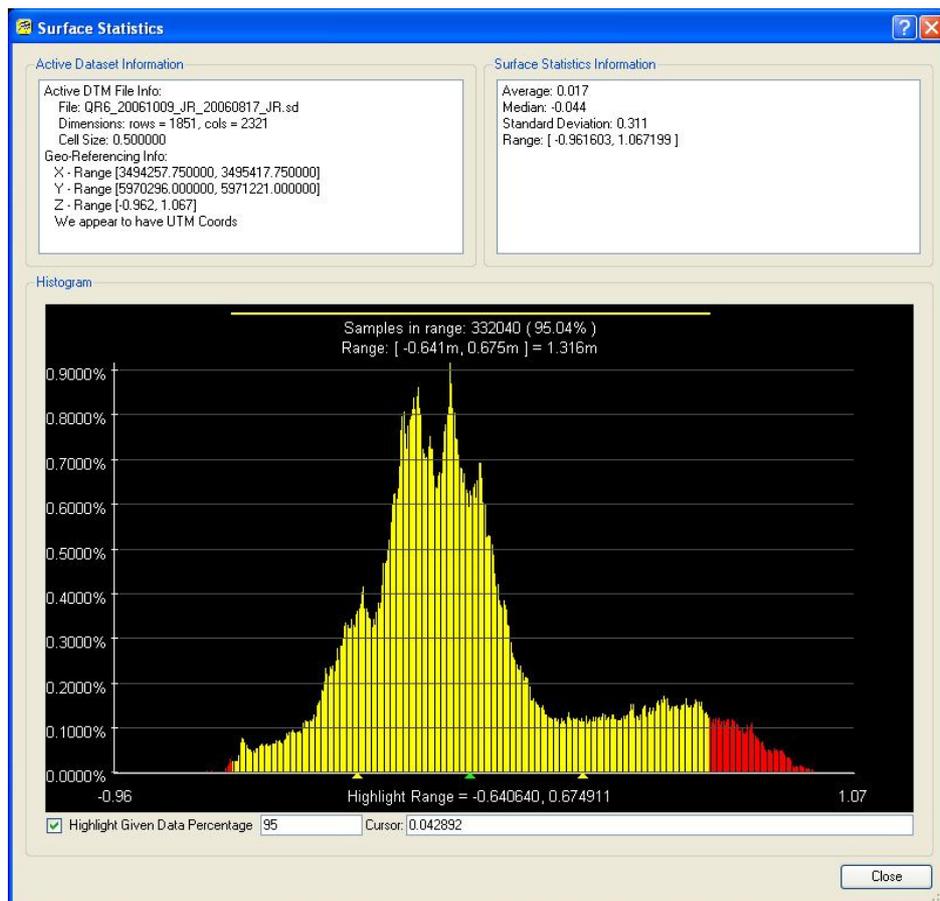


Abbildung 4.17: Statistik der Höhenverteilung des Höhendifferenzenmodells im Betrachtungszeitraum von August bis Oktober.

4.3 Auswertung der Bodenproben

Am 20. April 2006 wurde die erste Bodenprobe im Untersuchungsgebiet genommen und von einem Mitarbeiter des Instituts für Wasserbau ausgewertet. Die Auswertung erfolgte mit Unterstützung des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Die zugehörige Korngrößenverteilung ist in Abbildung 4.18 dargestellt. Die Entnahme erfolgte auf dem Neufelder Sand am südlichen Ende des Messquerschnittes. Eine genaue Verortung sowie Kartierung dieser und weiterer entnommener Proben ist in der Anlage C zu finden.

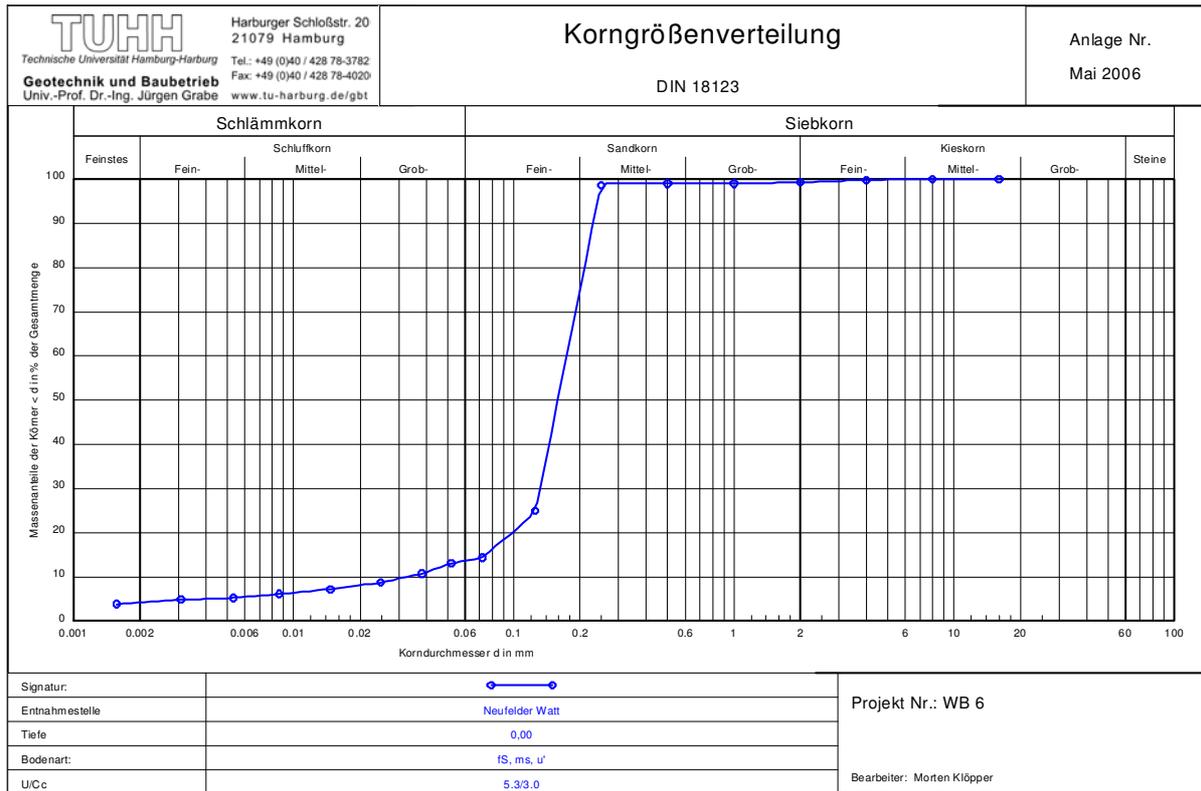


Abbildung 4.18: Korngrößenverteilung einer Bodenprobe aus dem Untersuchungsgebiet

Es handelt sich um einen Feinsand mit geringen Mittelsand- und Schluffanteilen. Die einzelnen Anteile und Siebdurchgänge sowie die Ergebnisse der Schlämmanalyse können der Anlage C entnommen werden. Es folgten weitere Probenahmen, die die Ergebnisse der ersten Probe bestätigten und deren Ergebnisse ebenfalls der Anlage zu entnehmen sind. Das anstehende Material am südlichen Prielrand sowie in der Neufelder Rinne, weist dabei sehr ähnliche Eigenschaften auf.

4.4 Auswertung der stationären Messgeräte

4.4.1 Strömungsmessungen

Nach dem Auslesen der Geräte konnten die Binärdaten mit der von RDI mitgelieferten Software „WinADCP“ betrachtet und einer ersten Kontrolle unterzogen werden. Die Geräte sendeten bei der Messung immer die Energie in die Wassersäule, die erforderlich ist, Messungen bis zum maximalen Wasserstand durchzuführen. Die tidebedingten Schwankungen des Wasserstandes werden dabei nicht berücksichtigt und es werden Messwerte bis zu einem konstanten Wasserstand erzeugt, der über dem tatsächlichen Wasserstand liegt. Um die Messungen herauszufiltern, die durch Reflexion an der Wasseroberfläche entstehen, bietet die Software einen Filter an, der die Intensität des empfangenen Signals analysiert. Ausgehend vom Sendekopf des Gerätes tritt dabei ein Sprung in der Intensität auf, wenn das Signal auf die Wasseroberfläche trifft. An dieser Stelle wird das Profil dann abgeschnitten. Probleme treten bei dieser Methode auf, wenn der Wasserstand stark schwankt und dabei auch sehr geringe Werte erreicht. Es muss in einem solchen Fall, der im Untersuchungsgebiet vorliegt, genügend Energie in die einzelnen Beams gesteckt werden, um auch bei hohen Wasserständen die gesamte Wassersäule zu erfassen, was bei geringen

Wasserständen allerdings zu einer zu hohen Energie der Beams führt. Gerade bei sehr geringen Wasserständen wird das Signal dann von der Wasseroberfläche bzw. der Sohle mehrfach hin und her reflektiert und der Filter der Software erkennt den richtigen Sprung in der Intensität nicht mehr. Dieses Problem ist in der Abbildung 4.19 dargestellt und muss in der weiteren Bearbeitung der Daten berücksichtigt werden.

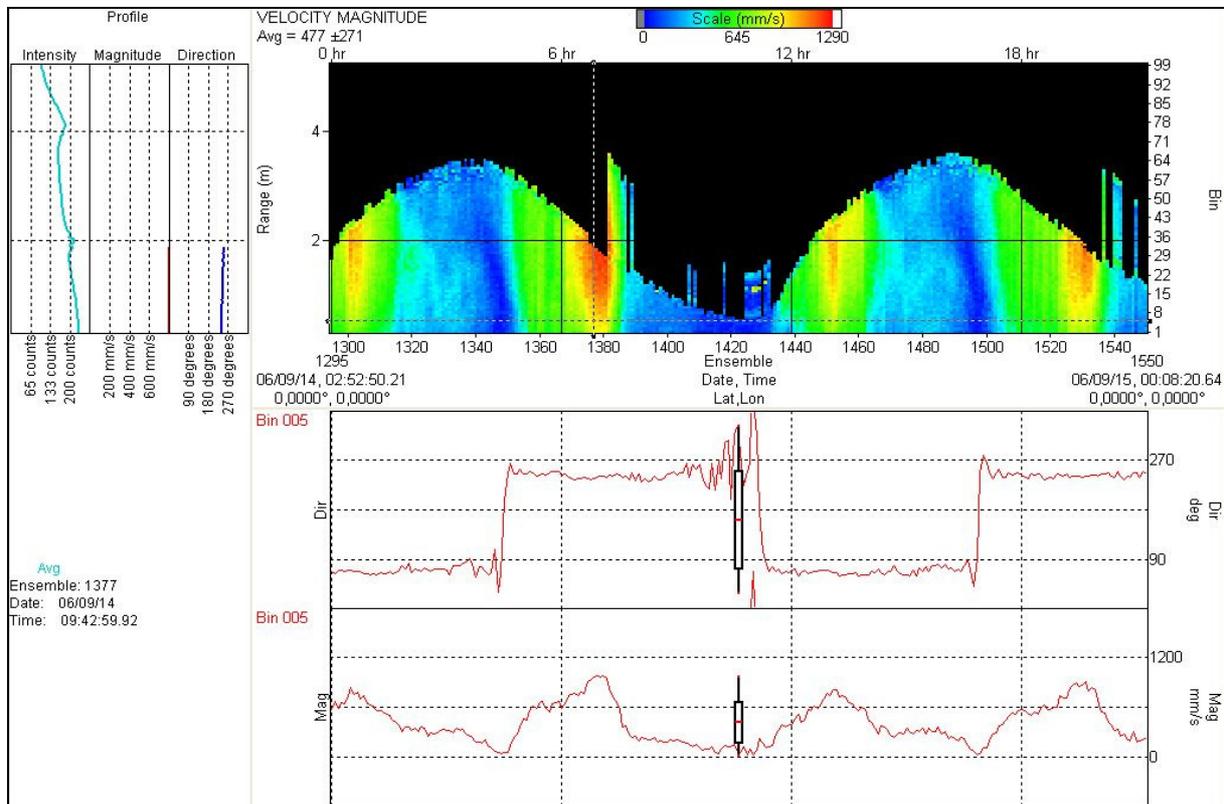


Abbildung 4.19: Screenshot der Software WinADCP

Die gefilterten Binärdaten wurden aus WinADCP als ASCII-Datei exportiert. Dabei wurden immer Zeiträume von einem Tag gewählt, die dann einzeln weiter untersucht wurden. Die Daten wurden in Excel importiert. Da die Höhenlage des ADCP-Gerätes und damit jeder einzelnen erzeugten Zelle bekannt waren, konnte eine Abhängigkeit zum Wasserstand hergestellt werden (Abbildung 4.20). Alle Messwerte, die oberhalb des tatsächlichen Wasserstandes lagen, wurden als falscher Wert markiert und fielen aus der weiteren Berechnung heraus. Für dieses Vorgehen wurde ein Makro in „MS Excel“ erstellt, das diesen Auswerteschritt vereinfachte. Die graphische Darstellung der Daten erfolgte mit Hilfe des Programms „Grapher“, das auf die bearbeiteten Excel-Dateien zurückgreift.

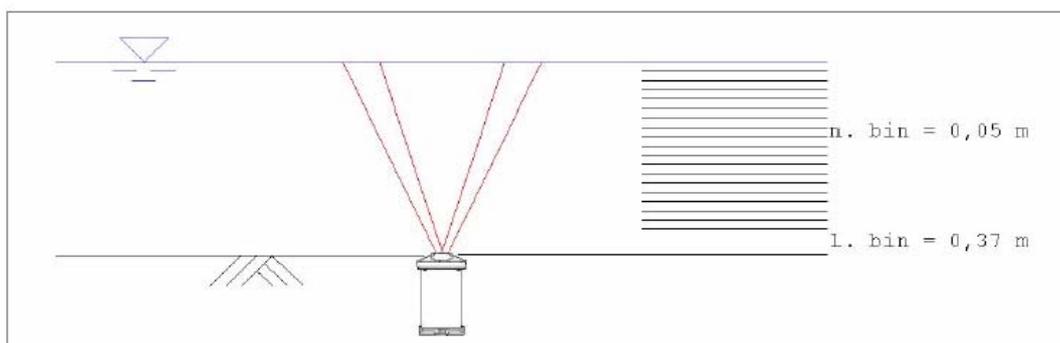


Abbildung 4.20: Einbau des ADCP

Das erstellte und verwendete Makro schreibt zunächst die Strömungsgeschwindigkeiten und die Pegeldaten im Datenblatt *Strömung_v Übersicht* zusammen und kann durch Vergleich dieser Daten die Strömungsdaten aussortieren, welche durch eine zu hohe Intensität der Schallwellen eine zu hohe Wassertiefe vortäuschen. Diese Daten werden mit **FALSCH** gekennzeichnet, die anderen werden gelb unterlegt. Dadurch lässt sich die Veränderung des Wasserstandes durch die Tide verfolgen, und es ist erkennbar, welche Daten für eine Auswertung der Strömung betrachtet werden müssen. In Abbildung 4.21 sind die zusammengefassten Daten zu erkennen. Ein Überblick über den variierenden Wasserstand kann durch Verkleinerung der Darstellung auf dem Bildschirm (siehe Abbildung 4.22) erreicht werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Ens	YR	MO	DA	HH	MM	SS	HH	n	d [m]	1	2	3	4	5	
2																
3	109	6	7	6	0	0	32	29	1	2,0996	599	596	517	595	609	601
4	110	6	7	6	0	5	32	59	2	2,0143	644	669	659	607	626	627
5	111	6	7	6	0	10	32	97	3	1,9656	672	679	636	746	745	746
6	112	6	7	6	0	15	33	11	4	1,9208	661	704	746	733	757	746
7	113	6	7	6	0	20	33	32	5	1,8495	724	707	749	740	734	762
8	114	6	7	6	0	25	33	60	6	1,8183	666	674	685	746	771	781
9	115	6	7	6	0	30	33	92	7	1,7923	662	699	711	729	717	736
10	116	6	7	6	0	35	34	26	8	1,7189	670	714	771	761	818	791
11	117	6	7	6	0	40	34	59	9	1,7021	613	800	800	803	715	791
12	118	6	7	6	0	45	34	89	10	1,6627	698	516	608	559	614	616
13	119	6	7	6	0	50	35	21	11	1,6994	660	553	668	631	630	627
14	120	6	7	6	0	55	35	56	12	1,5717	517	496	536	515	547	546
15	121	6	7	6	1	0	36	94	13	1,5222	484	484	613	510	629	694
16	122	6	7	6	1	5	36	25	14	1,4712	400	395	465	424	451	461
17	123	6	7	6	1	10	36	52	15	1,4216	410	432	490	473	457	497
18	124	6	7	6	1	15	36	82	16	1,3951	520	370	366	406	399	391
19	125	6	7	6	1	20	37	6	17	1,3535	319	362	332	335	367	375
20	126	6	7	6	1	25	37	29	18	1,3192	212	299	239	239	321	227
21	127	6	7	6	1	30	37	64	19	1,2734	277	234	267	219	321	221
22	128	6	7	6	1	35	37	91	20	1,2337	368	425	362	397	333	326
23	129	6	7	6	1	40	38	16	21	1,1966	281	245	273	319	280	291
24	130	6	7	6	1	45	38	47	22	1,1717	291	295	263	311	310	346
25	131	6	7	6	1	50	38	81	23	1,12	266	272	266	329	324	331
26	132	6	7	6	1	55	39	14	24	1,093	291	230	302	265	312	281
27	133	6	7	6	2	0	39	45	25	1,05	237	244	232	279	269	291
28	134	6	7	6	2	5	39	76	26	1,0186	247	251	267	288	302	267
29	135	6	7	6	2	10	40	9	27	0,979	254	335	279	269	317	291
30	136	6	7	6	2	15	40	38	28	0,942	200	249	232	230	265	271
31	137	6	7	6	2	20	40	69	29	0,9153	205	236	237	256	222	257
32	138	6	7	6	2	25	40	99	30	0,8722	229	240	242	292	304	336
33	139	6	7	6	2	30	41	32	31	0,8884	212	262	254	268	266	311
34	140	6	7	6	2	35	41	64	32	0,8372	232	266	254	241	280	221
35	141	6	7	6	2	40	41	98	33	0,7991	238	179	238	234	236	231
36	142	6	7	6	2	45	42	29	34	0,7591	262	249	240	265	227	267
37	143	6	7	6	2	50	42	53	35	0,7453	192	168	233	219	204	271
38	144	6	7	6	2	55	42	85	36	0,7332	109	206	204	239	162	181
39	145	6	7	6	3	0	43	10	37	0,6909	209	228	204	267	274	166
40	146	6	7	6	3	5	43	46	38	0,6598	219	168	201	175	219	110
41	147	6	7	6	3	10	43	90	39	0,6425	157	165	181	91	78	111
42	148	6	7	6	3	15	44	13	40	0,6175	135	120	107	118	104	FALSCH
43	149	6	7	6	3	20	44	40	41	0,6073	176	202	61	177	60	FALSCH
44	150	6	7	6	3	25	44	78	42	0,5958	174	163	107	208	119	FALSCH
45	151	6	7	6	3	30	45	4	43	0,5958	170	130	166	80	52	FALSCH
46	152	6	7	6	3	35	45	31	44	0,5495	199	207	105	117	FALSCH	FALSCH
47	153	6	7	6	3	40	45	54	45	0,5364	67	159	115	FALSCH	FALSCH	FALSCH

Abbildung 4.21: *Strömung_v Übersicht* (ohne Zoom)

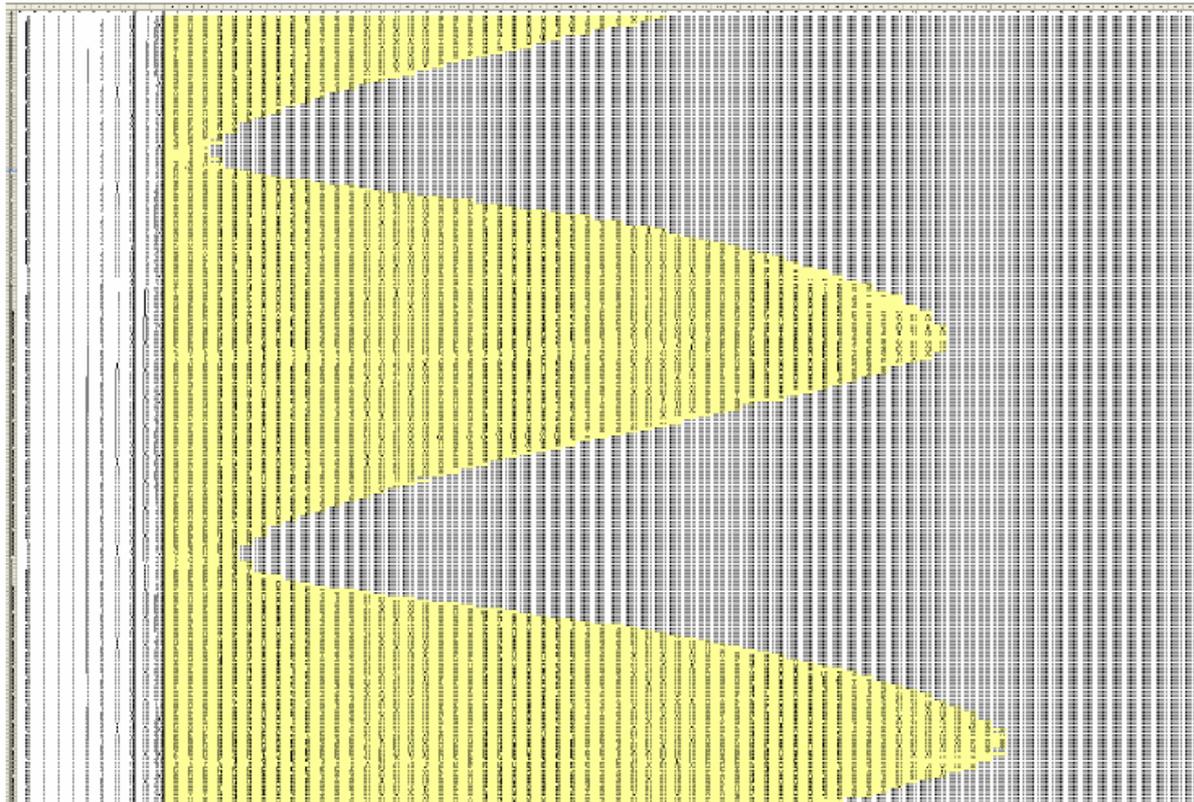


Abbildung 4.22: *Strömung_v Übersicht* für einen ganzen Tag

Mit der Tastenkombination *Str + d* startet das Makro „Strömungsrichtung“, welches inhaltlich das Gleiche macht wie das eben beschriebene Makro „Strömungsgeschwindigkeit“. Allerdings werden hier die Strömungsrichtungen betrachtet und in *Strömung_dir Übersicht* zusammengefasst. Zuletzt wird das Makro *Str + m* durchgeführt. Dieses Makro bildet zunächst zu allen Zeitpunkten einen Mittelwert der Strömung für Geschwindigkeit und Richtung. Anschließend muss die Datei unter dem zugehörigem Datum neu abgespeichert werden. Es ist zu erkennen, dass sich die Strömungsrichtung entsprechend der Tide ungefähr alle sechs Stunden umkehrt. Die Richtung beträgt dabei im Wechsel 230° und 50° .

Diese Richtungen entsprechen der Lage der Neufelder Rinne im Watt. D.h. bei auflaufendem Wasser strömt das Wasser in Richtung Nordost in die Rinne herein und bei ablaufendem Wasser in Richtung Südwest aus der Rinne heraus. Die Strömungsgeschwindigkeit ist zu den Kenterpunkten etwa null und ist maximal in der Mitte der Flut und der Ebbe. Diese hier dargestellten Daten entstammen einem nahezu wind- und wellenlosen Tag.

4.4.2 Messungen der Konzentrationen suspendierter Sedimente

Die Binärdaten, die mit Hilfe des Trübungsmessgerätes ASM aufgezeichnet wurden, konnten mit der vom Hersteller mitgelieferten Software „ASMA“ betrachtet, kontrolliert und zum Teil bearbeitet werden. So bietet das Programm die Möglichkeit, sämtliche aufgezeichneten Parameter zu visualisieren und z.B. Ausreißer aus den Messdaten herauszufiltern. Ein ähnliches Problem wie bei den ADCP-Geräten besteht bei den Trübungssonden auch. So messen sie immer auf der durch die Sensoren vorgegebenen Länge vom 96 cm, auch wenn das Gerät komplett oder einzelne Sensoren tidebedingt trockenfallen. Auch in diesem Fall wurde das Problem ähnlich wie bei den ADCP-Geräten gelöst. Dadurch, dass die Höhenlage des ersten Sensors be-

kannt war, konnten zu jedem Zeitpunkt die Sensoren aus der Bearbeitung herausgenommen werden, die oberhalb des Wasserspiegels lagen. Nachdem somit nur noch die aufgezeichneten Konzentrationen in der Wassersäule vorlagen und bereits vorher Ausreißer eliminiert wurden, erfolgte jetzt noch einmal eine visuelle Kontrolle der Messwerte. Außergewöhnlich hohe Messwerte wurden in den ASCII-Daten herausgesucht und mit Hilfe einer Visualisierung in der Software „ASMA“ kontrolliert. In einigen Fällen waren einige Sensoren nach einer Niedrigwasserphase verschmutzt oder Treibgut bzw. Algen hatte sich am Gerät festgesetzt. Diese Ereignisse sind in einigen Fällen nicht mit Filtervorgängen erkennbar. Daher ist eine visuelle Kontrolle erforderlich, um Fehlmessungen zu erkennen und aus der weiteren Bearbeitung herauszunehmen.

Die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration mittels der optischen Rückstreumethode ist ein indirektes Messverfahren und muss somit in regelmäßigen Abständen eine Verifizierung der Messdaten erfolgen. Es stehen verschiedene Methoden zur experimentellen Bestimmung der Schwebstoffkonzentration zur Verfügung. Am häufigsten sind die Entnahme von in situ Proben und eine entsprechende Auswertung im Labor. Während der Messungen in **Phase 1** wurden drei Schwebstoffproben entnommen und ausgewertet. Dabei wurde analog zu dem im DVWK-Merkblatt 125/1986 – Schwebstoffmessungen – beschriebenen Verfahren vorgegangen (DVWK, 1986).

Die Entnahme der Schwebstoffproben erfolgte bei Hochwasser vom Boot aus, so nah wie möglich an den Trübungsmessgeräten. Dabei wurden der Entnahmezeitpunkt sowie die Entnahmetiefe notiert. So bald wie möglich nach der entsprechenden Messfahrt erfolgte eine gravimetrische Bestimmung des Schwebstoffgehaltes nach DVWK (1986), d.h. eine Ermittlung des Schwebstoffgehaltes durch Filterung der Probe und anschließender Trocknung und Wägung des Filterrückstandes. Die Ergebnisse der Laboranalyse wurde dann mit den Werten verglichen, die das entsprechende ASM zum jeweiligen Zeitpunkt in der Entnahmetiefe aufzeichnete. Eine genaue Übereinstimmung von Probe und aufgezeichnetem Messwert konnte wegen Verfälschungen, die während der Probeentnahme entstehen sowie zeitlichen und räumlichen Abweichungen von Probe- und Messort, nicht erwartet werden. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Größenordnung der aufgezeichneten Messwerte der Trübungsmessgeräte und der Auswertung der Schwebstoffproben übereinstimmten (Anhang D). Die Kalibrierung der ASM, die vor Beginn der Messkampagne vorgenommen wurde, konnte also weiterhin verwendet werden.

4.4.3 Seegangsmessungen

Die durch den Seegang induzierten Druckwerte werden mit dem Datenlogger *P-Log521-MMC* der Firma *Driesen + Kern GmbH* mit einer Frequenz von 5 Hz aufgezeichnet. Der gemessene Absolutdruck setzt sich somit aus dem vorherrschenden Luftdruck, dem hydrostatischen Druckanteil und einem vom Durchgang der Welle erzeugten hydrodynamischen Druckanteil zusammen. Der Luftdruck wird separat mit einem Barometer aufgezeichnet, so dass sich der Relativdruck aus der Differenz des Absolutdrucks und des barometrischen Drucks berechnen lässt. Eine erste Auswertung der Messdaten erfolgt mit Hilfe der Software „Matlab“ von der Firma *The MathWorks, Inc.* *Matlab* ist ein Programm zur Lösung diverser mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der berechneten Ergebnisse. Die Berechnung wird dabei mit Matrizen durchgeführt. Mit Hilfe der Programmiersprache *Matlab* wurde ein Auswertungsprogramm erstellt. Die Auswertung der Seegangsdaten erfolgt im Frequenzbereich. Dafür ist es zunächst notwendig, die Wasserspiegelauslenkung über die Zeit als Eingangsparameter zu bestimmen. Anschließend wird eine Fourier-Analyse vorgenommen und aus den ermittelten Amplituden ein Zusammenhang zum

normierten eindimensionalen Seegangsspektrum hergestellt. Aus diesem werden definierte Momente berechnet, aus welchen die signifikanten Wellenparameter bestimmt werden.

Die Berechnung der Wasserspiegelauslenkung erfolgt entsprechend der linearen Wellentheorie mit der LAPLACE-Gleichung:

$$p = \rho \cdot g \cdot \left[\eta \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} - z \right] \quad \text{Gl.4.4}$$

mit: $k = 2 \cdot \pi / L$ (Wellenzahl)

η = aktuelle Wasserspiegelauslenkung

z = Einbautiefe

d = Wassertiefe

Der Wasserdruck p setzt sich dabei aus dem hydrodynamischen Druckanteil aus Wellenschlag

$$p_{hydrodyn} = \rho \cdot g \cdot \eta \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \quad \text{Gl.4.5}$$

und dem hydrostatischen Druckanteil

$$p_{hydrstat} = \rho \cdot g \cdot (-z) \quad \text{Gl.4.6}$$

zusammen. Untersuchungen von FRÖHLE (2000) zeigen, dass der hydrodynamische Druckanteil für eine Wellenperiode $T < 4$ s mit zunehmender Sensortiefe gegen Null geht. Der Pegellogger misst den Absolutdruck am Meeresboden. Demnach gilt entsprechend der Vorzeichenregelung der folgenden Abbildung 4.23 $z = -d$; der hydrodynamische Druckanteil nach Gleichung 4.5 wird in der ersten Auswertung gleich Null angenommen.

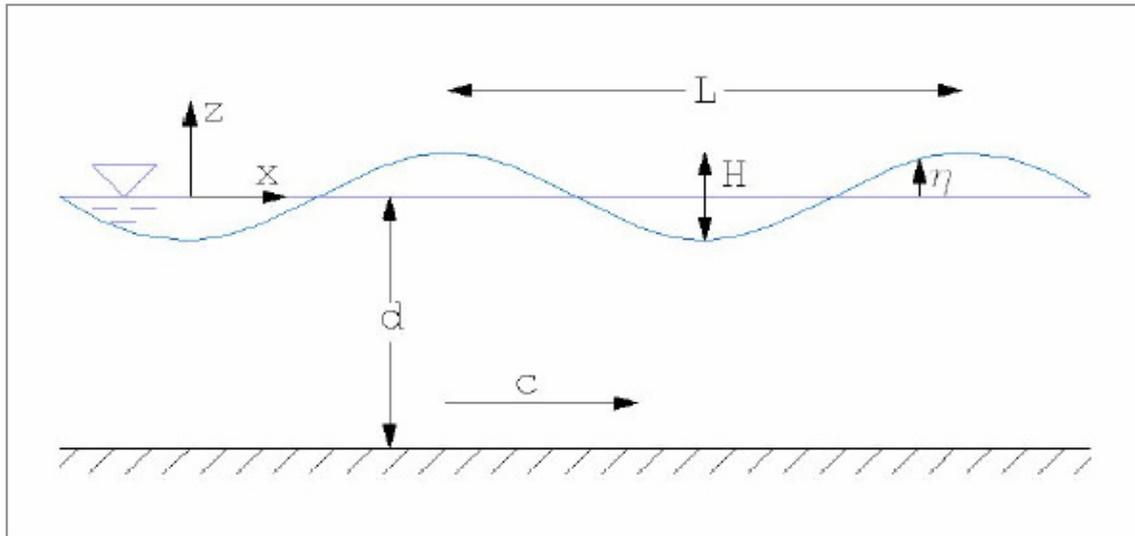


Abbildung 4.23: Vorzeichenregelung für Einbautiefe und Wassertiefe

Der gemessene Druck ist insofern nur die Summe aus dem Luftdruck und dem hydrostatischen Druckanteil. In einem ersten Schritt müssen deswegen die gemessenen Luftdrücke und Absolutdrücke in das Auswertungsprogramm eingelesen werden. Bevor die Daten importiert werden können, müssen die txt-Dateien aufbereitet werden. Da *Matlab* mit Matrizen arbeitet, müssen die Daten auch in Matrizen vorliegen. Dabei ist es grundlegend, dass je Matrix nur ein Datentyp vorliegen darf. Der Pegellogger und das Barometer speichern die Messdaten als Binärdaten ab, welche anschließend mit dem Programm *InfraLog* in ASCII-Daten umgewandelt werden. Bei dieser Datenumwandlung müssen neben den Druckdaten auch die Temperaturdaten exportiert werden. Die Dateien haben jeweils einen Dateikopf in welchem die Messstellenbeschreibung, die Loggerseriennummer sowie die Beschreibung der anschließend folgenden Daten enthalten ist. Die Daten werden in vier Spalten angegeben. Die erste Spalte beinhaltet das Datum, es folgen die Zeit und die Umgebungstemperatur. Die abschließende Spalte enthält die gemessenen Druckdaten.

Für die Berechnung der Wasserspiegelauslenkung in *Seegang* müssen diese txt-Dateien vorbereitet werden. Zunächst einmal werden die Dateiköpfe, also die ersten drei Zeilen, gelöscht. Danach müssen die Daten herausgearbeitet werden, welche ausgewertet werden sollen. Entscheidend an dieser Stelle zu beachten ist, dass der Luftdruck nur alle fünf Minuten gemessen wird, während der Absolutdruck in jeder Sekunde fünfmal gemessen wird. Damit in *Seegang* eine Überlagerung dieser Daten möglich ist, müssen für jede Zeile Luftdruck 1500 Zeilen Absolutdruck eingelesen werden. Das Programm *Seegang* ist so geschrieben, dass mindestens Daten von exakt 10 Minuten ausgewertet werden müssen und ansonsten beliebig viele Daten ausgewertet werden können, wenn diese die fünf Minuten-Intervalle genau einhalten. D.h. die Zeilenanzahl der einzulesenden Absolutdruckmatrix muss durch 1500 teilbar sein und die zugehörige Luftdruckmatrix muss genau 1/1500 dieser Zeilenanzahl aufweisen. Zur Darstellung des Programmablaufes wird der gesamte 06.07.2006 ausgewertet. Die txt-Dateien werden wie folgt bearbeitet und unter *06072006Wasser.txt* sowie *06072006Luft.txt* abgespeichert.

Diese beiden Dateien werden in das Programm unter Angabe der genauen Dateinamen als Matrix eingelesen. Anschließend wird die Größe der eingelesenen Matrizen *wasser* und *luft* bestimmt.

Damit aus den eingelesenen Daten der Wasserdruck bestimmt werden kann, muss jedem Absolutdruck der entsprechende Luftdruck zugewiesen werden. Um eine Sub-

traktion dieser Werte zu ermöglichen muss zunächst die Größe des Luftdruckvektors (entspricht der letzten Spalte der Luftdruckmatrix) der Größe des Absolutdruckvektors (entspricht der letzten Spalte des Absolutdruckvektors) angepasst werden. Dafür wird ein neuer Vektor *luftgem* erzeugt, welcher den 5-minütigen Luftdruckwert mit einer von Frequenz von fünf Hz wiedergibt. Der jeweils zu Beginn der fünf Minuten gemessene Luftdruckwert wird mit Hilfe zweier for-Schleifen in dem neuen Vektor auf 1500 Stellen eingetragen, die dieser Zeitdauer entsprechen. Jetzt kann der Wasserdruck durch Subtraktion des Vektors *luftgem* vom Absolutdruck (vierte Spalte der Matrix *wasser*) berechnet werden. Der resultierende Differenzvektor *druck* gibt den Wasserdruck in mbar an.

Aus dem Wasserdruck lässt sich der Wasserstand wie folgt berechnen:

$$-z = \frac{\rho \cdot g}{P_{hydrosta}} \quad \text{Gl.4.7}$$

Die Fallbeschleunigung g beträgt dabei $9,80665 \text{ m/s}^2$, die Dichte des Wassers ist abhängig von dem Salzgehalt und der Temperatur. Die Salinität im Untersuchungsgebiet wird von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) mit einem Maximum von 22,5 ‰ und einem Minimum von 15 ‰ angegeben. Der Mittelwert liegt bei 20 ‰

(www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Projekte/Elbe/cqibin/Wc7db5da11a058).

Der durch die Annahme einer mittleren Salinität entstehende Fehler ist vernachlässigbar gering. Die Internetseite der *Faculty of Science* der *Adelaide's Flinders University*

(www.es.flinders.edu.au/%7Emattom/IntroOc/lecture03.html)

bietet die Möglichkeit, für verschiedene Salzgehalte und Temperaturen die Seewasserdichte σ_T zu berechnen. Dabei gilt:

$$\sigma_T = \rho - 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{Gl.4.8}$$

Mit Hilfe des Seewasserdichterechners wird für eine mittlere Salinität von 20 ‰ für Temperaturen von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $30 \text{ }^\circ\text{C}$ die Seewasserdichte σ_T bestimmt. Anschließend wird die daraus entstehende Kurve durch ein Polynom 4. Grades angenähert. Die Näherungsfunktion lautet:

$$f(x) = -5,31244 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 7,12285 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,00758 \cdot x^2 - 0,0025 \cdot x + 16,01412$$

Die Annäherung weicht in diesem Bereich maximal 1/1000 von den Werten des Seewasserrechners ab. Der hier entstehende Fehler ist wesentlich geringer als die durch die Annahme einer mittleren Salinität entstehende Abweichung.

Das Programm berechnet nun zu jeder Wassertemperatur (3. Spalte der Matrix *wasser*) die Dichte

$$\rho = 1000 + \sigma_T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{Gl.4.9}$$

mit Hilfe des Polynoms 4. Grades. Es resultiert der Dichtevektor Rho .

Nun sind alle Komponenten zur Berechnung des Wasserstandes bekannt. Unter Berücksichtigung der Einheiten wird der Wasserstand entsprechend Gleichung 4.7 in m in Vektor z geschrieben. Im Programm wird jedoch die Vorzeichenregelung umgedreht, aus $-z$ wird z . Der aktuelle Wasserpegel ist jedoch nicht die gesuchte Größe. Vielmehr liegt das Interesse auf der Wasserspiegelauslenkung. Diese kann nicht direkt aus dem hydrostatischen Druckanteil berechnet werden. Stattdessen wird der Wasserstand über fünf Minuten gemittelt, und anschließend wird der Mittelwert von den gemessenen Wasserständen innerhalb dieses Zeitraumes subtrahiert. Die Differenz wird hier festgelegt als vorzeichengerechte Wasserspiegelauslenkung. Bevor jedoch die Differenz in Vektor η gebildet werden kann, müssen die Mittelwerte wieder auf einen Vektor mit der Größe des Vektors z verteilt werden. Zur Nachvollziehbarkeit der Daten werden zwei Diagramme erstellt. In dem ersten Diagramm werden die mit fünf Hz gemessenen Wasserstände und die über fünf Minuten gemittelten Wasserstände über die Zeit dargestellt. In der zweiten Figur wird die berechnete Wasserspiegelauslenkung gezeigt. Dafür muss zunächst die Zeitachse definiert werden. Die Zeit wird in dem Vektor t definiert. Sie beginnt bei Null Sekunden und wächst in Intervallen von 0,2 Sekunden entsprechend einer Frequenz von fünf Hz. Jetzt sind die x- und die y-Werte für das Diagramm bekannt und die Diagramme können fertig gestellt werden. Zunächst wird der Plot für die Darstellung des Wasserpegels erstellt (Abbildung 4.24). Für dieses Diagramm und alle weiteren gilt, dass Details mit einer Zoomfunktion betrachtet werden können.

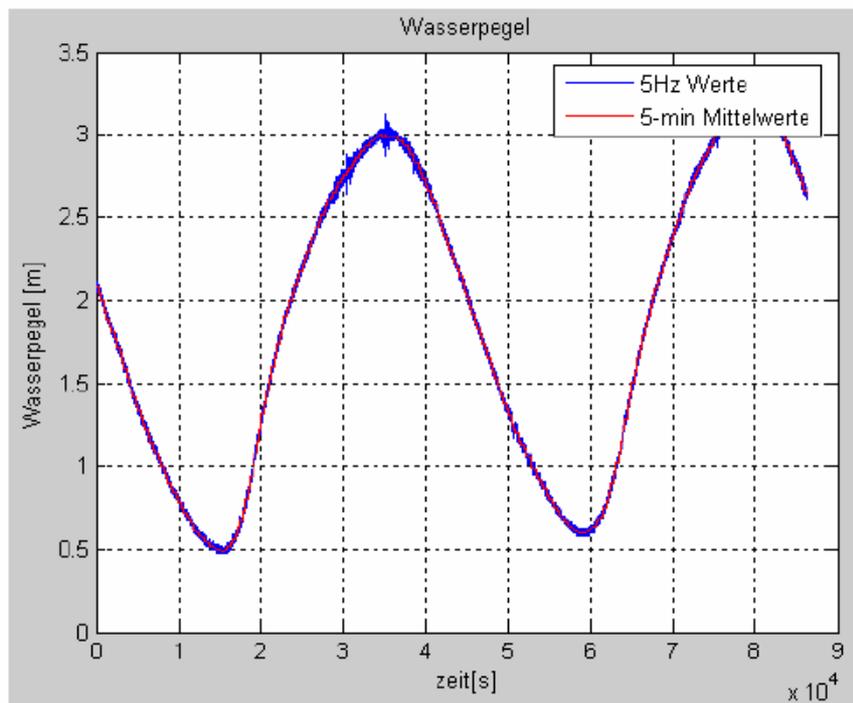


Abbildung 4.24: Diagramm Wasserpegel

Anschließend wird der Plot für die Wasserspiegelauslenkung durchgeführt (Abbildung 4.25).

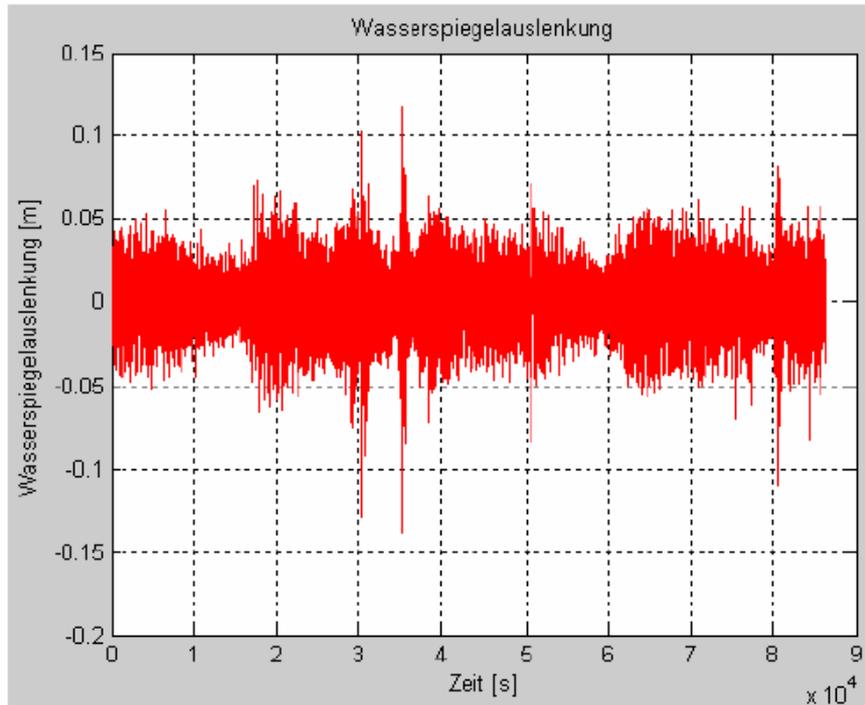


Abbildung 4.25: Diagramm Wasserspiegelauslenkung

Die Auswertung im Frequenzbereich verzichtet auf die Definition einzelner Wellen im Seegang. Stattdessen wird der Seegang als Überlagerung sinusförmiger langkämmiger Wellenkomponenten mit unterschiedlichen Richtungen, Amplituden und Wellenlängen idealisiert, welche sich mit der zugehörigen Fortschrittsgeschwindigkeit vorwärts bewegen. Die lineare Wellentheorie erfasst zwar lediglich die Vereinfachung zu langkämmigen, regelmäßigen Wellen, liefert jedoch trotzdem gute Ergebnisse.

Zunächst muss der Seegang mittels einer FOURIER-Analyse in seine sinusförmigen Komponenten zerlegt werden. Da die Daten nicht als Funktion definiert sind, sondern in Form einer Tabelle vorhanden sind, muss eine diskrete FOURIER-Transformation (DFT) eingesetzt werden. Für die DFT ist es notwendig, dass die Stützstellen auf einem Punkteraster liegen. Dies ist durch die konstante Abtastrate von fünf Hz gegeben. Im Auswertungsprogramm wird eine schnelle FOURIER-Transformation (FFT) durchgeführt, welche ein Algorithmus zur schnellen Berechnung der DFT ist.

Bei der DFT werden zunächst die Integrale der FOURIER-Transformation durch Summen ersetzt:

$$a_k = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n} + (j-1)\right) \quad k = 0 \dots n-1 \quad \text{Gl.4.10}$$

$$b_k = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot (j-1)\right) \quad k = 0 \dots n-1 \quad \text{Gl.4.11}$$

An die Stelle der Kosinus- und Sinus-Koeffizienten tritt die Formulierung mit komplexen Zahlen. Die Realteile der komplexen FOURIER-Koeffizienten entsprechen den Kosinus-Anteilen und die Imaginärteile den Sinus-Anteilen. Die Betragswerte der

komplexen Koeffizienten sind dann gerade die Gesamtamplituden, und die Argumentwerte entsprechen den Phasen:

$$z_k = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \exp\left(i \cdot (k-1) \cdot \frac{2\pi}{n} \cdot (j-1)\right) \quad k = 0 \dots n-1 \quad \text{Gl.4.12}$$

Diese Formel lässt sich wie folgt als Matrix-Vektor-Multiplikation schreiben:

$$z = T \cdot f$$

Dabei ist T die Transformationsmatrix. Der Berechnungsaufwand der DFT nach dieser Formel beträgt $O(n^2)$, während der Aufwand mit der FFT lediglich $O(n \log(n))$ beträgt. Der Algorithmus der FFT ersetzt eine DFT der Länge n durch Kombination von zwei DFTs, welche jeweils die Länge $n/2$ aufweisen. Diese können wiederum zusammengesetzt werden aus zwei DFTs der Länge $n/4$. Diese schrittweise Verfeinerung kann bis hinunter zur trivialen Kombination von je zwei Zahlen angewendet werden. Das Programm führt jeweils für ein Intervall von fünf Minuten eine FFT durch. Dabei entsprechen diese Abschnitte immer denen, bei denen der gleiche Wasserstand durch Mittelung über fünf Minuten berechnet wurde. Um Verfälschungen im Seegangsspektrum bei Unstetigkeit zwischen zwei solchen periodischen Blöcken zu verhindern, wird eine „tapering“-Funktion auf die Werte der Wasserspiegelauslenkung angewendet. Diese Funktion verringert die Bedeutung der Werte am Intervallanfang und -ende. Sie wird im Programm in Form des Vektors *tapering* eingesetzt.

Anschließend wird eine umfangreichen for-Schleife gestartet, welche für jeweils fünf Minuten eine Vielzahl an Berechnungsschritten durchführt. Zuerst wird der Vektor *eta* der Wasserspiegelauslenkung mit dem Vektor *tapering* multipliziert, um, wie oben beschrieben, die Verfälschung bei Unstetigkeit zwischen zwei Blöcken abzuwehren.

Anschließend wird eine FFT auf den so neu entstandenen Vektor *ETA* angesetzt. Dabei ist auf die Normierung zu achten. Es resultiert der Vektor Y , welcher den Wellenamplituden aus der Funktion der Frequenz $c(f)$ [m] entspricht.

Eine Quadrierung dieses Vektors erzeugt die Werte des Energiespektrums $c(f)^2$. Es ist dabei zu beachten, dass Y aus komplexen Zahlen besteht, sodass eine Multiplikation von Y mit der Konjugierten von Y den Vektor des Energiespektrums P_{yy} ergibt, welcher nun aus reellen Zahlen zusammengesetzt ist.

Aus der FFT resultieren die Wellenamplituden, die zugehörigen Frequenzen müssen eigens definiert werden. Die FFT gibt die Wellenamplituden in einem Vektor aus. Die erste Zeile entspricht dabei der Frequenz null Hz. Der letzte Wert entspricht der eingelesenen Frequenz (fünf Hz). Die Frequenzen dazwischen sind gleichmäßig aufgeteilt. Der Frequenzvektor f hat lediglich $n/2 + 1$ (751) Stellen. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass mindestens zwei Werte betrachtet werden müssen um die Frequenz errechnen zu können. Da die Abtastrate 5 Hz beträgt, kann maximal eine Frequenz von 2,5 Hz erkannt werden. Aus den nun bekannten Werten der Wellenamplituden und Frequenzen kann das normierte eindimensionale Seegangsspektrum entsprechend der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$S(f) = \frac{c(f)^2}{2 \cdot \Delta f} \quad \text{Gl.4.13}$$

mit: $S(f)$ = spektrale Dichte [m^2s]
 $c(f)$ = Wellenamplitude als Funktion der Frequenz [m]
 Δf = Frequenzabstand der FOURIER-Komponenten [1/s]

Für die Berechnung der signifikanten Wellenhöhe H_{m0} muss das spektrale Moment 0. Ordnung und für die signifikante Wellenperiode T_{02} auch das spektrale Moment 2. Ordnung bekannt sein. Das spektrale Moment ist allgemein definiert als:

$$m_n = \int S(f) \cdot f^n df \quad \text{Gl.4.14}$$

mit: m_n = n-tes Moment [$\text{m}^2(1/\text{s})^n$]
 $S(f)$ = spektrale Dichte [m^2s]
 f_n = n-te Potenz der Frequenz f [$(1/\text{s})^n$]

Die Integration muss im Programm numerisch durchgeführt werden. Aus dem 0. Moment lässt sich die signifikante Wellenhöhe der gemessenen Seegangssituation schätzen:

$$H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad \text{Gl.4.15}$$

Für die mittlere Wellenperiode muss das 0. und das 2. Moment herangezogen werden:

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \text{Gl.4.16}$$

Nun fehlt nur noch die zugehörige Wellenlänge L . Diese lässt sich in Abhängigkeit vom Verhältnis Wassertiefe d /Wellenlänge L aus der Wellenperiode bestimmen. Es muss eine Unterscheidung für die folgenden Fälle eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} d/L < 1/20 & \quad \text{Flachwasser} \\ 1/20 < d/L < 1/2 & \quad \text{Übergangsbereich} \\ d/L > 1/2 & \quad \text{Tiefwasser} \end{aligned}$$

Für Flachwasser gilt:

$$L = c \cdot T = T \cdot \sqrt{g \cdot d} \quad \text{Gl.4.17}$$

Die Gleichung kann ohne Umformung in das Programm übernommen werden. Für Tiefwasser ergibt sich die Wellenlänge wie folgt:

$$L = c \cdot t = \frac{g}{\omega} \cdot T = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \quad \text{Gl.4.18}$$

Im Übergangsbereich ist die Gleichung zur Berechnung der Wellenlänge implizit:

$$L = \frac{g}{\omega} \cdot T \cdot \tanh(kd) = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot d\right) \quad \text{Gl.4.19}$$

Diese Formel muss im Programm durch eine Iteration ersetzt werden. Dabei wird beginnend mit einer Wellenlänge $L = 0,001$ m die neue Wellenlänge ausgerechnet. Unterschreitet die so berechnete Wellenlänge die angenommene, so wird L um $0,001$ m erhöht und die Berechnung erneut durchgeführt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die berechnete Wellenlänge die angenommene übertrifft. Die berechnete Wellenlänge wird als signifikante Wellenlänge ausgegeben.

Die Fallunterscheidung wird durch eine if-Abfrage in das Programm integriert. Da bei dieser Abfrage das Verhältnis d/L entscheidend ist, muss die an dieser Stelle noch unbekannte Wellenlänge entsprechend der verschiedenen Formeln ersetzt werden. Flachwasser wird demnach angenommen, wenn

$$\frac{d}{L} = \frac{d}{T \cdot \sqrt{g \cdot d}} < \frac{1}{20} \quad \text{Gl.4.20}$$

gilt. Ist dies nicht der Fall, wird die Tiefwasserbedingung getestet:

$$\frac{d}{L} = \frac{d \cdot 2\pi}{g \cdot T^2} > \frac{1}{2} \quad \text{Gl.4.21}$$

Trifft weder die Abfrage bezüglich Flachwasser noch die des Tiefwassers zu, so wird vom Übergangsbereich ausgegangen. Dabei wird entsprechend der Fallunterscheidung den verschiedenen Bereichen ein weiterer Parameter b zugewiesen. Dieser Parameter kann später in die Ausgabematrix aufgenommen werden und macht die Berechnung der Wellenlänge nachvollziehbar. b ist im Flachwasser null, im Übergangsbereich eins und im Tiefwasser zwei. Nach Berechnung der Wellenlänge sind alle signifikanten Wellenparameter bekannt. In die Ausgabematrix *Ausgabe* werden nun alle wichtigen Werte geschrieben. Diese Matrix gibt für alle untersuchten Fünf-Minuten-Intervalle zunächst die Nummer n dieses Intervall an. Es folgen der Wasserstand d , die signifikante Wellenhöhe $Hm0$, die signifikante Wellenperiode $T02$, die signifikante Wellenlänge L sowie der Parameter b zur Beschreibung des Verhältnisses d/L . Anschließend wird die umschließende for-Schleife der FOURIER-Transformation und Wellenparameter wieder geschlossen.

Die Daten der Ausgabematrix werden kopiert und beispielsweise im *Editor* als txt-Datei abgespeichert. Es empfiehlt sich das Datum und den Inhalt im Dateinamen an-

zugeben, hier *06072006Ausgabe.txt*. In einem letzten Schritt erstellt das Programm *Seegang* in einem Diagramm eine Übersicht der signifikanten Wellenparameter über die Zeit (siehe Abbildung 4.26).

Die beschriebene Art der Auswertung wurde erstellt, um zeitnah eine Möglichkeit zu erhalten, die aufgezeichneten Seegangsdaten zu kontrollieren und auszuwerten, um so erste Aussagen auf die Wirkung des Seegangs auf die Morphodynamik im Untersuchungsgebiet treffen zu können. Parallel dazu wurden Gespräche mit dem Dekanat für Agrar- und Umweltwissenschaften der Universität Rostock in Person von Herrn Dr. Fröhle geführt und eine Zusammenarbeit vereinbart, bei der aufbauend auf das an der Universität Rostock eingesetzte Programm zur Seegangsauswertung ein an die für dieses Projekt erforderlichen Randbedingungen angepasstes Programm erstellt wurde. Am 13. November 2006 wurde vereinbarungsgemäß eine erste funktionsfähige Version an das Institut für Wasserbau übergeben. Diese erlaubt eine flexiblere und übersichtlichere Auswertung der Seegangsaufzeichnung sowie Darstellung unter Berücksichtigung hydrostatischer und hydrodynamischer Druckanteile. Änderungen im Messprogramm, wie beispielsweise die Änderung der Messfrequenz, können somit vorgenommen werden, ohne bei der Auswertung weiteren Programieraufwand betreiben zu müssen. Ein Screenshot des Programms, das den Arbeitstitel *PresMea* trägt, ist in Abbildung 4.27 zu sehen. Das allgemeine Vorgehen zur Auswertung von Seegangsdaten ist bei diesem Programm analog zum dem oben beschriebenen.

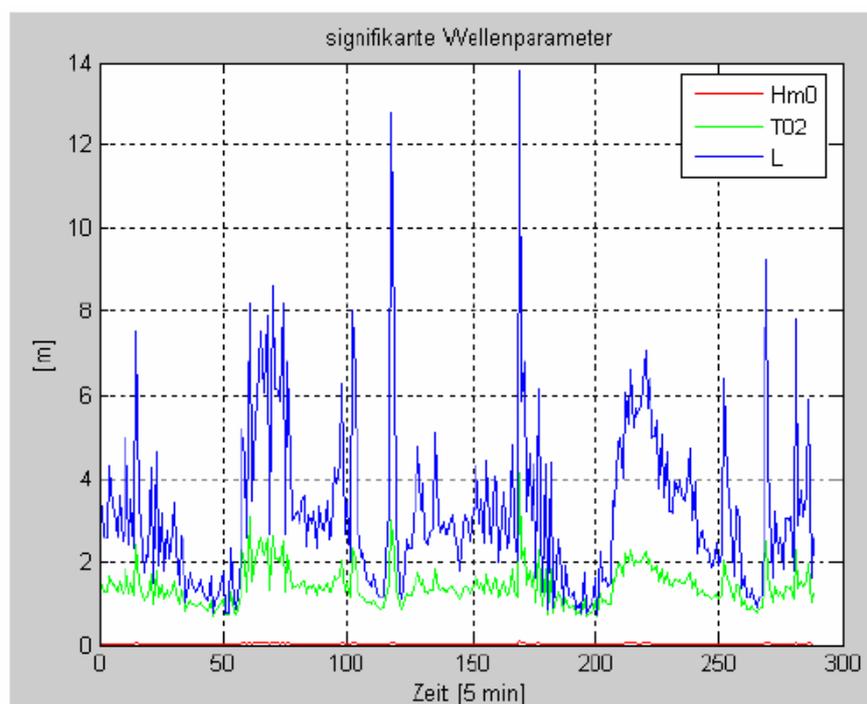


Abbildung 4.26: Signifikante Wellenparameter

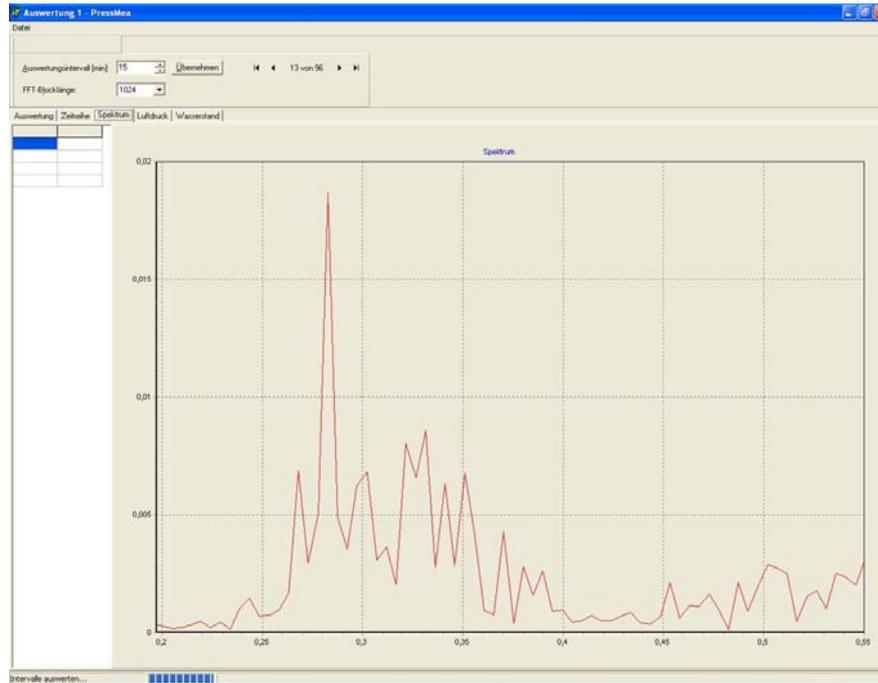


Abbildung 4.27: Screenshot des Programms PresMea mit einem Seegangsspektrum

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wird das Programm PresMea zur Seegangsauswertung verwendet. Im Anhang B sind die mit PresMea berechneten Ergebnisse der bisherigen Seegangsaufzeichnungen dargestellt. Über der signifikanten Wellenhöhe sind die Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung und der Tidewasserstand abgebildet. Somit ist eine Kontrolle der berechneten Seegangparameter möglich.

Die Auswertung von Seegangsmessungen kann, wie zuvor beschrieben, allgemein im Zeitbereich und im Frequenzbereich durchgeführt werden. Wird, wie ebenfalls oben dargestellt, eine Auswertung im Frequenzbereich vorgenommen, dann wird die gemessene Druckzeitreihe nach der Fourier-Transformation mit einer Druckübertragungsfunktion dividiert, um das Amplitudenspektrum zu erhalten. Aus dem Amplitudenspektrum wird das Energiedichtespektrum berechnet. Bei der Übertragung tritt die Problematik auf, dass die Druckübertragungsfunktion ab einer Grenze, die jeweils abhängig vom von der Wassertiefe und der Einbautiefe ist, sehr klein wird. Bei Division durch eine Zahl nahe Null werden auch kleinste Teile im Druckspektrum, die z.B. aus der Messungenauigkeit und/oder aus elektrischem Rauschen resultieren können, hochgerechnet. Neben einer sorgfältigen Filterung der hohen Frequenzen ist es daher notwendig, die Übertragung des Druckspektrums auf eine Maximalfrequenz zu begrenzen.

Bei größeren Sensortiefen, die bei den Pegelloggern in der Prielmitte zum Zeitpunkt des Hochwassers auftreten, werden mit der zum jetzigen Zeitpunkt verfügbaren Programmversion von PresMea zu hohe Wellenhöhen berechnet. Bezüglich dieser Problematik werden weitere Gespräche mit der Universität Rostock geführt. Zu jetzigen Zeitpunkt werden diese Auswertungen nicht dargestellt.

4.4.4 Wasserstandsaufzeichnungen

Der Wasserstand im Messquerschnitt wird in Prielmitte mittels einer Drucksonde in 5-Minuten-Werten aufgezeichnet. Dabei kommt eine Absolutdrucksonde zum Einsatz. Aus diesen Werten sowie aus den barometrischen Drücken wird dann die Tidekurve berechnet. Das Vorgehen erfolgt analog zu dem unter Punkt 4.3.3 beschriebenen Verfahren. Die Höhenlage der Drucksonde im Priel wird dabei in regelmäßigen Abständen zur Kontrolle vermessen. Bei Kontrolle der aufgezeichneten barometrischen Drücke unmittelbar im Untersuchungsgebiet (mittels der an der Tonne befestigten Drucksonde) sowie der Luftdrücke im Otterndorfer Hafen (mittels des Barometers) fielen Unterschiede auf, die über den gerätespezifischen Toleranzen lagen und auf die variable Verteilung der barometrischen Drücke über See und Land zurückzuführen sind. Um diesen Effekt zu beachten, wurden die Luftdrücke der Drucksonde an der Tonne verwendet.

4.4.5 Darstellung der Messergebnisse

Nach Auswertung der Messergebnisse der stationären Messgeräte erfolgte die tageweise graphische Darstellung in Diagrammen. Untereinander wurden, jeweils mit der gleichen Zeitachse versehen, die Windparameter, der Tidewasserstand, die Strömungsgeschwindigkeit, die Strömungsrichtung und die Sedimentkonzentration aufgetragen. Für die Zeiten, für die Seegangsmessungen vorlagen, erfolgte zusätzlich die Darstellung der ausgewerteten Seegangsdaten. Diese Darstellung wurde gewählt, um Zusammenhänge zwischen Tidedrömung, Triftströmung sowie seegangsinduzierten Strömungen und der Konzentration suspendierter Sedimente und damit dem Sedimenttransport aufzeigen zu können. Bei der Darstellung von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit sowie der Sedimentkonzentration wurden jeweils tiefenintegrierte Werte aufgetragen. Zusätzlich ist in der jeweiligen Abbildung die zugehörige Messposition markiert.

Zugehörig zu jeder einzelnen der beschriebenen Abbildungen erfolgt zu verschiedenen Zeitpunkte der Tide die Darstellung der Messergebnisse über das Profil der Wassersäule. Im obersten Diagramm ist der jeweilige Ausschnitt der Tidekurve zu sehen. Darunter zu drei ausgewählten Zeitpunkten die Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit, der Strömungsrichtung sowie der Sedimentkonzentration aufgetragen über die relative Tiefe.

Im Folgenden werden die beschriebenen Darstellungen exemplarisch für verschiedene Tage abgebildet und erläutert. Stellvertretend für die Sommermonate mit normalen Tideverläufen sowie ohne nennenswerte Seegangsbelastung werden Messwerte vom 4. und vom 28. Juli dargestellt. Als Beispiel eines Extremereignisses wurde die Sturmflut vom 1. November ausgewählt. Alle weiteren Messwerte sind im Anhang zu finden.

In Abbildung 4.28 sind die gemessenen Größen in der Prielmitte vom 4. Juli 2006 aufgetragen und stehen exemplarisch für den überwiegenden Teil der Messungen in den Sommermonaten ohne nennenswerte Trift- oder seegangsinduzierte Strömung. Die Maxima in den Strömungsgeschwindigkeiten während der Flut- und der Ebbe-phase sind deutlich zu erkennen. Auffallend sind dabei verbreiterte Peaks während der maximalen Flutstromgeschwindigkeit, die sich durch alle Messungen ziehen. An anderen Tagen ist dieses Phänomen auch auf dem Ebbeast der Tidekurve festzustellen. Eine mögliche Erklärung kann lauten, dass die Strömungsgeschwindigkeiten sich im Verlaufe steigender oder fallender Wasserstände verändern, wenn der Wasserstand die Höhe der Wattkante erreicht. Um Aussagen über die verschieden star-

ken Ausprägungen dieser Erscheinung machen zu können, werden weitere Beobachtungen im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Der Bereich höherer Strömungsgeschwindigkeiten ist während der Flut breiter als während der Ebbe. Der Verlauf der Tide ist deutlich den aufgetragenen Strömungsrichtungen zu entnehmen. Während der Flut strömt das Wasser dem Verlauf der Neufelder Rinne folgend in das Neufelder Watt, während der Ebbe zurück. Erkennbar ist die kürzere Dauer der Flutphase. Das Signal der Sedimentkonzentrationen ist im Allgemeinen stärkeren Schwankungen unterworfen als die Strömungsmessungen. Es sind Maxima auszumachen, die zeitversetzt den Maxima der Strömungsgeschwindigkeit folgen. Während des Verlaufes des dargestellten Zeitraumes sind die Konzentrationen der suspendierten Sedimente höher als zu anderen Messzeitpunkten. Dies trat wiederholt während Phasen niedrigerer Wasserstände auf.

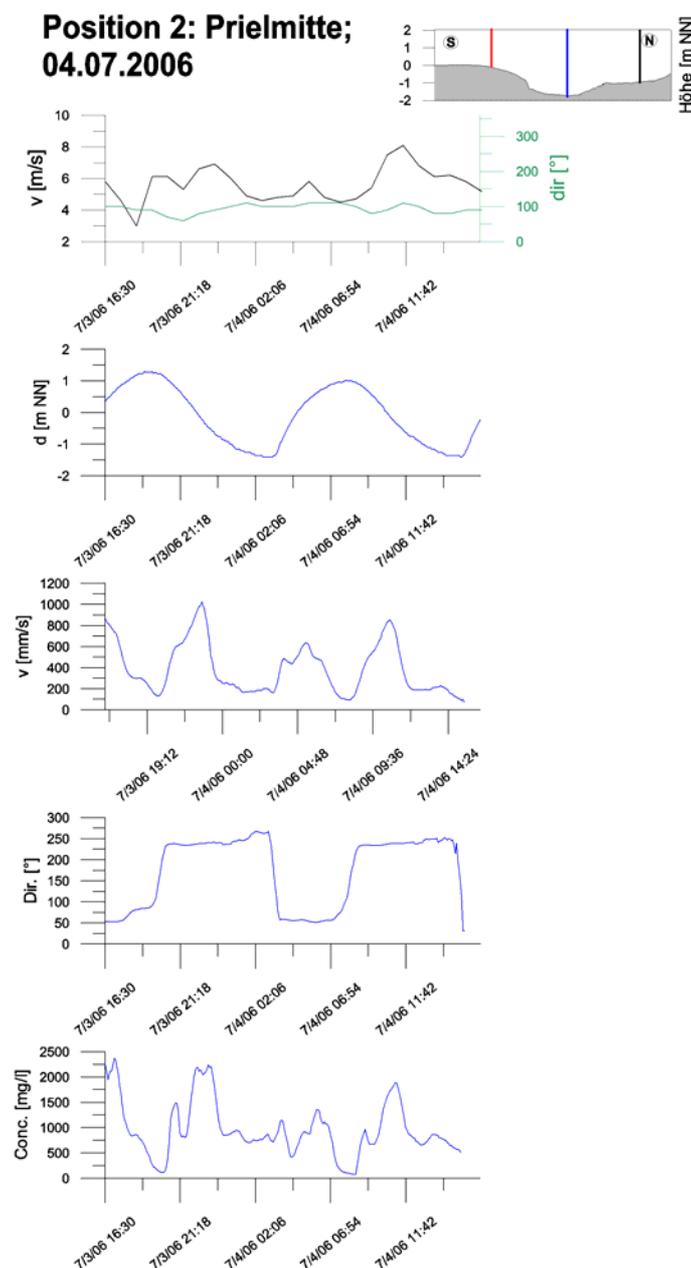


Abbildung 4.28: Darstellungen der Messwerte vom 4. Juli 2006

In Abbildung 4.29 sind die gemessenen Profilwerte vor, während und nach dem Hochwasser am 4. Juli 2006 dargestellt. Auch im Profil erkennt man die deutliche Verteilung der Strömungsrichtungen sowie den Bereich des Kenterns des Tidestroms. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Profil sind während des Strömungsmaximums in der Ebbe größer als während der Flutphase, wie auch aus Abbildung 1 ersichtlich wurde. Die Sedimentkonzentration in der Wassersäule ist während Ebbe größer als während Flut. Generell ist die aufgezeichnete Konzentration an der Sohle größer und nimmt zur Wasseroberfläche hin ab. In Sohlennähe können vermehrt Peaks mit hohen Konzentrationen auftreten.

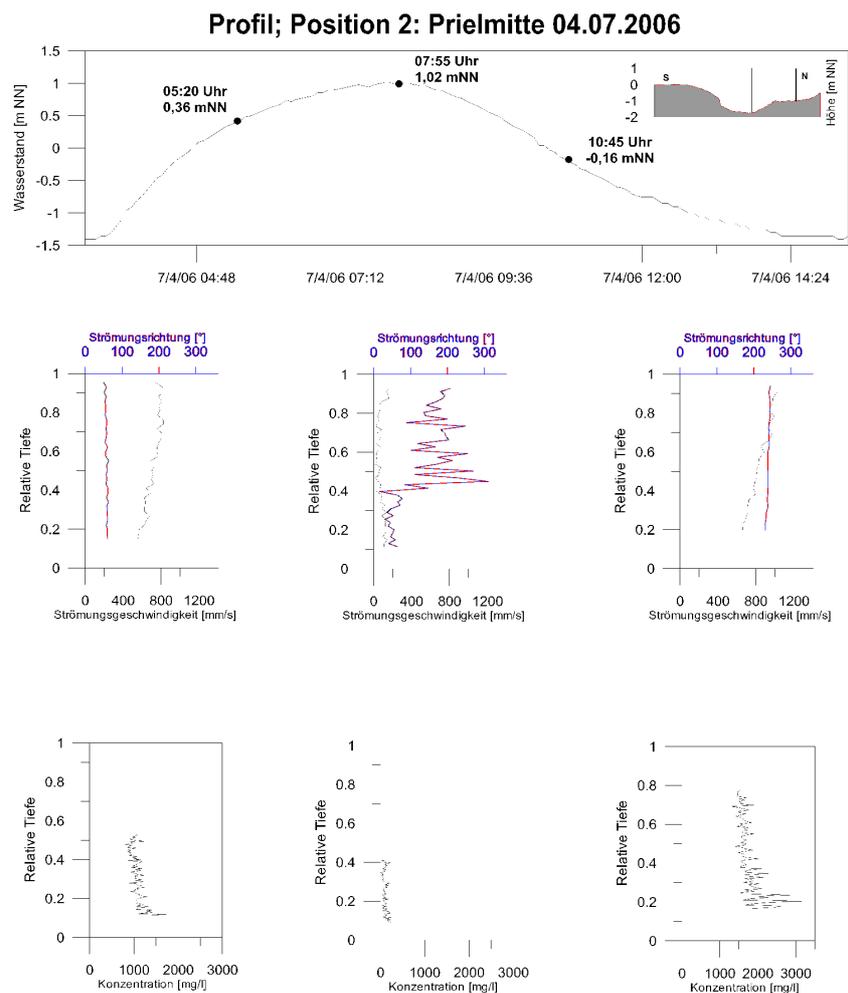


Abbildung 4.29: Messwerte im Profil vom 4. Juli 2006

In Abbildung 4.30 sind die Messwerte aller Messgeräte im Messquerschnitt über den Verlauf des 28. Juli 2006 dargestellt. Qualitativ haben alle den gleichen Verlauf. In Phasen, in denen die Messgeräte am nördlichen sowie am südlichen Prielrand trockenfallen, können keine Messwerte dargestellt werden. Gut erkennbar sind wiederum die Maxima in den Strömungsgeschwindigkeiten. Typisch für alle Messergebnisse ist, dass die Strömungsgeschwindigkeiten am nördlichen Prielufer größer sind als in der Prielmitte und am südlichen Prielrand. Zeitlich folgen alle Messungen dem gleichen Verlauf. Die Verläufe der Strömungsrichtungen sind ähnlich, wobei im Allgemeinen die Kurven an den Prielrändern abgerundeter sind. Es ist außerdem festzustellen, dass der Verlauf bei höheren Wasserständen weniger scharf abgegrenzt ist.

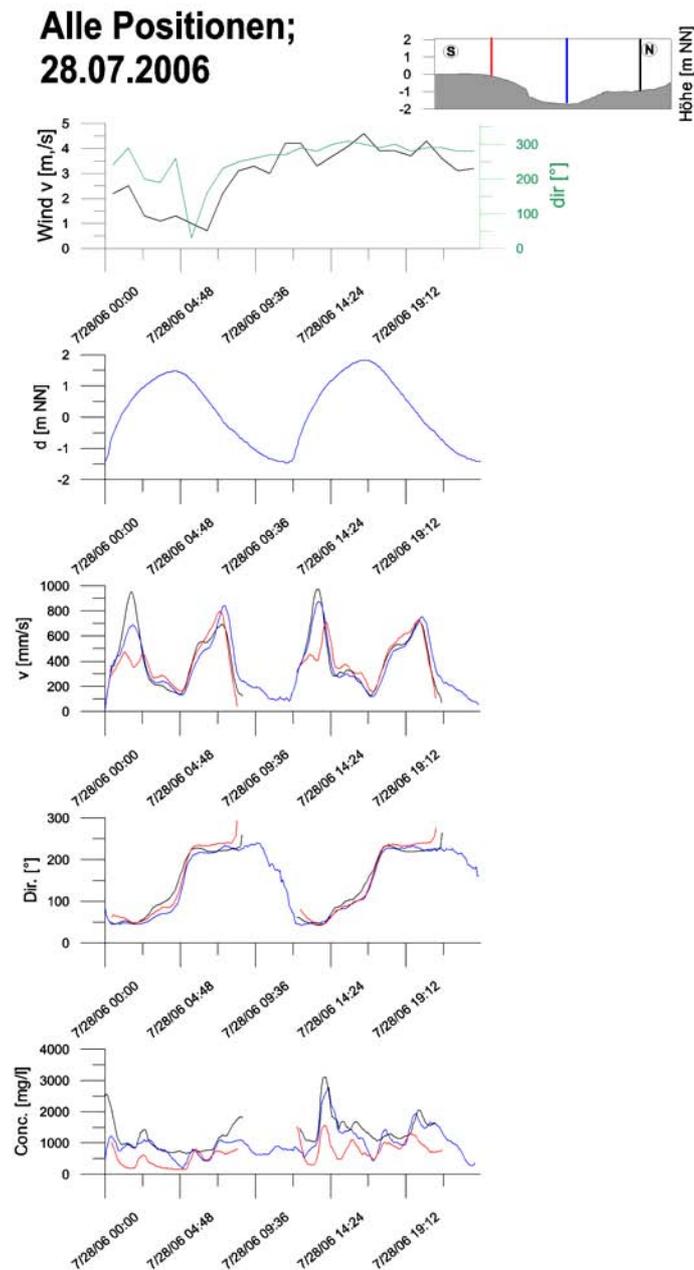


Abbildung 4.30: Darstellungen der Messwerte vom 28. Juli 2006

Im Folgenden (Abbildungen 4.31 bis 4.33) sind die Messwerte aller drei Profile vom 4. Juli abgebildet. Deutlich erkennbar ist wiederum der Verlauf der Strömungsrichtung, der Neufelder Rinne folgend. Generell werden an den Prielrändern höhere Sedimentkonzentrationen festgestellt als in der Prielmitte. Auch der Schwankungsbereich der Messwerte ist hier größer.

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

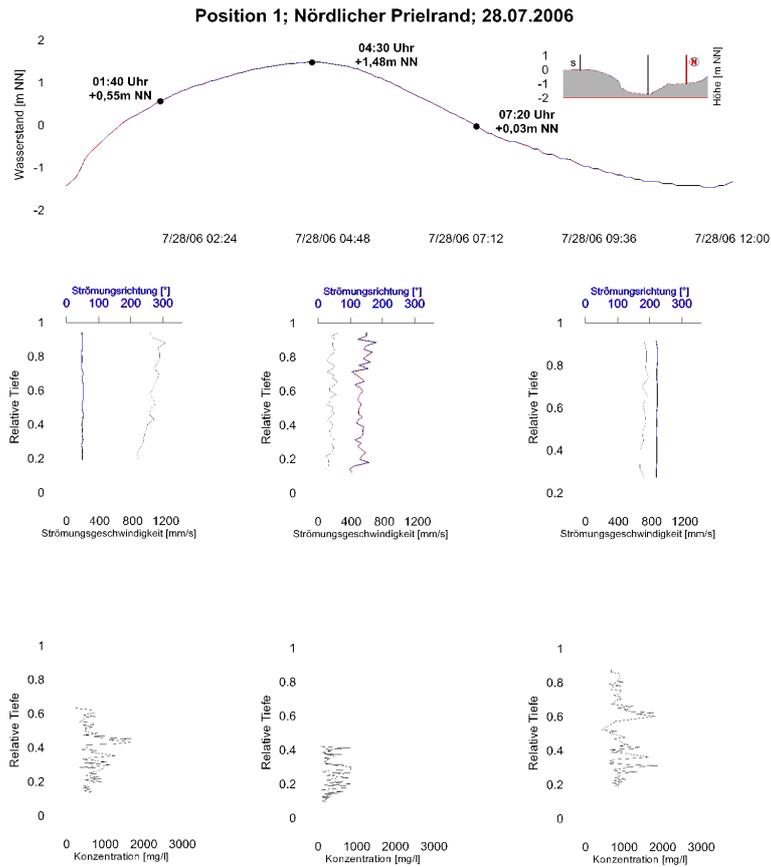


Abbildung 4.31: Messwerte am nördlichen Prielrand im Profil vom 28. Juli 2006

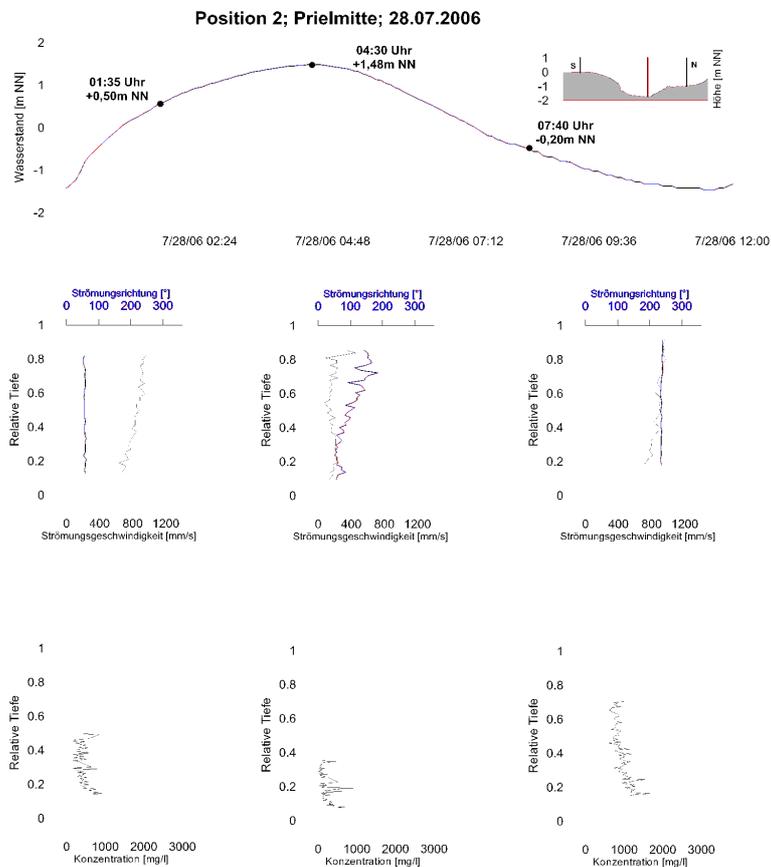


Abbildung 4.32: Messwerte in Prielmitte im Profil vom 28. Juli 2006

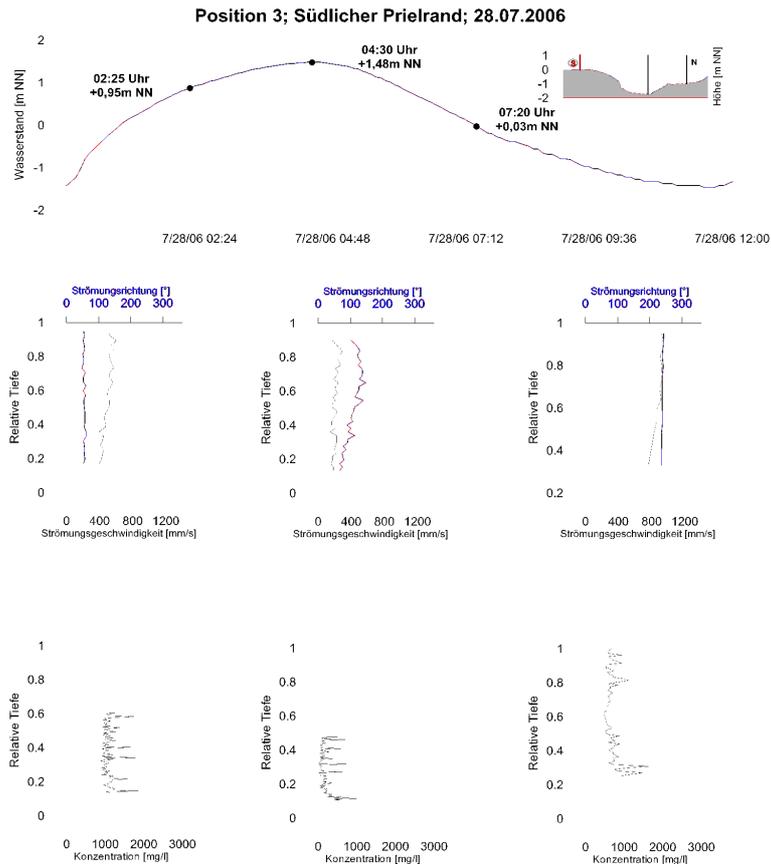


Abbildung 4.33: Messwerte am südlichen Prielrand im Profil vom 28. Juli 2006

In Abbildung 4.34 sind die während der Sturmflut am 1. November aufgezeichneten Messwerte dargestellt. Die Maxima in den Strömungsgeschwindigkeiten sind deutlich ausgedehnter gegenüber einer normalen Tide. Die Strömungsrichtungen entsprechen bei höheren Wasserständen nicht mehr der Achse der Neufelder Rinne. Die Sedimentkonzentrationen liegen auf einem normalen Niveau. Auch die zwei Peaks zum Zeitpunkt hoher Strömungsgeschwindigkeiten erreichen nicht den Betrag, der während niedrigerer Tide aufgezeichnet wurde.

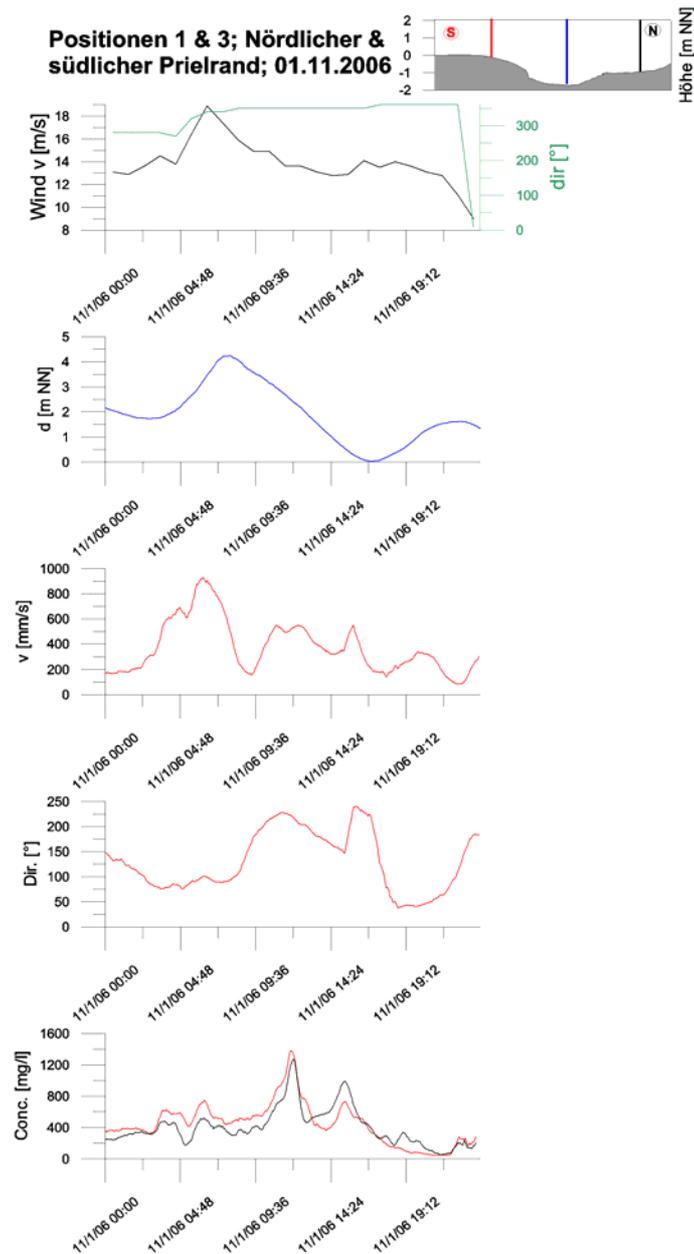


Abbildung 4.34: Darstellung der Messergebnisse vom 01.11.2006

In Abbildung 4.35 ist noch einmal deutlich die gegenüber einer normalen Tide veränderten Strömungsrichtung während der Flut erkennbar. Auch die Strömungsgeschwindigkeiten zu dieser Zeit sind erhöht, was sich allerdings nicht in einer größeren Sedimentkonzentration zeigt.

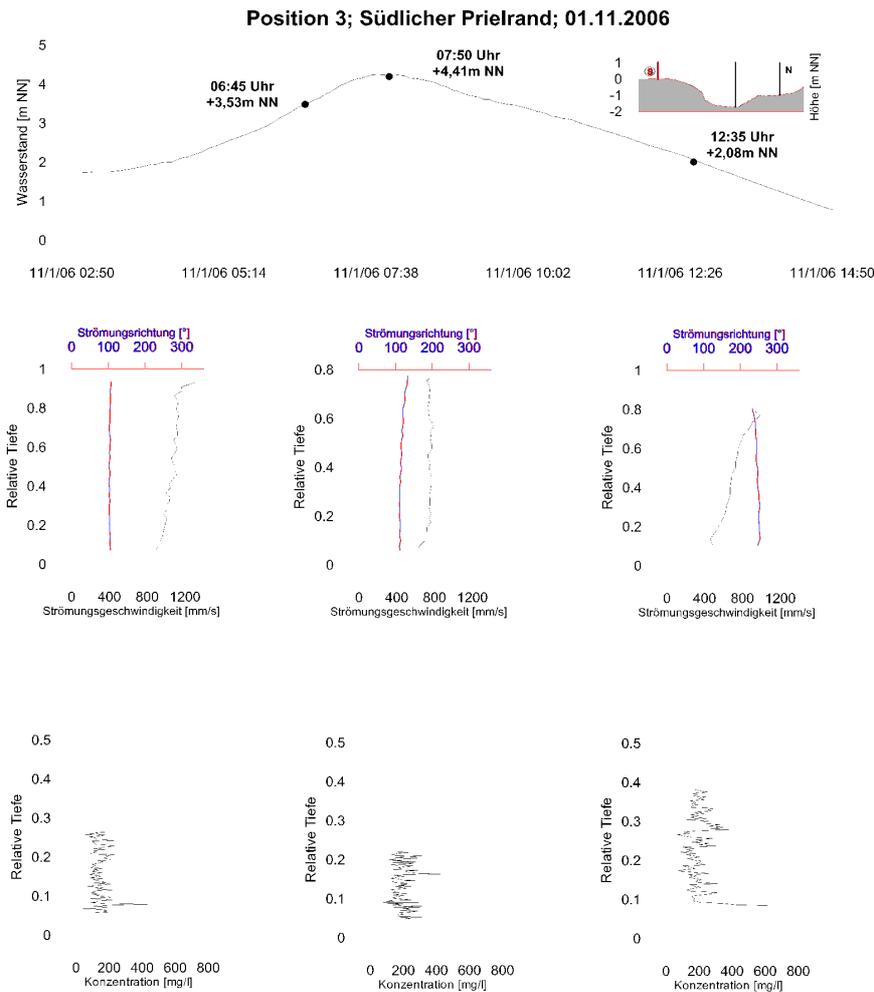


Abbildung 4.35: Darstellung der Messergebnisse über die relative Tiefe

Aus den aufgezeichneten und ausgewerteten Sedimentkonzentrationen und den Strömungsparametern wurde der residuelle Transport berechnet. Die Vorgehensweise ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Berechnung des residuellen Transports

Datum	Uhrzeit	u [m/s]	c [kg/m ³]	q [kg/m ² ·s]	d [m]	Q [kg/s·m]	Dir.
16.08.2006	03:45	0,74	0,478	0,35	2,23	0,789	55
16.08.2006	03:50	0,80	0,467	0,37	2,28	0,853	55
16.08.2006	03:55	0,85	0,468	0,40	2,35	0,936	56
16.08.2006	04:00	0,87	0,455	0,40	2,40	0,957	55

Für ausgewählte Messungen in der Prielmitte wurden über den zeitlichen Verlauf der Tide die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Sedimentkonzentrationen zusammengestellt. Aus der Multiplikation beider Parameter wurde die Transportrate in der Einheit [kg/m²·s] in der Prielmitte berechnet. Durch Berücksichtigung der Wassertiefe wurde die Transportrate auf einer bestimmten Breite pro Zeit-

einheit berechnet. Die Strömungsrichtung gibt an, in welche Richtung der Transport erfolgt, wobei die Richtung durch die Achse der Neufelder Rinne und die Tideverhältnisse bestimmt wird (s.o.). Geringe Abweichungen von der Hauptströmungsrichtung wurden akzeptiert und ebenfalls dem entsprechenden Transport zugewiesen. Über den Verlauf mehrerer Tiden konnte so die Sedimentmenge berechnet werden, die in Prielmittle transportiert wird. Durch eine Bilanzierung des transportierten Materials konnte der residuelle Transport abgeschätzt werden. Die Untersuchung ergab, dass der residuelle Transport während Ebbe überwog und daher über mehrere Tiden betrachtet Material aus der Rinne ausgetragen wurde. Gleiches gilt auch für die Randbereiche des Messquerschnittes. Auffällig war, dass die Menge des transportierten Materials von Tide zu Tide stark voneinander abweichen konnte, allerdings die Phasen mit hohem oder geringen Transport insgesamt ausgeglichen waren.

4.5 Interpretation der Messergebnisse

Aus den bisher im Rahmen dieses Projektes erfolgten Untersuchungen und Naturmessungen können bestimmte Schlüsse über die Morphodynamik des Neufelder Watts bzw. des Neufelder Sandes gezogen werden. Dabei finden die stationären Messungen, wie auch die Fächerecholotvermessungen Berücksichtigung. Die Ergebnisse fließen in die Modellerstellung ein und können helfen, das Systemverständnis der Hydro- und Morphodynamik im Untersuchungsgebiet zu verbessern.

Aus der Analyse vorliegender historischer Vermessungsdaten ging hervor, dass der Neufelder Sand zwar über lange Betrachtungszeiträume einer konstanten Entwicklung folgt, auf kleinen Zeitskalen jedoch zum Teil großen Schwankungen unterliegt. Es ist das Ziel, diese Veränderungen zu verstehen. Entsprechende morphologische Entwicklungen wurden durch die Fächerecholotmessungen dokumentiert.

Durch die Auswertung der Strömungsmessungen wird deutlich, dass die Neufelder Rinne das entscheidende Steuerungsinstrument für die Be- und Entwässerung des gesamten Wattkomplexes ist. Die tidebedingten Strömungen folgen auf der gesamten, durch die Messgeräte erfassten Breite der Achse der Rinne. Auch bei Wasserständen, die deutlich über der Oberkante des umliegenden Watts liegen, entspricht die Strömungsrichtung der Ausrichtung der Rinne. Lediglich bei sehr hohen Wasserständen – als Beispiel sei hier die Sturmflut vom 1. November genannt – weicht die aufgezeichnete Strömungsrichtung zunehmend von der sonst üblichen ab und die ansonsten scharf abgegrenzten Strukturen weichen einem fließenden Übergang. Während Ebbe und Flut sind die üblichen Strömungsmaxima festzustellen, die bei höheren Wasserständen zunehmend verwischen. Während normaler Tiden folgt den tidebedingten Strömungsmaxima zeitversetzt ein Maximum in der Konzentration suspendierter Sedimente.

Durch die Abschätzung des residuellen Transports wird deutlich, dass der Sedimenttransport während der Ebbe überwiegt. Ausgetragenes Material sedimentiert an der Ausfahrt der Neufelder Rinne wieder und bildet dort ein Ebbdelta.

Innerhalb der Neufelder Rinne fanden zwar Materialumlagerungen statt, insgesamt ist die Sedimentbilanz auf den untersuchten Flächen allerdings ausgeglichen. Aus der Rinne ausgetragenes Material stammt von den Wattflächen, was sich in den erhöhten Sedimentkonzentrationen an den Prielrändern zeigt.

Die Neufelder Rinne ist insgesamt lagestabil. Lediglich im Mündungsbereich finden horizontale Verschiebungen der Achse statt, die aber für die morphologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes von untergeordneter Bedeutung sind. Die Sedimentbilanz im Untersuchungszeitraum ist ausgeglichen. Unmittelbare Auswirkun-

gen von Extremereignissen auf die Morphologie konnten im Betrachtungszeitraum nicht ausgemacht werden.

Der Sedimenttransport ist primär durch die Tidedrömung geprägt. Triftströmungen oder seegangsinduzierte Strömungen sind erst bei extremen Wetterlagen zu erkennen. Im untersuchten Messquerschnitt ist die Wirkung von seegangsinduzierten Strömungen begrenzt, da nur bei erhöhten Wasserständen nennenswerter Seegang bis dorthin vordringt, dann allerdings der vorhandene Wasserstand eine hohe dämpfende Wirkung besitzt.

Bei der Auswertung des Seegangsspektrums ist darauf zu achten, bei größeren Perioden eine sinnvolle Abgrenzung zu treffen, da ansonsten bedingt durch die Druckübertragungsfunktion das vorhandene Rauschen verstärkt wird und falsche Interpretationen möglich sind. Diese Abgrenzung ist jeweils in Abhängigkeit der jeweiligen Zeitreihe zu sehen und stark vom Wasserstand abhängig. Eine individuelle Beurteilung der Ergebnisse ist in jedem Fall notwendig.

Die auffälligste Veränderung in der Morphologie fand am nördlichen Prielufer statt. Hier konnte beobachtet werden, dass sich große Sedimentmengen aus Richtung des Klotzenloches auf die Neufelder Rinne zuschoben. Wie beschrieben erhöhten sich hier die Watthöhen um bis zu einen Meter. Diese Entwicklung stoppte jedoch an der Böschung und setzte sich nicht weiter fort.

5 Aufbau eines hydronumerisch-morphodynamischen Modells

5.1 Hydrodynamische Strömungsgleichungen

Die zur Modellierung von hydrodynamischen Fließgewässern heranzuziehenden Strömungsgleichungen sind allgemein akzeptiert und können verschiedenen Werken entnommen werden.

PASCHE ET AL. (2005) enthält die anerkannte Form der Flachwassergleichungen (2-dimensionales HN-Modell). Dabei sind die Beschleunigungskräfte und die Fließwiderstände durch Windreibung vernachlässigt, da sie bei den meisten Anwendungen in Fließgewässern unbedeutend sind.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u_i h)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial}{\partial x_i} (z_{wsp}) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[h \left(\frac{1}{\rho} \tau_{L,ij} + \frac{1}{\rho} \tau_{t,ij} - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \right) \right] - \frac{1}{h} \frac{\tau_{so,i}}{\rho}$$
Gl.5.1

mit:

- u = lokale Geschwindigkeitskomponente [m/s]
- h = lokale Wassertiefe [m]
- τ_L = laminare Schubspannungskomponente [N/m²]
- τ_t = turbulente Schubspannungskomponente [N/m²]
- $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ = Dispersionsterme [m³/s²]
- τ_{so} = Sohlschubspannungskomponente [N/m²]
- ρ = Rohdichte Wasser [kg/m³]
- $i, j = 1, 2$ (x-, y-Komponente und Laufindex der Einsteinschen Summenkonvention)

Zur Schließung des Gleichungssystems werden für alle drei Ansätze empirische Parameter benötigt. Dabei stellt für das 1-dimensionale HN-Modell das Reibungsgefälle I_R bzw. der Fließwiderstand, dargestellt über die Sohlschubspannung τ_{so} die wichtigste empirische Größe dar. Beim 2-dimensionalen Modell kommt noch die turbulente Schubspannung und die durch Sekundärströmungen ausgelöste Dispersion hinzu.

Zur Quantifizierung des Reibungsgefälles bzw. der Sohlschubspannung wird ein empirischer Parameter verwendet, der sämtliche Fließverluste zusammenfasst. Dabei kann das Fließgesetz von Darcy-Weisbach-Gesetz (DW-Formel) zugrunde gelegt werden:

$$I_R = \frac{1}{k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}} \frac{Q^2}{A^2}$$
Gl.5.2

$$\tau_{so,i} = \frac{\rho g}{k_{St}^2 h^{1/3}} u_i \sqrt{u_i^2 + u_j^2}$$
Gl.5.3

mit

- λ = Darcy-Weisbach-Koeffizient [-]
- k_{St} = Strickler-Beiwert [m^{1/3}/s]
- g = Erdbeschleunigung [m/s²].

Die DW-Formel kann über einen physikalisch-begründeten Ansatz hergeleitet werden, weshalb ist der eingeführte Widerstandsbeiwert λ dimensionsrein ist. Unter Verwendung der Grenzschichttheorie lassen sich physikalisch basierte Gleichungen entwickeln, die den Fließwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von direkt in der Natur bestimmbaren Strömungsparametern oder äquivalenten Größen darstellen. Auf diese Weise lassen sich nahezu alle relevanten Fließwiderstände beschreiben.

Bei der Modellierung der turbulenten Schubspannung τ_t in 2-dimensionalen HN-Modellen werden in der Regel Modelle eingesetzt, die auf den Wirbelviskositätsansatz von Boussinesq zurückgreifen:

$$\tau_{t,ij} = \rho \left(\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad \text{Gl.5.4}$$

mit: k = turbulente kinetische Energie [m^2/s^2]
 ν_T = turbulente Viskosität [m^2/s]
 δ_{ij} = Kronecker Delta [-].

Die einfachsten Modelle gehen wiederum davon aus, dass die Wirbelviskosität ν_T durch einen konstanten Parameter darstellbar ist. Dieser Ansatz liefert in Fließgewässern gute Ergebnisse. Jedoch variiert die Wirbelviskosität von Strömungssituation zu Strömungssituation, so dass dieser Parameter nur durch eine Kalibrierung zuverlässig bestimmt werden kann. Da sich die Wirbelviskosität sowohl auf den Wasserstand als auch auf die Strömung auswirkt, kann bei einer Kalibrierung auf Basis von gemessenen Wasserständen nicht ausgeschlossen werden, dass trotz falsch geschätzter Wirbelviskosität und Fließwiderstandsbeiwert die Wasserstände richtig wiedergegeben werden, wenn sich die Fehler gegenseitig aufheben. Bei anderen Abflusszuständen kann sich dieser Effekt nicht mehr einstellen und das Berechnungsergebnis wird falsch.

Zur Überwindung dieser Schwäche in der Parameterschätzung von 2-dimensionalen HN-Modellen wurden analytische Gleichungen aufgestellt, mit denen die Abhängigkeit der Wirbelviskosität vom Strömungszustand und der Geometrie erfasst wird. In LIPPERT (2005) wurden gute Erfahrungen mit einer Kombination aus Prandtlischen Mischungswegansatz und Sohlschubspannungsansatz gemacht.

$$\nu_{t,ij} = l_m^2 \left[2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_j}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_j}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} + e^* \sigma_t h \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad \text{Gl.5.5}$$

mit: $e^* \sigma_t = 0,15$

Die Mischungswegbreite l_m kann unter der Annahme einer freien Scherschicht gemäß RODI, (1984) zu

$$l_m = 0,09 b_s \quad \text{Gl.5.6}$$

abgeschätzt werden, wobei b_S die mittlere Breite der freien Scherschicht darstellt (Free-Shear-Layer-Approach). In einem Ansatz von SMAGORINSKY, (1963) wird die Mischungswegbreite in Abhängigkeit zur Netzgeometrie gesetzt.

$$l_m = 0,197\Delta \quad \text{Gl.5.7}$$

mit: Δ = äquivalente Seitenlänge des Diskretisierungselementes

Damit trägt dieser Ansatz dem Einfluss der Netzgeometrie auf die Größe der turbulenten Schubspannung Rechnung, welche gemäß MALCHEREK, (2001) auf numerische Diffusion zurückzuführen ist.

Da 2-dimensionale HN-Modelle dreidimensionale Effekte nicht direkt erfassen, müssen sie über empirische Ansätze integriert werden. Entweder werden sie durch einen Zuschlag in der Wirbelviskosität oder durch Formulierung einer analytischen Beziehung für die Dispersionsterme $\overline{u_i u_j}$ berücksichtigt.

5.2 Morphodynamische Grundlagen

Durch Flut- und Ebbeströmungen, wie sie kontinuierlich wiederkehrend im Verlauf der Tide herrschen, unterliegt die Morphologie des Wattenmeeres ständigen Veränderungen. Unter bestimmten Bedingungen wird an der Sohle befindliches Material erodiert und mit dem Fluid transportiert, bis es durch eine verminderte Strömungsintensität z.B. in den Kenterphasen nicht mehr in Schwebelage gehalten werden kann und anderenorts sedimentiert. Hinzu kommt der Einfluss des Seegangs, der durch die vorhandenen Orbitalbewegungen der Wasserteilchen und möglicherweise entstehenden Turbulenzen ebenfalls dort zu Erosionen führen kann, wo dessen Einfluss bis an die Sohle reicht.

Transportprozesse von kohäsionslosen Sedimenten können heute mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden. Einen im ingenieurtechnischen Bereich häufig angewandten Ansatz für den Beginn der Sedimentbewegung stellt die Lösung von SHIELDS (1936) dar. In diesem und anderen Ansätzen ist ein Korn in einem ebenen Bett Kräften aus dem Fluid (Trägheit, Reibung usw.) und der Gravitation ausgesetzt. Das in Abbildung 5.1 dargestellte Diagramm zeigt einen Zusammenhang zwischen dem Korndurchmesser d und der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Ist die Kornfraktion des Sediments bekannt, so lässt sich die zugehörige kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_{*c} bestimmen, bei der ein Erosionsbeginn zu verzeichnen sein wird.

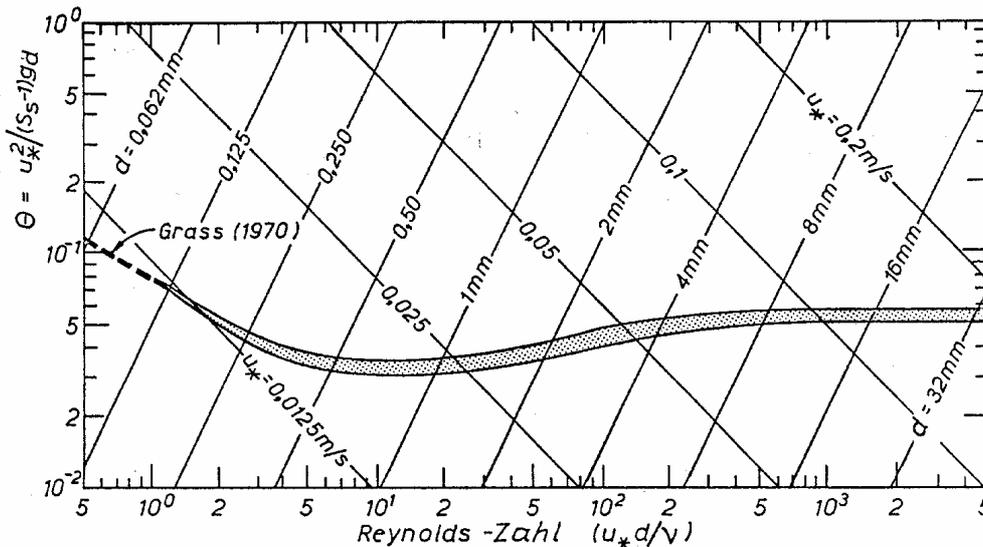


Abbildung 5.1: SHIELDS-Diagramm (SHIELDS, 1936)

Des Weiteren existiert für kohäsionslose Sedimente eine Vielzahl weiterer Ansätze, die die Berechnung der Geschiebefracht einer Gewässersohle als so genannte Geschiebetransportrate in dimensionsloser Form erlauben, die zwar für stationär-gleichförmige Strömungen entwickelt wurden, aber auch im Tidebereich zu brauchbaren Ergebnissen geführt haben. Hier seien z.B. die Formulierungen von EINSTEIN (1950), MEYER-PETER/MÜLLER (1948), BAGNOLD (1956) und ENGELUND/FREDSØE (1974) genannt.

Im Gegensatz dazu stellt sich die genaue Beschreibung der Transportprozesse von kohäsiven Sedimenten als deutlich schwieriger dar; u.a., da kohäsive Sedimente im Gegensatz zu nicht-kohäsiven Sedimenten nicht als einzelne Körner, sondern als größere Elemente, die ein Spektrum der Kornverteilung über mehrere Korndurchmesser beinhalten, in Suspension transportiert werden (RAUDKIVI, 1982). Die einzelnen Bestandteile des Sediments werden bei geringen Distanzen nicht mehr unabhängig voneinander transportiert, sondern beeinflussen sich über Kräfte der Anziehung und Abstoßung gegenseitig. Ursache sind Tonminerale, die in wechselnden Anteilen in den Sedimenten in Suspension vorhanden sind. Dadurch zeigen Tone und Tonsuspensionen in der Praxis oft unerwartete rheologische Eigenschaften (LAGALY, 1988). Schon bei einem Gehalt von fünf bis zehn Massenprozent wird die durch die Tonminerale entstehende Kohäsion für die Transporteigenschaften des Sedimentes von großer Bedeutung (DYER, 1986). So ändern sich ab bestimmten Sedimentkonzentrationen die rheologischen Eigenschaften des Fluid-Sediment-Systems derartig, dass durch die vorhandenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen kohäsiven Partikeln das Fließen des Fluids von einem NEWTONischen Verhalten (einzelne, voneinander unabhängig transportierte Partikel) zu einem pseudo-plastischen, nicht-NEWTONischen Verhalten übergeht. GÜVEN (1992) erklärt dieses Verhalten durch so genannte Flockenbildung der kohäsiven Bestandteile des Wattersediments. Die kohäsiven Teile bilden untereinander ein dreidimensionales Netzwerk, wodurch die Viskosität des Fluid-Sediment-Systems ansteigt.

Des Weiteren ist ein natürliches kohäsives Sediment sehr komplex zusammengesetzt, wodurch die mathematische Erfassung erschwert wird. Es besteht aus Kolloiden (in Dispersion), Tonmineralien (mit Durchmessern kleiner 5 μm), Sand, anderem körnigen und organischen Material in einer wässrigen Umgebung mit variierendem pH-Wert, sich ändernder Temperatur und Ionenstärke. Es erscheint als ausflockende Suspension mit Feststoffkonzentrationen von wenigen ppm bis annähernd einer Konzentration, die der sich ausbildenden Sohle entspricht. Zudem ändert sich bei bindi-

gen Böden mit steigendem Wassergehalt die Plastizität von fest über plastisch zu flüssig.

Ein weiterer, die mathematische Erfassung erschwerender Faktor ist der Einfluss von Organismen und organischem Material auf die verschiedenen Transportprozesse. Daneben finden sich in einer lebenden Sohle ein starkes chemisches Gefälle, adhäsive Substanzen, Gasblasen sowie Rillen, Kanäle bzw. Röhren von Bodenorganismen, welche einen Einfluss auf die Erosionseigenschaften des Bodens haben (MONTAGUE, 1986).

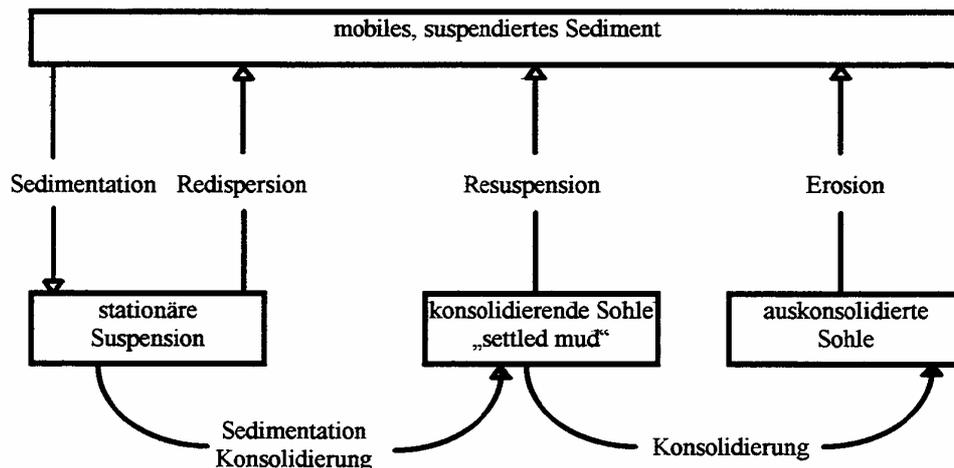


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Transportvorgänge von der mobilen Suspension bis zur auskonsolidierten Sohle (PARKER, 1986)

Wattsedimente sind im Verlauf der Gezeiten in unterschiedlichsten physikalisch-chemischen Bindungen vorzufinden. Der Grund dafür liegt in den sich periodisch verändernden Seegangs- und Strömungsverhältnissen während der aufeinander folgenden Tiden. VAN RIJN, (1993) unterscheidet dabei folgende Transportprozesse:

- Absinken/Absetzen (*settling*)
- Ablagerung (*deposition*)
- Konsolidierung
- Erosion

Diese Unterscheidung ist u.a. auch bei PARKER (1986) wieder zu finden. PARKER (1986) entwickelte ein Modell, welches die Vorgänge bzw. Zusammenhänge aufzeigt, die vom frei beweglichen (mobilen) Sediment bis hin zur auskonsolidierten Sohle auftreten können. Eine schematische Darstellung dieses Modells ist in Abbildung 5.2 zu finden. Ein wichtiger Aspekt, der hieraus entnommen werden kann, ist der zyklische Transfer von Material.

In Abschnitten höherer Strömungs- und Wellenintensitäten kann das Sediment in Schwebelage gehalten werden, und es bewegt sich frei unter dem Einfluss der aus der Wasserbewegung entstehenden Kräfte. PARKER (1986) spricht hier von einer mobilen Suspension.

Hat sich die Turbulenzintensität der Strömung so verringert, dass die auf die Sedimentpartikel wirkenden Gravitationskräfte nicht mehr ausgeglichen werden können, beginnt das Sediment abzusinken. Aufgrund der zwischen den kohäsiven Tonpartikeln wirkenden Anziehungskräfte formen diese mit zunehmender Konzentration durch den Absetzprozess lose Ansammlungen, die im Allgemeinen als Flocken bezeichnet werden. Mit zunehmender Flockengröße steigt auch die Sinkgeschwindigkeit.

keit im Vergleich zu einem einzelnen Teilchen an. Im weiteren Verlauf des Absetzvorgangs beginnen die Flocken oberhalb einer bestimmten Konzentration sich gegenseitig zu behindern. Die Sinkgeschwindigkeit nimmt deutlich ab. Ist dadurch keine horizontale Bewegung, sondern nur noch ein vertikales Absetzen mit stark verminderter Sinkgeschwindigkeit mehr möglich, bezeichnet PARKER (1986) diesen Abschnitt des Transportprozesses als stationäre Suspension.

Durch Strömungen und Welleneinwirkungen oder durch infolgedessen induzierte Turbulenzen können Flockenansammlungen wieder aus der stationären Suspension in die mobile Suspension herausgetragen werden. Das Material, welches die Sohle erreicht, wird unter seinem Eigengewicht immer weiter verdichtet, bis eine zunächst Kartenhaus-ähnliche Struktur unter der zunehmenden Auflast zusammenbricht. Unterstützt wird dieser Vorgang u.a. durch die Anziehungskräfte, die zwischen den kohäsiven Bestandteilen des Wattsedimentes herrschen. Das in den Hohlräumen eingeschlossene Porenwasser wird während dieses Vorgangs herausgedrückt. Die Verdichtung des abgelagerten Sedimentes durch Eigengewicht unter Abscheiden des Porenwassers wird als Konsolidierung bezeichnet.

Die Konsolidierung der jüngeren Ablagerungen kann solange fortschreiten, wie Strömungen und Wellen und daraus resultierende Turbulenzen nicht stark genug sind, um das Sediment zu erodieren. Dieses schließt nicht nur die Kenterphase zwischen Flut- und Ebbeströmungen ein, sondern auch die Zeit, in der das Watt während der Ebbphase nahezu trockengelegt wird. Die beginnende Konsolidierung des kohäsiven Sedimentes führt zu einer gewissen Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Erosion, so dass ein Teil des abgelagerten Sedimentes auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen nicht resuspendiert werden kann und die Sohlmächtigkeit in geringem Maß zunimmt. Diesen Bereich erhöhter Erosionsstabilität bezeichnet PARKER (1986) als *settled mud* bzw. als *settled bed*, also einen sich absetzenden Schlamm oder Schlick. VAN RIJN (1993) definiert diesen Schlick als Fluid-Sediment-Gemisch bestehend aus Salzwasser, Sand, Tonmineralien und organischem Material. Dieser Teil der Ablagerung kann auskonsolidieren, bis die dichteste Lagerung erreicht ist. Diese erosionsstabileren Sohlen können jedoch durch ausreichend große Scherbeanspruchungen erodiert und resuspendiert (*entrainment*) werden. Damit schließt sich der o.g. Materialkreislauf.

5.2.1 Sedimenttransport

Feststoffe werden in der Wassersäule angereichert, wenn ihre Dichte mit der von Wasser vergleichbar ist und sie sich dadurch nicht absetzen oder wenn schwerere sinkfähige Partikel durch Turbulenz vom Boden aus aufwärts transportiert bzw. in Schwebe gehalten werden.

Infolge unterschiedlicher Konzentrationen besitzen Schwebstoffsuspensionen verschiedene Eigenschaften. So wird bei geringen Konzentrationen (< 1 g/l) das Absinkverhalten der enthaltenen Feststoffe nicht beeinflusst, während bei höheren Konzentrationen der Effekt des „Hindered Settling“ an Bedeutung gewinnt. Außerdem verändern sich mit höherem Feststoffgehalt auch die rheologischen Eigenschaften und die Wirkung auf die Turbulenzverhältnisse. Bei Konzentrationen unter 100 g/l besitzt das Fluid noch Newton'sche Eigenschaften und die Turbulenz wird je nach Höhe des Feststoffgehalts mehr oder weniger stark gedämpft. Steigt die Konzentration über 100 g/l ist keine Turbulenz mehr vorhanden, da das Fluid träger ist. Diese Art der Suspension wird als Fluid Mud bezeichnet und tritt in sohlennahen Bereichen auf. Das Material wird dann nur durch eine Scherströmung infolge des Sohlgefälles transportiert.

Die Sinkgeschwindigkeit einzelner Sedimentteilchen kann durch die Anwesenheit weiterer Partikel verhindert werden. Betrachtet man eine kleine Partikelgruppe mit geringen Abständen zueinander, die in einem Fluid absinkt, ist ihre Sinkgeschwindigkeit größer als die einzelner Teilchen, da sich darin enthaltene absinkende Partikel im Strömungsschatten direkt vor ihnen absinkender befinden können. In Suspensionen mit hoher Sedimentkonzentration behindert jedoch rückströmendes Fluid eines fallenden Partikels das Absinken nachfolgender Teilchen und führt formell zu einer Reduktion der Sinkgeschwindigkeit. Dieser Effekt des hindered settling kann z.B. nach RICHARDSON & ZAKI (in: VAN RIJN, 1993) beschrieben werden.

Der Transport von Schwebstoffen in der Wassersäule wird durch drei Teilprozesse bestimmt (MAERKER, 2006):

1. Durch die Strömung wird das Material advektiv transportiert.
2. Feststoffe besitzen im Falle einer gegenüber Wasser höheren Dichte eine eigene Vertikalgeschwindigkeit.
3. Konzentrationsunterschiede bewirken eine diffusive Bewegung der Partikel.

Advektion ist der Transport von Stoffen mit dem sich bewegenden Wasser. Dabei besitzen die Partikel die gleiche Geschwindigkeit wie die Wassermoleküle. Bei Partikeln mit einer höheren Feststoffdichte als der des Trägerfluids unterscheidet sich die Geschwindigkeit, mit der die Inhaltsstoffe mitgeführt werden, von der Strömungsgeschwindigkeit u um die Sinkgeschwindigkeitskomponente w_c . Die Triebfeder der Diffusion sind Konzentrationsunterschiede. Teilchen bewegen sich dabei durch die Brown'sche Molekularbewegung von Orten großer zu Orten niedriger Konzentration. Dadurch gleichen sich Unterschiede in der räumlichen Verteilung von Inhaltsstoffen auf Dauer aus. Grundlage der mathematischen Beschreibung ist das Fick'sche Gesetz. In einem Fluid bewegt sich ein Stoff der Konzentration c in Richtung des negativen Konzentrationsgradienten. Führt man die drei Bewegungskomponenten zusammen, erhält man eine Differentialgleichung zur mathematischen Beschreibung des Schwebstofftransports. Dabei werden die diffusiven Flüsse in der Bilanzierung der Gesamtflüsse in dem Kontrollvolumen berücksichtigt.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(c \vec{u}_c - K \text{grad} c) = 0 \quad \text{Gl.5.8}$$

Da in der Modellierung des Schwebstofftransportes Wasser als Trägerfluid fungiert, kann aus dieser Gleichung die Kontinuitätsgleichung für kompressible Fluide eliminiert werden. Damit folgt für die Transportgleichung:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial w_c c}{\partial z} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}. \quad \text{Gl.5.9}$$

Zur Lösung der Transportgleichung sind Randbedingungen für die Wasserspiegeloberfläche und die Gewässersohle erforderlich. Durch die freie Oberfläche sollen die Sedimente die Wassersäule nicht verlassen. Der Massenfluss durch diese Grenzfläche ist also null. Für die horizontale Oberfläche gilt damit:

$$\left(\left(w_c + \frac{\partial z_s}{\partial t} \right) c - K \frac{\partial c}{\partial t} \right) \Big|_s = 0 \quad \text{Gl.5.10}$$

Zwischen sich in der Wassersäule befindlichen Schwebstoffen und der Sohle treten Wechselwirkungen in Form von Depositions- und Erosions- bzw. Resuspensionsflüssen auf. Die Bilanzierung des Gesamtflusses an der Sohle ist also nicht zwingend null. Für eine horizontale Gewässersohle ergibt sich damit als Randbedingung:

$$\left(w_c c - K \frac{\partial c}{\partial z} \right)_B = \phi_{ero} + \phi_{dep} \quad \text{Gl.5.11}$$

Der Sedimentationsfluss lässt sich als das Produkt aus sohnaher Konzentration und Sinkgeschwindigkeit ausdrücken. Damit vereinfacht sich die Randbedingung für die Sohle noch einmal.

$$\phi_{dep} = w_c c_B \quad \text{Gl.5.12}$$

$$\phi_{ero} = \left(-K \frac{\partial c}{\partial z} \right)_B \quad \text{Gl.5.13}$$

Formulierungen zur Bestimmung der Stärke der Erosion sind zumeist mit einer kritischen Erosionsschubspannung assoziiert. Der bekannteste Ansatz wurde von Partheniades formuliert. Er ist so gestaltet, dass erst bei Überschreiten einer kritischen Sohlschubspannung Material erodiert wird.

$$\phi_{ero} = \begin{cases} M_{res} \left(\frac{\tau_B}{\tau_{ce}} - 1 \right), & \tau_B \geq \tau_{ce} \\ 0, & \tau_B < \tau_{ce} \end{cases} \quad \text{Gl.5.14}$$

Hierin ist M_{res} eine Erosionskonstante, die stark vom Konsolidierungsgrad des Bodens abhängt und üblicherweise aus einem Konsolidierungsmodell folgt. Anhand dieser Größe kann eine Kalibrierung des Erosionsflusses erfolgen. Die kritische Erosionsschubspannung τ_{ce} kann man in erster Näherung nach dem Bewegungsbeginn nach Shields bestimmen. Jedoch ist sie in der Regel größer als die Shieldsspannung, da bei der Erosion feinen Bodens noch zusätzlich die kohäsiven Kräfte und eventuell haltenden biologische Kräfte überwunden werden müssen.

Die Turbulenz beeinflusst das Transportgeschehen, indem sie auch schwere Partikel, deren Dichte größer als die des Trägerfluids ist, vom Boden in die Wassersäule befördert. Wie bei den Reynoldsgleichungen zur Modellierung des Strömungsgeschehens kann die Wirkung der Turbulenz bei der Transportberechnung ebenfalls durch ein Turbulenzmodell erfasst werden. In diesem Fall lässt sie sich als Erhöhung der Diffusivität beschreiben. Die Transportgleichung liest sich damit.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \text{grad}c + \frac{\partial w_c c}{\partial z} = \text{div}K_t \text{grad}c \quad \text{Gl.5.15}$$

Hierin ist K_t die turbulente Diffusivität, die vom jeweiligen Strömungszustand abhängt. Aus Experimenten konnte geschlossen werden, dass das vertikale Profil der turbulenten Wirbelviskosität ν_t ähnelt. Es kann durch die nachfolgende Gleichung beschrieben werden.

$$K_t = \frac{\kappa}{Sc} u_* z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad \text{Gl.5.16}$$

mit:

- κ = von Kármán-Konstante (=0.41)
- Sc = turbulente Schmidtzahl
- u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit
- z = Tiefenkoordinate
- h = Wassertiefe

Dabei wird mit der turbulenten Schmidtzahl Sc das Verhältnis der turbulenten Wirbelviskosität zur turbulenten Diffusivität beschrieben.

$$Sc = \frac{\nu_t}{K_t} \quad \text{Gl.5.17}$$

Um die beim Schwebstofftransport auftretende Breite des Korngrößenspektrums in der Modellierung zu erfassen, kann man in Abhängigkeit von der Partikelgröße Schwebstoffklassen definieren und jeder Klasse eine charakteristische Sinkgeschwindigkeit zuweisen. Im Fall der Berechnung des Transports mehrerer Feststofffraktionen ist die Transportgleichung für jede Klasse k einzeln zu lösen.

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \bar{u} \text{grad}c_k + \frac{\partial w_c^k c_k}{\partial z} = \text{div}K \text{grad}c_k . \quad \text{Gl.5.18}$$

Führt man die Teilgebiete des Sedimenttransportes in einer Bilanz zusammen, erhält man eine Gleichung für die Entwicklung der Sohlhöhe über die Zeit. Diese wird als Bodenevolutionsgleichung bezeichnet und besitzt unter Berücksichtigung der Porosität n folgende Form:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \text{div} \frac{\vec{q}_s}{1-n} = \frac{\phi_{dep} - \phi_{ero}}{\rho_s(1-n)}. \quad \text{Gl.5.20}$$

Die Sinkgeschwindigkeit der Feststoffe wird zur Lösung der Schwebstofftransportgleichung benötigt. Sie hängt im wesentlichen von der Größe, Dichte und Form der Schwebstoffe ab. Da kohäsive Partikel dazu neigen, nach Zusammenstoßen Agglo-

merate zu bilden, wird dadurch auch ihre Sinkgeschwindigkeit beeinflusst. Man findet verschiedene mathematische Beschreibungen für Sinkgeschwindigkeiten kohäsiver Schwebstoffe unterschiedlicher Komplexität. Im wesentlichen wird zwischen Sinkgeschwindigkeitsparametrisierung und Formulierungen in Kombination mit einem Flockungsmodell unterschieden. Die dabei auftretenden Formen berücksichtigen unterschiedlichste Aspekte kohäsiver Sedimente und des Flockungsvorgangs. In Sinkgeschwindigkeitsparametrisierungen wird die Flockulation nicht direkt beschrieben. Es werden nur Abhängigkeiten zwischen der Sinkgeschwindigkeit und bestimmten sinkgeschwindigkeitsbeeinflussenden Größen betrachtet, die anhand empirischer Untersuchungen gefunden wurden. Bei der Verwendung von Flockulationsmodellen wird hingegen die Evolution der Flockengröße explizit modelliert und mit einem Sinkgeschwindigkeitsansatz kombiniert.

5.2.2 Einfluss der Tide auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden

Mit dem Einlaufen der Tidewelle in den Vorlandbereich verringert sich die im Seebereich (Tief) herrschende Strömungsgeschwindigkeit des Flutstroms (Abb. 5.3, Pkt. 1), so dass sich mitgeführte Schwebstoffteilchen absetzen können (Abb. 5.3, Pkt. 2 und 3).

Der Ebbestrom ist in der Regel zu schwach, um bereits abgelagerte Schwebstoffteilchen zu resuspendieren. Gefälleströmungen, die beim „Leerlaufen“ des Watts entstehen, können diese jedoch in tiefer gelegene Bereiche hineintransportieren (Abb. 5.3, Pkt. 4 und 5). Infolge der großen Wassertiefen in diesen Bereichen können die Schwebstoffteilchen bis zum Einsetzen der nächsten Flut nicht zum Boden absinken (Abb. 5.3, Pkt. 6) und werden während der nächsten Flutstromzeit wieder auf das Watt transportiert (Abb. 5.3, Pkt. 7). Sinkt es dort ab, wurde es während einer Tide die Strecke 3 bis 8 landeinwärts bewegt (SRU, 1980, S. 28).

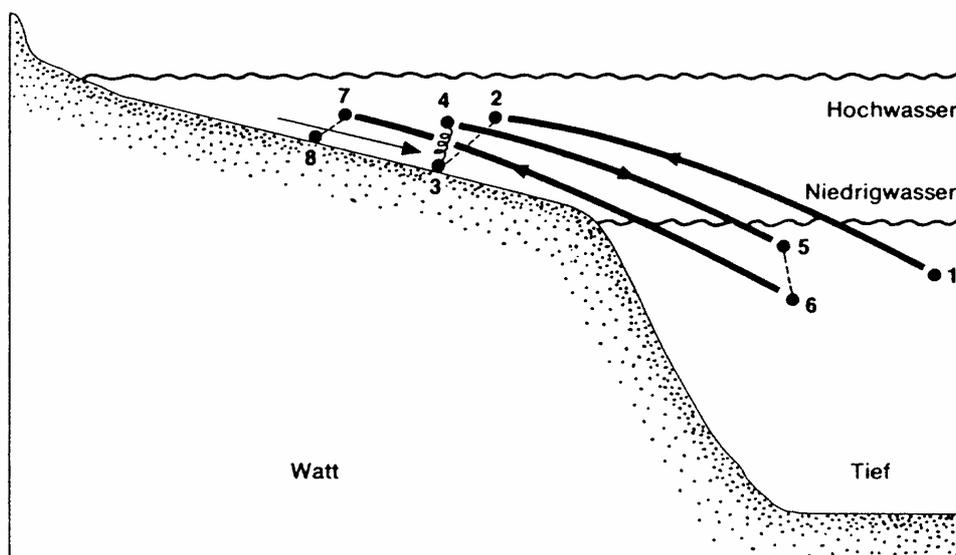


Abbildung 5.3: Transportstrecke eines Schwebstoffteilchens (nach HICKEL, 1979, in SRU, 1980)

Wird die für ein Schwebstoffteilchen transportkritische Geschwindigkeit unterschritten, so sedimentiert es nicht vertikal an einem Ort, sondern unterliegt dem so genannten *settling lag effect* und wird, bis es den Grund erreicht, noch in der Strömung mittransportiert. Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit v_1 , bei der noch eine Se-

dimentation eines Schwebstoffteilchens möglich ist und der Geschwindigkeit v_2 , die notwendig ist, um das Teilchen wieder vom Boden zu lösen, existiert der so genannte *scour lag effect* (mit: $v_1 > v_2$), der mit abnehmender Korngröße steigt. Je kleiner der Korndurchmesser des betrachteten Teilchens ist, desto geringer wird auch die Geschwindigkeit v_1 bei der es sedimentiert. Daher bleiben kleinere Teilchen eine größere Anzahl an Tiden in verschiedenen Wasserschichten in Schwebelage als solche mit größerem Korndurchmesser, bevor sie sich endgültig ablagern und erreichen somit verstärkt den deichnahen Vorlandbereich.

Die Strömungen während einer Tide erzeugen im halbtäglichen Wechsel sowohl Erosionen als auch Sedimentationen. Abbildung 5.4 zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten, Konzentrationen sowie die Transportart des Sedimentes während einer Tide.

Nach NICHOLS (1986) ist ein signifikantes Merkmal der zeitlichen Variationen einer Tide, dass das Maximum der Suspensionskonzentrationen dem Geschwindigkeitsmaximum der Strömungen meist um 30 Minuten bis 90 Minuten versetzt auftritt (ΔT_1). Ein weiterer zeitlicher Versatz ist zwischen dem Bereich verminderter Strömungsgeschwindigkeiten und der Sedimentation (ΔT_2) zu finden (Abb. 5.4). Die Strömung ist also erst nach gewisser Zeit derart beschleunigt, dass Material resuspendiert und durch Turbulenzen in obere Schichten der Strömung transportiert werden kann, als auch derart verzögert bis sich das suspendierte Material bei verminderter Strömungsintensität absetzt. Es sind demnach Prozesse, die durch einen vertikalen Austausch bzw. Sinkgeschwindigkeiten beschrieben werden.

Sedimentations- und Erosionsraten werden ebenfalls durch die halbmonatliche Ungleichheit der Tide beeinflusst. Von Nipptide zu Springtide nimmt der Tidehub langsam zu, und die Tideströmungen werden zusätzlich beschleunigt. Durch die vergrößerte Belastung der Sohle erhöht sich die Erosionsrate, und es wird mehr suspendiertes Material transportiert. Während der Nipptiden wird durch verminderte Strömungsgeschwindigkeiten weniger Material aus der Sohle resuspendiert.

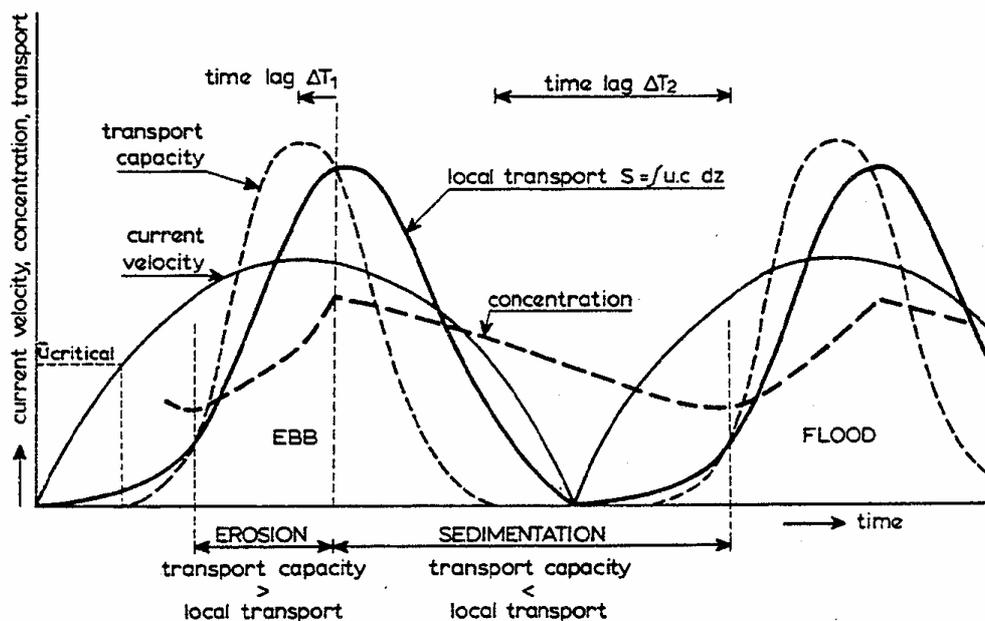


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen Suspensionskonzentration und Strömungsgeschwindigkeit mit den dazugehörigen Transportprozessen im Verlauf einer Tide (VAN RIJN, 1993).

5.2.3 Einfluss des Seegangs auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden

Unter der Einwirkung von Wellen ergeben sich Strömungsprobleme, die für jeden Ort und über die Tiefe variierend instationär sind. Zudem ändert sich die Richtung der Strömung periodisch, und das Wasser wird periodisch beschleunigt und verzögert. Anders als bei stationärer Strömung werden Sedimente unter Welleneinwirkung nicht erst bei anhaltender Überschreitung einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit, sondern durch die kurzzeitig, periodisch auftretenden entsprechend hohen Strömungsgeschwindigkeiten von der Sohle gelöst und in Suspension gebracht. Sie können daher auch bei sehr schwach ausgebildeten Strömungen transportiert werden, das heißt, dass das Sediment nicht durch die Transportgeschwindigkeit der Strömung in Bewegung gesetzt zu werden braucht (RAUDKIVI, 1982).

Wenn Wellen in Übergangs- oder Flachwasserbereiche einlaufen, beeinflusst die Sohle die Wellenbewegung. Effekte wie Shoaling, Refraktion, Sohlreibung, Perkolation und Prozesse wie Erosion, Transport in Suspension, Ablagerung und Konsolidierung sind für die Umgestaltung der Wellen als Resultat der Wellen-Boden-Interaktion von Bedeutung (HORIKAWA, 1977; YAMAMOTO/TAKAHASHI, 1985). In Abhängigkeit von den Wellenparametern (Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellensteilheit, Wassertiefe) als hydraulische Belastungsparameter und vom Konsolidierungsgrad des Bodenmaterials, das heißt von dessen Zusammensetzung und Vorgeschichte (KENDRICK/WATERS, 1987; VAN RIJN/LOUISSE, 1987) kann der Seegang eine Verflüssigung der oberen Schicht des Meeresbodens induzieren und somit eine dickflüssige, aus Schwebstoffen bestehende Schicht, eine so genannte *Fluid-Mud*-Schicht erzeugen (ZIDAN/LIN, 1989). Die Grenzwerte der Geschwindigkeit für das Auftreten einer *Fluid-Mud*-Schicht liegen nach Aussagen der Literatur deutlich über den Grenzen für den Beginn der Bewegung des einzelnen Sedimentpartikels (ZANKE, 1982; SLEATH, 1984).

Unter der dynamischen Belastung durch den Seegang treten gekoppelte Bewegungen der festen und der fluidalen Phase des marinen Bodens auf. Der Seegang erzeugt eine entsprechend der Wellenperiode oszillierende Schubspannung auf die Sedimentpartikel am Meeresboden. Die Orbitalbewegungen des Wassers setzen sich in der verflüssigten und unkonsolidierten Sedimentoberfläche (*Fluid Mud*) fort. Eine signifikante Dämpfung der Welle sowie eine erhöhte Resuspension des Sediments sind die Folgen. Die Orbitalamplitude innerhalb der Sedimentschicht wird durch die rheologischen Eigenschaften, also durch die Viskosität des Sediments und den Grad der Konsolidation beeinflusst. Folglich wird die Erosionsstabilität geschwächt und die Erosionsrate erhöht (YAMAMOTO/TAKAHASHI, 1985).

5.2.4 Sedimentation und Erosion

Transportprozesse von Schwebstoffen, die quantitativ beschrieben werden sollen, beinhalten Sedimentanhäufungen, Absetzvorgänge, Sedimentablagerungen, Konsolidierung, Erosion und dispersiven Transport. Diese Vorgänge werden in einem mathematischen Modell gewöhnlich durch Quell- und Sinkterme sowie Terme, die den Transport wiedergeben, beschrieben. Eine mögliche Darstellungsform ist die advektive-dispersive Gleichung für den Massentransport. Gleichung 5.21 stellt sie in allgemeiner dreidimensionaler Form (TEISSON/FRITSCH, 1988) dar. Je nach Aufgabenstellung lässt sich Gleichung 5.21 über Annahmen vereinfachen (z.B. mittlere Geschwindigkeiten, Betrachtung in zwei Dimensionen etc.), so dass einzelne Terme entfallen.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial c}{\partial z}) + S \quad \text{Gl.5.21}$$

Mit:	I	Änderungsrate
	II	konvektiver Transport der Strömung
	III	diffuser Transport der Turbulenz
	IV	Quell- und Sinkterm
	c	Suspensionskonzentration [kg/m ³]
	u, v, w	Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in x-, y- und z-Richtung [m/s]
	D _x , D _y , D _z	Diffusionskoeffizient in x-, y- und z-Richtung [m ² /s]
	S	Sink- und Quellterm (S = - q _d + q _e) [kg/(m ³ ·s)]
	q _e	Erosionsrate [kg/(m ³ ·s)]
	q _d	Sedimentationsrate [kg/(m ³ ·s)]

5.2.5 Sedimentationsprozess

5.2.5.1 Ausflockung von Schwebstoffen

Die Ausflockung von Schwebstoffen erfordert Kollisionen, hervorgerufen durch eine entsprechend hohe Bewegungsenergie der einzelnen Teilchen. ONGLEY ET AL. (1992) nennen dazu drei maßgebende Kollisionsmechanismen:

- BROWNSche Molekularbewegung
- Kollision in einem turbulenten Strömungsfeld oder unter dem Einfluss von Wellen (*fluid shear*)
- Kollision durch unterschiedlich hohe Sinkgeschwindigkeiten der Tonaggregate (*differential settling*); hierbei treffen größere Ansammlungen infolge höherer Sinkgeschwindigkeiten auf kleinere oder einzelne Partikel, überwinden dadurch die abstoßenden Kräfte und gehen mit ihnen eine Verbindung ein.

Die Größe der Flocken hängt von der Kollisionsfrequenz und damit erheblich von der Konzentration sowie der Größe der Kohäsionskräfte ab (BURT, 1986). Die Kollisionsfrequenz berechnet KRONE (1962) über die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen zwei Teilchen. Dabei wird zwischen der Kollisionsfrequenz aufgrund der BROWNSchen Molekularbewegung (Glg. 5.22)

$$I = \frac{4 \cdot k_{\text{Boltzmann}} \cdot T' \cdot n_{\text{Ton}}}{3 \cdot \mu} \quad \text{Gl.5.22}$$

und einer Kollisionsfrequenz aufgrund örtlicher Schubspannungen, resultierend aus der Wasserbewegung, unterschieden (Glg. 5.23).

$$J = \frac{4}{3} \cdot n_{\text{Ton}} \cdot R^3 \cdot \frac{du}{dz} \quad \text{Gl.5.23}$$

Mit:	I	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund BROWNScher Molekularbewegung [1/s]
	J	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund örtlicher Schubspannungen [1/s]
	$k_{\text{BOLTZMANN}}$	BOLTZMANN-Konstante = $1,3803 \cdot 10^{-25}$ [J/K]
	T	absolute Temperatur [K]
	n_{Ton}	Anzahl der Tonteilchen pro Volumeneinheit [$1/\text{m}^3$]
	μ	dynamische Viskosität [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
	R	Kollisionsradius (Annahme des zweifachen Partikelradius) [m]
	du/dz	örtliche Größe der Schubspannung [1/s]

Mit zunehmender Konzentration steigt die Kollisionsrate an, wodurch größere Flocken gebildet werden können, die sich mit anwachsendem Gewicht schneller absetzen. Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit lässt sich in Abhängigkeit von der Konzentration in drei Bereiche unterteilen (MEHTA, 1986):

1. Bei sehr kleinen Konzentrationen ($< 10 \text{ mg/l}$), in denen eine Ausflockung aufgrund zu seltener Kollisionen vernachlässigbar klein ist, lässt sich die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen mit Hilfe des STOKESSchen Gesetzes berechnen. Dieser Fall liegt in der Praxis im Umgang mit kohäsiven Sedimenten jedoch nur selten vor und ist daher weniger relevant. Es gilt:

$$w_s = \frac{g \cdot d^{*2}}{18 \cdot \mu} \cdot (\rho_s - \rho_w) \quad \text{Gl.5.23}$$

Mit:	w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
	g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
	d^*	Korn- bzw. Partikeldurchmesser [m]
	μ	dynamische Viskosität [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
	ρ_s	Dichte der Partikel [kg/m^3]
	ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m^3]

2. Bei mäßigen Konzentrationen von 10 mg/l bis 10.000 mg/l (VAN RIJN, 1993) erfolgt durch die Ausflockung der Tonteilchen mit zunehmender Konzentration c eine Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit w_s . In diesem Fall ergibt sich folgende Beziehung zwischen der Sinkgeschwindigkeit w_s und der Konzentration c:

$$w_s = k^* \cdot c^{n^*} \quad \text{Gl.5.24}$$

Mit:	w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
	k^*	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [m^3/kg]
	c	Suspensionskonzentration [kg/m^3]
	n^*	Potenz, Konstante [–]

ZHU (1993) gibt Versuchsergebnisse von KRONE (1962) wieder, der bei Suspensionskonzentrationen kleiner 10.000 mg/l Größen für k^* (= 0,011) und n^* (= 4/3) erhält. BURT (1986) bestätigt nach Feldmessungen in der Themse die Proportionalität von Sinkgeschwindigkeit und Konzentration potenziert mit 4/3. Jedoch weicht der Vorfaktor k^* von KRONES Ergebnissen ab. Nach PARTHENIADES (1986) ändert sich k^* je nach Zusammensetzung des Sedimentes, während sich n^* auch nach anderen Autoren zu annähernd 4/3 ergibt. MEHTA (1986) und VAN RIJN (1993) geben für n^* einen Bereich von 1 bis 2 an.

3. Bei Konzentrationen größer 10.000 mg/l bilden die Flocken im so genannten *Fluid Mud* ein kontinuierliches Netzwerk, aus dem das vorhandene eingeschlossene Porenwasser nur eingeschränkt nach oben entweichen kann, da es sich während des Verdrängungsprozesses einen Weg durch die Flockenzwischenräume bahnen muss. Aufgrund dieser Vorgänge ist die Sinkgeschwindigkeit in diesem Bereich deutlich reduziert. Dieser Prozess wird als gehemmtes oder behindertes Absetzen (*hindered settling*) bezeichnet (KRONE, 1962). Die BROWNSche Molekularbewegung spielt dort für die Kollisionsprozesse eine immer größere Rolle. In vielen praktischen Fällen hat sich in diesem Bereich die empirische Gleichung 5.25 als ausreichend genau erwiesen:

$$w_s = w_{so} (1 - \alpha \cdot c)^\beta \quad \text{Gl.5.25}$$

Mit:	w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
	w_{so}	Referenzsinkgeschwindigkeit eines einzelnen Partikels (entspricht i.w. Gl. (4-4)) [m/s]
	α	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [m^3/kg]
	c	Suspensionskonzentration [kg/m^3]
	β	Koeffizient (= 3 bis 5; VAN RIJN, 1993, S. 10.11) [–]

An dieser Stelle sei auch auf die Arbeiten MEHTAS verwiesen (z.B. MEHTA, 1996), die eine weitere empirische Lösung (Glg. 3-7) zur Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit in so genannten *hindered settling*-Bereichen vorstellen:

$$w_s = \frac{a' \cdot c^{n'}}{(c^2 + b'^2)^{m'}} \quad \text{Gl.5.26}$$

Mit:	w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
	a'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [-]
	c	Suspensionskonzentration [kg/m ³]
	n'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (= 0,8 bis 2,5; MEHTA, 1996) [-]
	b'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 10; MEHTA, 1996) [-]
	m'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 3; MEHTA, 1996) [-]

KRONE (1962) stellte fest, dass es ab einer Suspensionskonzentration von rd. 10 g/l zu einem behinderten Absetzen im so genannten *Fluid Mud* kommt. KIRBY (1986) unterteilen diesen Bereich weiter in mobilen und stationären *mud* (vgl. Abb. 5.2). Letzterer weist keine horizontalen Geschwindigkeitsanteile mehr auf. Im Bereich des stationären *Fluid Muds* entsteht das vielleicht schwächste Gleichgewicht zwischen dem Eigengewicht, den bindenden Kräften an den Kontaktpunkten der Flocken und den Scherspannungen. Diese erste Ablagerung ist durch einen hohen Poren- und Wassergehalt sowie einer geringen Dichte gekennzeichnet. Mit zunehmender Sedimentation nimmt der Druck auf tiefere Schichten zu, so dass es zu einer Neuformierung kommt. Die ersten Kontaktpunkte brechen auf und die Flocken formieren sich unter Abgabe von Porenwasser zu einem stabileren Gerüst mit einer größeren Anzahl an Kontaktpunkten, wodurch die Dichte der Flockenansammlungen ansteigt (PARTHENIADES, 1986). Wenn die Flocken eine solche Struktur ausbilden und sich weiter verdichten, wird das physikalische Verhalten durch Konsolidierungstheorien wie z.B. von GIBSON ET AL. (1967) oder BEEN/SILLS (1983) wiedergegeben.

Tabelle 5.1: Beispiele mittlerer Sinkgeschwindigkeiten w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (NACH: VAN RIJN/LOUISSE, 1987)

	w_s	c	SEDIMENT
NEDECO (1965)	$1 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $3 \cdot 10^{-2}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $1 \cdot 10^5$ mg/l	<i>Demerara silt</i>
OWEN (1970)	$2 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $7,5 \cdot 10^{-1}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $3 \cdot 10^4$ mg/l	<i>Avonmouth mud</i>
VAN RIJN/LOUISSE (1987)	$1 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $1,5 \cdot 10^{-1}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $1 \cdot 10^5$ mg/l	Kaolinit

Nach LICK ET AL. (1992) sind bisherige numerische Berechnungen von Ausflockungsprozessen zwar von ihren Ansätzen her relativ einfach zu lösen, jedoch ist der Rechenaufwand und damit der Zeitbedarf, um zu Ergebnissen zu gelangen, sehr hoch. Die Ursache dafür liegt darin, dass bislang alle Zustände einer einzelnen Flocke numerisch beschrieben wurden und dadurch die Gesamtbeschreibung des Ausflockungsprozesses zu erheblichen Datenmengen führt, deren Auswertung sehr zeitaufwendig ist. Die Lösung dieses Problems besteht für LICK ET AL. (1992) darin, die Anzahl der einzelnen Zustände zu reduzieren, indem Flocken gleicher Größe gruppiert werden. So kann die Anzahl der zu berechnenden Zustände von einigen Tausend auf eine sehr kleine Zahl reduziert werden. Typisch sind nach LICK ET AL. (1993) zehn zu berechnende Zustände.

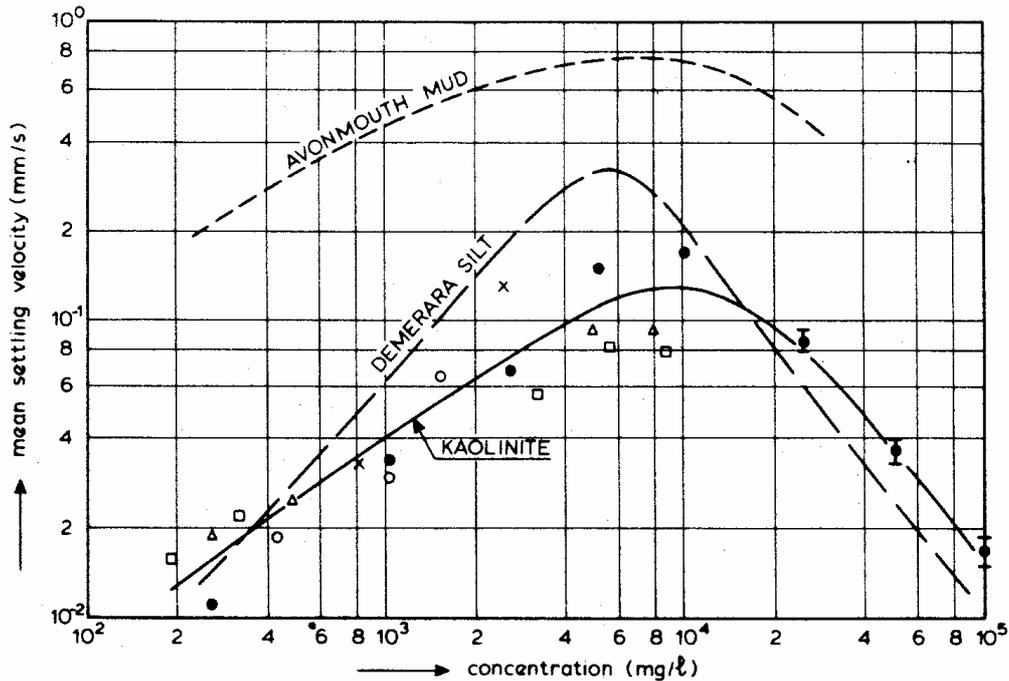


Abbildung 5.5: Mittlere Sinkgeschwindigkeit w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (VAN RIJN, 1993)

Wie auch bei anderen Modellen ist in diesem Modell die Erhaltung der Masse gewährleistet. Im Vergleich zu LICK ET AL. (1992) fehlt anderen Ansätzen häufig eine Betrachtung des Volumens. Während einer Kollision bleibt zwar die Masse erhalten, jedoch ändert sich das Volumen, da sich auch Hohlräume zwischen den Partikeln oder kleineren Flocken bilden können. Die mathematische Herleitung des numerischen Modells ist bei LICK ET AL. (1992) zu finden, während LICK ET AL. (1993) eine Zusammenfassung der Modelleigenschaften und eine allgemeine Beschreibung des Ausflockungsvorganges wiedergeben. Auf eine formelmäßige Wiedergabe des Ansatzes soll verzichtet werden.

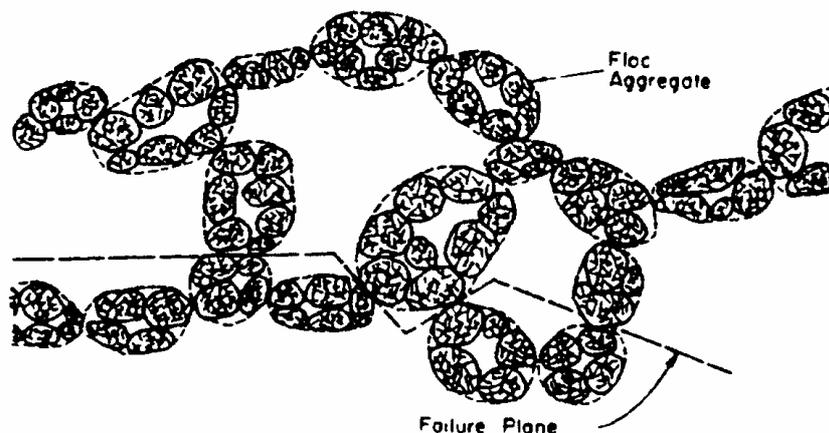


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung eines Netzwerkes aus Flocken in seinem schwächsten Zustand (PARTHENIADES, 1986)

SPEARMAN und ROBERTS (2002) vergleichen die Wirkung verschiedener Ansätze zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit und schlussfolgern, dass keine Formulierung

bevorzugt werden kann. Es gibt also keinen allgemein gültigen Ansatz. Sie empfehlen, zunächst möglichst einfache Modellierungen mit wenig in der Natur zu bestimmenden Parametern zu verwenden, solange keine ausreichenden Naturdaten zur Verfügung stehen, um das Modell zu verfeinern.

Die einfachste Art, die Sinkgeschwindigkeit festzulegen, ist sie auf einen konstanten Wert zu setzen. In einem fraktionierten Transportmodell können die Sinkgeschwindigkeiten mit Hilfe der Formulierung nach Stokes oder Dietrich in Abhängigkeit von den Partikeleigenschaften ermittelt werden. In diesem Fall werden Einflüsse wie Flockenbildung oder das Zerschneiden von Flocken nicht berücksichtigt.

Es existiert eine große Anzahl verschiedener Ansätze zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit. Ein relativ neuer Ansatz stammt von WINTERWERP (1999). Er basiert im wesentlichen auf einem Kräftegleichgewicht zwischen der an der Flocke angreifenden Schwerkraft und der auf sie wirkenden Widerstandskraft während des Absinkens. Dieses Vorgehen ist analog zu Stokes, dessen Sinkgeschwindigkeitsformel aus dem Kräftegleichgewicht an einem einzelnen Partikel hervorgegangen ist. Zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit wird von Winterwerp ein Flockungsmodell angewendet, in dem die turbulenzbedingte Aggregation und das Zerschneiden der Flocken infolge zu hoher Turbulenz berücksichtigt wird. In der Sinkgeschwindigkeitsformulierung wird zudem der Effekt des hindered settling erfasst. Grundlage für die von Winterwerp hergeleiteten Formeln bildet die Betrachtung der Flocken als fraktale Einheiten.

NIKORA ET AL. modifizierten das Modell von WINTERWERP, um mit Hilfe einfacher Natur- oder Labormessungen die Sinkgeschwindigkeit ähnlich detailliert zu erfassen. Sie berücksichtigen die fraktalen Eigenschaften der Projektion der 3D-Flocke auf eine ebene Fläche. Zudem erweitern sie die Formulierung um die Porosität der Flocken. WINTERWERP hatte diese vernachlässigt. Die Idee hinter den Modifikationen ist, den schwer zu ermittelnden Wert der fraktalen Dimension aus der Gleichung zu eliminieren und stattdessen mit Hilfe eines Optical Backscatter Sensors (OBS) einen gemessenen Wert, der die fraktale Dimension beinhaltet, eingehen zu lassen.

Die Formulierungen zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeiten kohäsiver Schwebstoffe beinhalten die unterschiedlichsten Abhängigkeiten und variieren daher hinsichtlich ihrer Komplexität und des rechnerischen Aufwands. Allen Ansätzen ist gemein, dass eine Verifikation anhand von Naturdaten unerlässlich ist, da eine physikalisch exakte Lösung nicht existiert. Zu heterogen verhalten sich die Sinkgeschwindigkeiten kohäsiver Schwebstoffe aufgrund der Abhängigkeit von den physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften des Flockungsmaterials.

Flockungsmodelle, z.B. von WINTERWERP zeigen, dass sehr detaillierte Modelle zur Beschreibung der Flockendynamik existieren, die jedoch aufgrund des hohen numerischen Aufwands und der zum Teil schwierigen Quantifizierung benötigter Flockungsparameter nicht uneingeschränkt anwendbar sind.

Generell sind die Ansätze zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit in Anbetracht der großen Anzahl empirischer Koeffizienten kritisch zu betrachten. Weitere Informationen zur Sinkgeschwindigkeit kohäsiven Materials können beispielsweise der neueren Arbeit NIELSONS (1992) entnommen werden.

5.2.5.2 Konsolidierung von Schwebstoffen

Sediment wird in Suspension vom bewegten Wasser weitergetragen, bis eine so verringerte Strömungsintensität vorhanden ist, dass sich die einzelnen Partikel bzw. Flocken zur Sohle hin absetzen können. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Konzentration der Flocken. Ab einem bestimmten Zeitpunkt verhält sich das Sediment

nicht mehr als einzelnes Partikel oder Flocke in einer Suspension, sondern es geht in ein frühes Stadium der Sohle über. In diesem Übergangsbereich entwickelt sich ein Rahmgebilde zwischen den Flocken, dem auch wirksame Spannungen zugeordnet werden können. Dieses Gerüst ist sehr kompressibel, so dass noch mit vergleichsweise großen Verformungen gerechnet werden muss. Wenn weiteres Material sich an der obersten Schicht ablagert, wird der Zwischenraum durch das zusätzliche Gewicht unter Ausscheidung von Porenwasser aus den Hohlräumen der Flocken weiter verkleinert. Dieser Verdichtungsprozess wird als Konsolidierung bezeichnet. Durch die in Wechselwirkung tretenden Flocken entsteht ein stabilisierender Effekt auf die Sohle gegenüber anstehenden Strömungen und Turbulenzen (SILLS/ELDER, 1986).

MIGNIOT/BOULOC (1981) unterscheiden beispielsweise fünf Phasen von der Sedimentation bis zur auskonsolidierten Sohle; zwei des Absetzens und drei der Konsolidierung (Abb. 5.7):

0 Std. bis 0,1 Std.:	Flockenbildungsphase Das suspendierte Material setzt sich durch Flockenbildung rasch ab. Es entsteht eine feste Schicht.
0,1 Std. bis 1,0 Std.:	Gehemmtes oder behindertes Absetzen Eine Suspensionskonzentration von $c > 10$ g/l behindert das Absetzen der Schwebstoffe, da das Wasser infolge der starken Flockenbildung nicht leicht entweichen kann. Es bildet sich die so genannte <i>Fluid Mud</i> -Schicht.
1,0 Std. bis 10,0 Std.:	1. Konsolidierungsphase Die Flockenstruktur bricht auf, das Porenwasser entweicht und die Sedimente beginnen zu konsolidieren.
10 Std. bis 600 Std.:	2. Konsolidierungsphase Durch die Drainwirkung entweicht das Wasser nur langsam.
> 600 Std.:	3. Konsolidierungsphase Durch die Auflast der oberen Schichten wird eine zusätzliche Konsolidierung erreicht.

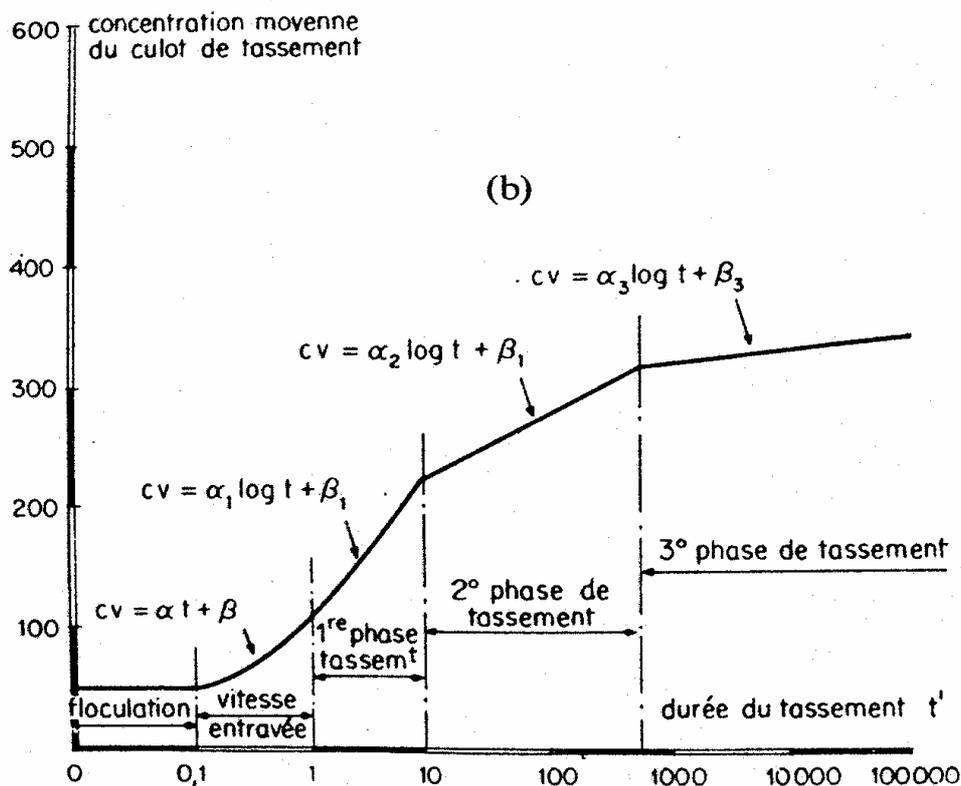


Abbildung 5.7: Phasen des Absetzens und der Konsolidierung bindiger Böden (nach: MIGNIOT/BOULOC, 1981)

Je höher der Konsolidierungsgrad und die Tiefe des Bodens, desto größer ist die Bodendichte und damit auch der Bodenfeststoffgehalt c_b . Der Bodenfeststoffgehalt c_b an der Sohle kann als Funktion der Trockenlegungs- bzw. der Konsolidierungsdauer t^* dargestellt werden (MIGNIOT/BOULOC, 1981):

$$c_b = \alpha^* \log t^* + \beta^* \quad \text{Gl.5.27}$$

Mit:	c_b	Bodenfeststoffgehalt [kg/m ³]
	t^*	Trockenlegungs- bzw. Konsolidierungsdauer [s]
	α^*	Faktor in Abhängigkeit von der Korngröße der Partikel [–]
	β^*	Faktor in Abhängigkeit vom Wassermedium [–]

Bisher wurde die Konsolidierung in Modellansätzen nur ungenügend berücksichtigt. Eine Übersicht der Arbeiten über die Konsolidierung kohäsiver Böden (Abb. 3.8) zeigt, dass die Arbeiten TERZAGHIS (1925), KYNCHS (1952) und GIBSONS ET AL. (1967) als grundlegend zu bezeichnen sind. KYNCH (1952) legt mit seiner Veröffentlichung „*A Theory of Sedimentation*“ den Grundstein der theoretischen Beschreibung der Absetzprozesse von Sedimenten. Ziel dieser Arbeit war es, zu zeigen, dass der Sedimentationsvorgang vollständig über die örtliche Konzentration beschrieben werden kann, ohne Genaueres über auf die Partikel wirkende Kräfte zu wissen. Dieser Ansatz ist, ebenso wie die Theorie TERZAGHIS, nur sehr eingeschränkt anwendbar. Das

Modell von GIBSON ET AL. ist vergleichsweise allgemeingültiger. GIBSON ET AL. (1967) beschreibt den Konsolidierungsvorgang von durchtränkten Lehmböden unter Berücksichtigung der möglichen Verformungen durch die vertikale Spannungsverteilung und bei variierender Permeabilität und Kompressibilität. Dabei wird zwischen dünnen und dicken Schichten unterschieden. Bei dünnen Schichten spielt für die Konsolidierung das Eigengewicht der Schicht im Vergleich zu anderen aufgebracht Lasten eine untergeordnete Rolle. Dagegen wird bei dicken Schichten die Konsolidierung durch das Eigengewicht verursacht, so z.B. bei einer Sohle, die mit fortlaufender Zeit durch Sedimentation an Mächtigkeit zunimmt.

Als weiterer Ansatz zur Beschreibung der Konsolidierung von Schwebstoffen sei der von BEEN/SILLS (1983) genannt. Er ermöglicht die Berechnung des Porenwasserdrucks u^* an einer beliebigen Stelle y und zum beliebigen Zeitpunkt t unter einer imaginären Auflast:

$$u^*(y^*, T^*) = 2 (\rho_S - \rho_F) z^0 \sum_n \frac{\cos(m^0 \pi y)}{m^0 \pi^2} \exp(-m^0 \pi^2 T^*) \quad \text{Gl.5.28}$$

Mit:	u^*	Porenwasserdruck [KN/m ²]
	y^*	Materialkoordinate [-]
	T^*	Zeitfaktor [-]
	ρ_S	Dichte des Sediments [kg/m ³]
	ρ_F	Dichte des Fluids [kg/m ³]
	z^0	Koordinate der Schichtoberfläche [m]
	n^0	= 0, 1, 2, 3, ... [-]
	m^0	= 0,5·(2· n^0 + 1) [-]

Mit Gleichung 5.28 ergibt sich für $z = z_1$ (reale Sohloberfläche) ein resultierender Porenwasserdruck. Gemäß Laborversuchen sollte sich dieser jedoch zu Null ergeben. Daher wurde Gleichung 5.28 in folgender Weise modifiziert (BEEN/SILLS, 1983):

$$u_1(z, t) = u^*(z, t) - u^*(z_1, t) \quad \text{für } 0 \leq z \leq z_1 \quad \text{Gl.5.29}$$

Mit:	u^*	Porenwasserdruck [KN/m ²]
	u_1	Porenwasserdruck in der realen Sohle [KN/m ²]
	z	vertikale Koordinate [m]
	z_1	reale Sohloberfläche [m]
	t	Zeit [s]

5.2.6 Erosionsprozess

Wenn äußere Kräfte auf die Sohloberfläche von sedimentiertem kohäsivem Material einwirken, können sowohl Erosions- als auch Sedimentationsprozesse stattfinden, wobei die Größe des jeweiligen Partikelstroms u.a. von der Größe der angreifenden Kraft abhängt. Die Sohlschubspannung τ_0 ist dabei ein weit verbreiteter Parameter,

um ein Maß für die Intensität der Sedimentations- bzw. Erosionsraten aufgrund hydrodynamischer Vorgänge zu finden. Ebenfalls sehr gebräuchlich ist die aus τ_0 resultierende Schubspannungsgeschwindigkeit u^* . Nach SLEATH (1984) besteht folgender Zusammenhang:

$$u^{*2} = \frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \frac{du}{dy} = \nu \frac{du}{dy} \quad \text{Gl.5.30}$$

Mit:	u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
	τ_0	Sohlschubspannung [KN/m ²]
	ρ	Dichte des Fluids [kg/m ³]
	μ	dynamische Zähigkeit des Fluids [kg/(m·s)]
	ν	kinematische Zähigkeit des Fluids [m ² /s]
	du/dy	Geschwindigkeitsgradient [1/s]

Die zu Erosionen führenden Kräfte resultieren (u.a. nach: MIMURA, 1993) aus:

1. den über einen gewissen Zeitraum gleichgerichteten, instationären turbulenzintensiven Strömungen, wie sie die Ebbe- und Flutströmungen darstellen
2. den kurz-periodischen oszillierenden, durch Oberflächenwellen hervorgerufenen Strömungen.

Oberflächenerosion findet statt, wenn die an der Sohle herrschenden Schubspannungen τ_0 die kritische Sohlschubspannung τ_c übersteigen, das heißt wenn die äußere Spannung τ_0 groß genug ist, um die zwischen den kohäsiven Partikeln entstandenen elektrochemischen Bindungen aufzubrechen, wodurch das Material resuspendiert. Ein bindiger Boden wird also für $\tau_0 > \tau_c$ bzw. $u^* > u^*_c$ abgetragen.

MEHTA (1986) unterscheidet in bezug auf den Erosionsprozess zwischen der Oberflächen- und der Massenerosion. Bei der Oberflächenerosion werden einzelne Partikel oder Aggregate aufgrund von auftretenden Scherspannungen aus ihren elektrochemischen Bindungen herausgelöst. Dagegen werden bei der Massenerosion größere Elemente von einer Ausdehnung sehr vieler Flocken aus der Sohle herausgerissen. Diese Elemente gehen bei verhältnismäßig flüssigem Boden sofort in Suspension über. Bei festeren Sohlmaterialien werden sie rollend transportiert, dabei zerkleinert und schließlich ebenfalls resuspendiert (ZANKE, 1982). Letztere Erosionsart ist besonders bei oszillierenden Strömungen infolge Wellen anzutreffen.

Für über die Tiefe homogene und auskonsolidierte Sohlen gibt MEHTA (1986) folgende Gleichung zur Berechnung der so genannten Erosionsrate E (= pro Zeit- und Flächeneinheit erodiertes Sedimentvolumen) an:

$$E = \frac{dm}{dt} = \alpha_1 \cdot \left(\frac{\tau_0 - \tau_s}{\tau_s} \right) \quad \text{Gl.5.30}$$

Mit:	E	Erosionsrate [m ³ /s]
	dm/dt	zeitlicher Gradient der Massentransportrate [m ³ /s]

α_1	empirische Erosionsratenkonstante [m^3/s]
τ_0	Sohlschubspannung [KN/m^2]
τ_s	vorhandener kohäsiver Scher- oder Strömungswiderstand der Sohle [KN/m^2]

Für eine konstante Schubbelastung τ_0 ist E konstant, solange τ_s nicht mit der Tiefe z variiert. Für weichere, nur teilweise konsolidierte Sohlen kann die Erosionsrate nach Gleichung 5.31 bestimmt werden:

$$E(z) = \frac{dm}{dt}(z) = \varepsilon_0 \cdot \exp(\alpha_2(\tau_0 - \tau_s(z))^{0,5}) \quad \text{Gl.5.31}$$

Mit:	$E(z)$	Erosionsrate [m^3/s]
	dm/dt	Gradient der Massentransportrate [m^3/s]
	ε_0	empirische Konstante [m^3/s]
	α_2	empirische Konstante [$\text{m}^{0,5} \cdot \text{s}/\text{kg}^{0,5}$]
	τ_0	Sohlschubspannung [KN/m^2]
	$\tau_s(z)$	vorhandener kohäsiver Scher- oder Strömungswiderstand der Sohle [KN/m^2]

Der Strömungswiderstand τ_s steigt mit zunehmendem Konsolidierungsgrad über die Tiefe z an. Daher kann der Erosionsprozess solange über die Tiefe fortschreiten, bis in einer bestimmten Tiefe τ_s die Größe von τ_0 erreicht hat und damit der Strömungswiderstand größer wird als die anliegende erodierende Schubspannung. Die jeweiligen Koeffizienten α_1 , α_2 und ε_0 müssen experimentell in Laborversuchen bestimmt werden, da sie von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Fluids und des Sedimentes abhängen.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die zuvor genannten Quellen nur einen Einblick, insbesondere in die aktuelleren Ergebnisse gewährt. Ein Vergleich der verschiedenen Forschungsergebnisse hinsichtlich allgemeingültiger Aussagen stellt sich häufig sehr schwer dar, da sich das versuchstechnisch eingesetzte kohäsive Material insbesondere hinsichtlich vorhandener Verunreinigungen sowie der Vorbereitung für das Experiment unterscheidet (WILLIAMS, 1986).

5.3 Numerische Modelle von Küstengewässern

Strömungs- und Transportprozesse an der Küste entstehen durch Gezeiten, Wind, Seegang und durch Einmischung von Süß- in Salzwasser. Numerische Modelle von Küstengewässern müssen deshalb instationär und mindestens zweidimensional sein. Ziele sind im Allgemeinen die Berechnung der Transformation des einlaufenden Seegangs, der Normal- und Extremwasserstände, des Sedimenttransports und immer häufiger der morphologischen Veränderung. Als besondere Herausforderung bei der Modellierung ist die Interaktion zwischen den verschiedenen ablaufenden Prozessen wie Wechselwirkung zwischen Seegang, Strömung und Morphologie zu sehen.

Das markanteste Merkmal der Strömungsprozesse in Küstengewässern sind die astronomisch bedingten Gezeiten. Sie induzieren Flut- und Ebbeströme, deren Geschwindigkeiten lokal stark variieren können. Neben den Gezeiten werden die Strömungsprozesse wesentlich durch den Einfluss des Windes geprägt. Aus ihm resultiert ein Eintrag von Spannungen auf die Wasseroberfläche, dessen Ergebnis Seegang, Windstau und Beckenschwingungen sind, wobei letztere auch durch Luftdruckunterschiede beeinflusst werden und ein typisches Merkmal der Ostseeküste sind. Neben Windstärke und -dauer ist die Windwirklänge (Fetch) ein wichtiger, das Seegangsspektrum beeinflussender Parameter. Eine weitere bedeutende Komponente für Prozesse in Küstengewässern ist der Seegang. Der an der Küste zu beobachtende Seegang ist das Resultat von Wechselwirkungen zwischen dem aus der offenen See einlaufenden Seegang und den im betrachteten Gebiet herrschenden Strömungs- und Windverhältnissen sowie den topographischen Gegebenheiten. Der einlaufende Seegang wird unter dem Einfluss abnehmender Wassertiefe grundlegend verändert. Die Wellenkämme beginnen sich uferparallel auszurichten (Refraktion). Die Höhen der Wellen unterliegen flachwasserbedingten Veränderungen (Shoaling), gleichzeitig werden die Wellen kürzer. Inseln verursachen Reflexion und Diffraktion. Erreicht die Wellensteilheit oder das Verhältnis von Wellenhöhe zu Wassertiefe eine Grenzbedingung, beginnen die Wellen zu brechen. Im Bereich zwischen der Brecherlinie und dem Ufer entstehen starke küstenparallele Strömungen, die für die morphologische Formung und Massenbilanz eines Küstenabschnitts von erheblicher Bedeutung sind.

Die Sedimente in Küstengebieten unterliegen einem weiten Korngrößenbereich und sind häufig einem ständigen Wechsel von Erosion und Sedimentation ausgesetzt. Es erscheint daher sinnvoll, diese Prozesse in mehreren Zeit- und Raumskalen zu betrachten:

1. Kleinskalige Entwicklungen mit morphologischen Skalen von einigen hundert Metern und zeitlichen Skalen der Dauer von Stürmen bis zu einigen Wochen.
2. Mesoskalige Entwicklungen mit morphologischen Skalen von Kilometern und einer zeitlichen Skala von Jahren.
3. Großskalige Entwicklungen mit morphologischen Skalen von Zehnerkilometern und einer zeitlichen Skala von Jahrzehnten.

Die Hydrodynamik von Wattgebieten wird von Gezeitenrinnen gesteuert, deren Einzugsgebiet durch Wattwasserscheiden voneinander getrennt sind. Das Tidevolumen eines Einzugsgebietes kann ohne weiteres 500 Millionen Kubikmeter erreichen. Die Wattflächen können der Hydrodynamik der Nordsee ungeschützt ausgesetzt sein (offene Watten, z.B. Büsumer Watt), sich innerhalb einer Bucht erstrecken (Buchtenwatten, z.B. Jadebusen) oder als Rückseitenwatten im Schutz vorgelagerter Inseln, Halligen oder Außensänden (z.B. Nord- und Ostfriesische Inseln) liegen. Die Strömungsverhältnisse in Wattgebieten weisen eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf. Ausgedehnte, annähernd ebene Flächen im Bereich von Wattwasserscheiden unterliegen verhältnismäßig geringen Strömungsgeschwindigkeiten.

Seegatten stellen die seewärtige Verbindung zwischen den Rückseitenwatten von Inseln zur offenen See her. Die Morphodynamik im Bereich ihrer seewärtigen Ebbdeltas und landwärtigen Flutdeltas ist sehr ausgeprägt, die Strömungsgeschwindigkeiten erreichen Werte bis zu 1,5 m/s. Stromachsen von Prielen können sich jährlich und horizontal um mehrere Zehnermeter bis hundert Meter verlagern. Tiefen dieser Rinnen von NN -10 m bis NN -35 m sind zu erwarten und stehen im Gegensatz zu den angrenzenden Wattflächen mit Geländehöhen zwischen NN +1 m und NN -2 m.

Ästuare werden durch das Zusammenwirken der gezeitenbedingten Strömungen des Küstengebietes mit dem Oberwasserzufluss geprägt. Durch das Aufeinandertreffen des salzigen Meerwassers und des Süßwassers werden Dichteströmungen induziert. Über den Grad der turbulenten Durchmischung wird eine Klassifizierung der Ästuare vorgenommen. Mit zunehmendem Tidehub und abnehmendem Süßwasserzufluss steigt die turbulente Durchmischung. Es ist lediglich ein horizontaler Salzkonzentrationsgradient zu beobachten. Typische Beispiele für derartige Ästuare stellen Ems, Elbe und Weser dar. Bei geringem Tidehub und nennenswertem Süßwassereintrag spielt dagegen auch der vertikale Konzentrationsgradient eine wichtige Rolle, was eine dreidimensionale, mindestens aber eine vertikal zweidimensionale Modellierung erforderlich macht.

Wasserstände und Strömungen werden zwar immer gemeinsam in einem Modell berechnet, aber oft für unterschiedliche Aufgaben benötigt. Wasserstände gehen mit ihren Extremwerten als wichtigste Größe in die Bemessung von Hochwasserschutzanlagen oder in die Modellierung des Überflutens oder Trockenfallens von Wattgebieten ein. Strömungen werden dagegen im Zusammenhang mit weiterer Modellierung als wichtigste Eingangsgröße in Transportmodelle von bodennahem und suspendiertem Sediment und allgemein von gelösten und partikulären Substanzen benötigt. Damit sind sie die Grundvoraussetzung für alle Modellierungen der Morphodynamik.

Strömungsmodelle der Nordseeküste und deren Ästuare müssen das Überfluten und Trockenfallen großflächiger Wattgebiete berücksichtigen. Das Problem besteht darin, dass die Lage der seitlichen Strömungsumrandung nicht fixiert, sondern von den Wasserständen abhängig ist, die das Modell zu berechnen hat. Die Berechnung dieser Vorgänge ist um so anspruchsvoller, je schneller sich der Strömungsrand verlagert, je flacher also das Gebiet und je schneller die Wasserstandsänderung ist. Man kann zwischen der Verwendung konstanter und variabler Netze unterscheiden. Erstere differenzieren lediglich nach vollständig benetzten und vollständig trockenen Elementen, während letztere eine Anpassung der randnächsten Elemente an die Wassergrenze vornehmen. Konstante Netze lassen ruckartig ein ganzes Element weg, wenn die berechnete Wassertiefe an mindestens einem seiner Knoten kleiner als ein vorher definierter Grenzwert wird. Entsprechend wird ein neues Element zugefügt, wenn sich für alle Knoten dieses Elements eine Wassertiefe größer als dieser Grenzwert berechnet. Beim Wegfallen eines Elementes sollte dessen Wasservolumen dem verbleibenden Nachbarelement zugeschlagen werden, bzw. abgezogen werden beim Zufügen eines Elementes, was aber zu Schwingungen in der Lösung führen kann. Konstante Netze sind nur bei einer sehr feinen Diskretisierung zulässig.

Sedimenttransport weist im Vergleich zum Transport von gelösten Stoffen einige Besonderheiten auf. So gilt für den Schwebstofftransport die Transportgleichung, d.h. die turbulente Advektions-Diffusionsgleichung, während der Geschiebetransport durch empirische Transportgleichungen in Abhängigkeit von der Bodenschubspannung erfasst wird. Wegen der Schwierigkeit, ihn in der Natur zu messen, stammen die Gleichungen aus Laborversuchen, die zwar unter kontrollierten Bedingungen aber selten mit den Sedimenteigenschaften und der Oberflächenstruktur durchgeführt wurden, die dem konkreten Anwendungsfall entsprechen.

Beim Schwebstofftransport spielt die Sinkgeschwindigkeit eine herausragende Rolle. Sie ist nicht nur von der Partikelgröße, sondern bei höheren Konzentrationen auch von dieser abhängig. Bei mehreren Fraktionen kann für jede Fraktion eine eigene Transportgleichung gelöst werden. Sedimentgemische mit einem Tonanteil von mehr

als etwa 10% weisen kohäsive Eigenschaften auf, so dass sich größere Aggregate (Flocken) mit höherer Sinkgeschwindigkeit bilden, die durch den Einfluss der Turbulenz wieder zerbrechen können.

Als Morphodynamik wird die zeitabhängige Formänderung eines Gebietes bezeichnet. In Küstengebieten ist Morphodynamik das Ergebnis der Wechselwirkung von Tide, Seegang, Strömungen und Sedimenttransportvorgängen mit der beweglichen Sohle.

Sohländerungsmodelle berechnen die Wirkung von Sedimenttransport in einem diskretisierten Modellgebiet. Das Modell für die Sohländerung ist meist in ein System gekoppelter Module eingebettet, die jeweils Seegang, Strömungen und die daraus resultierenden Sedimenttransportraten berechnen. Bis auf wenige Ausnahmen basieren alle Modelle der Sohländerung auf einer Kontinuitätsgleichung für das Bodensediment (Bodenevolutionsgleichung). Sie kann formuliert werden, indem man die horizontalen Sedimentströme über die gesamte Wassertiefe einschließlich denen in der beweglichen Bodenschicht bilanziert und daraus die Sohländerung berechnet. Alternativ dazu können die Sedimentströme in der Bodenschicht sowie die Erosion und Sedimentation bilanziert werden. Weiterentwicklungen berücksichtigen mehrere Kornfraktionen im Sediment sowie Konsolidierung und Schichtung im Boden.

Für die Simulation langfristiger Sohlentwicklung stößt eine Berechnung nach der oben beschriebenen Methode an ihre Grenzen. Das nichtlineare Verhalten der Natur ist langfristig nicht streng berechenbar und auch nicht durch Extrapolation kurz- oder mittelfristiger Entwicklungen vorhersagbar.

Für den Modellaufbau sind topographische Daten erforderlich. Je flacher das Gewässer ist, um so höher ist der Anspruch an die Genauigkeit der Tiefendaten. Da Küstengebiete zumeist morphodynamisch sehr aktiv sind, kann es vorkommen, dass die verfügbaren Daten nicht aktuell genug sind. Die Topographie geht unmittelbar in die Generierung des Berechnungsnetzes ein, wobei erwartungsgemäß gilt, dass steile Böschungsgradienten eine hohe örtliche Diskretisierung erfordern, wenn das Strömungsfeld gut aufgelöst werden soll.

Freie Oberflächen, Boden und seitliche Begrenzungsflächen sind die Modellränder von 3D-Modellen, für die Randbedingungen zu formulieren sind. Bei 2DH-Modellen reduziert sich dies auf die seitlichen Begrenzungslinien. Man unterscheidet bei den seitlichen Rändern zwischen offenen (aktiven) und geschlossenen (passiven). Offene Ränder finden sich etwa am seeseitigen Rand der Ästuar, Seegatten oder Deltas, aber auch in den binnenseitigen Zuflüssen. Die längs dieser Ränder gewählten Randbedingungen sind von höchster Bedeutung, da sie das gesamte Strömungsgeschehen definieren. Durch sie findet der Zu- und Abstrom des Wassers einschließlich des Transports der gelösten und partikulären Substanzen statt, und sie legen auch die Wasserstände im Modellgebiet fest. Ihre Lage muss sorgfältig gewählt werden. Ausgeprägte topographische Änderungen längs der offenen Ränder sind möglichst zu vermeiden. Besonders problematisch ist es, wenn die Topographie nicht gut bekannt ist oder sich mit der Zeit ändert, da sich dann im Modell falsche Durchflüsse einstellen können.

Am seeseitigen Rand wird der Wasserstand an jedem Knoten zu jedem Zeitpunkt vorgegeben. Am binnenseitigen Rand ist die Vorgabe der Durchflussverteilung (2DH-Modelle) zweckmäßig.

Geschlossene Ränder sind die festen seitlichen Strömungsbegrenzungen, in deren Normalenrichtung Strömung und Transport null sind.

Für den Start der zeitdiskreten Berechnung sind der Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeiten sowie ggf. Konzentrationen und Temperaturen für jeden Knoten vorzugeben. Mit fortschreitender Berechnung verschwindet der Einfluss der Anfangsbedingungen zugunsten dem der Randbedingungen. Dies geht für die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten recht schnell, so dass im Anfangszustand der Wasserspiegel horizontal und die Geschwindigkeiten zu null gesetzt werden können. Die Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen bei Transportberechnungen kann länger dauern, so dass man eine möglichst naturnahe Wahl der Anfangskonzentrationen verwenden sollte.

5.4 Das Modellsystem RMA

Das Modellsystem RMA besteht aus einer Vielzahl von Simulations- und Graphikmodulen, die im Folgenden aufgelistet sind:

RMA-2	ein ein-/zwei-dimensionales finite Elemente Modell für hydrodynamische Simulationen
RMA-10	ein ein-/zwei-/drei-dimensionales finite Elemente Modell hydrodynamische Simulationen
RMA-11	ein ein-/zwei-/drei-dimensionales Wassergütemodell. Es ist vollständig kompatibel zu RMA-2 und RMA-10
RMAGEN	ein graphisches interaktives Modul zur Erstellung und Änderung von finiten Elemente Netzen
RMAPLT	ein graphisches interaktives Postprocessing Modul, welches die Möglichkeit bietet, die Ergebnisse der Simulationen darzustellen.
RMAPR2	ein graphisches interaktives Modul zur Generierung von RMA-2 Eingabekontrolldateien
RMAPR10	ein graphisches interaktives Modul zur Generierung von RMA-10 Eingabekontrolldateien
RMAPR11	ein graphisches interaktives Modul zur Generierung von RMA-11 Eingabekontrolldateien

Das folgende Schaubild (Abbildung 5.8) verdeutlicht den Informationsfluss und die Interaktion zwischen den einzelnen Modulen.

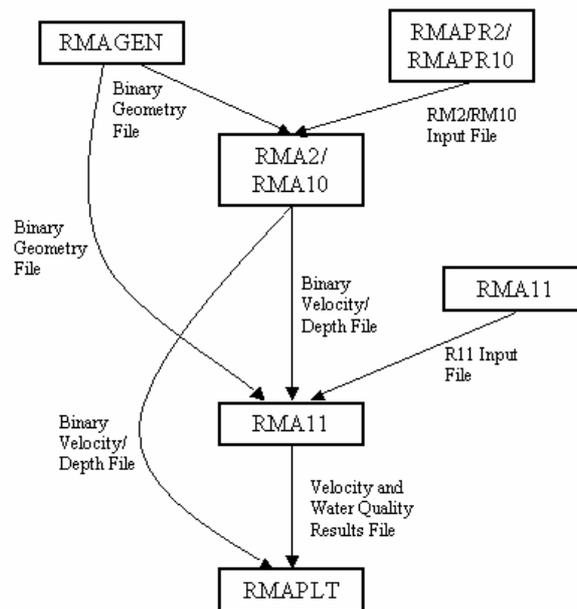


Abbildung 5.8: Schaubild des Informationsflusses im RMA-Modellsystem

Zur Sedimenttransportberechnung kommt das Modul RMA-10s zum Einsatz, das speziell für diesen Zweck optimiert wurde. Das Modul wurde bereits vom Institut für Wasserbau weiterentwickelt und an spezielle Verhältnisse in unterschiedlichen Einsatzgebieten angepasst. So wurden unter anderem die Bodenevolutionsgleichung sowie 3-dimensionale morphodynamische Ansätze erweitert und Möglichkeiten der Integration verschiedener Berechnungsansätze geschaffen.

5.5 Modellerstellung für das Projektgebiet

Der Generierung des finiten Elementes Netzes kommt bei der Modellierung eine entscheidende Bedeutung zu. Von der Güte der Vernetzung hängt entscheidend die Qualität der Ergebnisse ab. Im Allgemeinen sollten folgende Regeln bei der Netzgenerierung für Finite Elemente Modelle beachtet werden.

1. Eine feinere Diskretisierung wird dort erforderlich, wo Gradienten der abhängigen Variablen (Strömungsgeschwindigkeit, Wasserstand) oder der Bathymetrie erwartet werden.
2. Knoten an Ecken von Elementen dürfen nicht mit Knoten in den Elementmitten zusammenfallen, d.h. ein Eckknoten eines Elementes darf nicht gleichzeitig Mittelknoten eines anderen Elementes sein.
3. Tiefenänderungen innerhalb eines Elementes müssen auf ein Minimum reduziert werden. Dies bedeutet, dass die Elementgrenzen den Konturen der Bathymetrie folgen sollten.
4. Die Elemente müssen so angeordnet werden, dass äußere Ränder keine Sprünge in der Höhe aufweisen.
5. In einer Ecke eines Modells, in der keine Strömung über den Modellrand hinweg stattfindet, darf nicht einzelnes Element platziert werden.
6. Das Längenverhältnis eines Elementes ist nur wichtig, wenn Strömung quer zur Hauptrichtung dieses Elementes erwartet wird.

Bei der Erstellung des hydronumerischen sowie des Transportmodells ist ein Detailmodell vorgesehen, welches in ein größeres Umgebungsmodell eingebettet ist, das die erforderlichen Randbedingungen für das Detailmodell bereitstellt. Zunächst galt es, die Grenzen des Detailmodells abzuschätzen. Dabei waren die aktuellsten vorliegenden bathymetrischen Daten aus dem Jahr 2004. Wie oben beschrieben, ist größter Wert auf eine sorgfältige Netzgenerierung zu legen, die sehr stark von der Bathymetrie abhängt. Gerade im Bereich der Neufelder Rinne war die Dichte der bathymetrischen Daten nicht sehr hoch. In diesen Bereichen können die vorhandenen Daten durch die Daten der Fächerecholotvermessung mit dem Messboot des Instituts für Wasserbau ergänzt werden. Somit würde es auch gelingen, in Bereichen mit einem Höhengradienten hochauflösende Messungen einzupflegen. Durch die hohe morphodynamische Aktivität im Untersuchungsgebiet ist es nicht möglich, Daten aus den Jahren 2004 und 2006 zu kombinieren. Im Oktober 2006 wurde eine durch das WSA Hamburg veranlasste Laserscanbefliegung durchgeführt. Die bearbeiteten Daten dieser Befliegung werden ab Februar 2007 zur Verfügung stehen. Sie umfassen die Wattgebiete, jedoch keine Wasserflächen wie die Neufelder Rinne. Kombiniert mit den Fächerecholotdaten aus dem gleichen Zeitraum ergeben sie ein präzises und aktuelles Abbild der Bathymetrie im Untersuchungsgebiet. Eine Generierung des Netzwerkes für das Modell sollte unbedingt mit diesen Daten erfolgen. Wie bereits beschrieben, ist es wegen der geringen Wassertiefen im Untersuchungsgebiet nicht möglich, das gesamte relevante Gebiet mit dem Fächerecholot zu vermessen. Eine Optimierung kann nur durch die Kombination verschiedener Datenquellen erreicht werden. Eine Modellerstellung zum jetzigen Zeitpunkt erfolgte mit den aktuellsten vorhandenen Daten aus dem Jahr 2004. Dabei konnte das Netz im Allgemeinen erstellt werden und die erforderlichen Randbedingungen getestet werden. Nach Vorliegen der Laserscandaten und deren Kombination mit den Fächerecholotdaten kann dann eine Anpassung des Netzes an diese Bathymetrie, speziell im Bereich der Neufelder Rinne erfolgen.

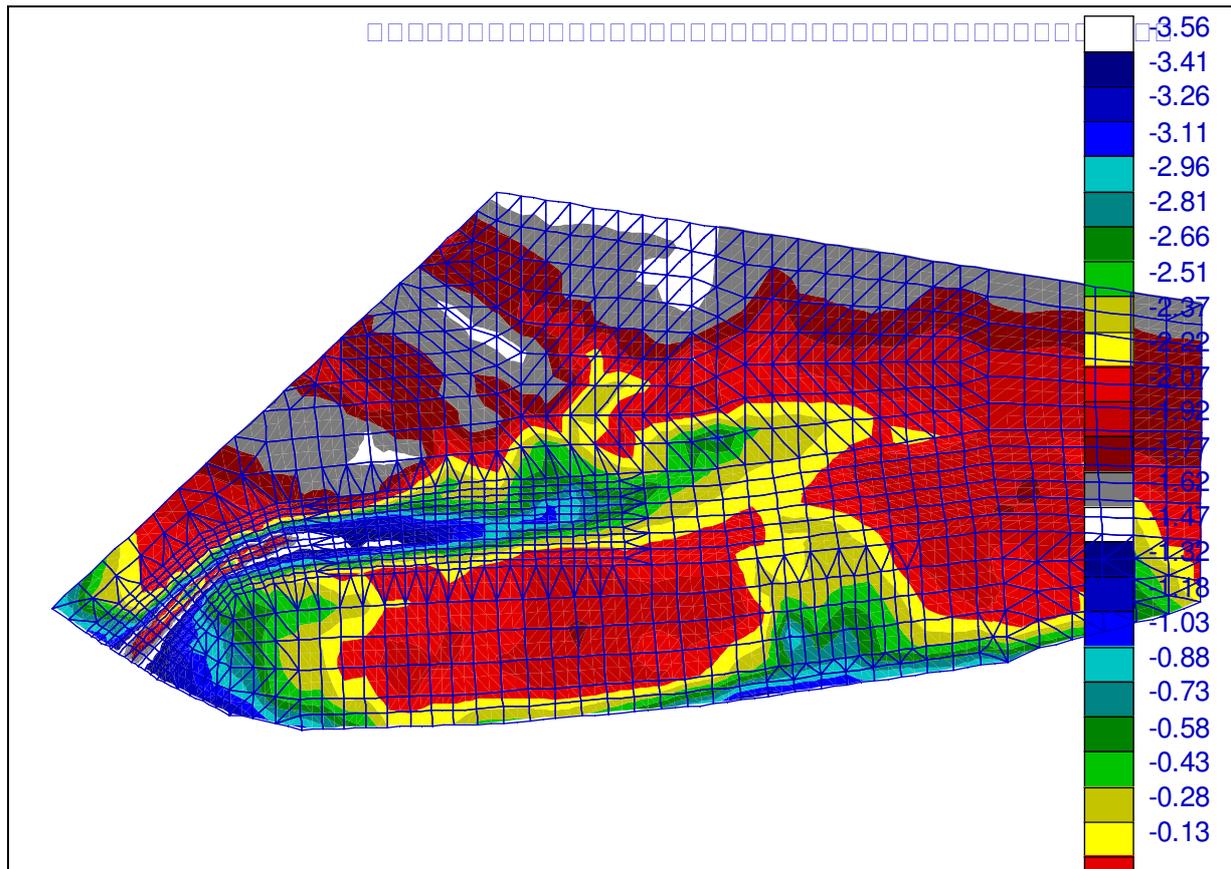


Abbildung 5.9: Modellgebiet mit generiertem Netz

Die vorliegenden Höhendaten des Jahres 2004 wurden zunächst in einem Geographischen Informationssystem dargestellt, um die Modellgrenzen festzulegen. Als westliche Modellgrenze wurde dabei die Wattwasserscheide ausgewählt. Ihre Lage wurde zunächst geschätzt, indem die Lage der Wathöhenscheide bestimmt wurde. Ihre Lage kann von der Lage der Wattwasserscheide abweichen, daher gilt es, anhand von Strömungsmessungen mit dem Mini-ADCP Katamaran die genaue Position festzulegen. Es wird vorausgesetzt, dass das Gebiet jenseits der Wasserscheide durch die Ausläufer des Klotzenloches be- und entwässert werden, das Gebiet auf der Modellseite der Wasserscheide durch die Neufelder Rinne. Dieser Voraussetzung steht die oben beschriebene Beobachtung entgegen, dass ein erheblicher Sedimenteintrag scheinbar aus Richtung des Klotzenloches stattfand. Der nördliche Modellrand wird durch das hohe Watt bzw. den Übergang zum Vorland gebildet. Hier wird ein geschlossener Modellrand vorausgesetzt. Der östliche Modellrand wird dort gewählt, wo die Neufelder Rinne soweit verflacht ist, dass sie nicht mehr als solche erkennbar ist und auch vom Elbefahrwasser keine Priele mehr in den Neufelder Sand führen, die eine Verbindung zur Neufelder Rinne haben könnten. Der südliche Modellrand wird am Rand des Neufelder Sandes gesetzt. Allgemeinen Regeln zur Netzgenerierung folgend, muss der Rand dort gesetzt werden, wo keine großen Gradienten in der Bathymetrie zu erwarten sind (Abbildung 5.10). Die Randbedingungen für den östlichen und den südlichen Rand sind durch ein größeres Umgebungsmodell und durch Naturmessungen zu ermitteln.



Abbildung 5.10: Abgrenzungen des Detailmodells

Es wurden die innerhalb des Polygonzuges, der das oben beschriebene Modell umgrenzt, liegenden Höhendaten selektiert und ein entsprechendes Map file erzeugt, das in RMAGEN eingelesen wird und neben Höheninformationen zusätzlich Informationen über die Abgrenzungen des Modells enthält. Die Höheninformationen wurden in RMAGEN visualisiert und ein erstes grobes Netz erstellt. Entlang des Verlaufes der Neufelder Rinne wurde dabei schon feiner diskretisiert, während ebene Wattflächen mit größeren Elementen versehen wurden. Anschließend wurde den Knoten der Elemente auf Basis der bathymetrischen Daten eine Höhe zugewiesen, und die Konturen der Höhenverteilung wurden visualisiert. Im Anschluss wurde das Netz an die Konturen angepasst und an entsprechenden Stellen verfeinert. Nachdem allen Knoten wiederum eine Höhe zugewiesen wurde und erneut die Konturen der auf dem Netzwerk basierenden Höhen dargestellt wurden, kamen die feineren Strukturen des Untersuchungsgebietes noch besser heraus. Nach weiteren Verfeinerungen ergab sich ein Netz, das zu ersten Testläufen genutzt werden konnte (Abbildung 5.9).

Zur Eingabe der Randbedingungen und zur Kontrolle der Ergebnisse wurden am Modellrand bzw. innerhalb des Modells Kontinuitätslinien erstellt. In entsprechenden Dateien wurden dann Randbedingungen definiert, die an den Kontinuitätslinien in das Modell eingebracht wurden. Gesteuert wird das Modell mit einer Kontrolldatei, die den Kontinuitätslinien die zugehörigen Randbedingungen und dem Modell die Anfangsbedingungen zuweist. An der Einfahrt zur Neufelder Rinne wurde eine Kontinuitätslinie generiert, die als obere Randbedingung den Wasserstand vorgibt. Am östlichen Modellrand wurde als untere Randbedingung ein sehr geringer Durchfluss eingestellt. Alle anderen Modellränder wurden als geschlossene Ränder definiert. Diese Vorgehensweise ist eine deutliche Vereinfachung des tatsächlichen Systems, aber geeignet, erste Testläufe des Modells durchzuführen. Es wird dabei angenommen, dass das Untersuchungsgebiet durch die Neufelder Rinne be- und entwässert wird und die umgebenden Wattflächen von dort aus geflutet werden bzw. wieder tro-

ckenfallen. Dies ist auch in etwa der Vorgang, der sich dem Betrachter auch bei den Aufenthalten im Untersuchungsgebiet zeigte. Nicht berücksichtigt wird zunächst, dass mit steigenden Wasserständen der Neufelder Sand nicht nur von der Neufelder Rinne, sondern auch von der südlichen Modellgrenze her eingeschnürt wird und über einen flachen Priel dann auch Kontakt zum tiefen Wasser hat.

Soll die Hydrodynamik und damit in der Folge auch die Morphodynamik des Untersuchungsgebietes erfolgreich modelliert werden, so muss nicht nur die Bathymetrie möglichst exakt abgebildet werden, sondern auch die Randbedingungen müssen sehr genau gewählt werden. Diese Forderung zeigt deutlich den weiteren Bedarf von Naturmessungen. Aber auch ein Umgebungsmodell ist notwendig, um die Zusammenhänge in größeren Raumskalen zu verstehen. Aus diesem Grunde wurde parallel mit dem Aufbau des Umgebungsmodells begonnen. Als Modellgebiet wurde der Bereich der Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel gewählt (Abbildung 5.11). Auch hier wurden zunächst die bathymetrischen Daten aus dem Jahr 2004 verwendet. Analog zu den oben beschriebenen Schritten wurde mit der Erstellung eines finiten Elemente Netzes begonnen.

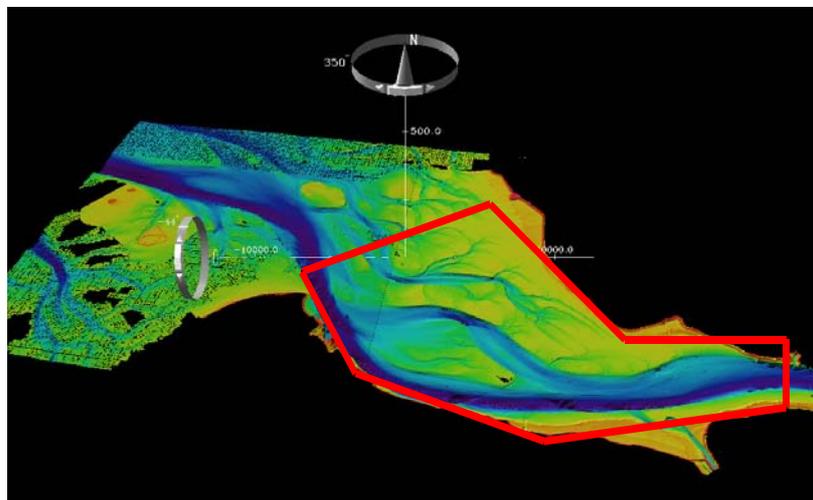


Abbildung 5.11: Abgrenzungen des Umgebungsmodells

Die Messergebnisse aus Phase 1 zeigten, dass zunächst eine 2-dimensionale tiefenintegrierte Modellierung ausreicht. Das im Untersuchungsgebiet vorhandene Strömungsfeld kann durch eine 2-Dimensionalität abgebildet werden. Die vorhandenen Sekundärströmungen können zunächst vernachlässigt werden.

6 Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise

Plangemäß sind in **Phase 2** des Projektes die Erweiterung des numerischen Modells um ein Seegangsmodule sowie die Validierung anhand der Naturmessungen vorgesehen. Des Weiteren erfolgt eine Fortsetzung des Messprogramms.

Während **Phase 1** des Projektes wurden zunächst Messungen im Messquerschnitt in der Neufelder Rinne durchgeführt. Die Neufelder Rinne ist das entscheidende Steuerungselement zur Be- und Entwässerung des Untersuchungsgebietes. Die bisherigen Messergebnisse stellen diese Bedeutung heraus und zeigen die Dominanz der Tideströmung in Zusammenhang mit dem Sedimenttransport. Im weiteren Verlauf der Messungen soll die Neufelder Rinne auch weiterhin ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen sein. In Prielmitte ist auch weiterhin die Aufzeichnung von Strömungsparametern sowie der Sedimentkonzentration vorgesehen. Dabei sollte die Messposition im Messquerschnitt weiter beibehalten werden. Somit braucht der Geräteträger nicht versetzt werden und die Verhältnisse an dieser Position sind bekannt und können weiterhin als Anlaufpunkt für das Messboot verwendet werden. Von den dann in Prielmitte aufgezeichneten Werten kann nach den Erkenntnisse der in **Phase 1** erfolgten Messungen auf die Strömungsverhältnisse an den Prielrändern geschlossen werden. Das Gerät sollte nicht weiter in Richtung Einfahrt der Rinne verlegt werden, da dort die Effekte der Horizontalverschiebung, die für die eigentliche Untersuchung nicht von Interesse sind, die relevanten Messungen beeinflussen.

Auch weiterhin sind Fächerecholotaufnahmen der Neufelder Rinne geplant, um Sedimentbilanzen aufstellen zu können. Allgemein sollte aber die Aufzeichnung von Messparametern in der folgenden Phase des Projektes in der Fläche erfolgen. Um die bathymetrischen Daten, die aus der aktuellen Laserscanbefliegung gewonnen werden können, zu ergänzen sind weitere Echolotvermessungen vorgesehen. Eine Ergänzung wird im wesentlichen aber im Bereich der Rinne erforderlich sein, ein Bereich der ohnehin in regelmäßigen Abständen vermessen wird. Darüber hinaus werden Flächen auf dem Neufelder Sand sowie nördlich der Rinne auf dem Neufelder Watt gescannt. Aufgrund der Größe der Gesamtfläche ist es hier nicht möglich eine vollständige Vermessung durchzuführen und zu wiederholen. Aus diesem Grund werden spezielle kleinere Flächen immer angesteuert, um eine Sedimentbilanz auch auf den Wattflächen detailliert darstellen zu können.

Des Weiteren sollten Messungen durchgeführt werden, um die Modellierung zu unterstützen. Insbesondere zur Erfassung von Randbedingungen sollten Messgeräte installiert und Messfahrten unternommen werden. Entlang des südlichen und des östlichen Randes sollten Strömungsparameter und Sedimentkonzentrationen aufgezeichnet werden. An diesen Positionen sollten möglichst immer zwei Geräte entlang des Randes installiert werden, um an möglichst vielen Positionen gleichzeitig Informationen über die Strömungsparameter zu erhalten und somit von punktuellen Werten auf linienhafte Informationen schließen zu können, die im Modell verwendet werden können. Nach einer Messkampagne sollten die Geräte dann an den anderen Modellrand versetzt werden. Ergänzend werden mobile Strömungsmessungen mit dem Stream Pro-ADCP am südlichen und östlichen Rand vorgenommen. Auf die gleiche Weise wird die genaue Position der Wattwasserscheide am westlichen Modellrand bestimmt.

Seegangsmessungen sollten in der Einfahrt der Neufelder Rinne sowie verteilt über die Wattkante am südlichen Modellrand erfolgen. Um die Entwicklung des Seegangs zu verfolgen, sind weitere Messungen auf der Fläche des Neufelder Sandes vorgesehen.

Weiterhin sind für die Modellierung detaillierte Kenntnisse über die anstehenden Sedimente erforderlich. Daher sind umfangreiche großflächige Entnahmen von Sedimentproben vorgesehen. Ergänzt werden kann diese herkömmliche Methode zur Seegrundklassifizierung durch hydroakustische Verfahren mit Hilfe des Fächerecholotes. Die Grenzen und Möglichkeiten dieses Verfahrens auf den Gebieten des Wattenmeeres wurden im Rahmen einer Studienarbeit geprüft. Weitere Untersuchungen in Form von Diplom- oder Studienarbeiten sind geplant. Bestenfalls können dann zeitsparend flächendeckende Informationen zur Beschaffenheit des Wattbodens gewonnen werden und das Detailmodell einfließen.

Nachdem die Laserscandaten der Befliegung der Wattflächen aus dem Oktober 2006 zur Verfügung stehen, werden diese im Bereich der Neufelder Rinne mit den Daten der Fächerecholotvermessungen ergänzt und diese neue Bathymetrie in das Modell eingepflegt. Es erfolgt dann eine Anpassung des Netzes an diese Bathymetrie sowie die Erstellung genauer Randbedingungen, die aus den entsprechenden Naturmessungen gewonnen werden.

Wie bereits in **Phase 0** des Projektes erarbeitet, ist ein Kamerasystem sowie eine Wetterstation zur Erfassung von Windparametern sinnvoll. Entsprechende Vorarbeit wurde in den vergangenen Monate geleistet und vor kurzem ein entsprechendes System auf der Insel Sylt im Rahmen eines anderen Projektes aufgebaut. Neben dem Online-Abruf aktueller Bilder per MMS können ferngesteuert ganze Videosequenzen aufgezeichnet und lokal gespeichert werden. Diese visuellen Eindrücke helfen, das Systemverständnis zu steigern. Insbesondere in Phasen mit stärkerem Wind und Seegang, in denen ein Aufenthalt im Neufelder Watt mit dem Messboot nicht möglich ist, können somit analysiert werden. Die Windparameter ergänzen die Seegangsmessungen sinnvoll. Eine Ergänzung des Kamerasystems um diese Wetterstation kann relativ kostengünstig erfolgen. Es wird dann ebenfalls möglich sein, online Wetterdaten abzurufen und somit Messeinsätze oder einen Einsatz der Kamera besser planen zu können.

Im Rahmen der **Phase 1** wurden beim Deutschen Wetterdienst Winddaten der Station Cuxhaven bestellt. Diese werden zeitnah in die aufgezeichneten Daten eingepflegt und ergänzen die Darstellungen der Messergebnisse. Im Rahmen eines KfKI-Projektes wurde ein Windatlas erstellt, der es erlaubt, nach Eingabe eines Wasserstandes sowie eines Windfeldes die Windgeschwindigkeit für beliebige Punkte innerhalb des Modellgebietes, das unter anderem die Elbmündung umfasst, zu berechnen. Sobald dieser Windatlas online zur Verfügung steht, ist geplant, die dann vorhandenen Winddaten der Station Cuxhaven auf das Untersuchungsgebiet umzurechnen. Dieses Verfahren kann dann voraussichtlich als Alternative zur eigenen Wetterstation dienen.

In Zusammenarbeit mit Prof. Thurau, dem Leiter des Instituts für Mikrosystemtechnik an der TU Harburg, erfolgt zur Zeit im Rahmen eines studentischen Projektes der Aufbau eines Knotennetzes zur Seegangsaufzeichnung. Dabei zeichnen einzelne Drucksonden mit einer Frequenz von 5 Hz den entsprechenden Wasserdruck auf. Unmittelbar auf diesen Knoten erfolgt eine Auswertung der Seegangsdaten, die während Phasen, in denen die Knoten trockenfallen, diese Daten zu einem Hauptknoten senden, der auch eine Fernabfrage per SMS ermöglicht. Zur optimierten Planung von Messfahrten können diese Informationen über aktuelle Seegangparameter genutzt werden. Zudem werden die Rohdaten gespeichert und stehen für weitere Auswertungen zur Verfügung. Dieses Konzept wird im weiteren Verlauf des Projektes

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

weiterentwickelt und erste Prototypen nach Fertigstellung in einem Testlauf eingesetzt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Angesichts der großen Bedeutung, die der freie Zugang des Hamburger Hafens zum Meer für die wirtschaftliche Entwicklung des Nordens Deutschlands besitzt, dieser aber auch durch Fehleinschätzungen in der morphodynamischen Entwicklung des Elbeästuars zu unwirtschaftlichen Unterhaltungsmaßnahmen führen kann, muss die Wissensgrundlage über morphodynamische Prozessabläufe und Wirkungszusammenhänge dringend verbessert werden. Insbesondere gilt dies für die Flachwasserbereiche des Wattenmeeres.

Das Projekt „Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt“ soll auf diesem Gebiet einen Beitrag leisten, indem auf der Grundlage umfangreicher Felduntersuchungen auf einem Teilraum des norddeutschen Wattenmeeres die hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse analysiert und Wirkungsketten aufgezeigt werden. Hierauf aufbauend soll eine verbesserte Theorie zur Morphodynamik von Wattbereichen entwickelt werden, die es erlaubt, das Verhalten von Seegang in Flachwasserstrukturen sowohl in der Fläche als auch Prielen und Rinnen des Wattenmeeres zu beschreiben, die daraus resultierenden Schubspannungsbelastungen zu quantifizieren und die Stabilität des Wattsedimentes in Abhängigkeit von Kornzusammensetzung, Bodengefüge, hydrogeologischen und auch biogenen Verfestigungen zu beschreiben. Diese Theorie soll in zwei Schritten an numerischen Modellen erprobt werden. Zunächst wird sie in einem Feinmodell implementiert, mit dem Ziel, die dominierenden kleinskaligen Prozesse möglichst vollständig abzubilden und dabei die für den morphodynamischen Prozess wichtigen Detailstrukturen sowohl in der Fläche als auch in Prielen und Rinnen in ihrer räumliche und zeitlichen Entwicklung nachzuvollziehen. Dazu wird auf das Strömungs- und Stofftransportmodell RMA10 zurückgegriffen. Für großflächige Anwendungen auf ganze Wattgebiete und Ästuare ist die Parametrisierung der entwickelten Theorie dann auf eine gröbere Skalierung hin zu übertragen. Dabei ist eine geeignete Methode der Aggregation zu entwickeln und mit dem Feinmodell abzugleichen.

Neben dem rein wissenschaftlichen Interesse an der Beschreibung dieser Phänomene sollen auch praxisrelevante Fragen, wie z.B. zur subaquatischen Ablagerung von Baggert, beantwortet werden.

Der hier vorliegende Bericht beschreibt zunächst die im Rahmen der Naturmessungen durchgeführten Arbeiten. Die Messgeräte, die verwendeten Einstellungen und die erforderlichen Arbeitsschritte werden dokumentiert. Neben der Auswertung dieser Messungen wurden auch morphologische Veränderungen in größeren Raum- und Zeitskalen untersucht.

Aus den bisher im Rahmen dieses Projektes erfolgten Untersuchungen und Naturmessungen können bestimmte Schlüsse über die Morphodynamik des Neufelder Watts bzw. des Neufelder Sandes gezogen werden. Dabei finden sowohl die stationären Messungen als auch die Fächerecholotvermessungen Berücksichtigung.

Aus der Analyse vorliegender historischer Vermessungsdaten ging hervor, dass der Neufelder Sand über lange Betrachtungszeiträume einer konstanten Entwicklung folgt, auf kleinen Zeitskalen jedoch Veränderungen unterliegt. Es ist das Ziel, diese Veränderungen zu verstehen. Entsprechende morphologische Entwicklungen wurden durch die Fächerecholotmessungen dokumentiert.

Die Neufelder Rinne ist über den Untersuchungszeitraum insgesamt relativ lagestabil. Lediglich im Mündungsbereich finden horizontale Verschiebungen der Achse statt, die aber für die morphologische Entwicklung von untergeordneter Bedeutung sind. Innerhalb der Neufelder Rinne fanden zwar Materialumlagerungen statt, insge-

samt ist die Sedimentbilanz auf den untersuchten Flächen allerdings ausgeglichen. Unmittelbare Auswirkungen von Extremereignissen auf die Morphologie konnten im Betrachtungszeitraum nicht ausgemacht werden.

Durch die Abschätzung des residuellen Transports wird deutlich, dass der Sedimenttransport während der Ebbe überwiegt. Ausgetragenes Material sedimentiert an der Ausfahrt der Neufelder Rinne wieder und bildet dort ein Ebbdelta. Aus der Rinne ausgetragenes Material stammt von den Wattflächen, was sich in den erhöhten Sedimentkonzentrationen an den Prielrändern zeigt.

Durch die Auswertung der Strömungsmessungen wird deutlich, dass die Neufelder Rinne das entscheidende Steuerungsinstrument für die Be- und Entwässerung des gesamten Wattkomplexes ist. Die tidebedingten Strömungen folgen auf der gesamten durch die Messgeräte erfassten Breite der Achse der Rinne. Auch bei Wasserständen, die deutlich über der Oberkante des umliegenden Watts liegen, entspricht die Strömungsrichtung der Ausrichtung der Rinne. Während Ebbe und Flut sind die üblichen Strömungsmaxima festzustellen. Während normaler Tiden folgt den tidebedingten Strömungsmaxima zeitversetzt ein Maximum in der Konzentration suspendierter Sedimente. Der Sedimenttransport ist somit primär durch die Tideströmung geprägt. Triftströmungen oder seegangsinduzierte Strömungen sind erst bei extremen Wetterlagen zu erkennen. Im untersuchten Messquerschnitt ist die Wirkung von seegangsinduzierten Strömungen begrenzt, da nur bei erhöhten Wasserständen nennenswerter Seegang bis dorthin vordringt, dann allerdings der vorhandene Wasserstand eine hohe dämpfende Wirkung besitzt.

Während der ersten Phase des Projektes konnten wichtige Erkenntnisse über die Morphodynamik des Untersuchungsgebietes gewonnen werden. In der Folgephase werden diese Erkenntnisse in die hydronumerische Modellieren einfließen, die später helfen soll, zukünftige Strombaumaßnahmen zu bewerten.

Bei der Erstellung des hydronumerisch-morphologischen Modells ist ein Detailmodell in ein größeres Umgebungsmodell eingebettet. Dieses liefert die erforderlichen Randbedingungen für das Detailmodell. Das Detailmodell wird im weiteren Verlauf des Projektes um ein Seegangsmodul erweitert und anhand der Naturmessungen validiert. Die Messergebnisse zeigen, dass das Strömungsfeld im Untersuchungsgebiet durch ein 2-dimensionales Modell gut abgebildet werden kann.

Auch weiterhin sind in regelmäßigen Abständen Fächerecholotaufnahmen der Neufelder Rinne geplant, um Sedimentbilanzen aufstellen zu können. Des Weiteren müssen Messungen durchgeführt werden, um die Modellierung zu unterstützen. Insbesondere zur Erfassung von Randbedingungen müssen weitere Messkampagnen betrieben und Messfahrten unternommen werden. Entlang des südlichen und des östlichen Modellrandes müssen Strömungsparameter und Sedimentkonzentrationen aufgezeichnet werden. An diesen Positionen werden jeweils zwei Geräte entlang des Randes installiert werden, um somit von punktuellen Werten auf linienhafte Informationen schließen zu können, die im Modell verwendet werden können. Nach einer Messkampagne werden die Geräte dann an den anderen Modellrand versetzt werden. Ergänzend werden mobile Strömungsmessungen mit ADCP-Geräten am südlichen und östlichen Modellrand vorgenommen.

Seegangsmessungen werden verteilt über die Wattkante am südlichen Modellrand sowie auf der Fläche des Neufelder Sandes vorgenommen.

Weiterhin sind für die Modellierung detaillierte Kenntnisse über die anstehenden Sedimente erforderlich. Daher sind umfangreiche großflächige Entnahmen von Sedimentproben vorgesehen. Ergänzt werden kann diese herkömmliche Methode zur

Seegrundklassifizierung durch hydroakustische Verfahren mit Hilfe eines Fächer-
echolotes.

8 Schrifttum

- Been, K., 1983: Self-weight consolidation of soft soils: an experiment and theoretical study, In: Geotechnique, Jg.31, H.4, S.519 - 535
- Been, K., Sills, G.C., 1984: Escape of pore fluid from consolidating sediment
- Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie, 2005: Seekarte der Elbmündung
- Burt, N.T., 1986: Field Settling velocities of estuary muds, In: Metha, A.J., 1986: Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Defra & Environment Agency (Hrsg.), 2005 : Final Report of the Estuary Process research Project (EstProc), http://www.estproc.net/EstProc_library.htm
- DVWK (Hrsg.), 1986: Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 125, Schwebstoffmessungen, Verlag Paul Parey, Hamburg
- Dyer, K., 1986: Coastal and Estuarine Sediment Dynamics, John Wiley & Sons, S.215 - 247
- Fröhle, P., 2000: Messungen und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenschutzes, Dissertation
- Gibson, R.E. et al 1967 : The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays, In: Geotechnique, Jg. 17, S. 261 - 247
- Güven, N., 1992: Molecular aspects of clay-water interactions, In: Güven, N., Pollastro, R.M.: Clay-Water Interface and its Rheological Implications, H.4, The Clay Minerals Society, S. 1-80
- Hofstede, J., 1991: Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der deutschen Bucht, In: Berliner geographische Studien, Band 31
- Horikawa, K., 1977: Present state of coastal sediment studies, In: Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 56, S.77 - 197
- HPA & WSDN (Hrsg.), 2006: Konzepte für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg, Broschüre
- Kendrick, M.P., Waters, 1987: Field Laboratory Measurements of Fluid Mud Layer
- Kirby, R., 1986: Suspended fine cohesive sediment in the Severn Estuary and inner Bristol Channel, Report No. ETSU-STP-4042 to the UK Atomic Energy Authority. Ravensrodd Consultants, Taunton, UK, 243 pp.
- Krone, R.B., 1962: The significance of aggregate properties to transport processes, In: Metha, A.J., 1986: Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Kynch, G.J., 1952: A theory of sedimentation, In: Transaction of the Faraday Society, Jg. 48, S.108 - 125
- Lagaly, G., 1988: Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen, In: Lang, H.J., Tonmineralogie und Bodenmechanik. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik , ETH Zürich, S. 7-22

- Lick, W., Lick, J., Ziegler, C.K., 1992: Flocculation and its effect on the vertical transport of fine grained sediments, *Hydrobiologia*, Vol. 235, pp. 1-16
- Lippert, K., 2005: Analyse von Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und ihre mathematische Formulierung für hydrodynamische Modelle
- Maerker, C., 2006: Die Modellierung der Sinkgeschwindigkeit kohäsiver Schwebstoffe in Ästuaren, Diplomarbeit, TU Harburg, unveröffentlicht
- Malcherek, A., 2001: Hydrodynamik der Fließgewässer, Habilitation, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Bericht Nr. 61/2001
- Mayerle, R., Zielke, W., 2005: PROMORPH – Predictions of Medium-Scale Morphodynamics: Project Overview and Executive Summary. In: *Die Küste*, Heft 69
- Metha, A.J., 1986: Estuarine cohesive sediment dynamics. *Lecture Notes Coastal Estuarine Studies*, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Migniot, C., Bouloc 1981 : Étude des propriétés physique de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques
- Mimura, N., 1993: Rates of erosion and deposition of cohesive sediments under wave action, In: Metha, A.J., *Nearshore and estuarine cohesive sediment transport* , American Geophysical Union, S. 247 - 263
- Montague, C., 1986: Influence of biota on erodibility of sediments, In: Metha, A.J. 1986: *Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies*, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Nichols, M.M., 1986: Effects of fine sediment resuspension in estuaries, In: Metha, A.J. 1986: *Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies*, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Nielson, P., 1992 : *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport (Advanced Series on Ocean Engineering)*, World Scientific Publishing
- Nikora, V., Aberle, J., Green, M., 2004 : Sediment Flocculation: Settling Velocity, Flocculation Factor and Optical Backscatter. In: *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(10): 1043-1047
- Ongley, E.D., et al, 1992: Cohesive sediment transport: emerging issues for toxic chemical management, In: Hart, B.T. und Sly, P.G. *Sediment/Water Interactions*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London, S. 270 -289
- Parker, R.P., 1986: On the observation of cohesive sediment behaviour for engineering purposes, In: Metha, A.J. 1986: *Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies*, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Partheniades, E., 1986: A fundamental framework for cohesive sediment dynamics, In: Metha, A.J. 1986: *Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies*, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Pasche, E.; C. Brüning; W. Plöger; U. Teschke (2005): Möglichkeiten der Wirkungsanalyse anthropogener Veränderungen in naturnahen Fließgewässern, *Hamburger Wasserbau-Schriften*, Heft 4, Hrsg. Erik Pasche, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Raudkivi, A.J., 1982: *Grundlagen des Sedimenttransports*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- Richardson, Y.F., Zaki, W.N., 1954: Sedimentation and Fluidization, Part I Trans. Inst. Chem. Eng., Vol 15 p. 35-53
- Rijn, van, L.C., 1993: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Niederlande
- Rijn, L.C. van, Louisse, C.J., 1987 : The effect of waves on cohesive bed surface, Proceedings of Coastal and Port Engineering in Developing Countries
- Rodi, W., 1984: Turbulence models and their application in hydraulics: A state of the art review, 2. Edition, IAHR, Delft
- Siefert, W., 1983: Morphologische Analysen für das Knechtsand Gebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). In: Die Küste, Heft 38
- Siefert, W., 1987: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. In: die Küste, Heft 45
- Sills, G.C., Elder, D. M.G., 1986: The transition from sediment suspension to settled dynamics, In: Metha, A.J. 1986: Estuarine cohesive sediment dynamics. Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, Nr. 14, Springer Verlag, S. 290 - 325
- Sleath, J.F.A., 1984: Sea bed mechanics, John Wiley & Sons
- Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. Mon. Weather Rev. 91
- Spearman, J.R., Roberts, W., 2002: Comparison of flocculation models for applied sediment transport. In: Winterwerp, J.C. and Kranenburg, C. (Eds.): Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment, pp 277-293, Amsterdam, Elsevier Science B.V.
- Teisson, C., 1993: Consolidation of soft marine soils: Unifying theories, numerical modelling and in situ experiments. Collection de notes internes de la Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France (EDF)
- Teisson, C., Fritsch, D., 1988: Numerical Modelling of Suspended Sediment Transport in the Loire Estuary, In: Proceedings of the International Coastal Engineering Conference, pp. 2707-2720
- Terzaghi, K., 1925: Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, In: Die Untersuchungsergebnisse an Gesteinsdeformationen (Petrotektonik), International Journal of Earth Sciences, Springer, Berlin, Heidelberg
- Thumm, S., 2003: Temporale Analyse der morphodynamischen Veränderungen im Tidebereich der Elbe, Studienarbeit, TU Hamburg-Harburg, unveröffentlicht
- Williams, D.J.A., 1986: Rheology of cohesive suspensions. In: Mehta, A.J. (Ed.), Estuarine cohesive sediment dynamics, Springer-Verlag, Berlin, 110-125
- Winterwerp, J.C., et al, 1999: A laboratory study on the behaviour of mud from the Western Scheldt under tidal conditions, In: Metha, A.J., Nearshore and estuarine cohesive sediment transport , American Geophysical Union, S. 247 - 263
- Yamamoto, T., Takahashi, S., 1985: Wave Damping by Soil Motion, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE 111(1), 62–77
- Zanke, U., 1982: Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York

Zidan, Z., Lin, J., 1989: Viscous Damping of Solitary Waves Over Fluid-Mud Seabeds, In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 115, No. 3, May/June 1989, pp. 345-362

Anhang A – Darstellung der Ergebnisse der stationären Messgeräte

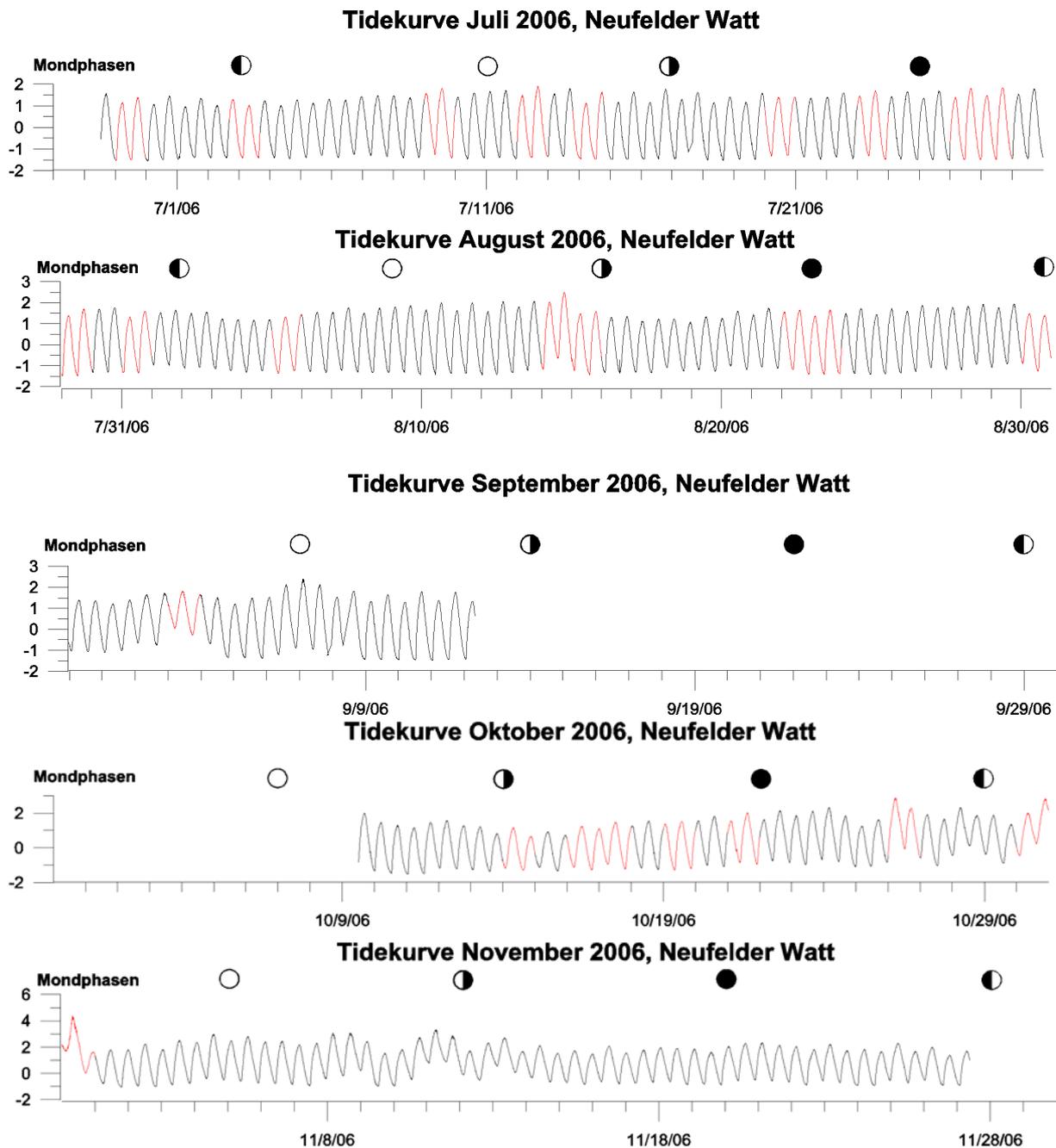


Abbildung A1: Tidekurve von Juli bis November; rot markiert sind die Zeiträume der im Folgenden dargestellten Auswertungen

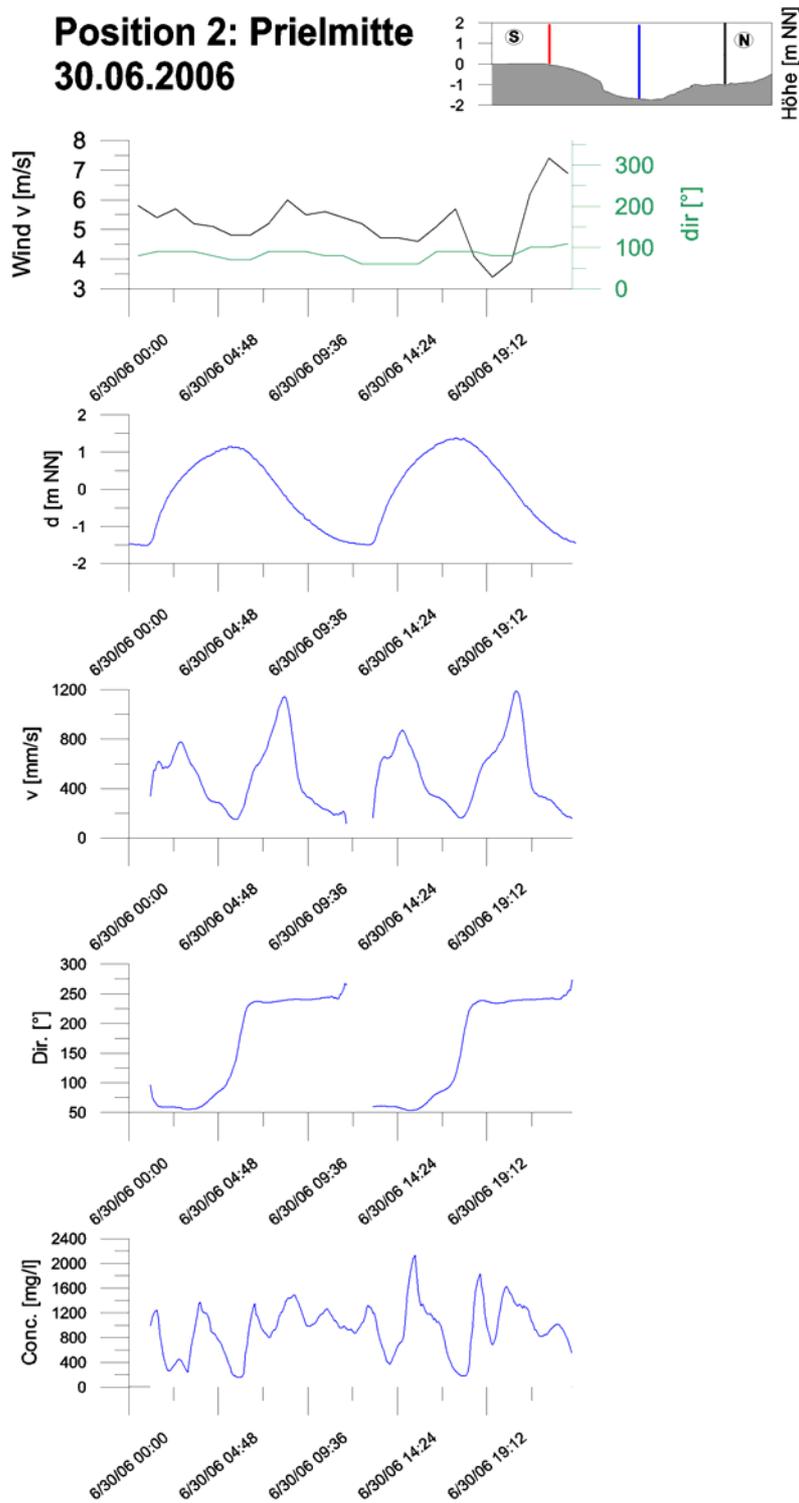


Abbildung A2: Darstellung der Messergebnisse; 30.06.2006

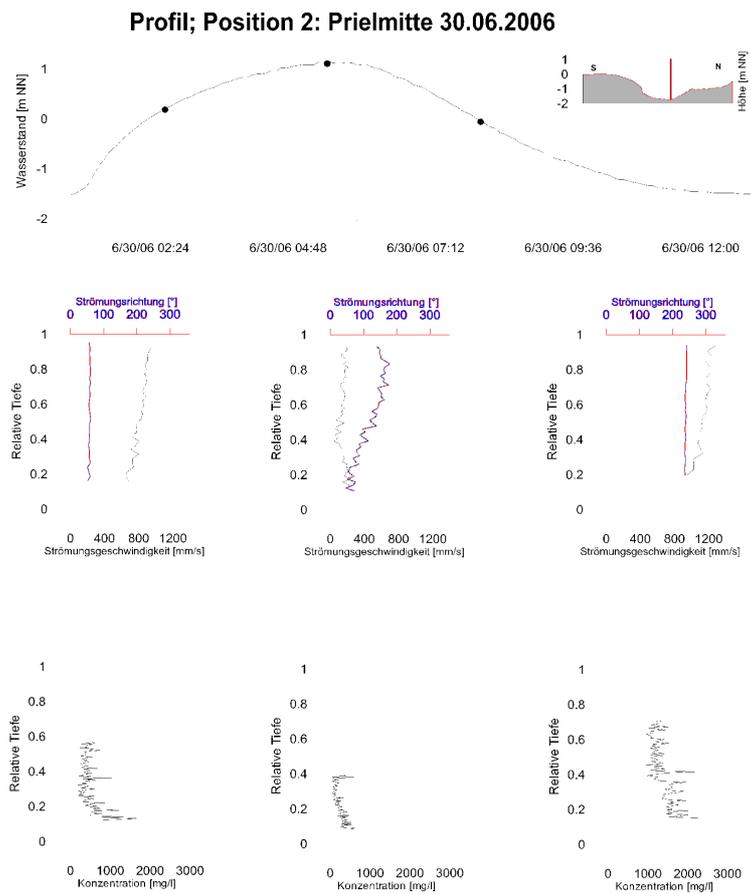


Abbildung A3: Darstellung der Messergebnisse; Profil; 30.06.2006

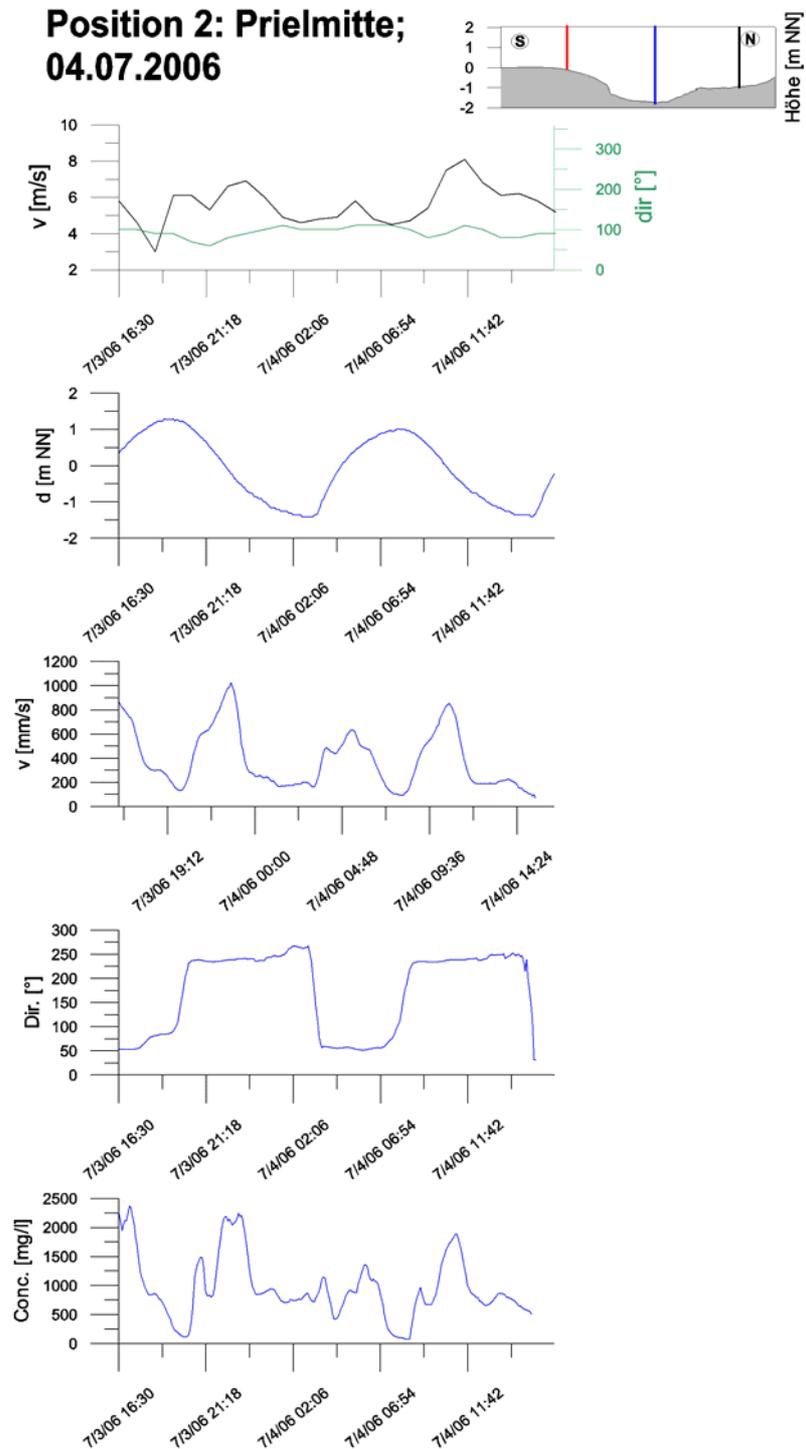


Abbildung A4: Darstellung der Messergebnisse; 04.07.2006

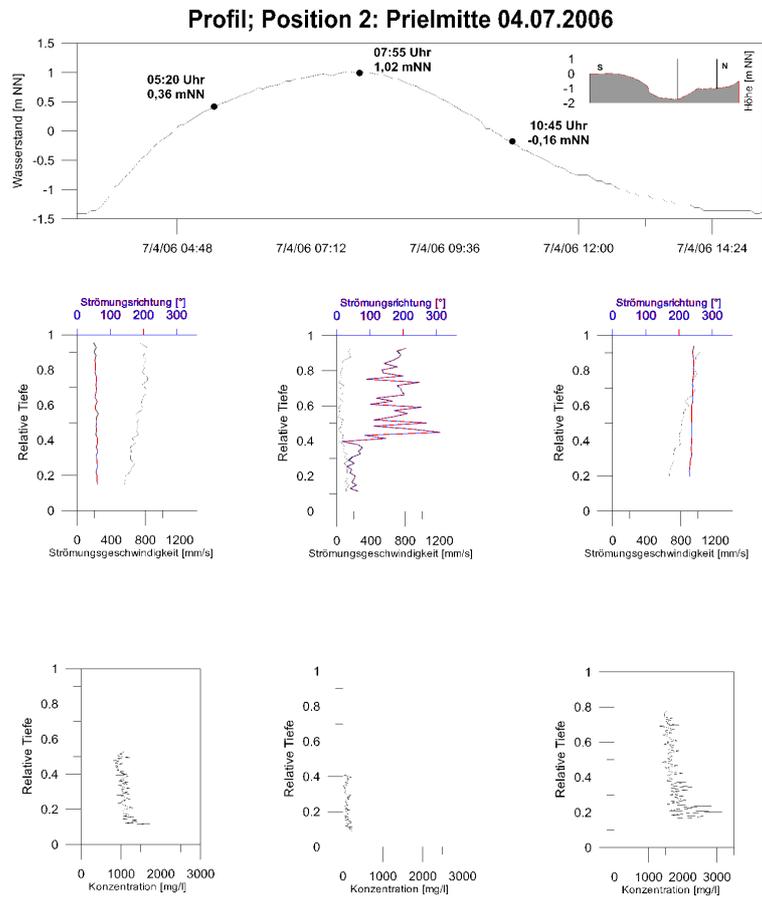


Abbildung A5: Darstellung der Messergebnisse; Profil; 04.07.2006

Position 2: Prielmitte; 10.07.2006,

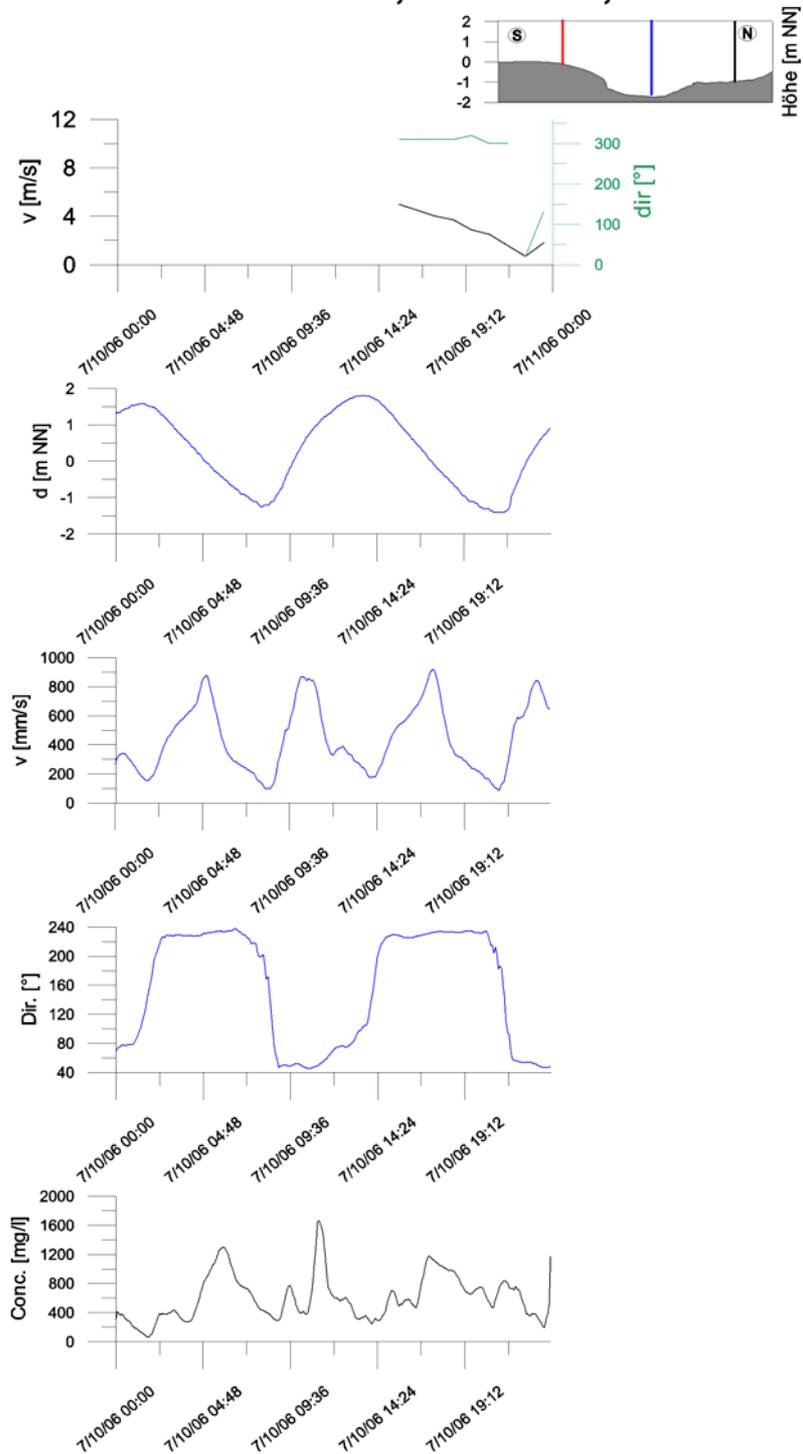


Abbildung A6: Darstellung der Messergebnisse; 10.07.2006

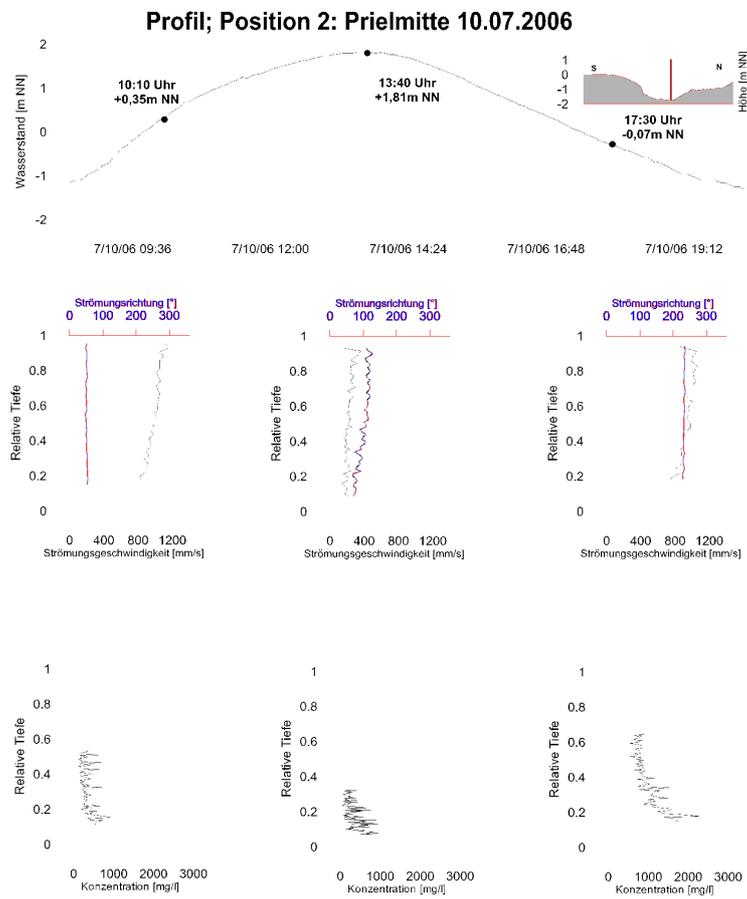


Abbildung A7: Darstellung der Messergebnisse; Profil; 10.07.2006

Position 2: Prielmitte; 13.07.2006

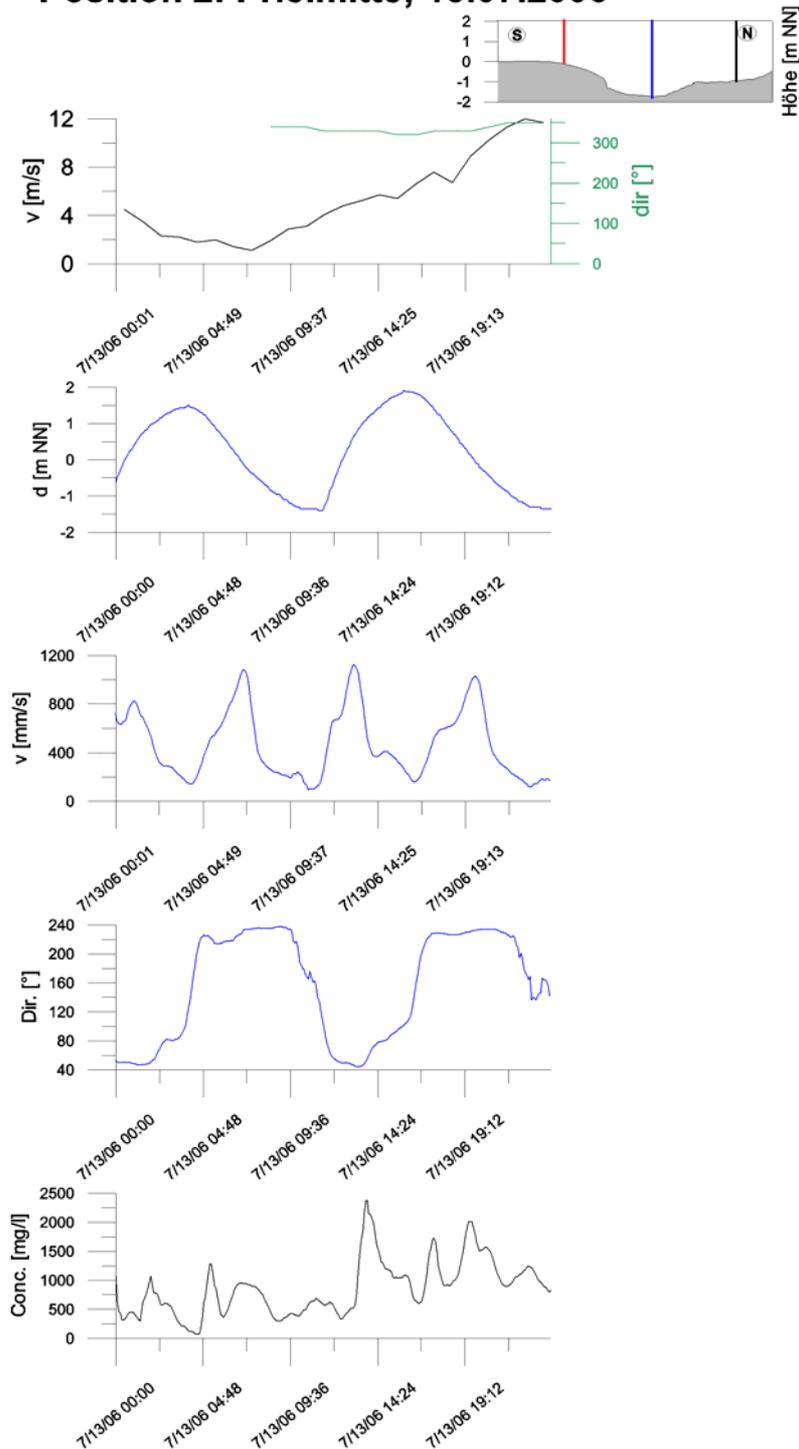


Abbildung A8: Darstellung der Messergebnisse; 13.07.2006

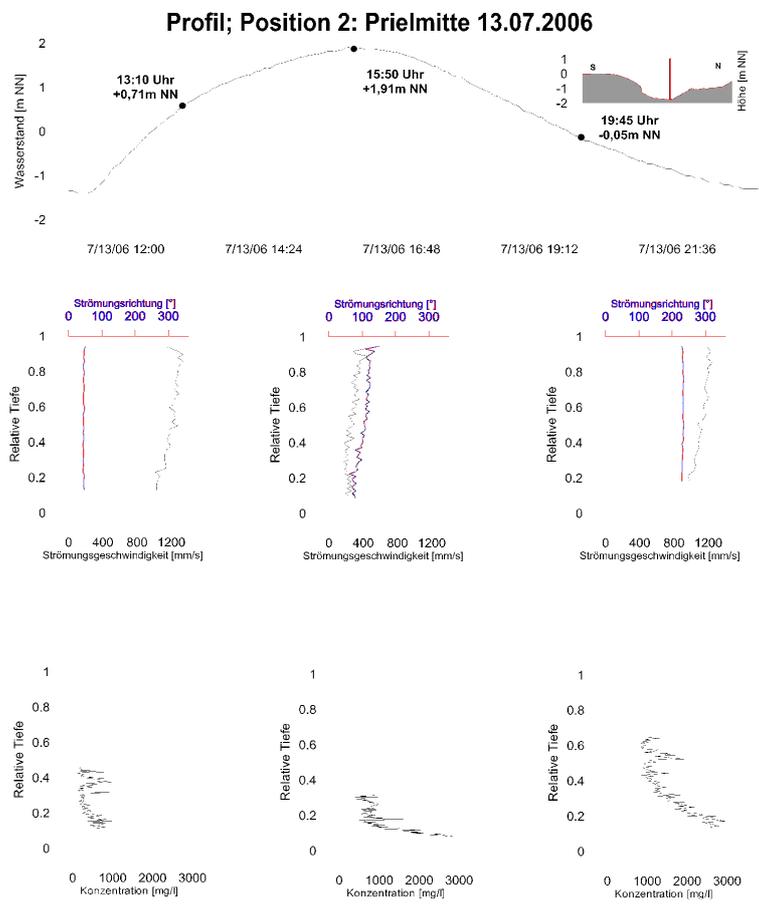


Abbildung A9: Darstellung der Messergebnisse; Profil; 13.07.2006

Position 2: Prielmitte; 15.07.2006,

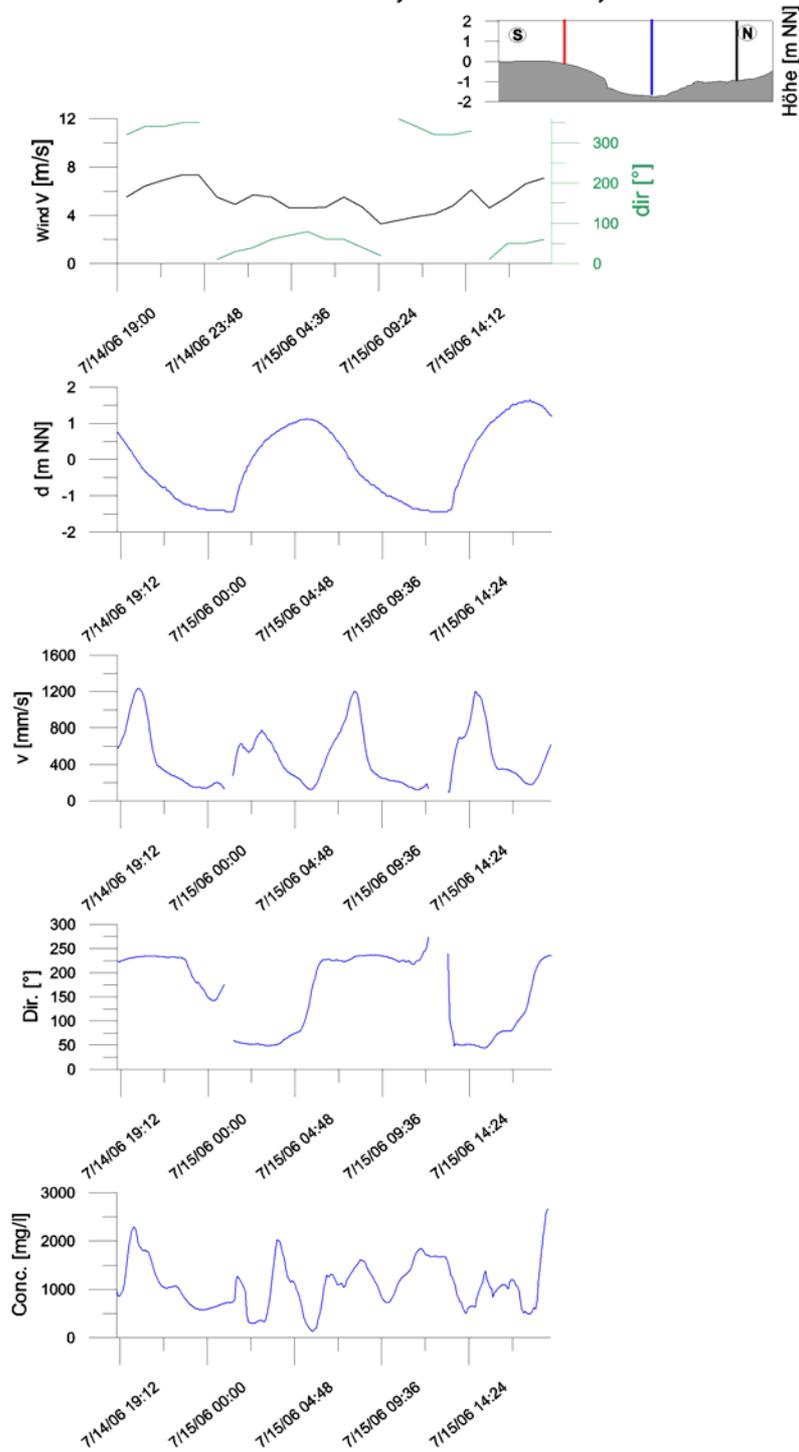


Abbildung A10: Darstellung der Messergebnisse; 15.07.2006

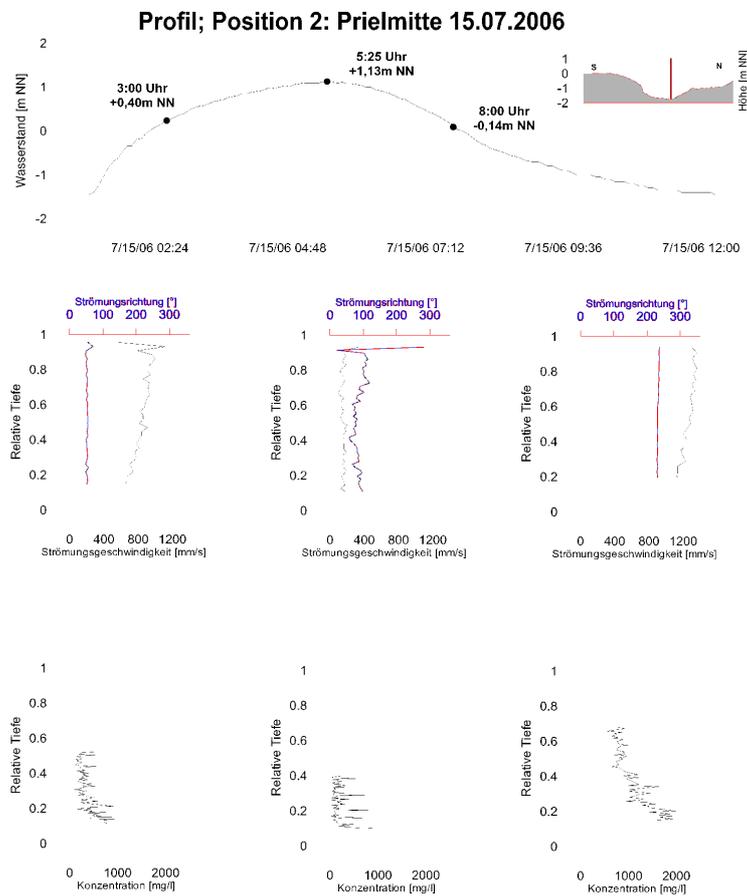


Abbildung A11: Darstellung der Messergebnisse; Profil; 15.07.2006

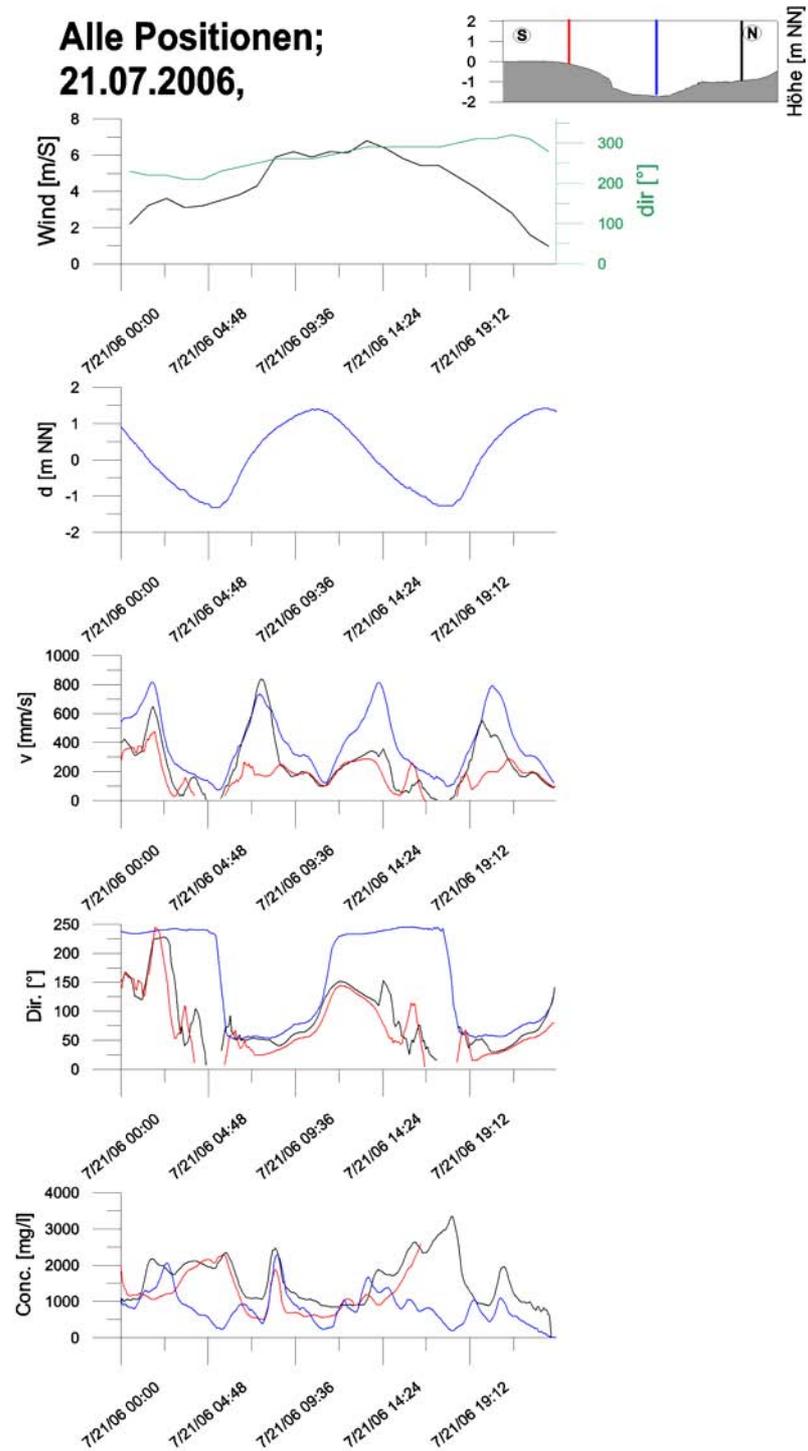


Abbildung A12: Darstellung der Messergebnisse; 21.07.2006

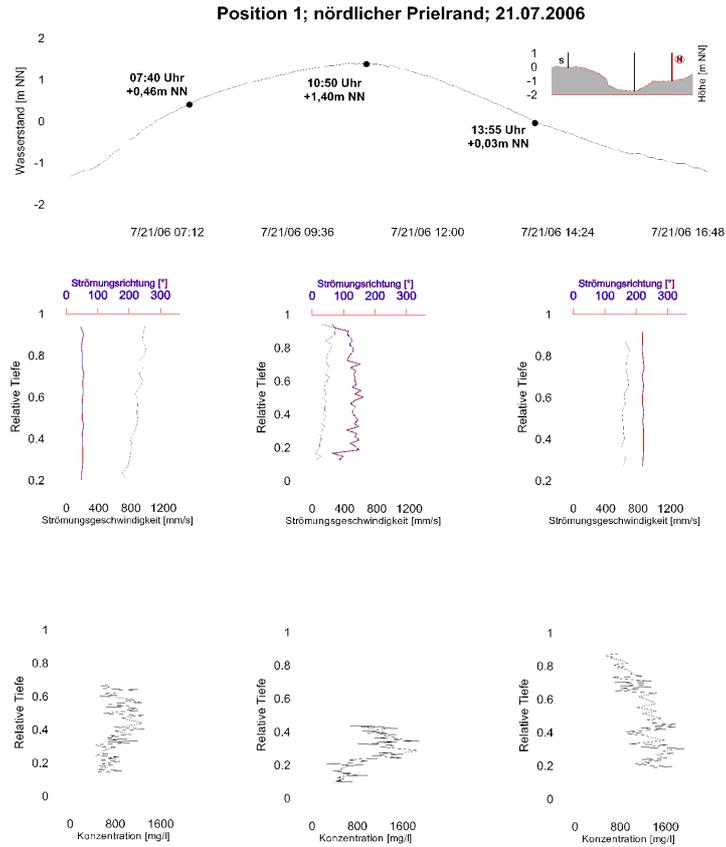


Abbildung A13: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 21.07.2006

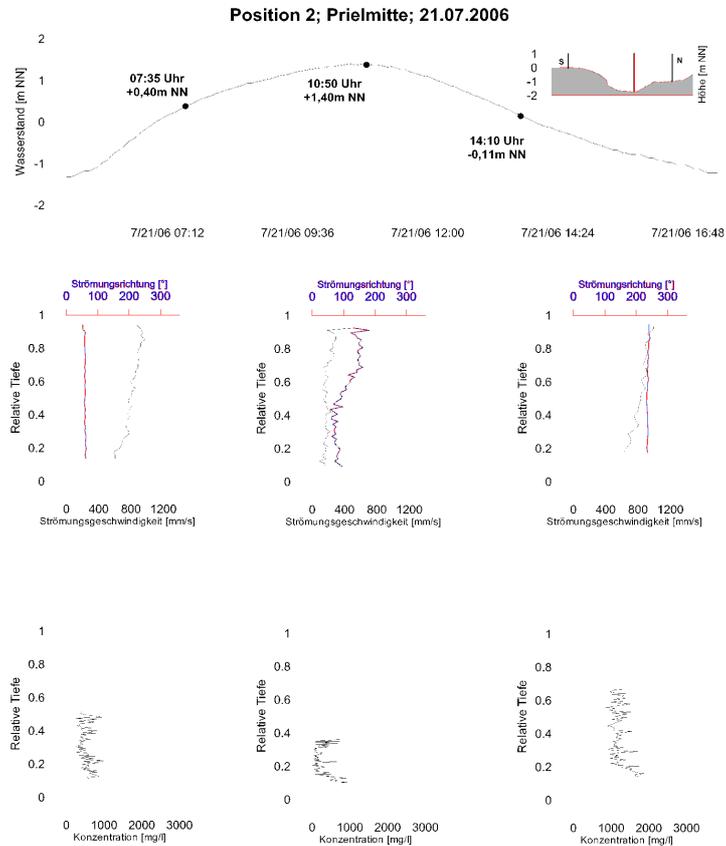


Abbildung A14: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 21.07.2006

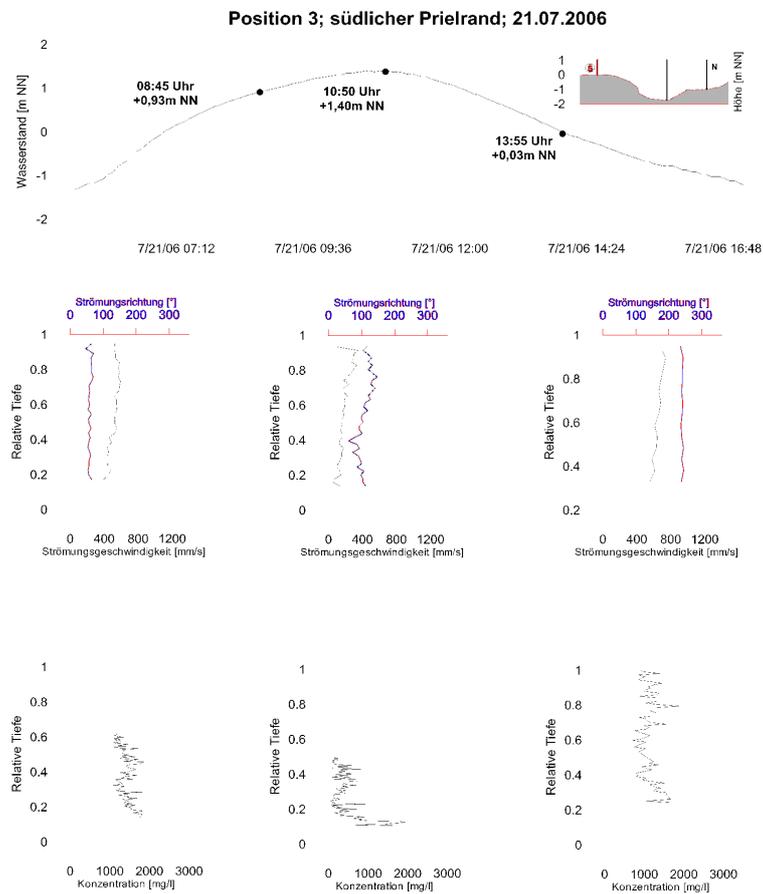


Abbildung A15: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 21.07.2006

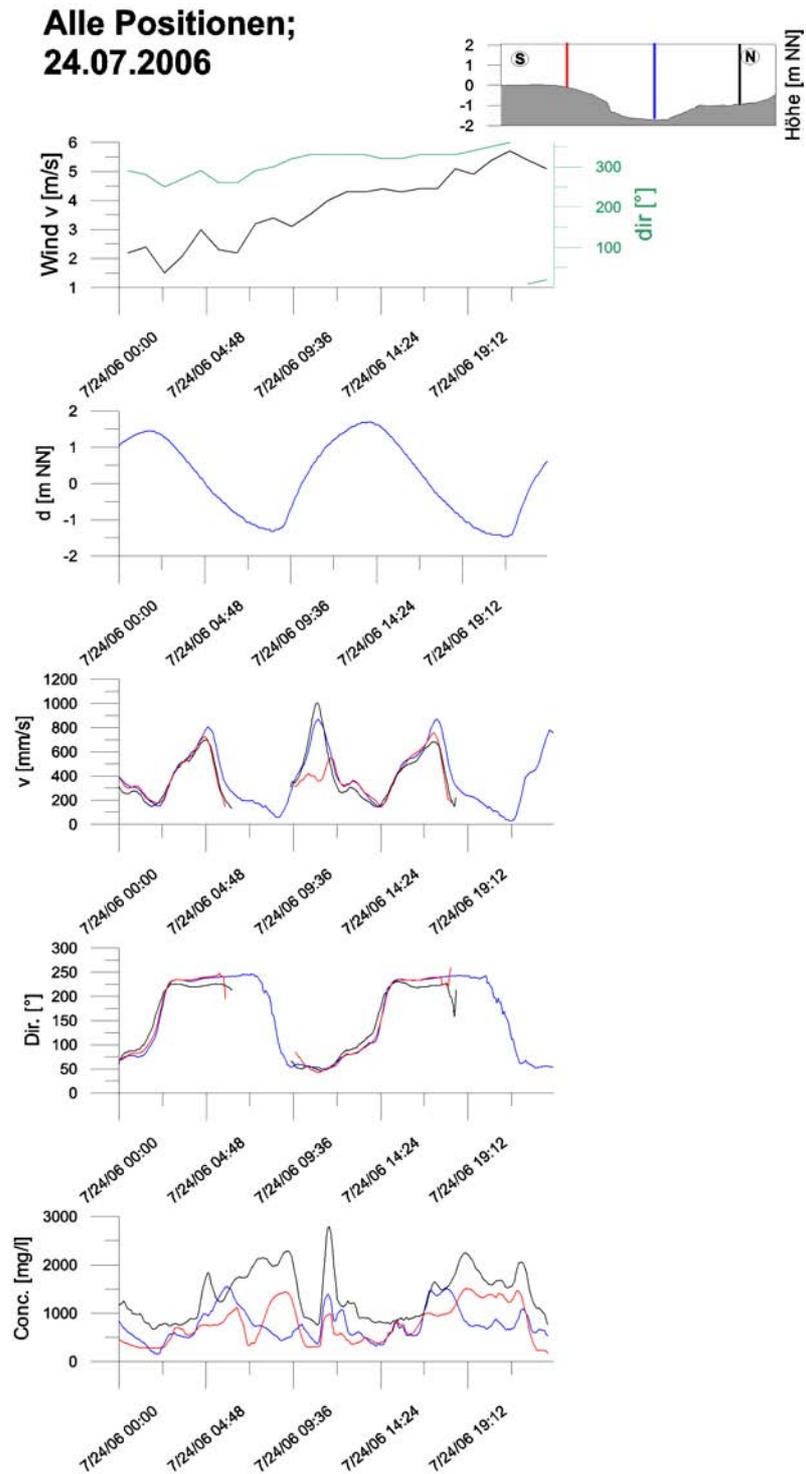


Abbildung A16: Darstellung der Messergebnisse; 24.07.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

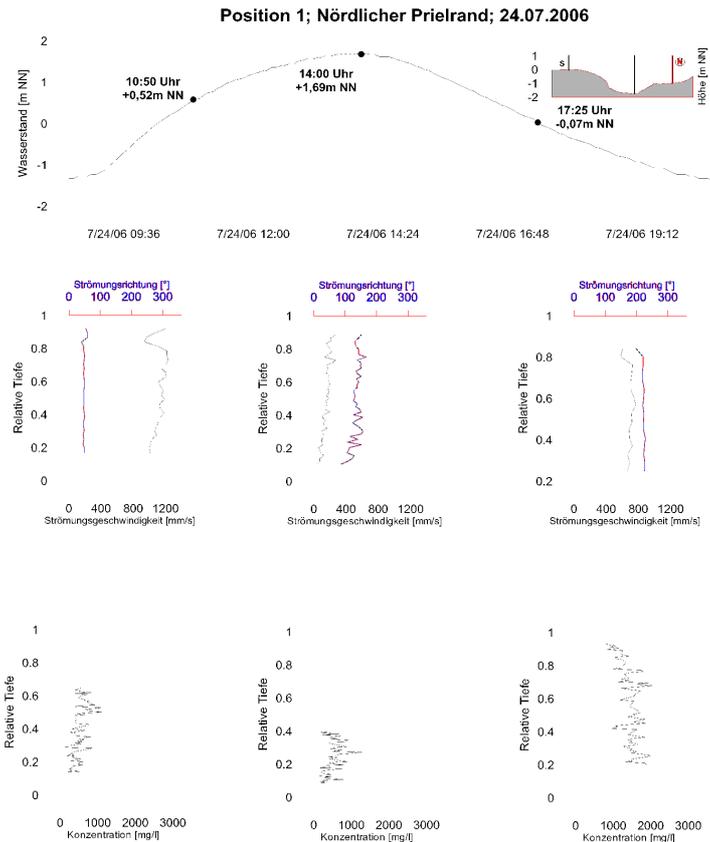


Abbildung A17: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 24.07.2006

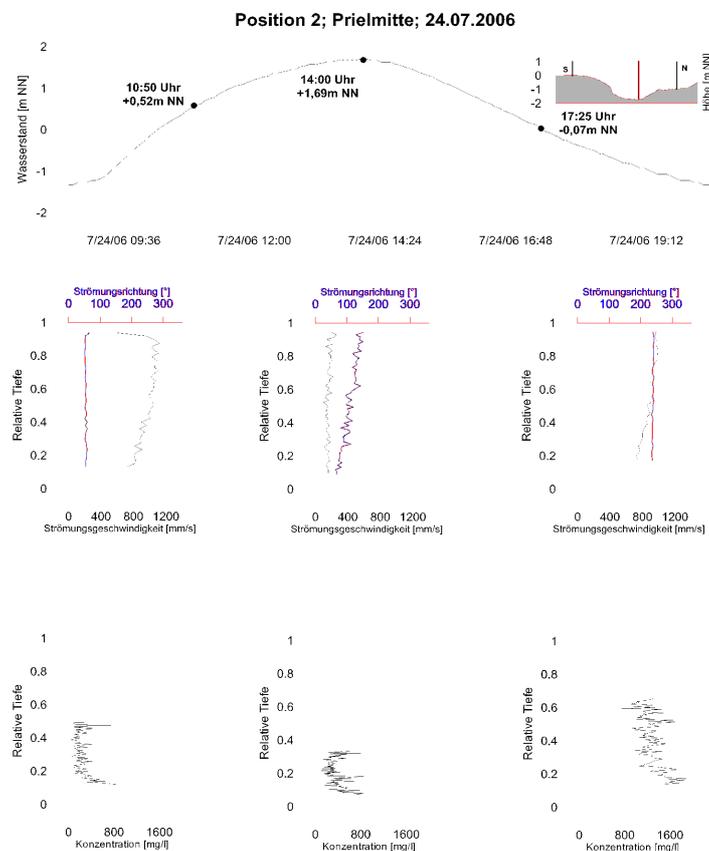


Abbildung A18: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 24.07.2006

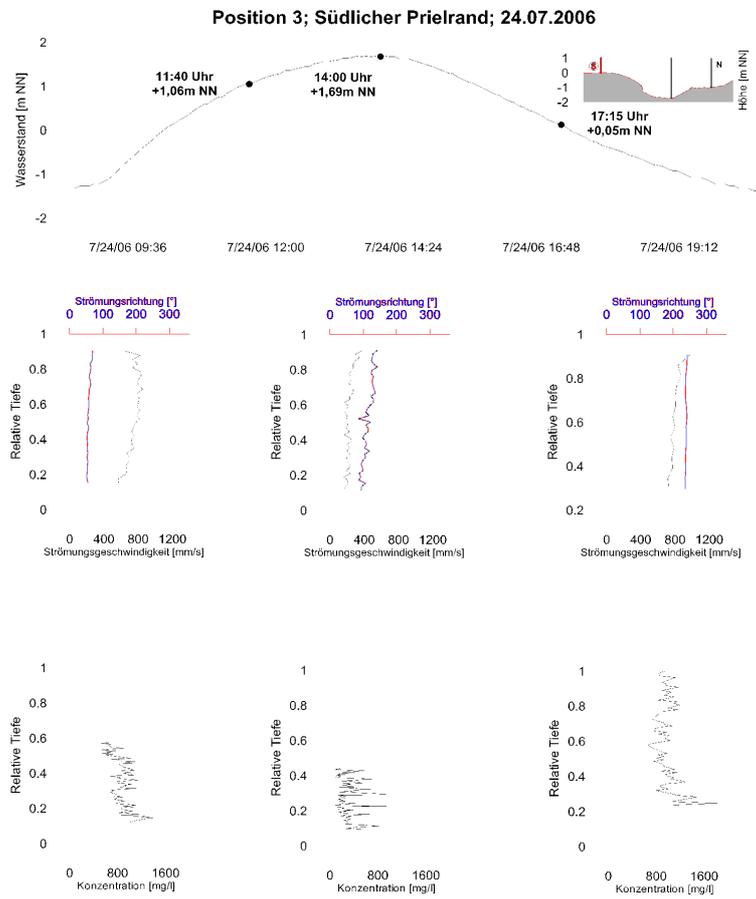


Abbildung A19: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 24.07.2006

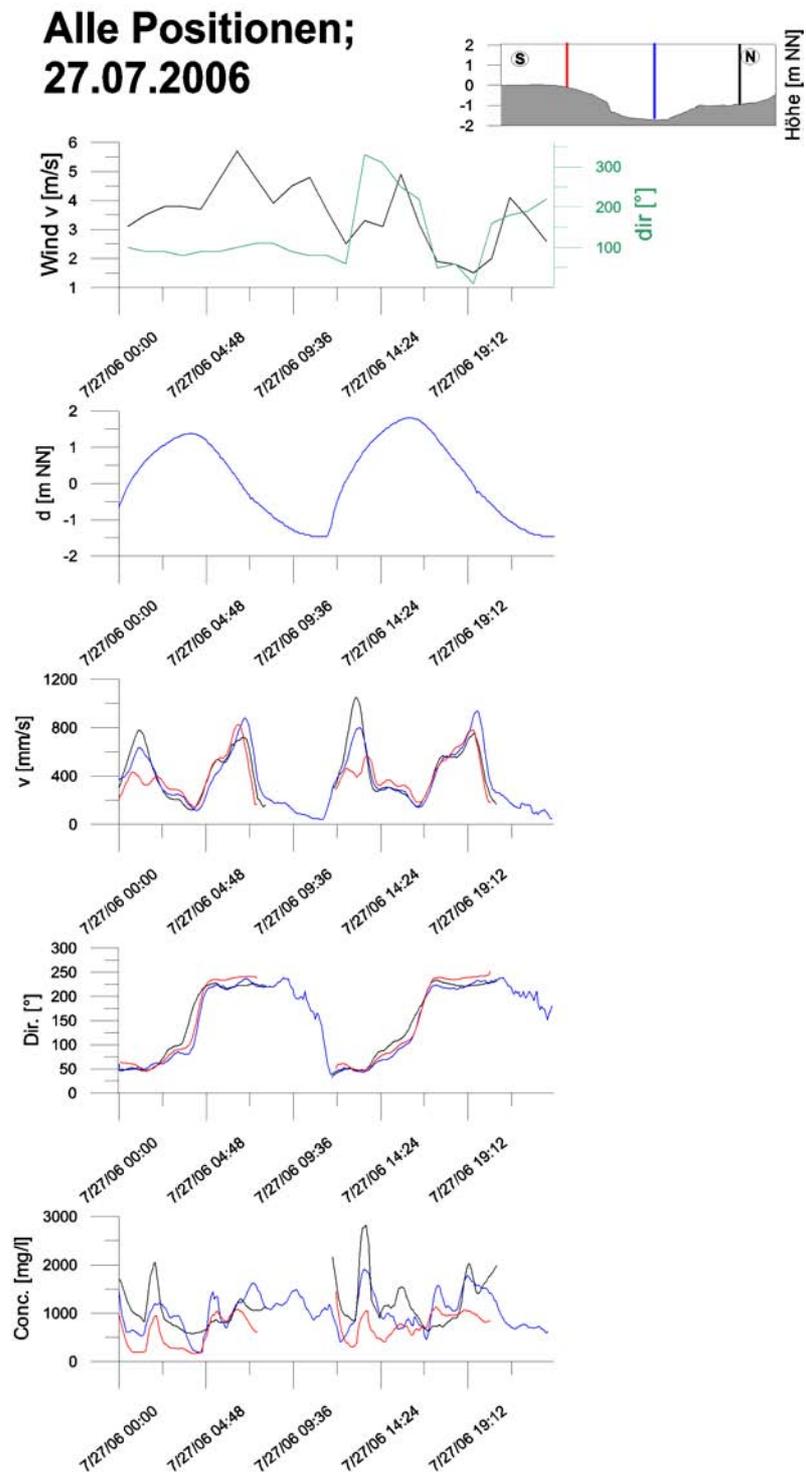


Abbildung A20: Darstellung der Messergebnisse; 27.07.2006

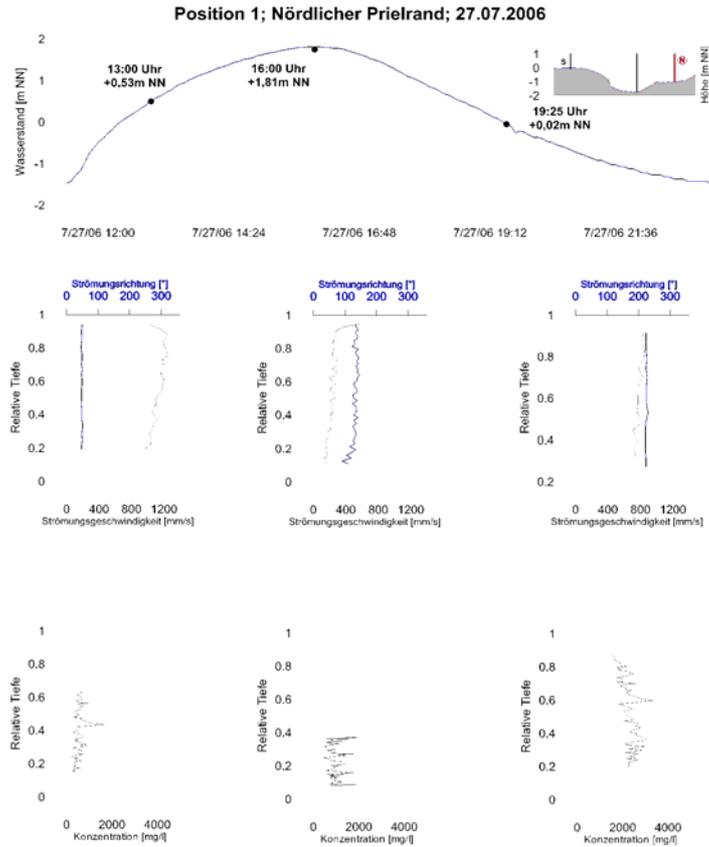


Abbildung A21: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 27.07.2006

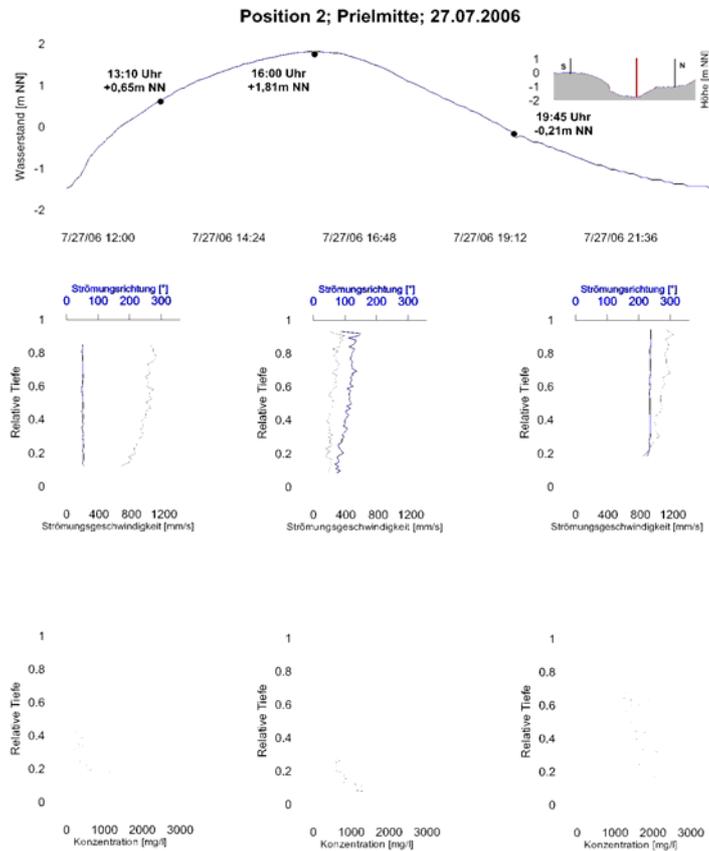


Abbildung A22: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 27.07.2006

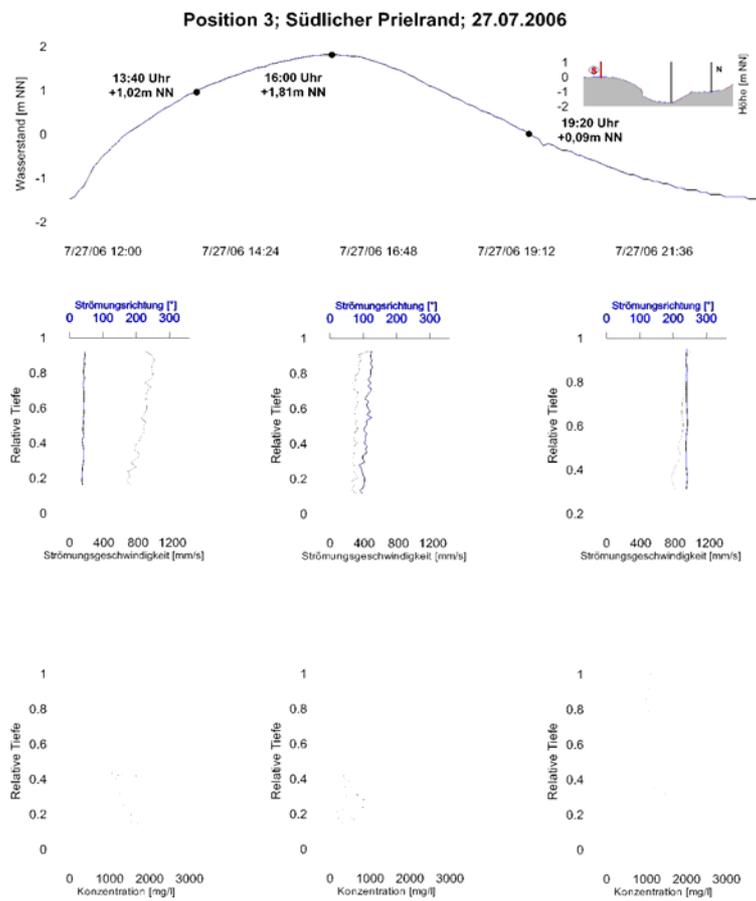


Abbildung A23: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 27.07.2006

**Alle Positionen;
28.07.2006**

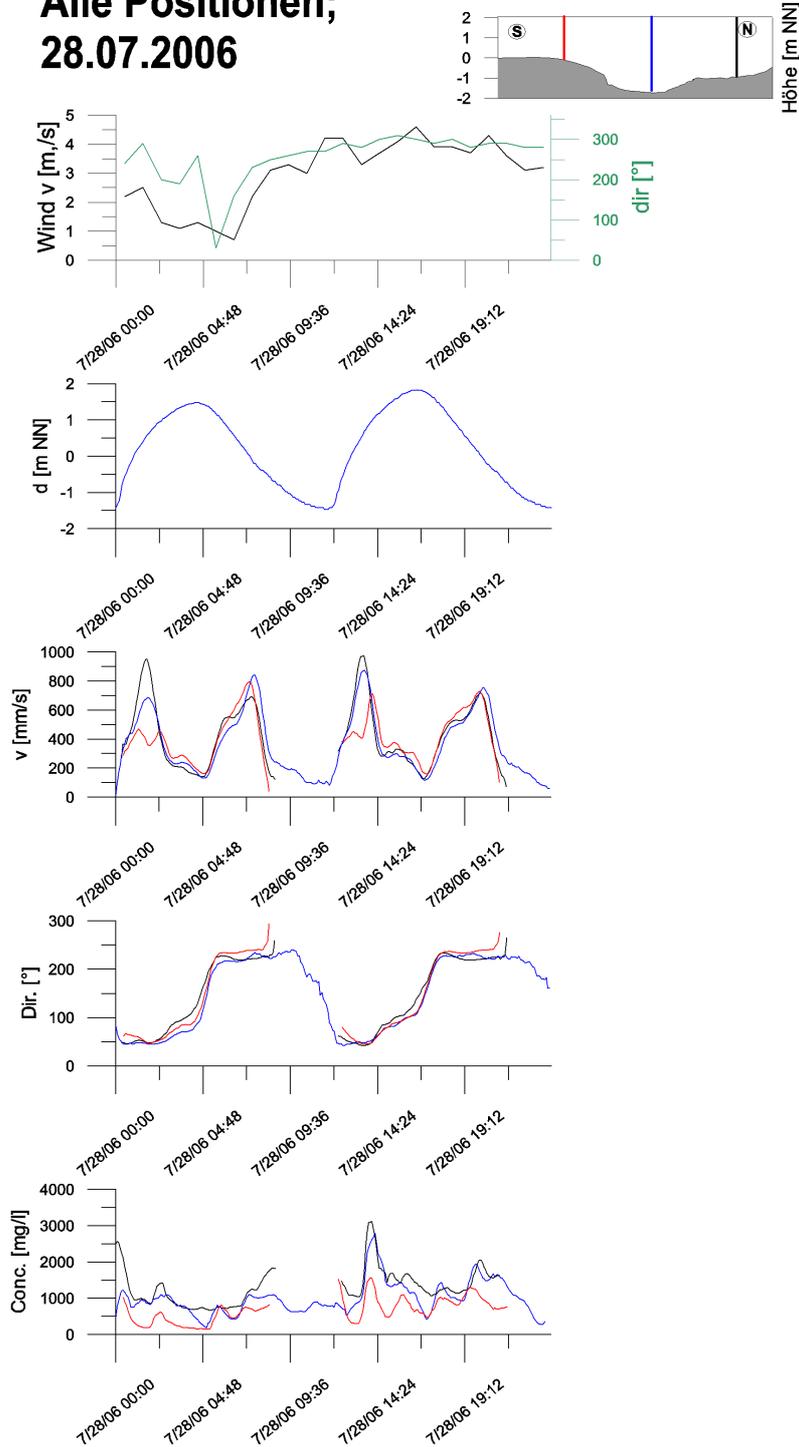


Abbildung A24: Darstellung der Messergebnisse; 28.07.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

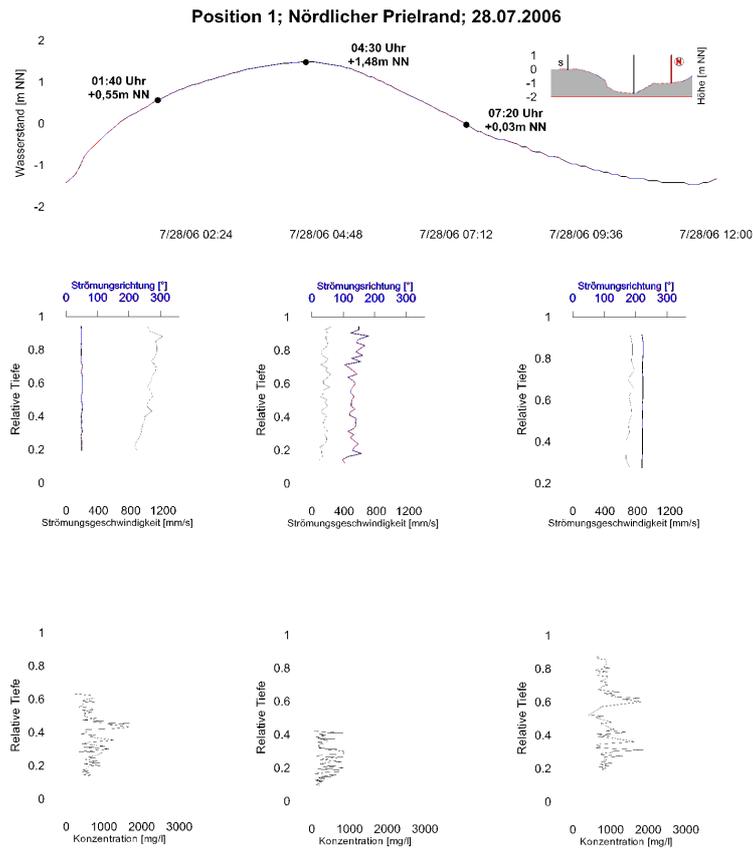


Abbildung A25: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 28.07.2006

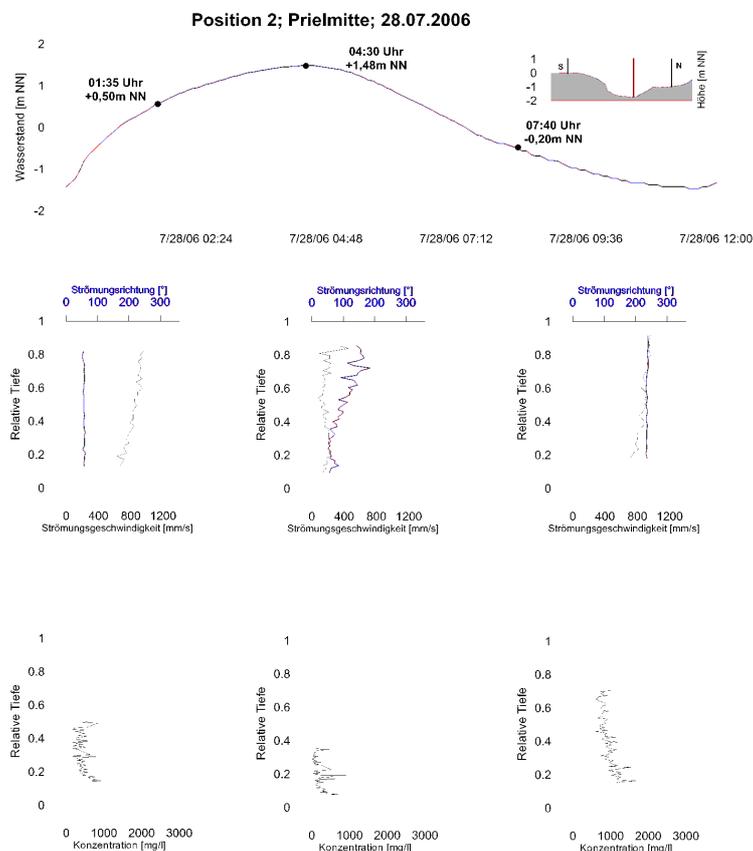


Abbildung A26: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 28.07.2006

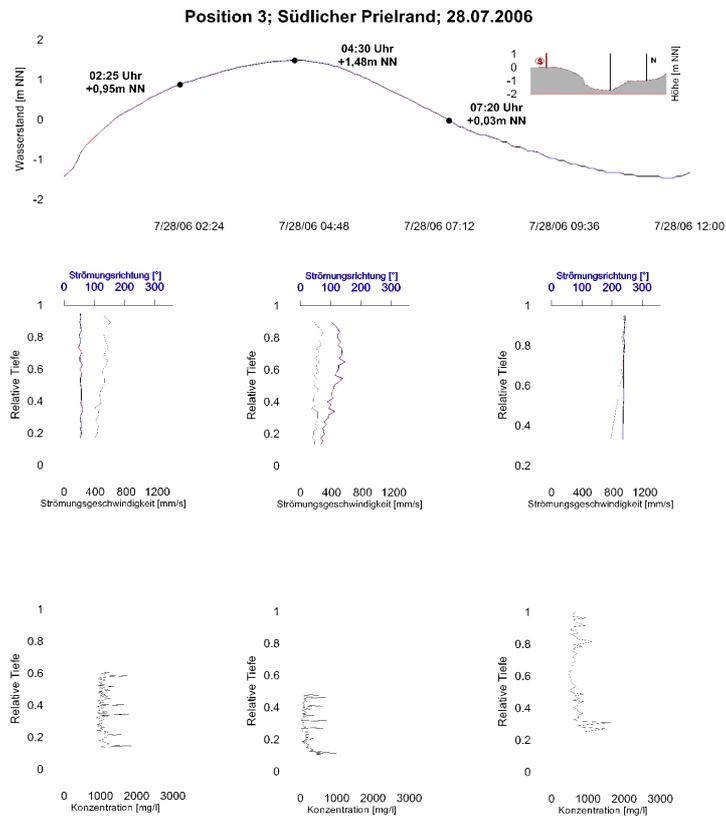


Abbildung A27: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 28.07.2006

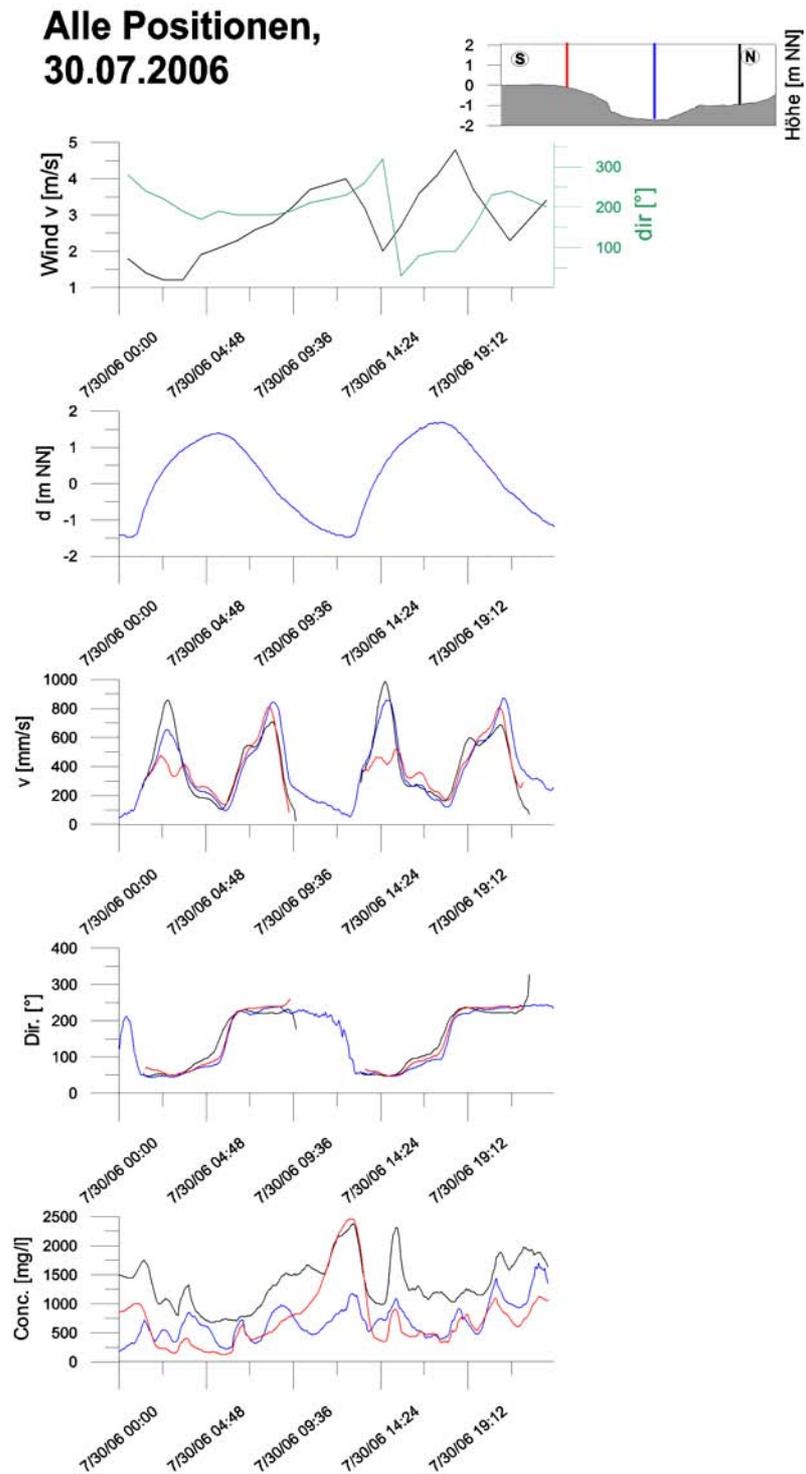


Abbildung A28: Darstellung der Messergebnisse; 30.07.2006

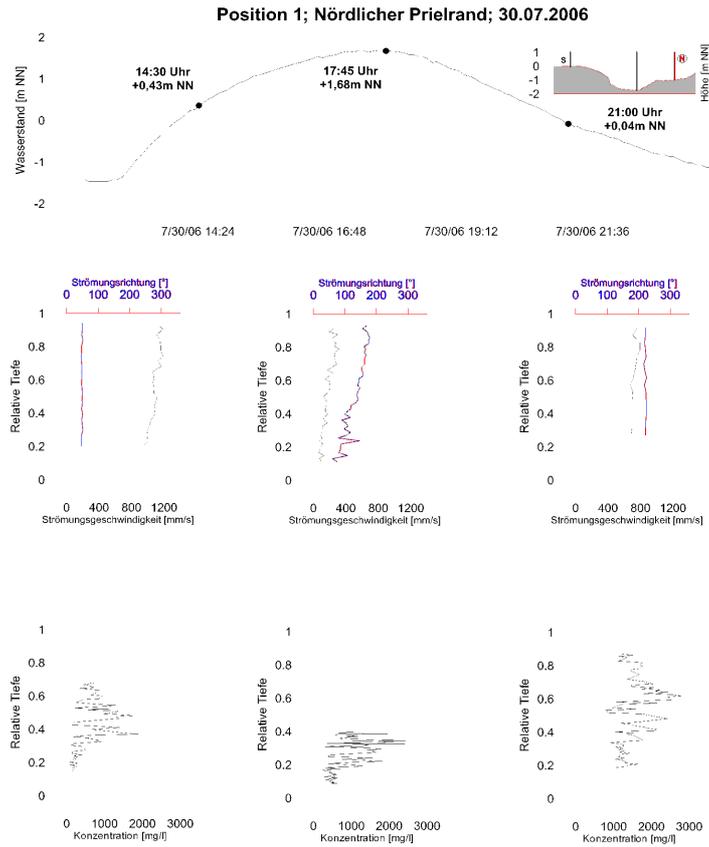


Abbildung A29: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 30.07.2006

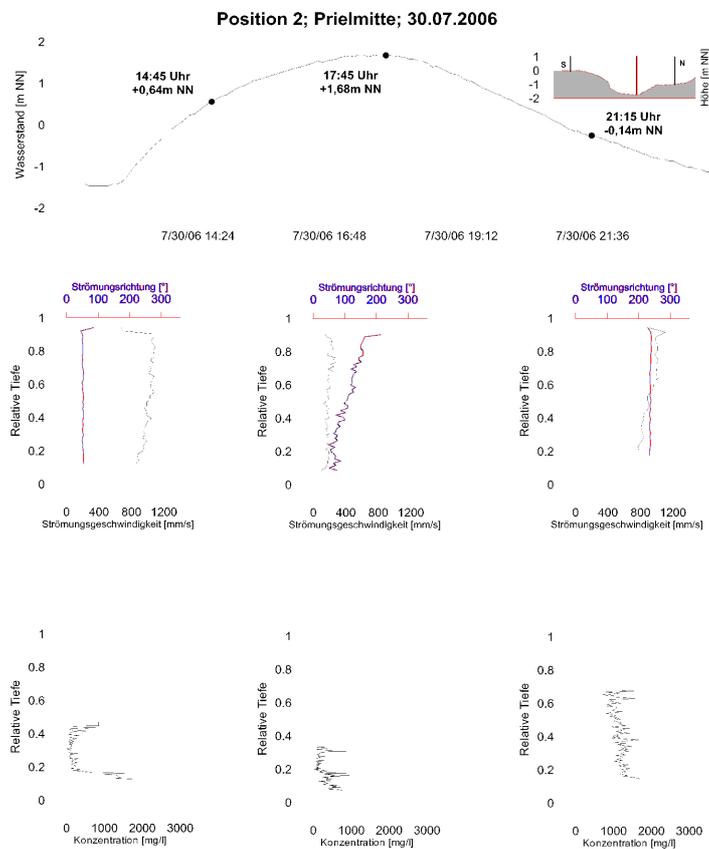


Abbildung A30: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 30.07.2006

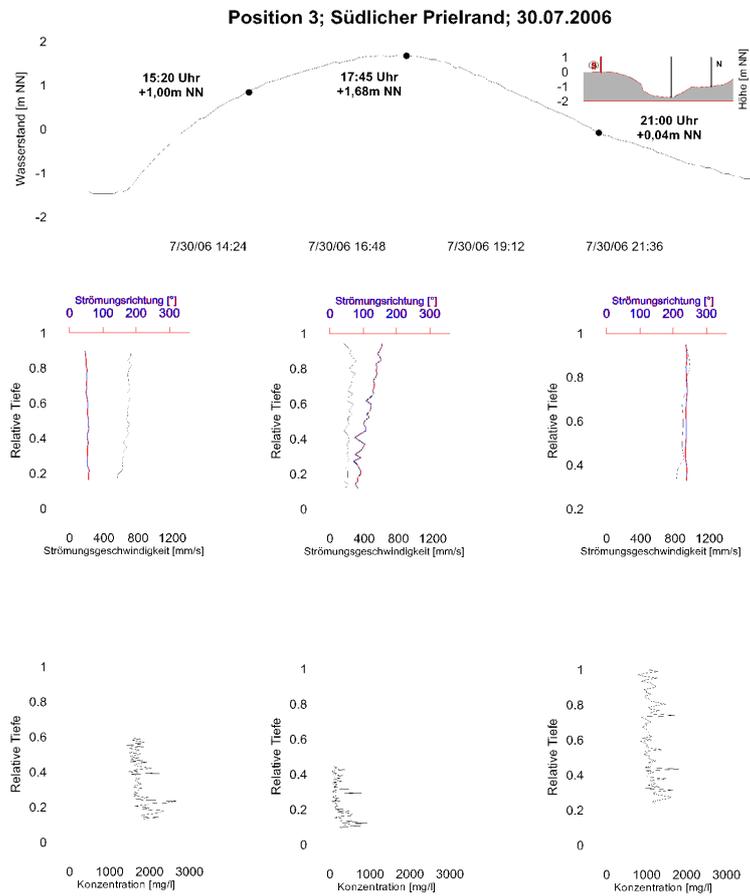


Abbildung A31: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 30.07.2006

**Alle Positionen;
01.08.2006**

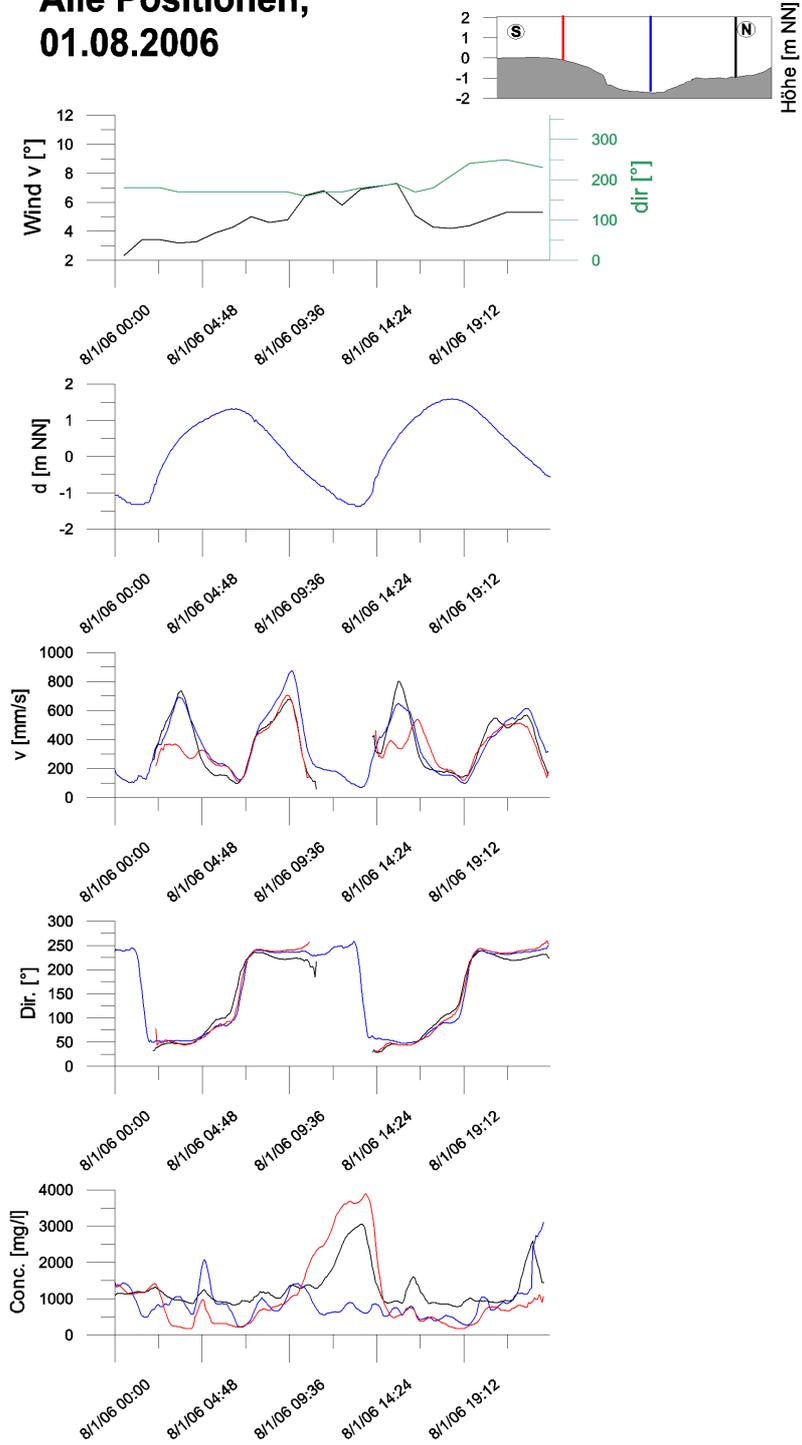


Abbildung A32: Darstellung der Messergebnisse; 01.08.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

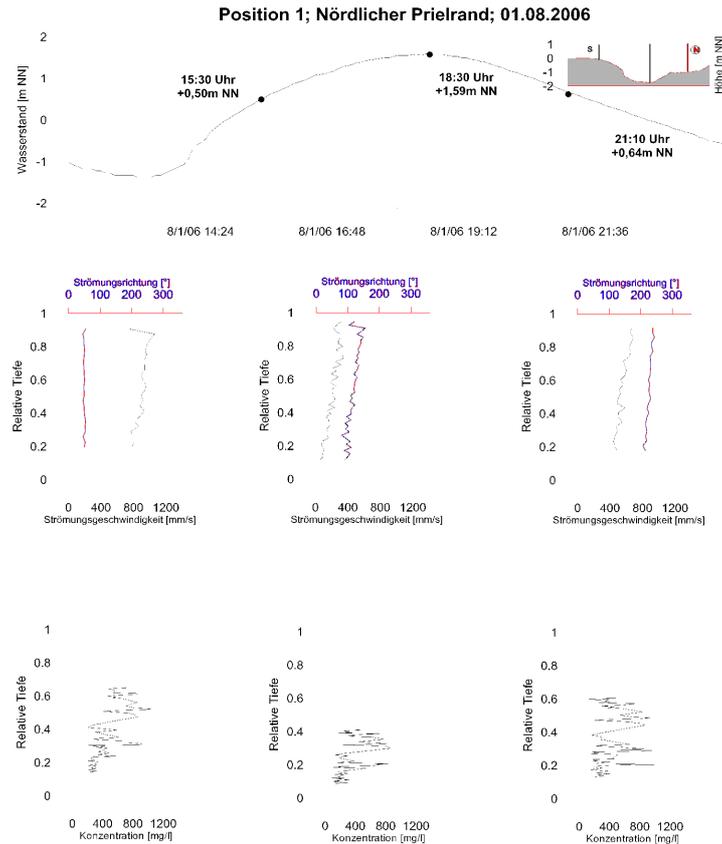


Abbildung A33: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 01.08.2006

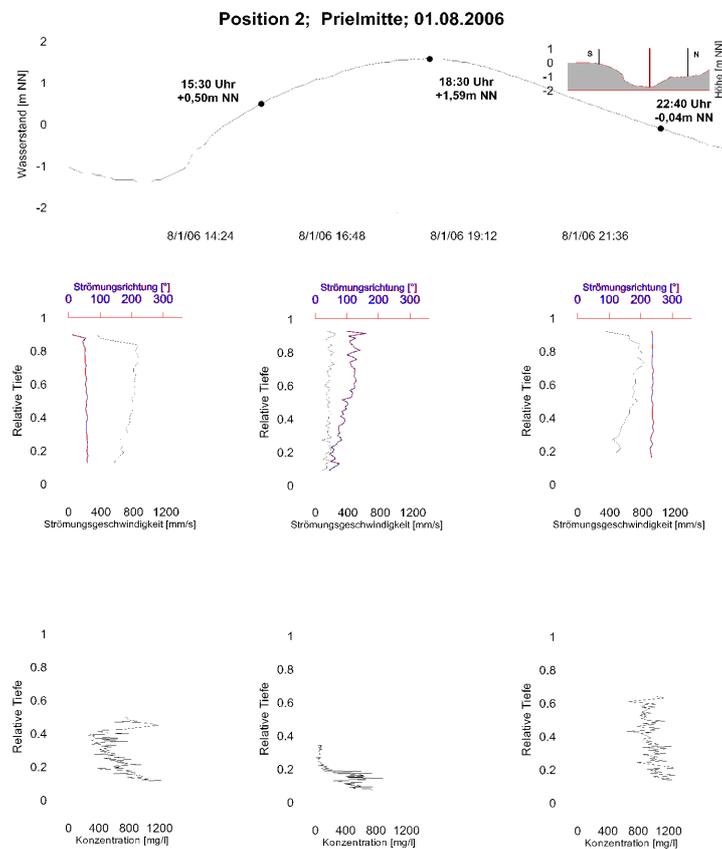


Abbildung A34: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 01.08.2006

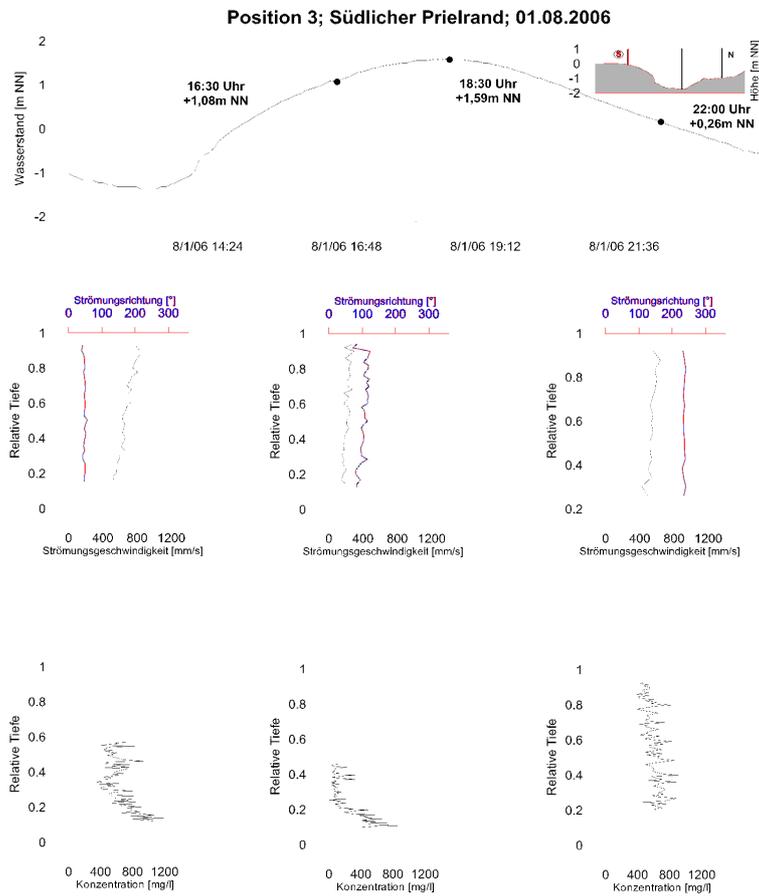


Abbildung A35: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 01.08.2006

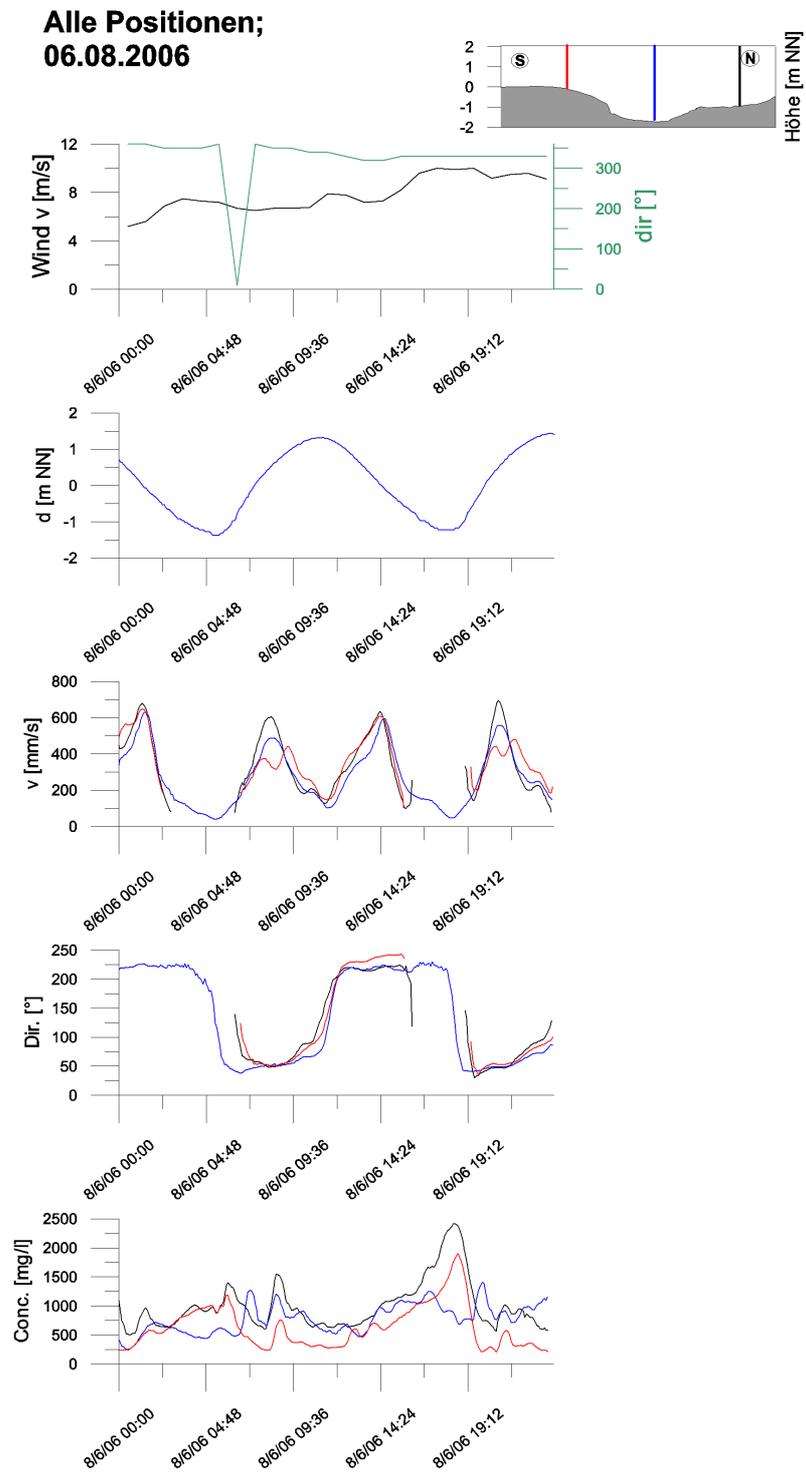


Abbildung A36: Darstellung der Messergebnisse; 06.08.2006

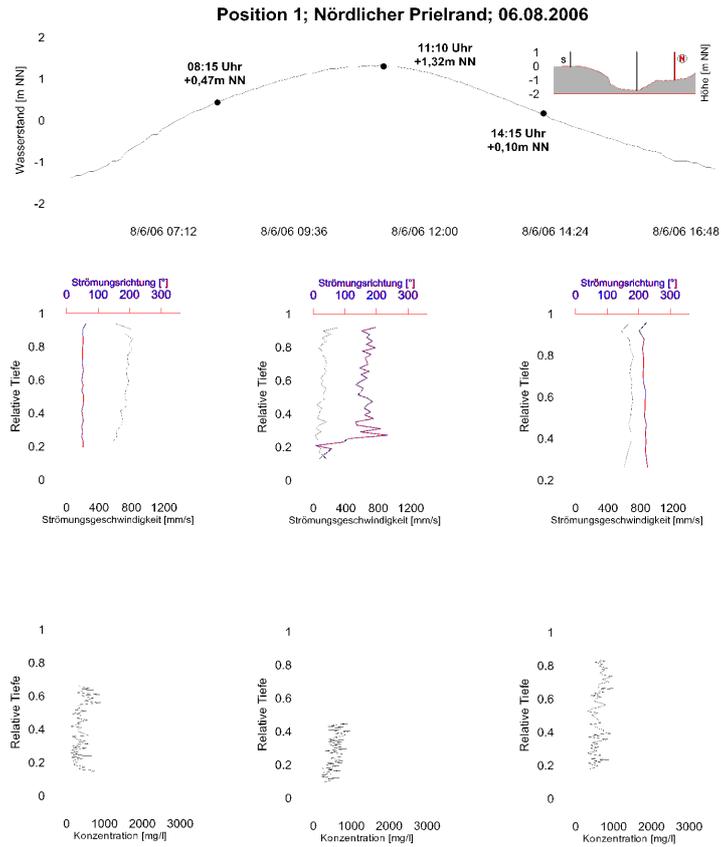


Abbildung A37: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 06.08.2006

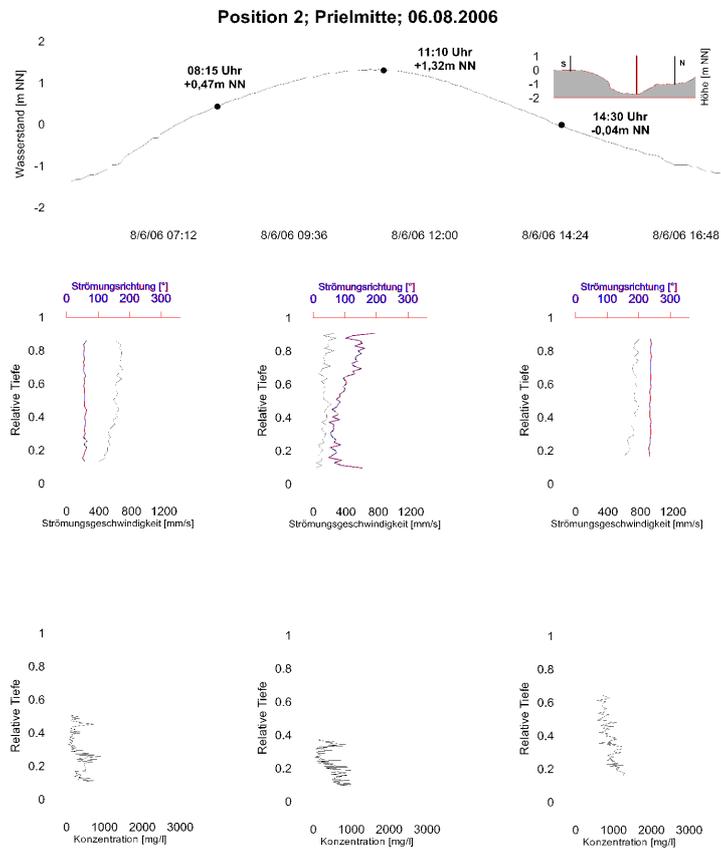


Abbildung A38: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 06.08.2006

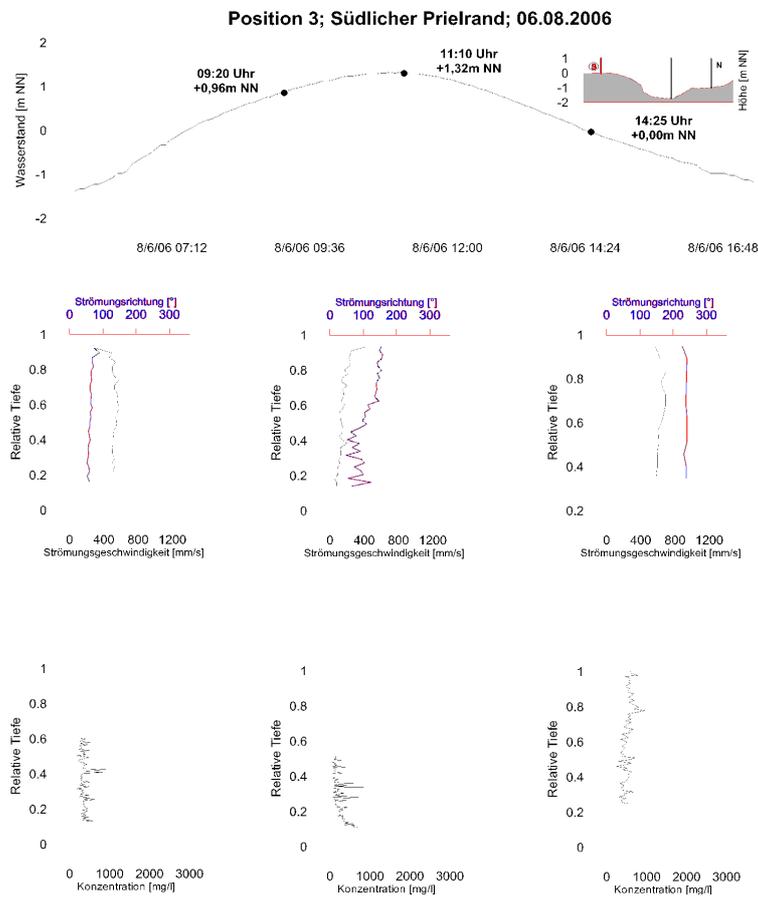


Abbildung A39: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 06.08.2006

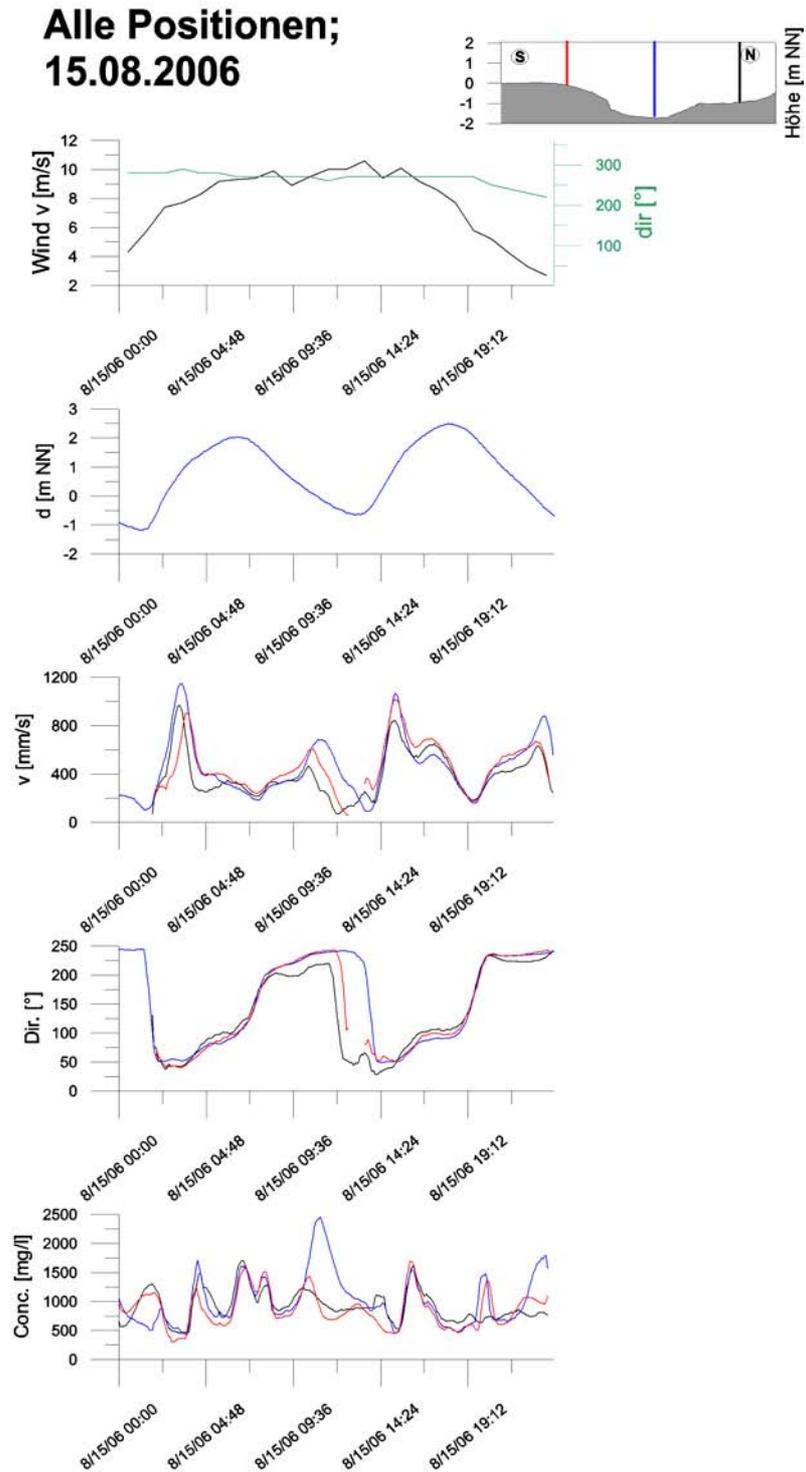


Abbildung A40: Darstellung der Messergebnisse; 15.08.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

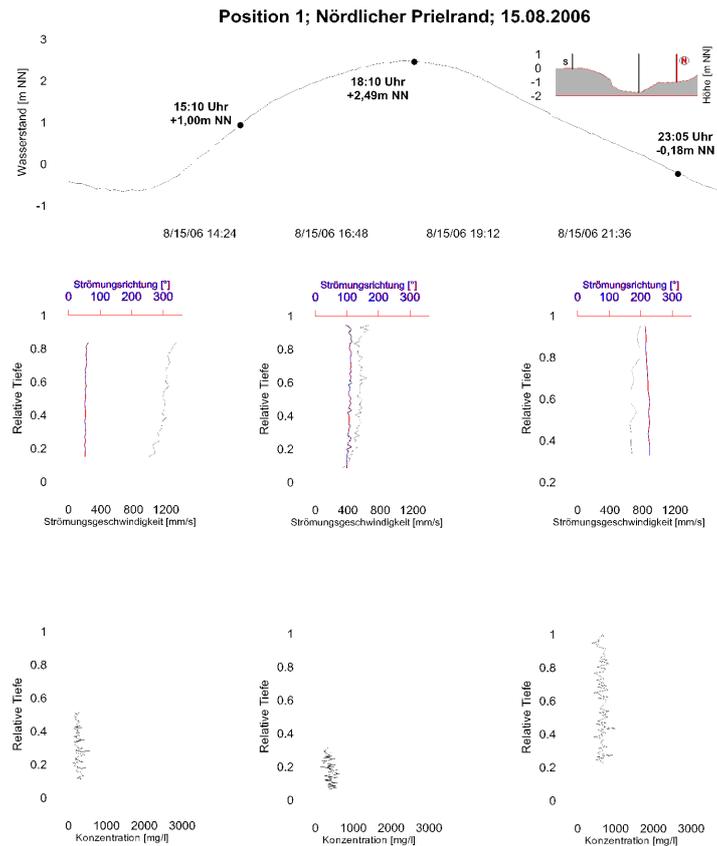


Abbildung A41: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 15.08.2006

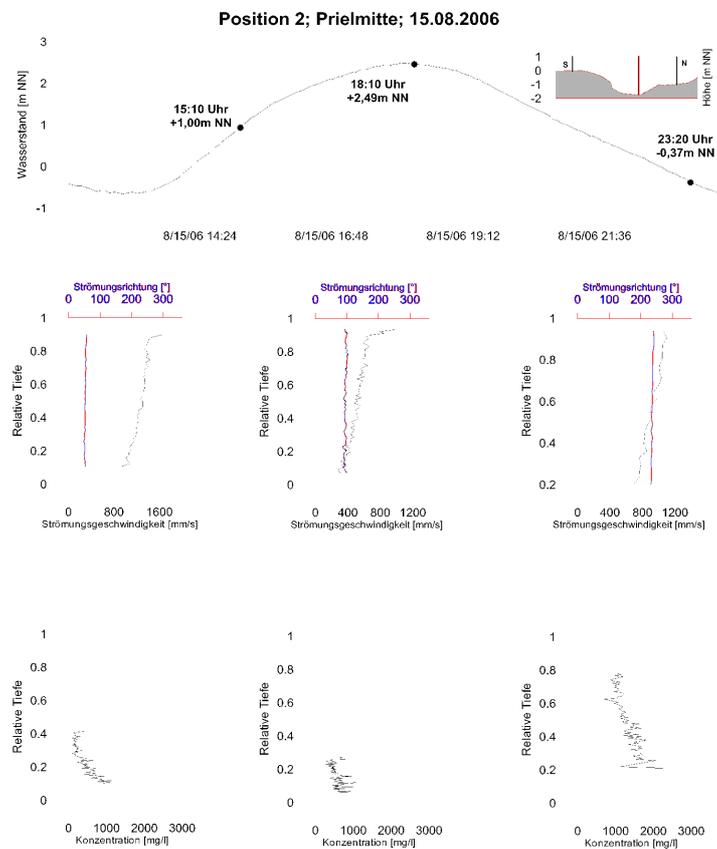


Abbildung A42: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 15.08.2006

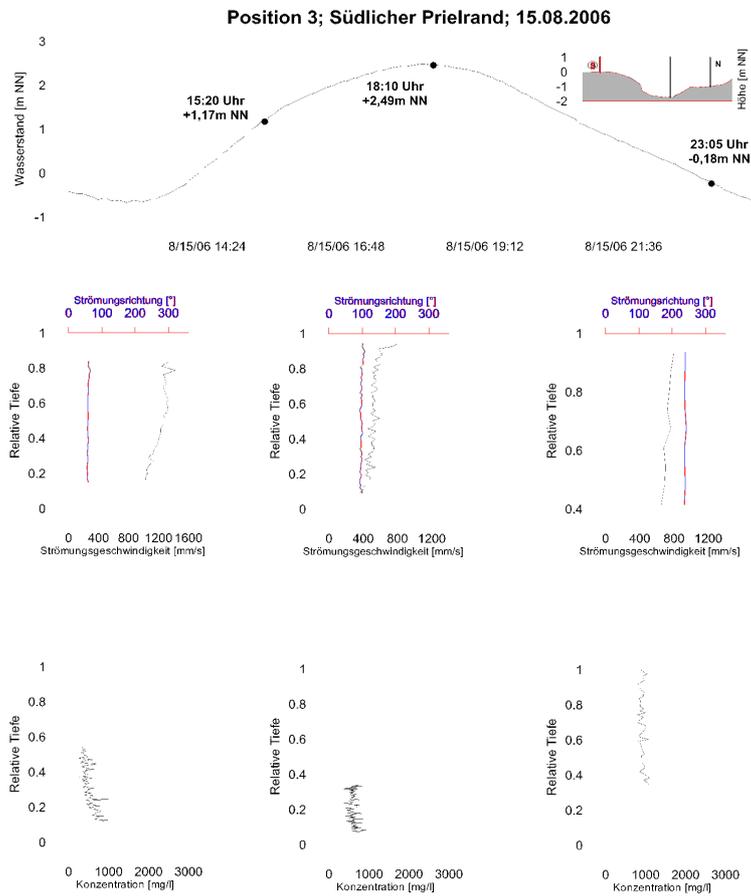


Abbildung A43: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 15.08.2006

Alle Positionen; 16.08.2006

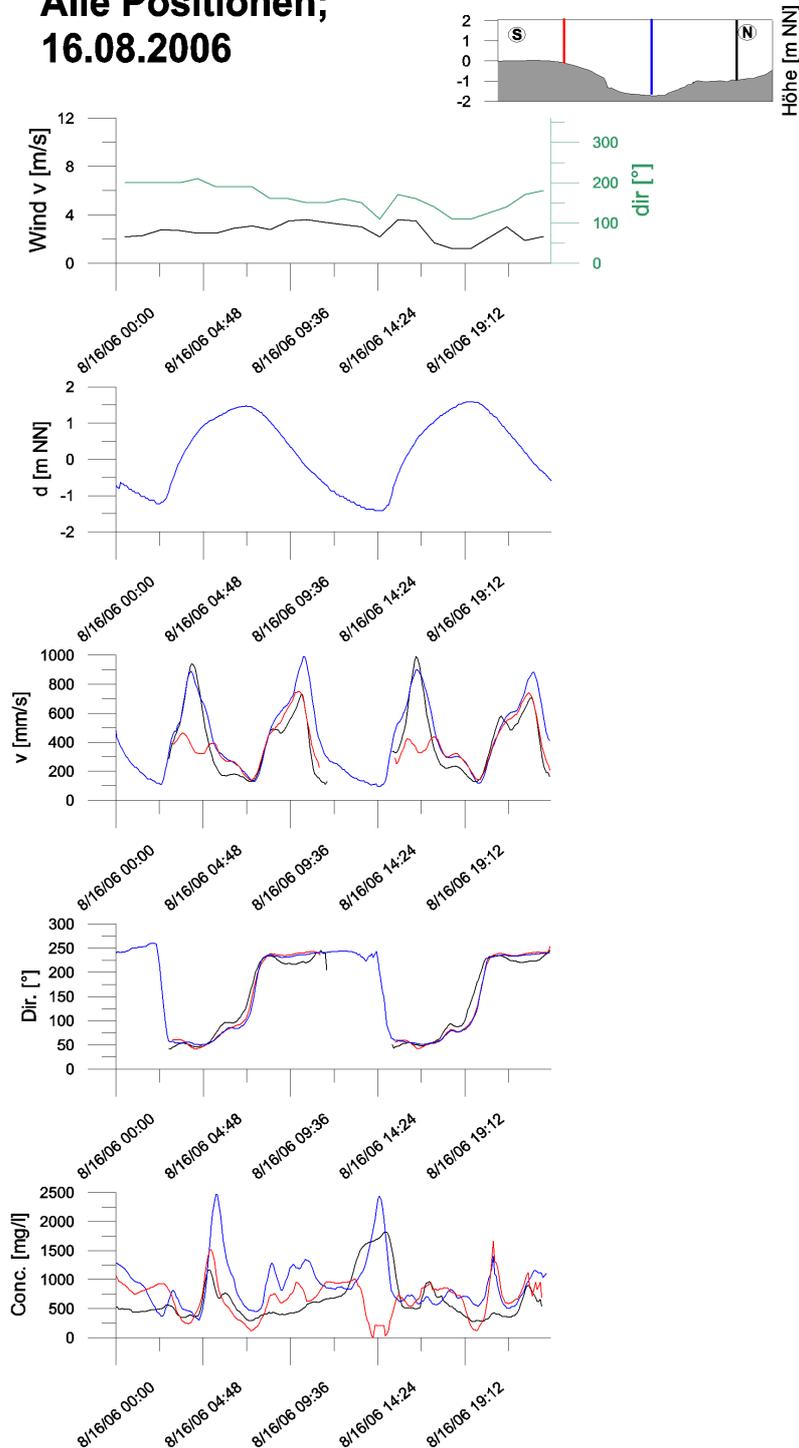


Abbildung A44: Darstellung der Messergebnisse; 16.08.2006

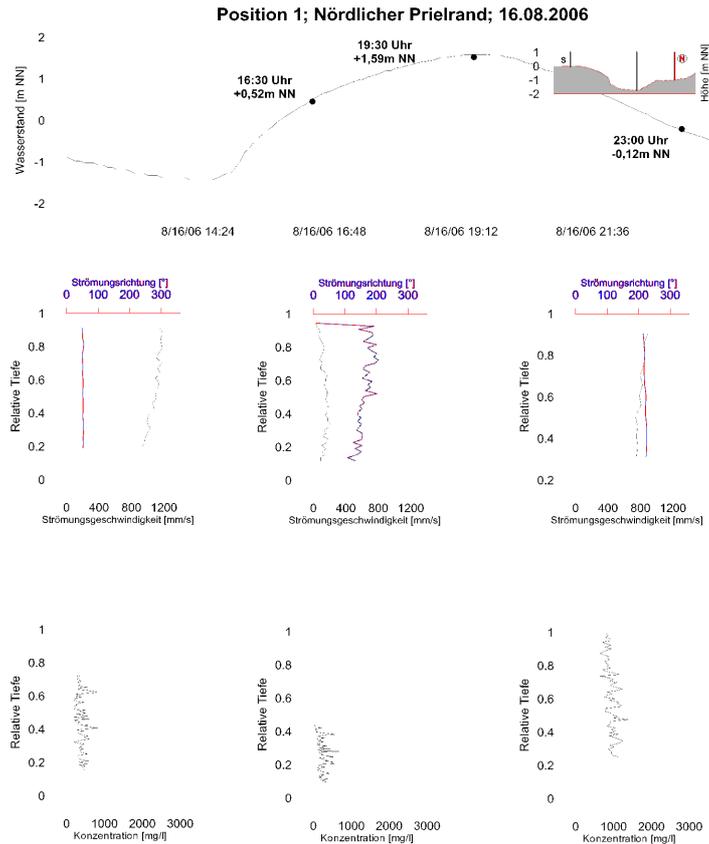


Abbildung A45: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 16.08.2006

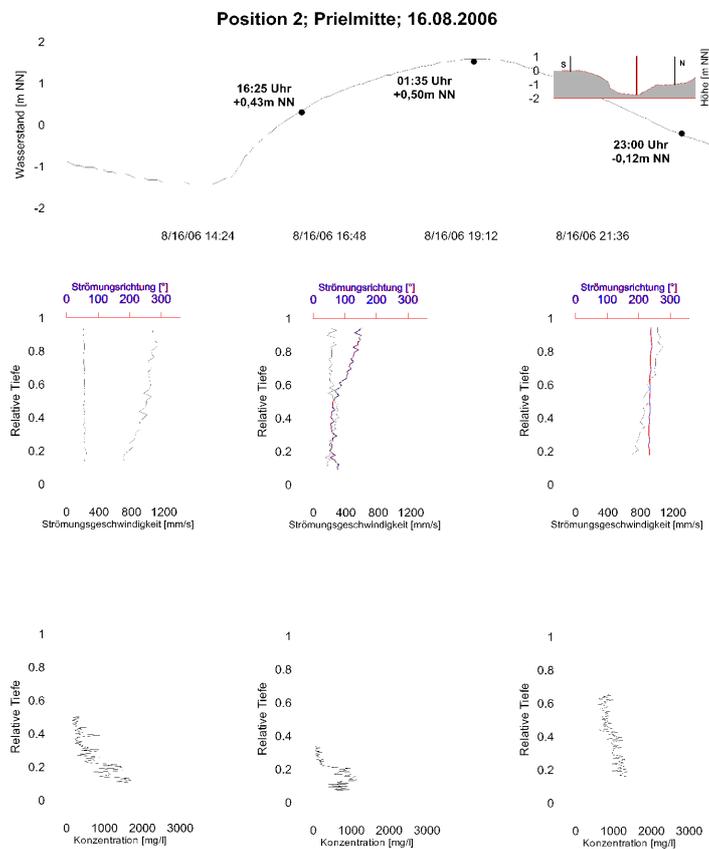


Abbildung A46: Darstellung der Messergebnisse; Profil 2; 16.08.2006

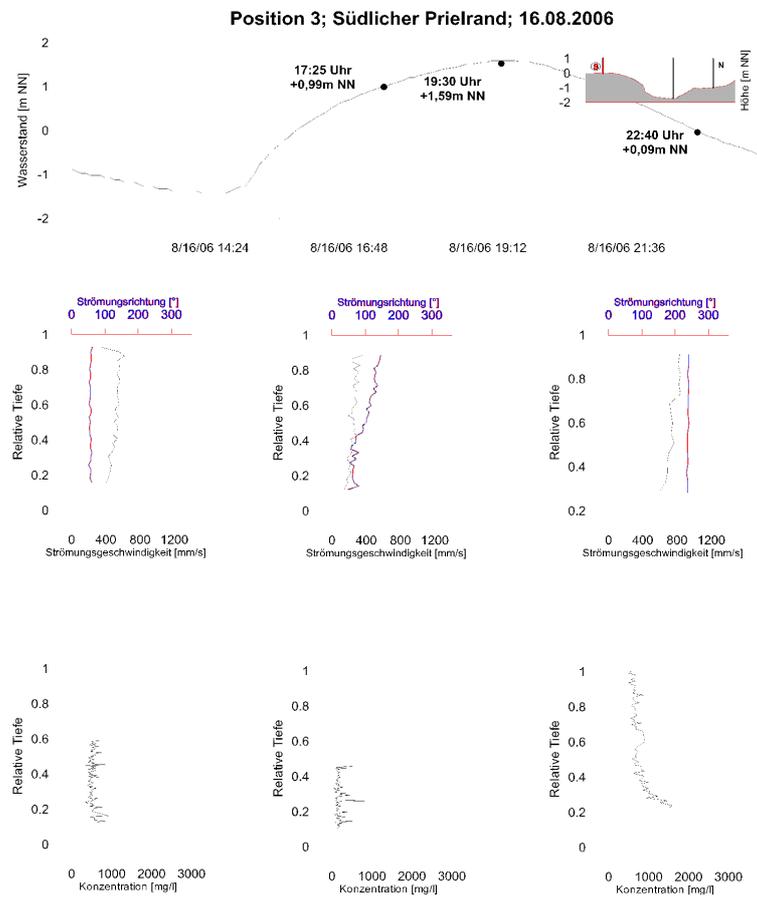


Abbildung A47: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 16.08.2006

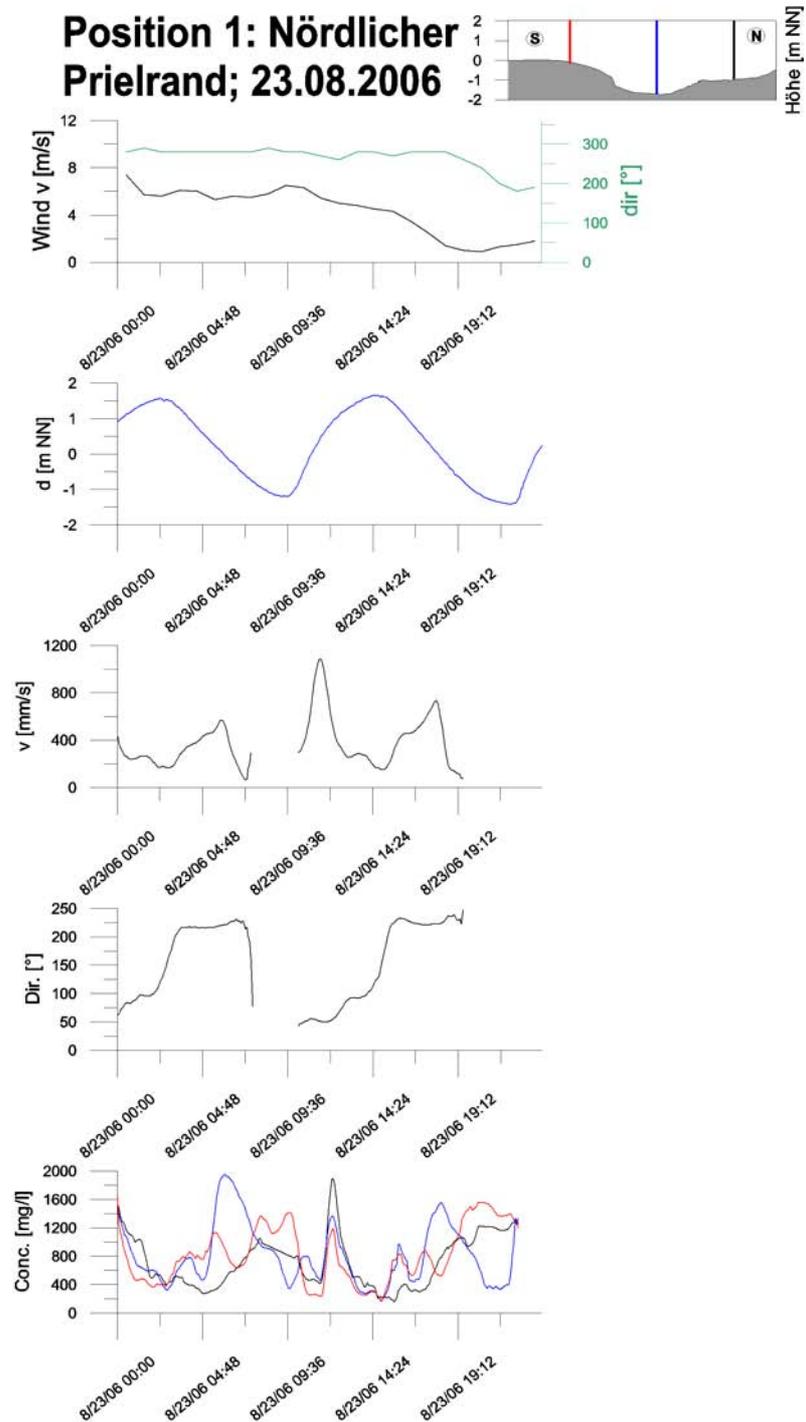


Abbildung A48: Darstellung der Messergebnisse; 23.08.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

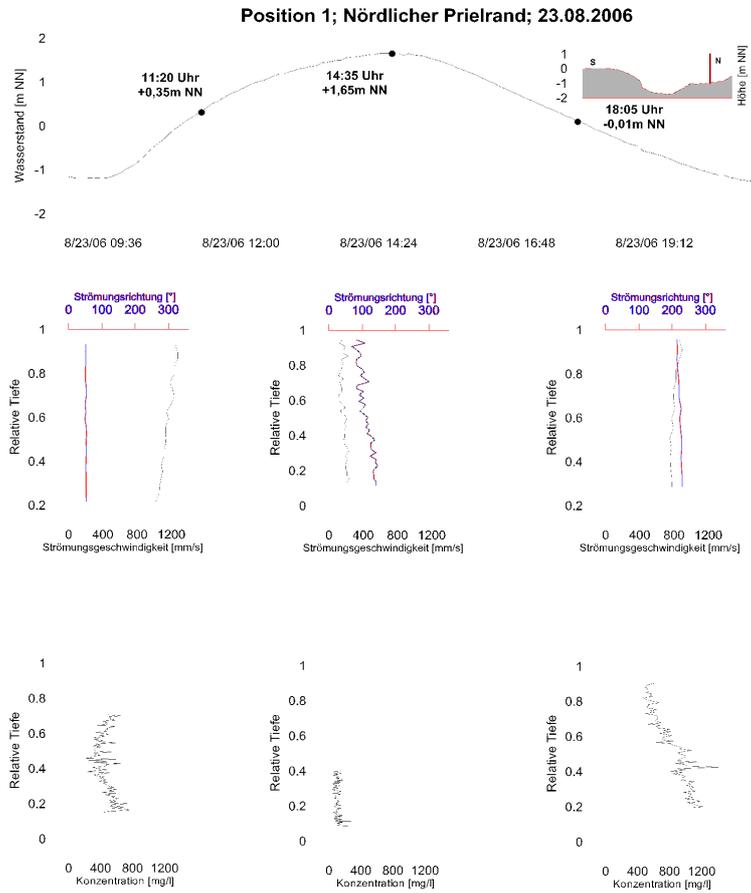


Abbildung A49: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 23.08.2006

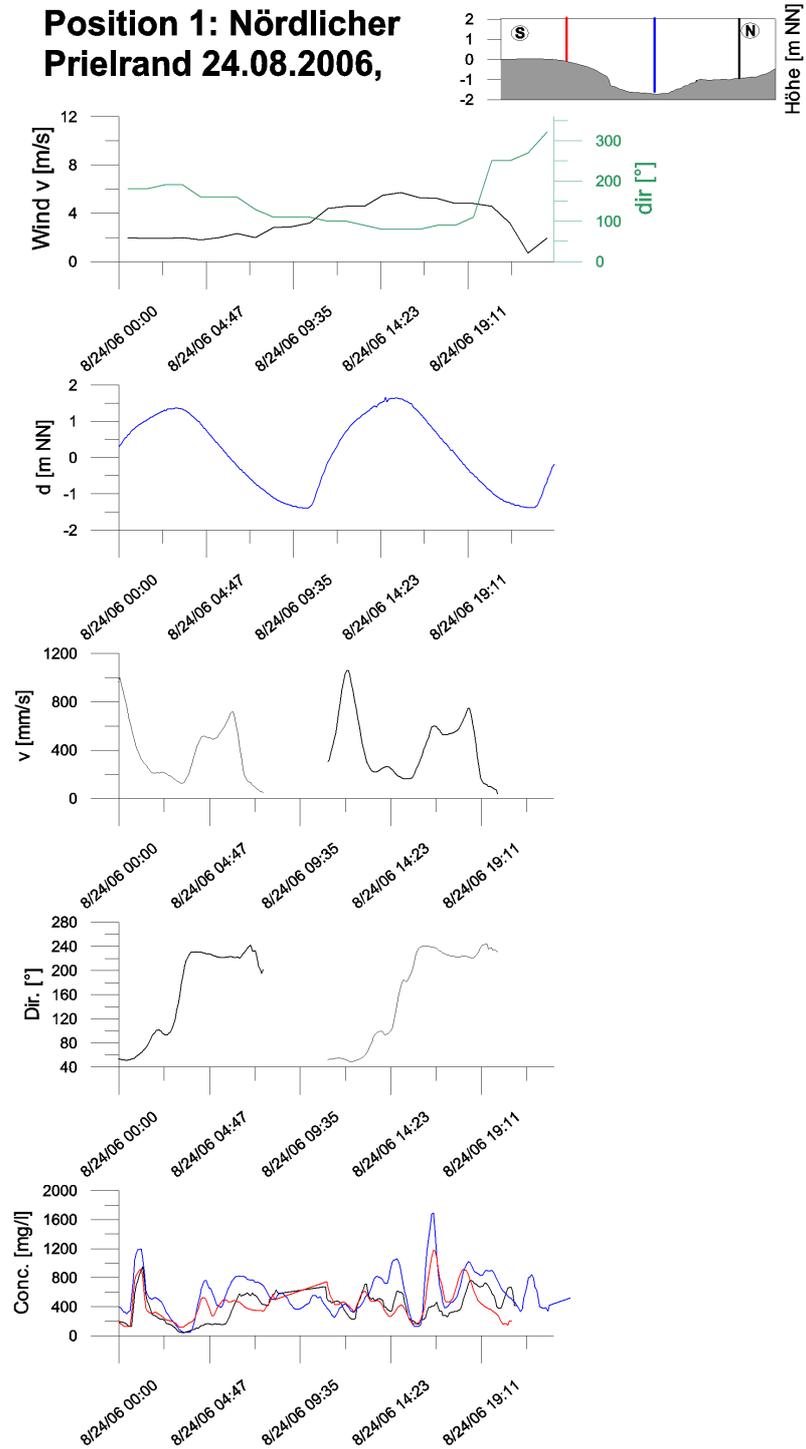


Abbildung A50: Darstellung der Messergebnisse; 24.08.2006

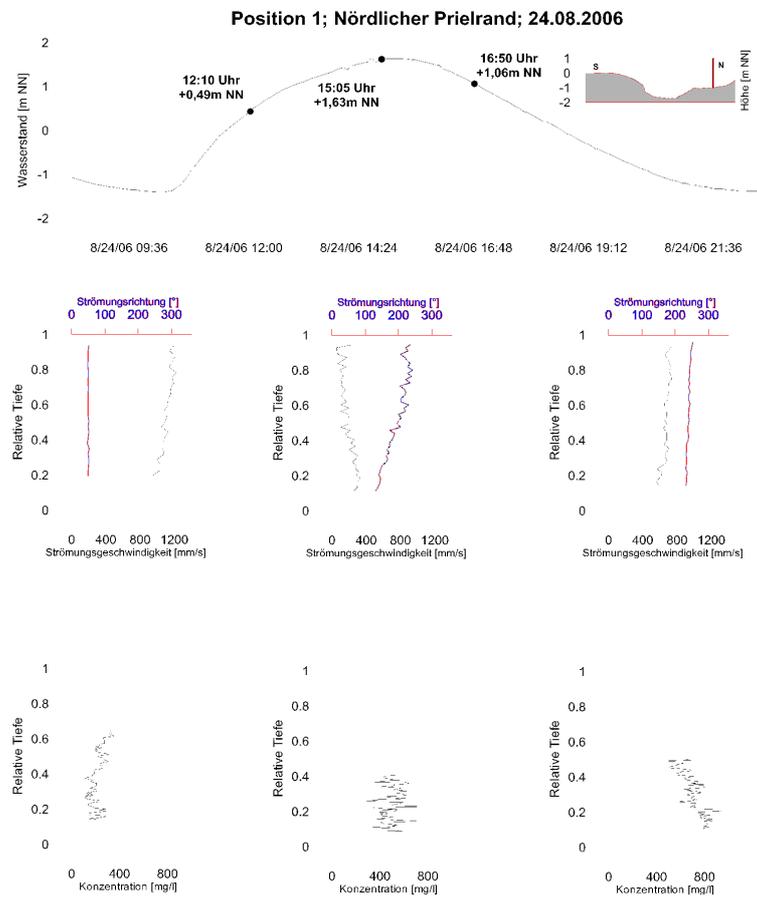


Abbildung A51: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 24.08.2006

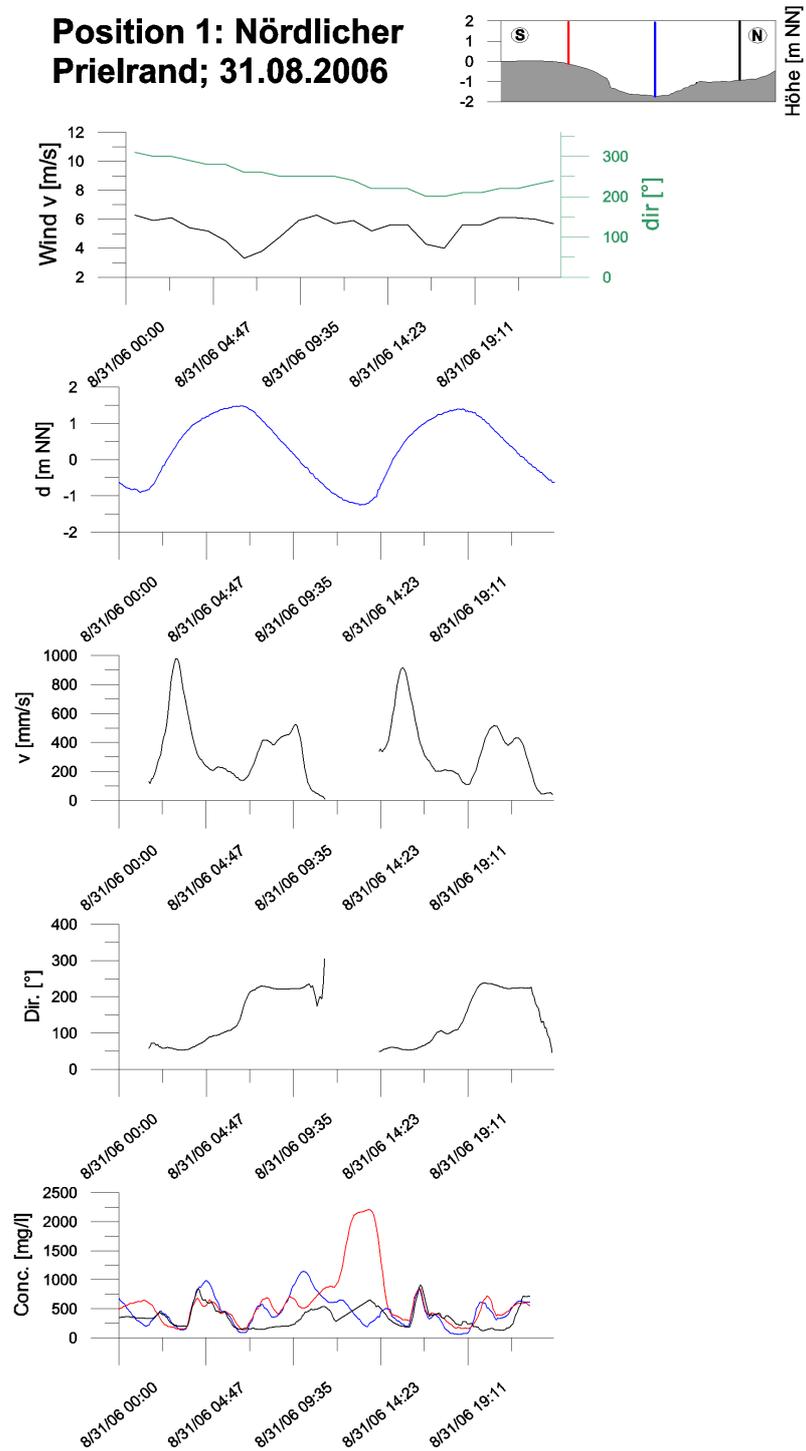


Abbildung A52: Darstellung der Messergebnisse; 31.08.2006

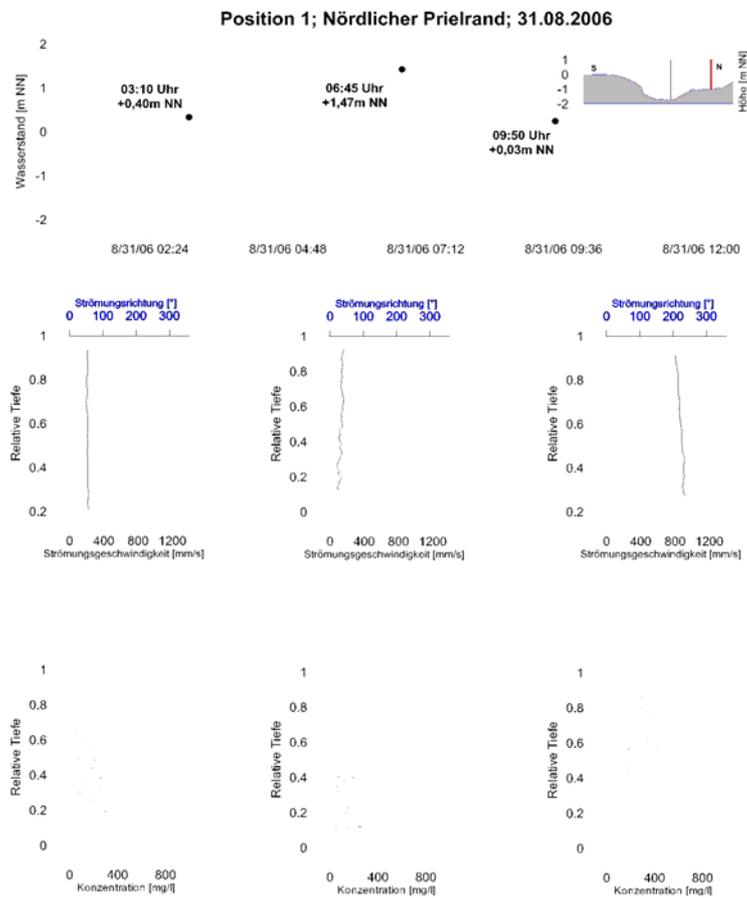


Abbildung A53: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 31.08.2006

Position 1: Nördlicher Prielrand; 04.09.2006

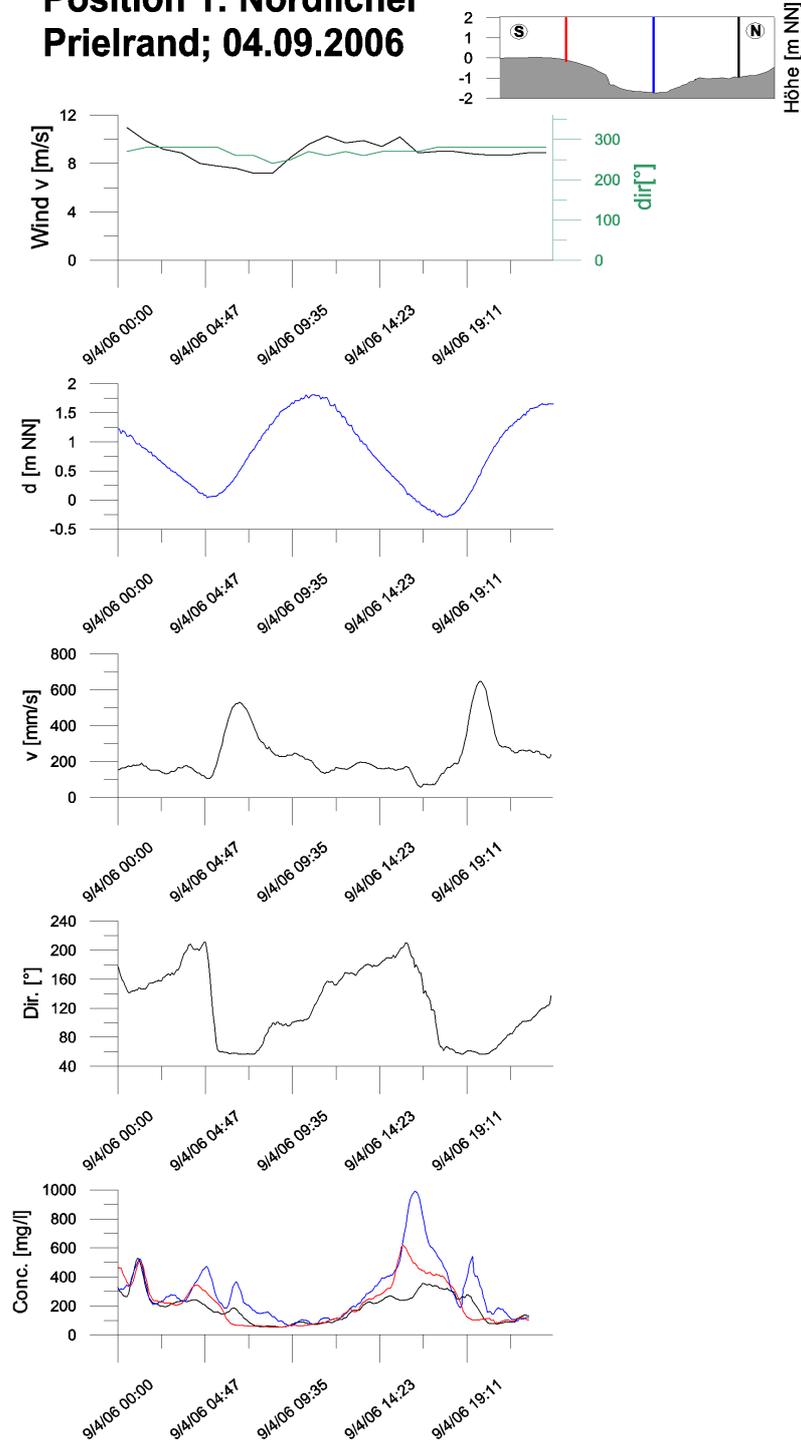


Abbildung A54: Darstellung der Messergebnisse; 04.09.2006

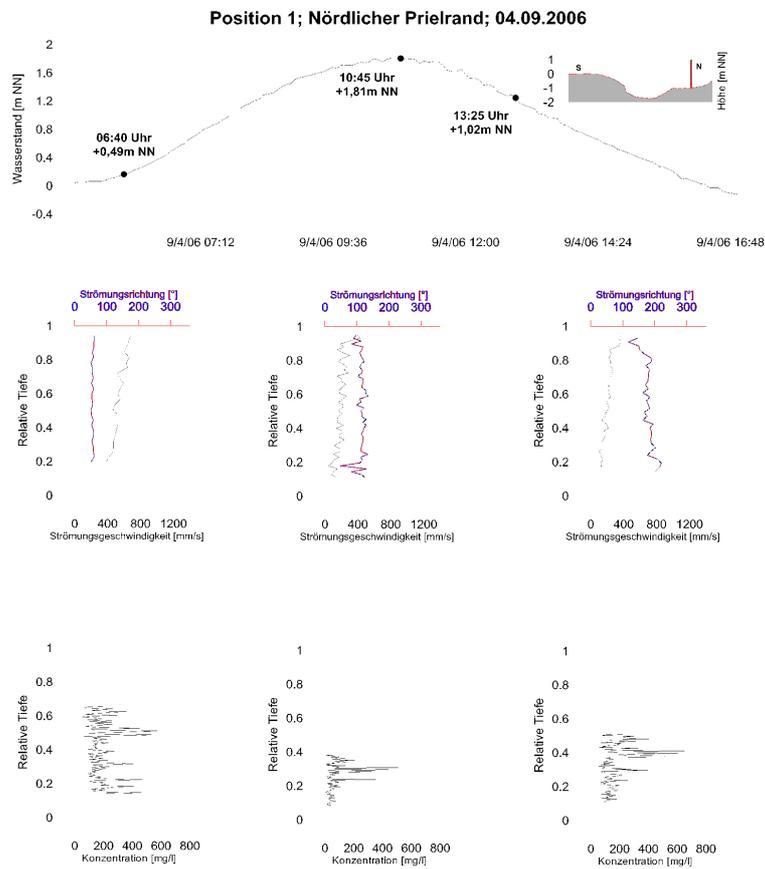


Abbildung A55: Darstellung der Messergebnisse; Profil 1; 04.09.2006

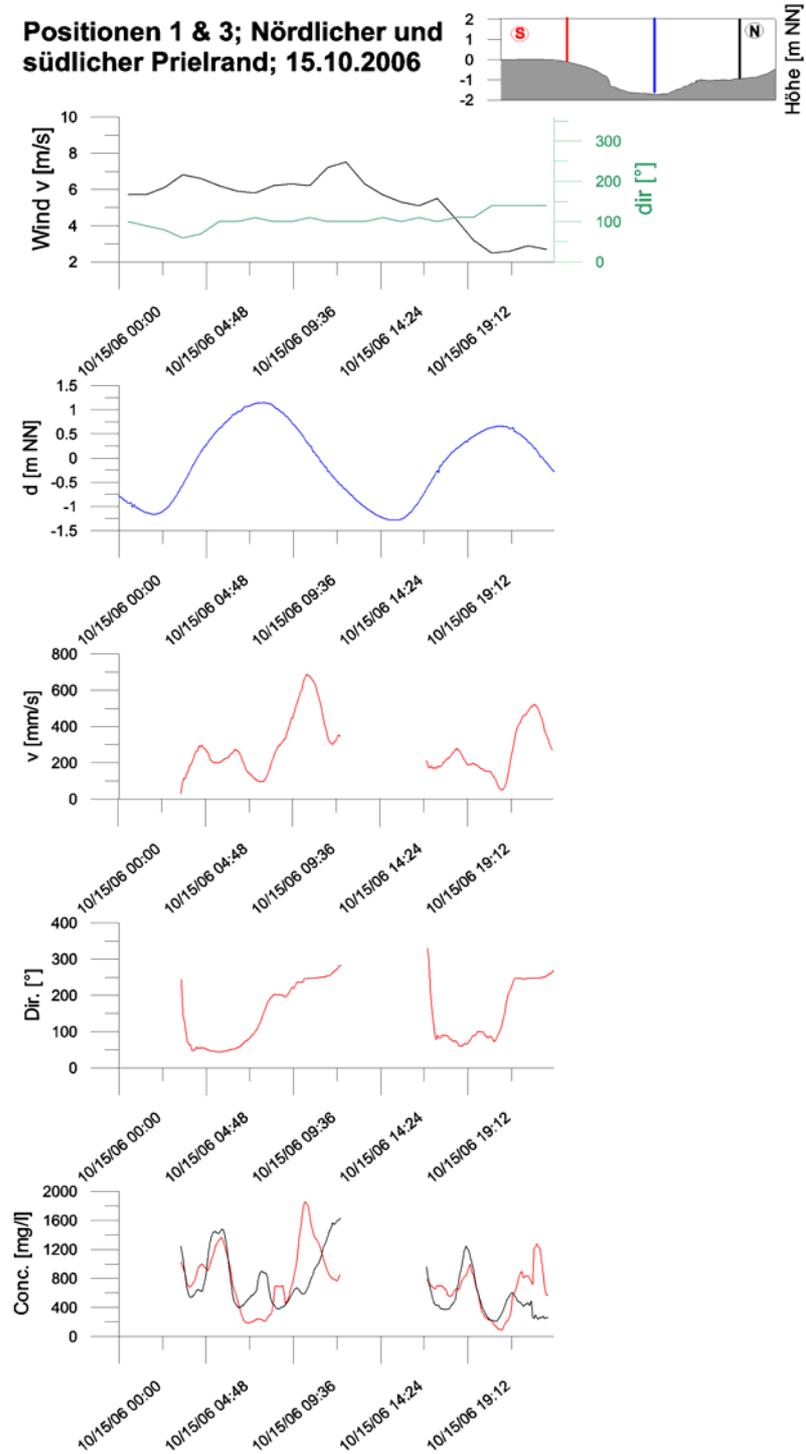


Abbildung A56: Darstellung der Messergebnisse; 15.10.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

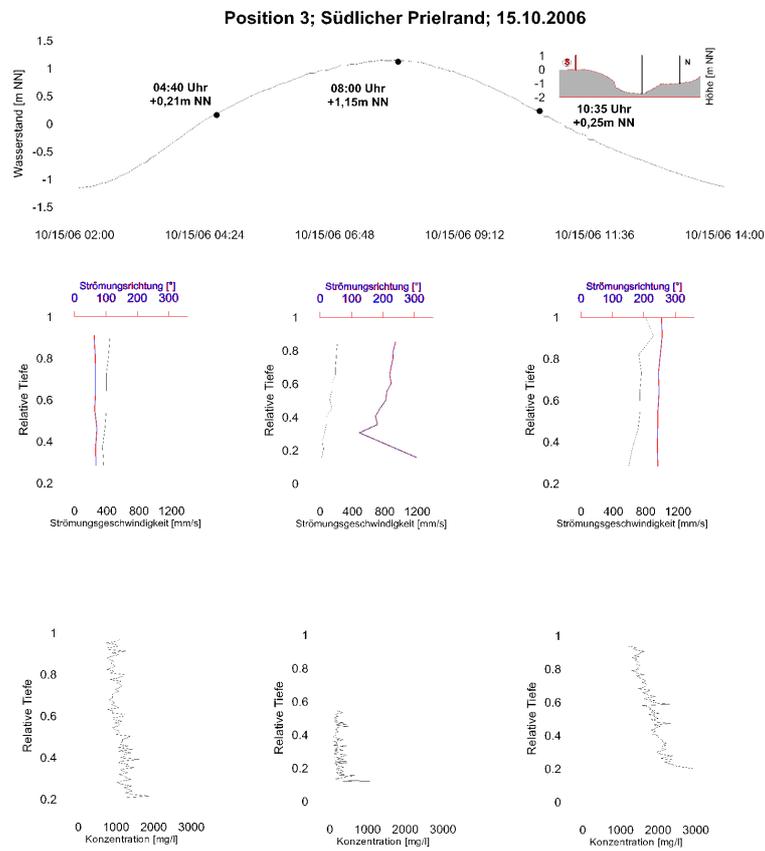


Abbildung A57: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 15.10.2006

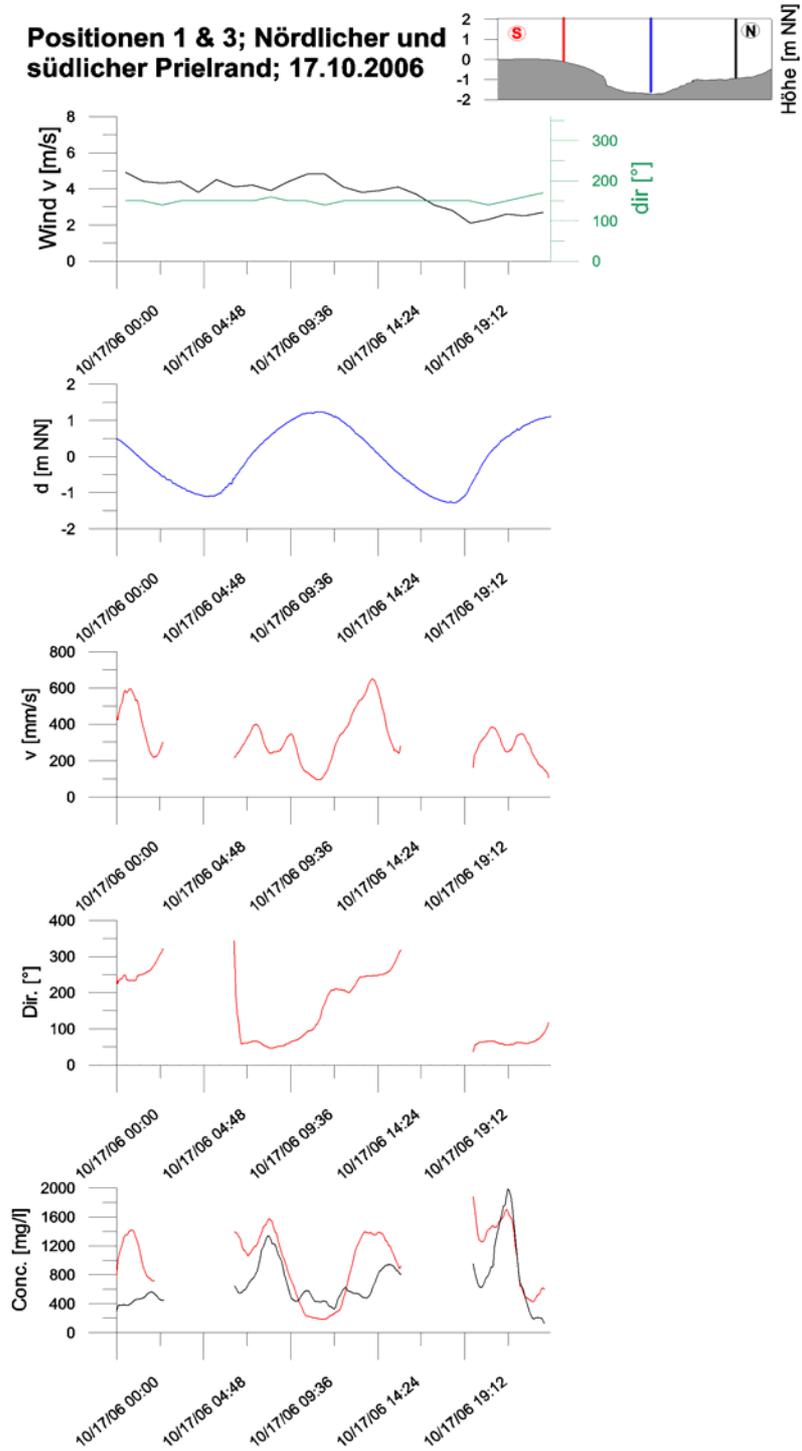


Abbildung A58: Darstellung der Messergebnisse; 17.10.2006

Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt – Phase 1

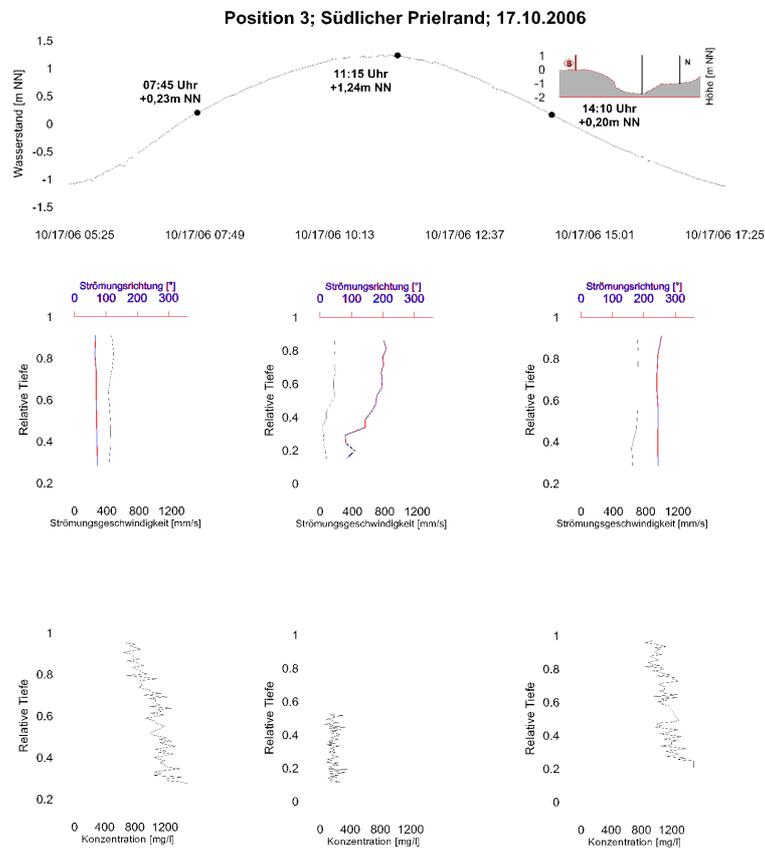


Abbildung A59: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 17.10.2006

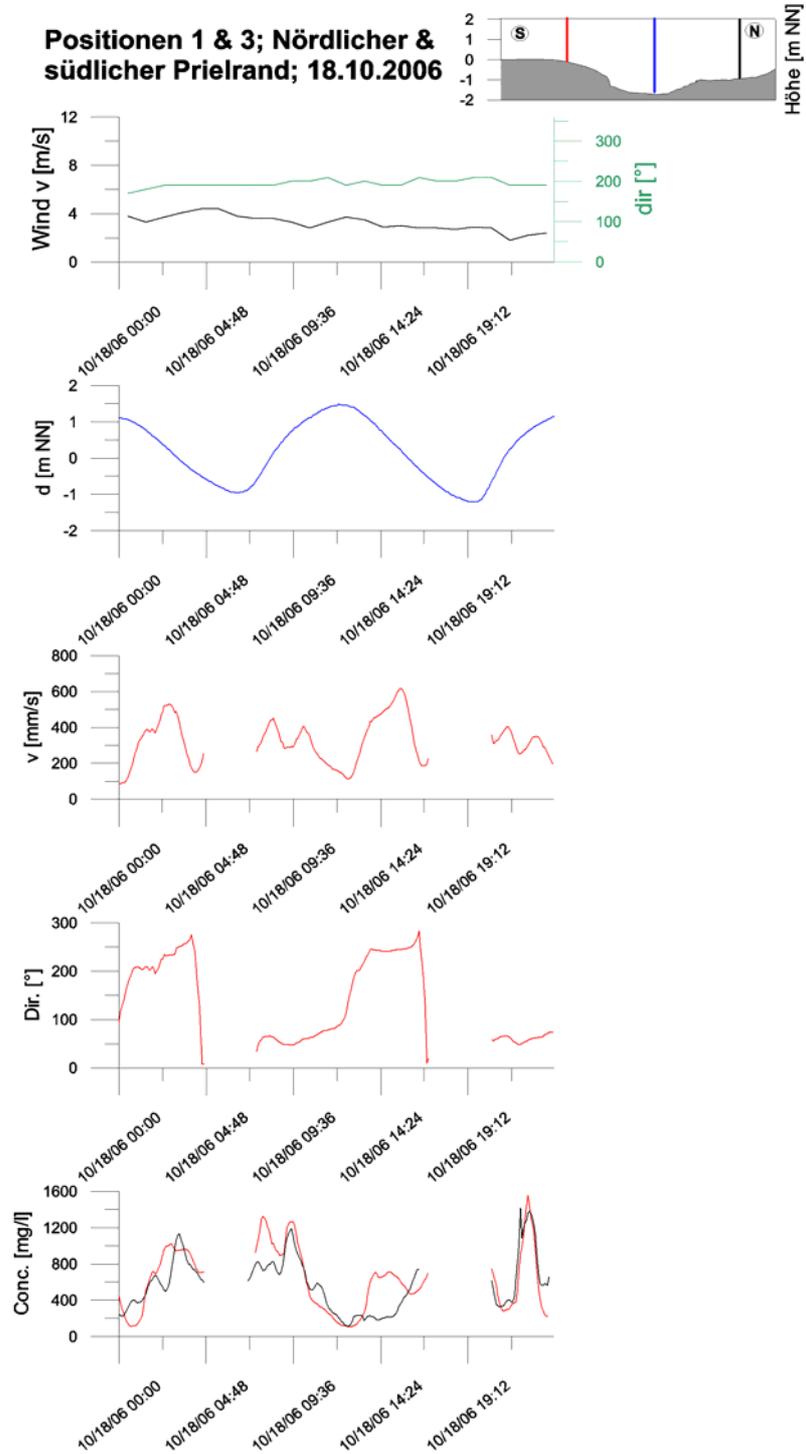


Abbildung A60: Darstellung der Messergebnisse; 18.10.2006

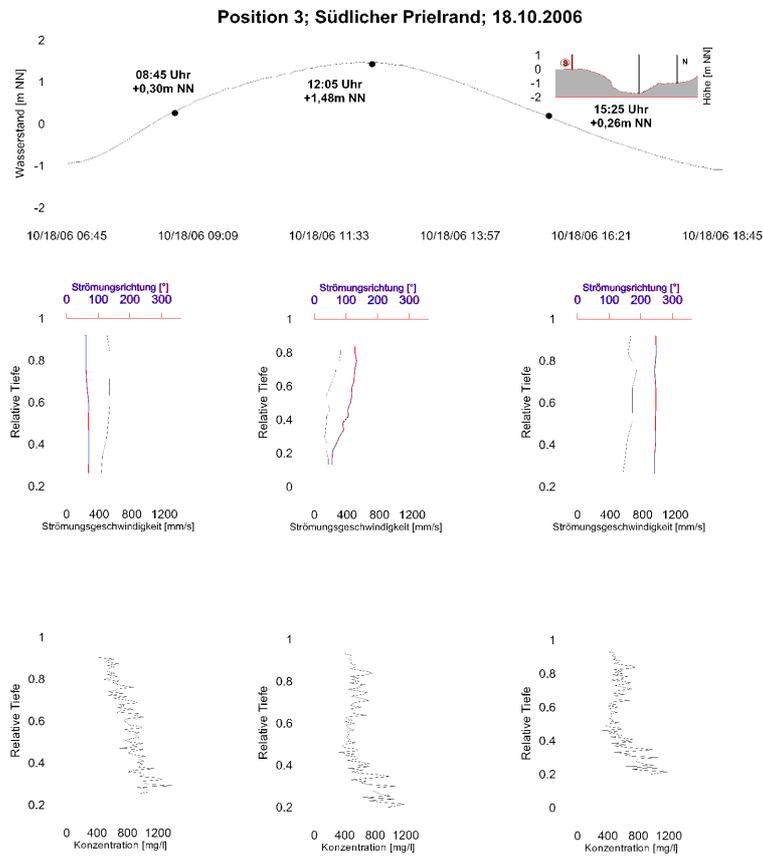


Abbildung A61: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 18.10.2006

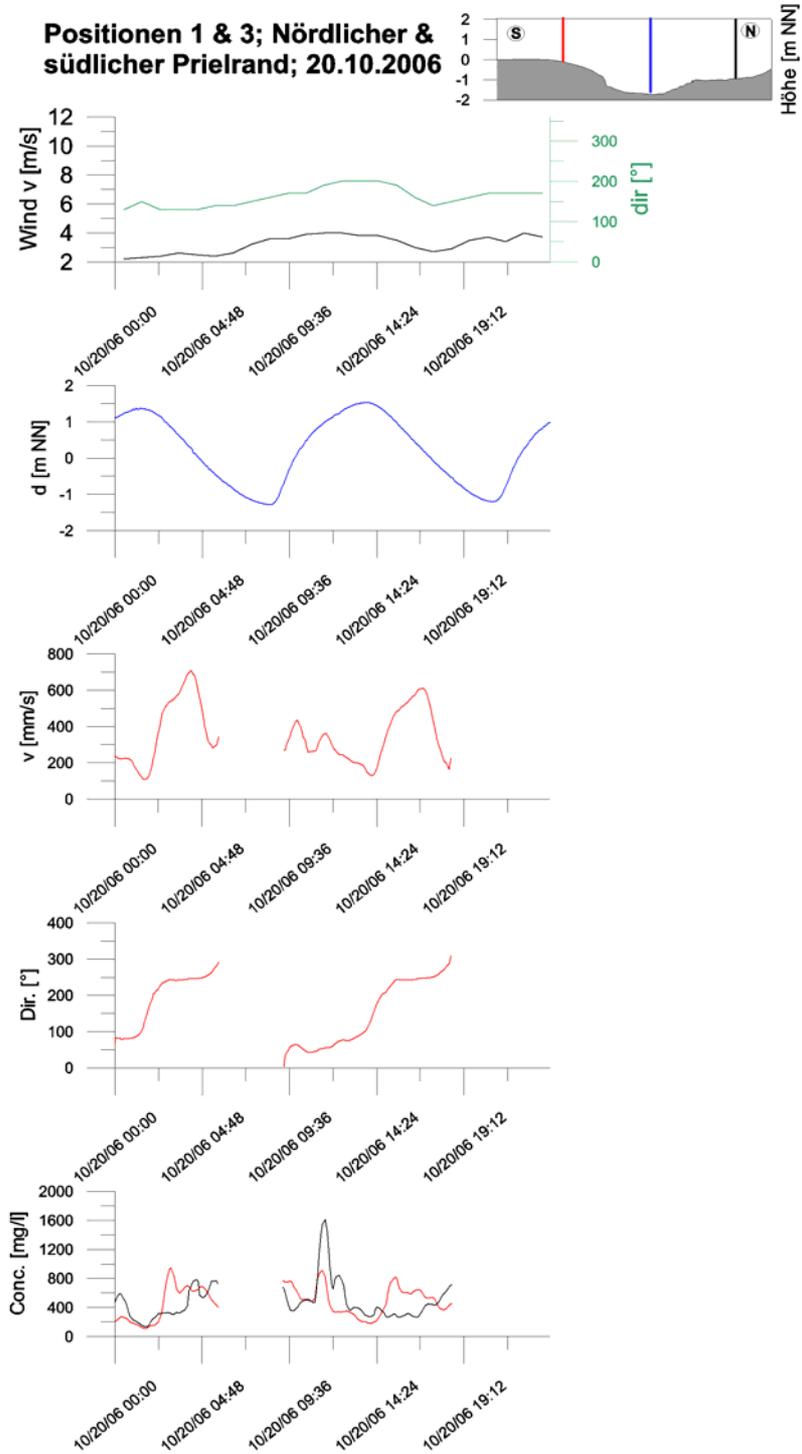


Abbildung A62: Darstellung der Messergebnisse; 20.10.2006

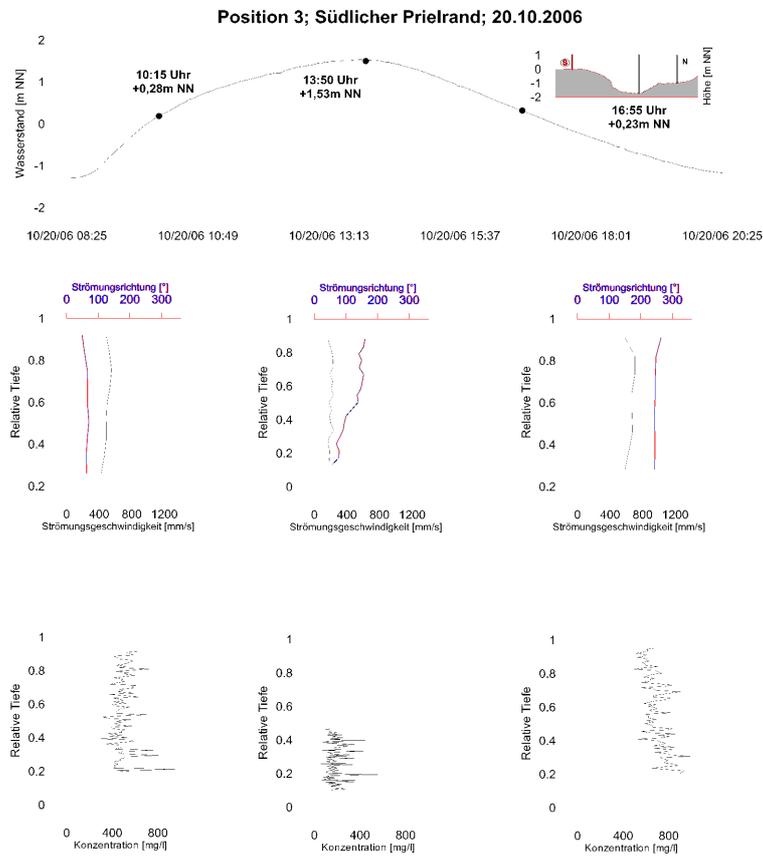


Abbildung A63: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 20.10.2006

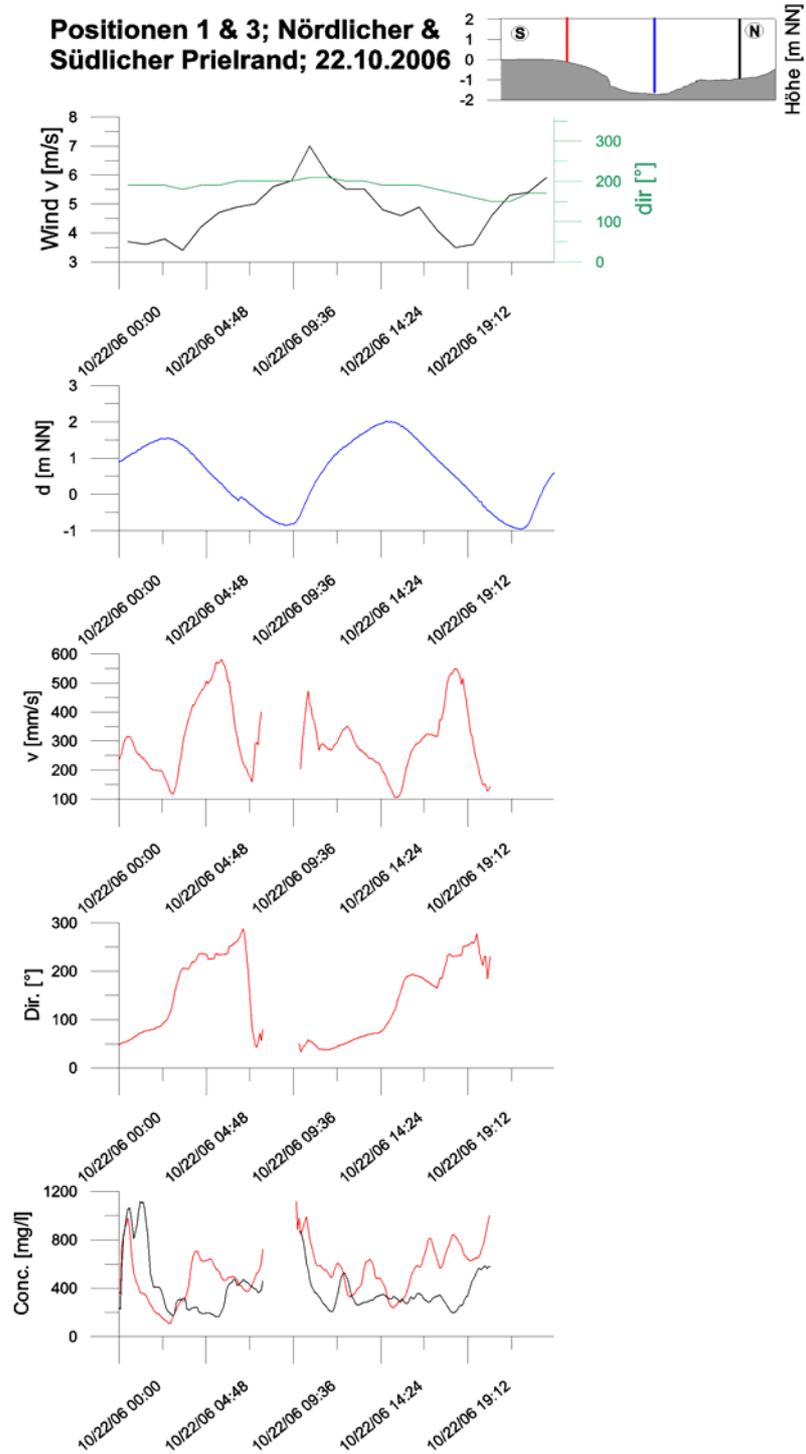


Abbildung A64: Darstellung der Messergebnisse; 22.10.2006

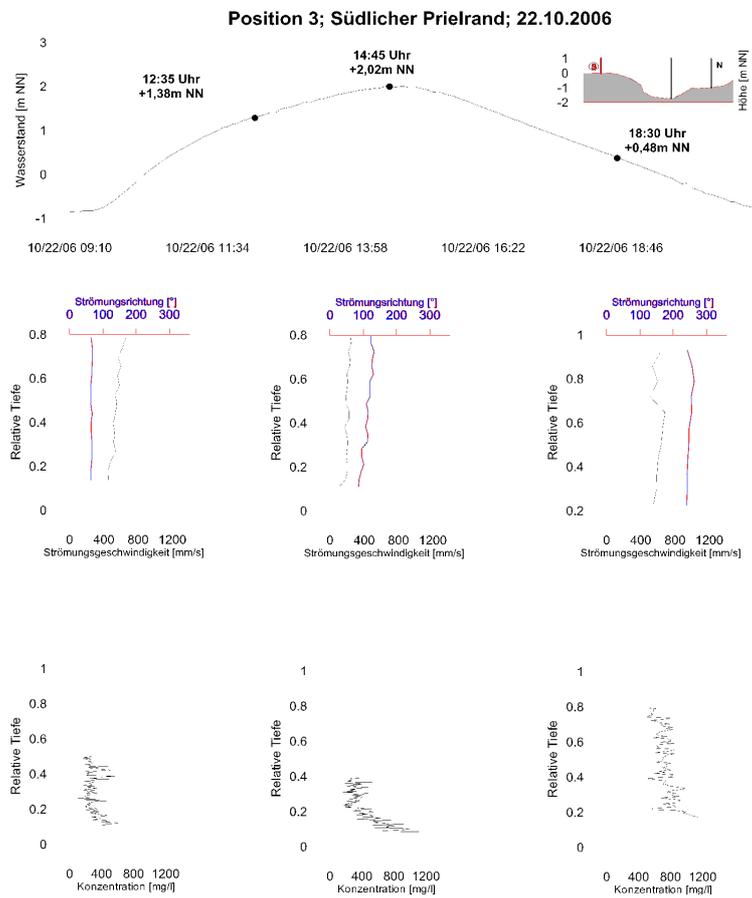


Abbildung A65: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 22.10.2006

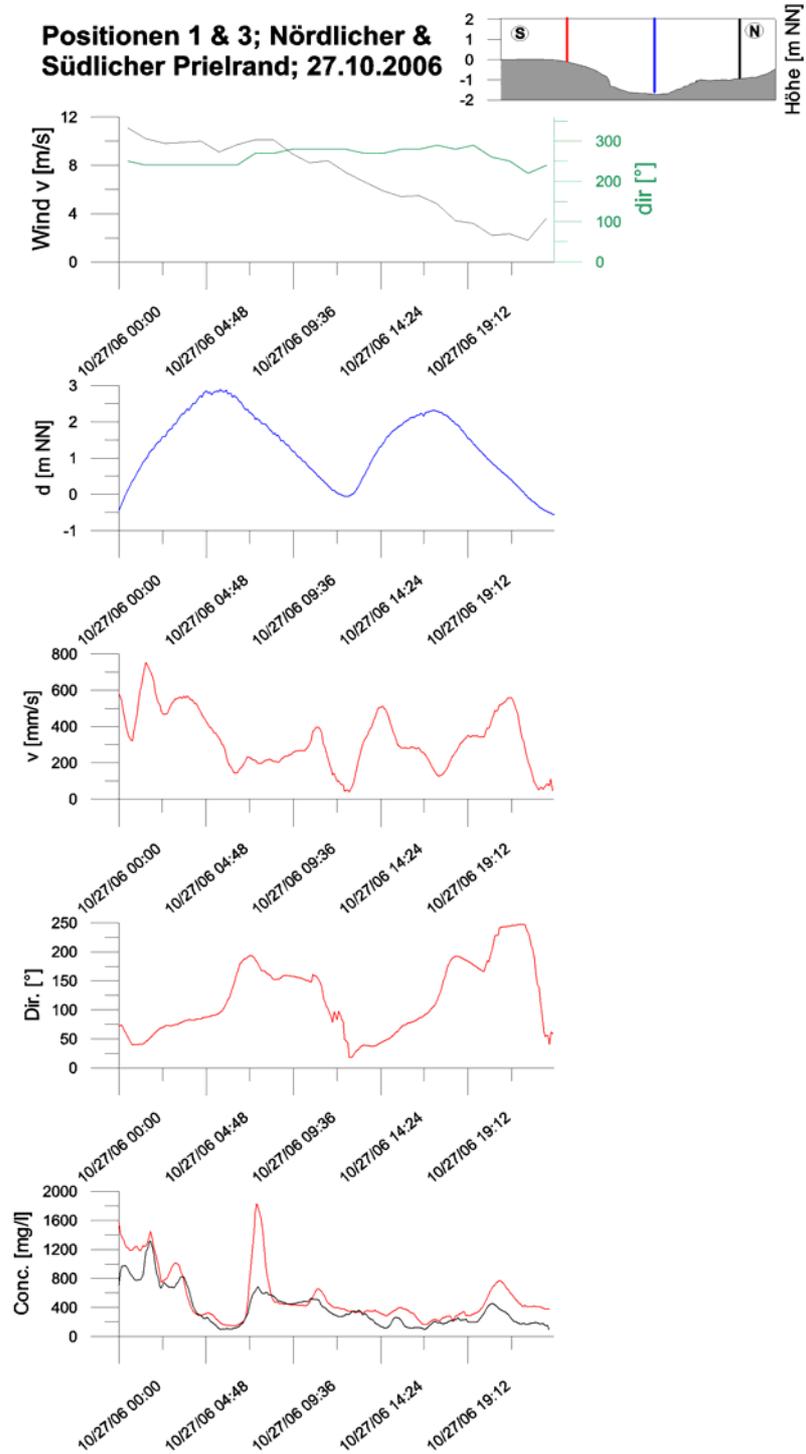


Abbildung A66: Darstellung der Messergebnisse; 27.10.2006

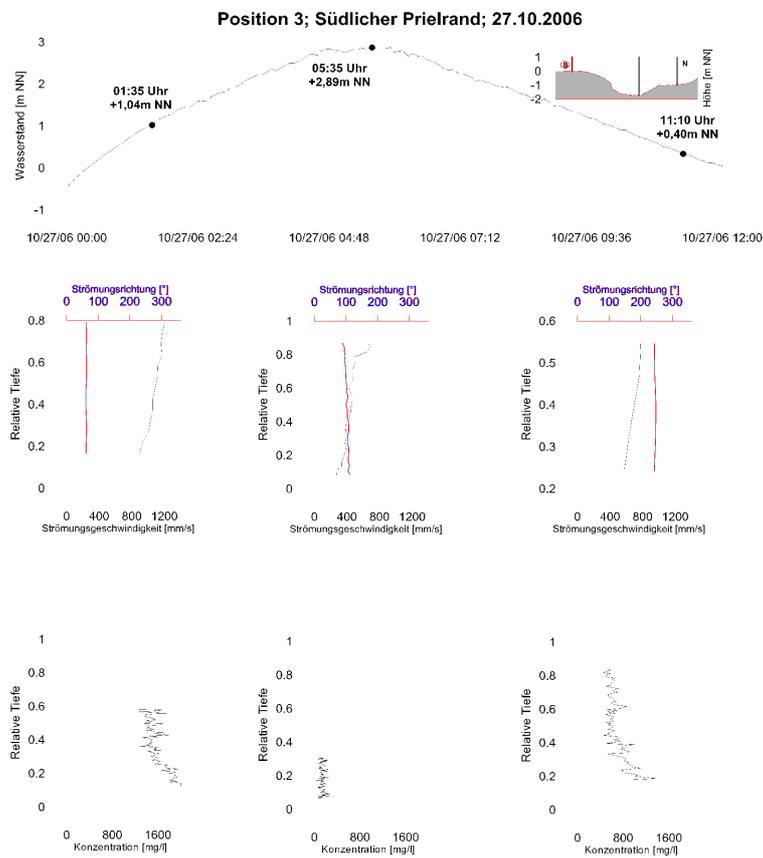


Abbildung A67: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 27.10.2006

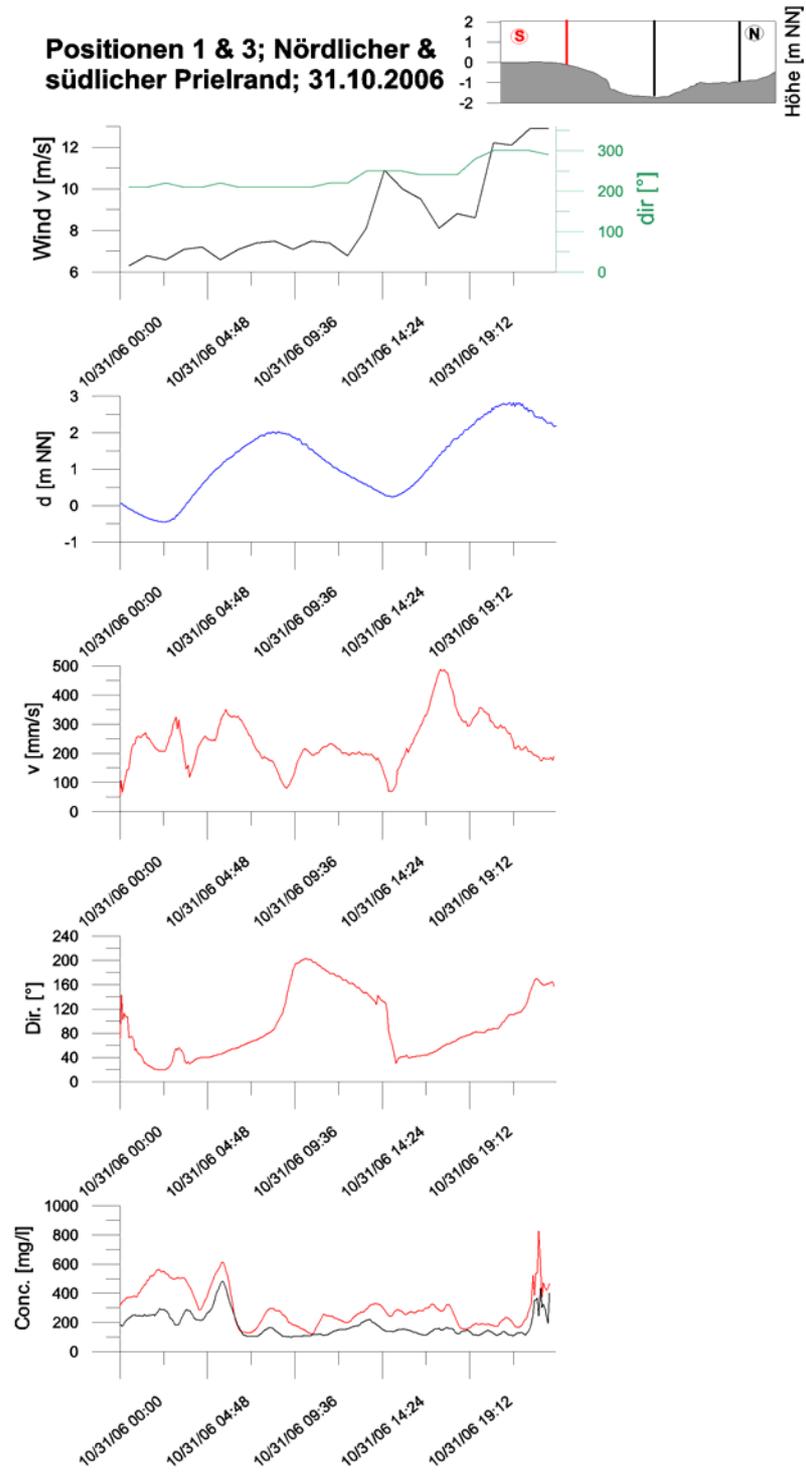


Abbildung A68: Darstellung der Messergebnisse; 31.10.2006

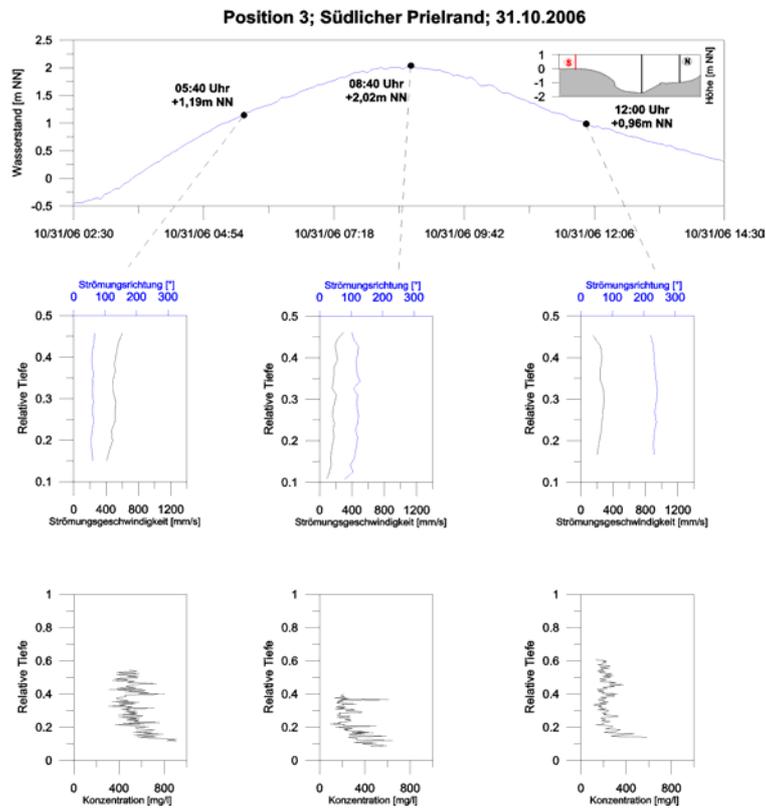


Abbildung A69: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 31.10.2006

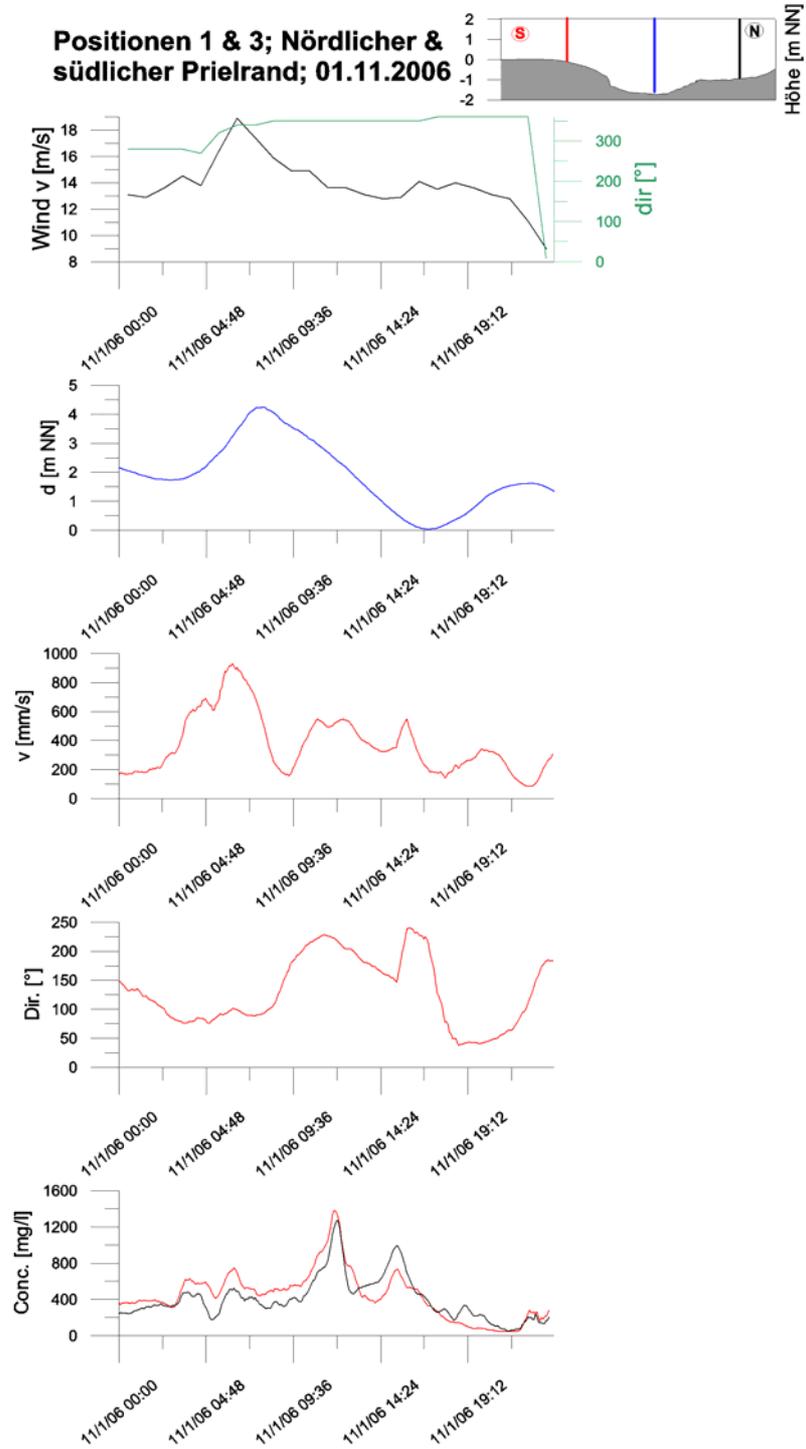


Abbildung A70: Darstellung der Messergebnisse; 01.11.2006

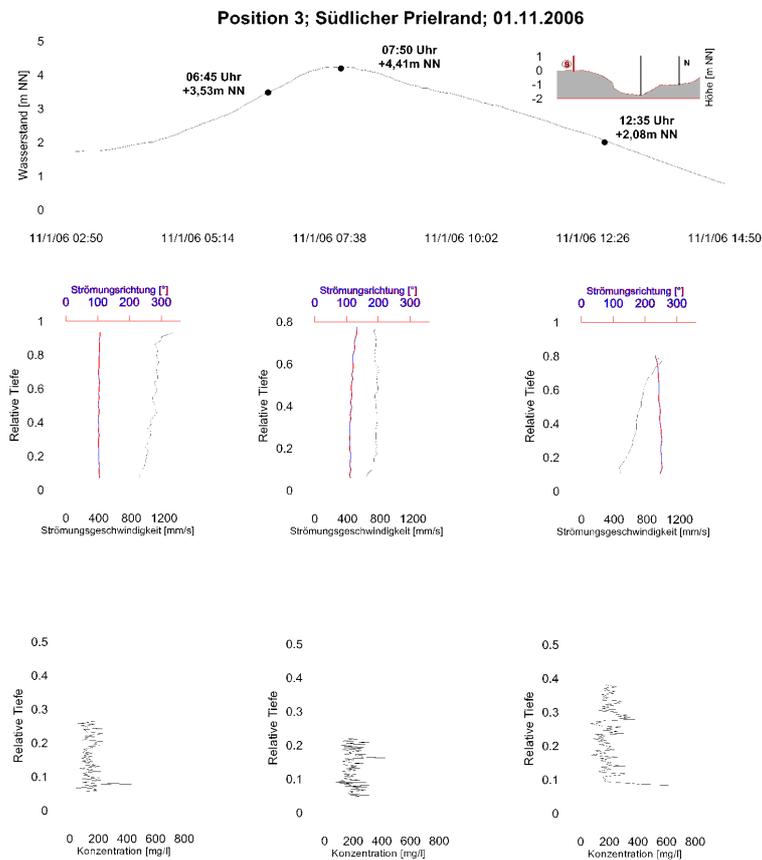


Abbildung A71: Darstellung der Messergebnisse; Profil 3; 01.11.2006

Anhang B – Ergebnisse der Seegangsaufzeichnungen

**Seegang, Position 1: Nördlicher Prielrand
17.08.2006, 16:00 Uhr bis 18.08.2006, 19:45 Uhr**

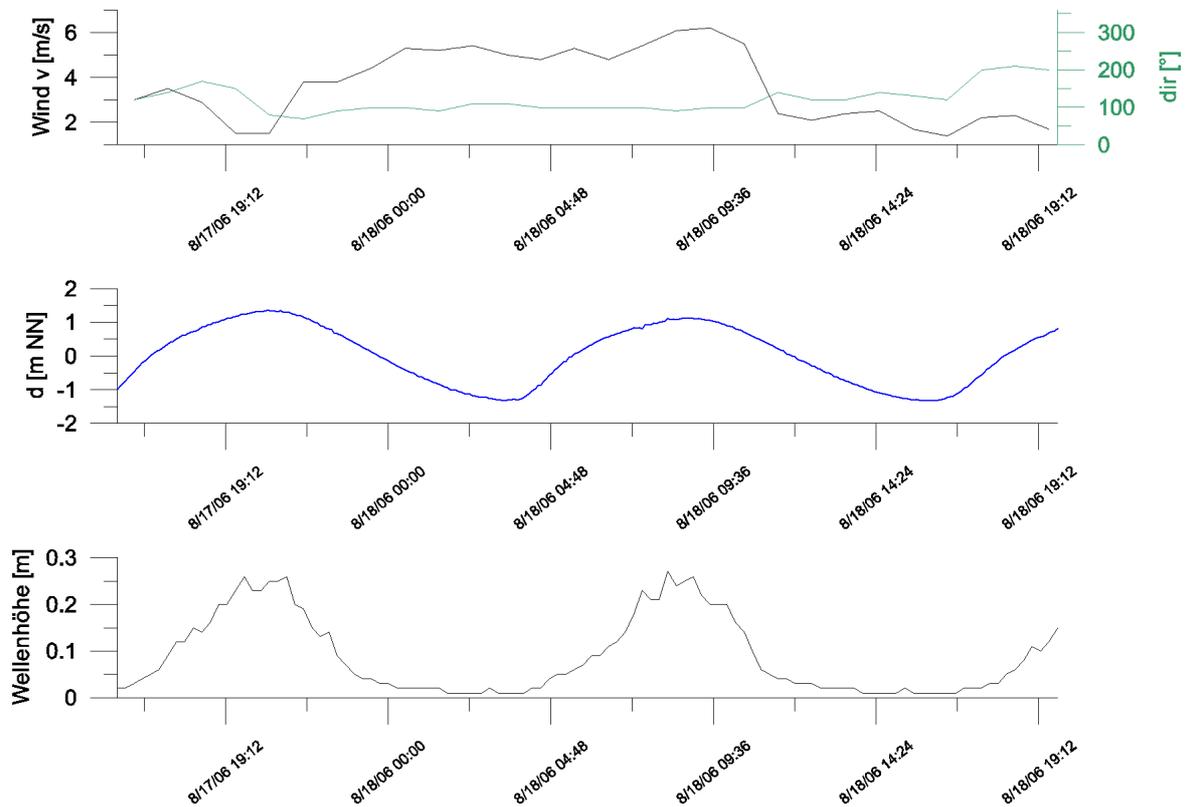


Abbildung B1: Darstellung der Seegangsauswertung; Nördlicher Prielrand; 17.08.2006 – 18.08.2006

Seegang, Position 3: Südlicher Prielrand
17.08.2006, 16:00 Uhr bis 21.08.2006, 02:30 Uhr

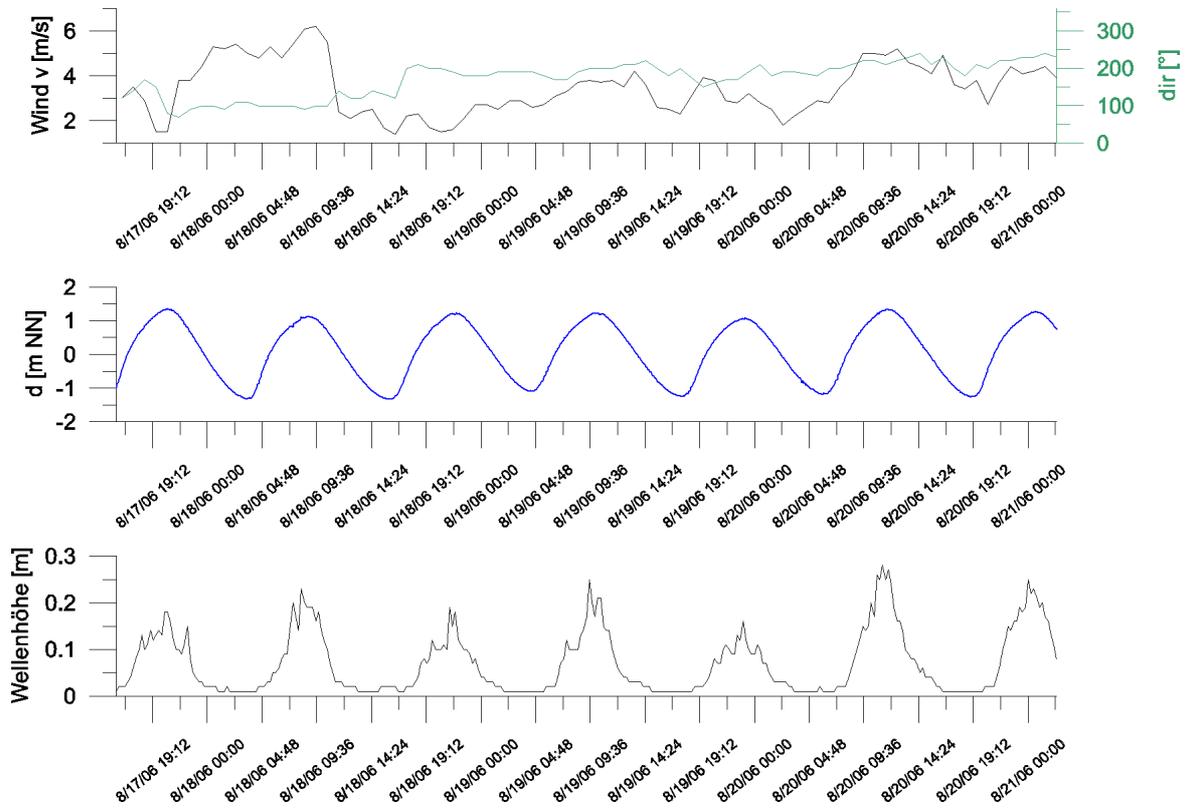


Abbildung B2: Darstellung der Seegangsauswertung; Südlicher Prielrand;
 17.08.2006 – 21.08.2006

**Seegang, Position 3: Südlicher Prielrand
09.09.2006, 15:00 Uhr bis 13.09.2006, 04:00 Uhr**

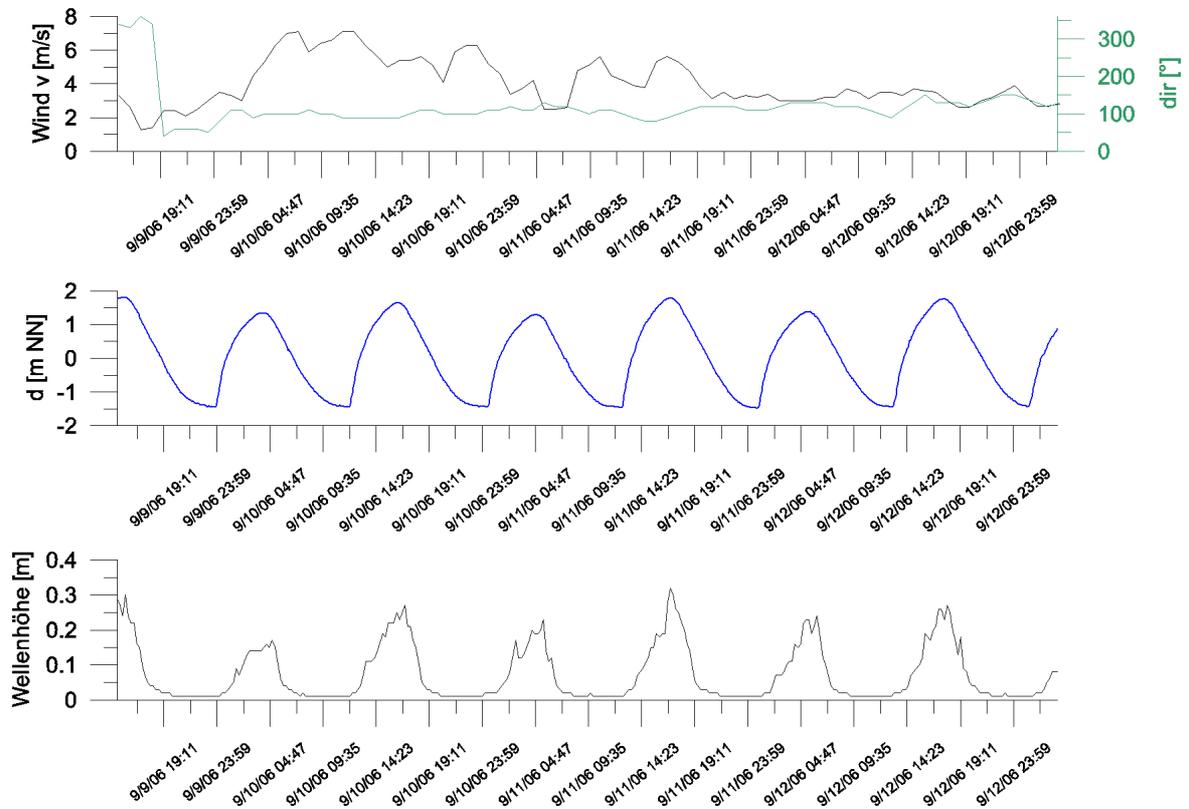


Abbildung B3: Darstellung der Seegangsauswertung; Südlicher Prielrand; 09.09.2006 – 13.09.2006

Seegang, Position 3: Südlicher Prielrand
14.10.2006, 00:00 Uhr bis 23.10.2006, 19:30 Uhr

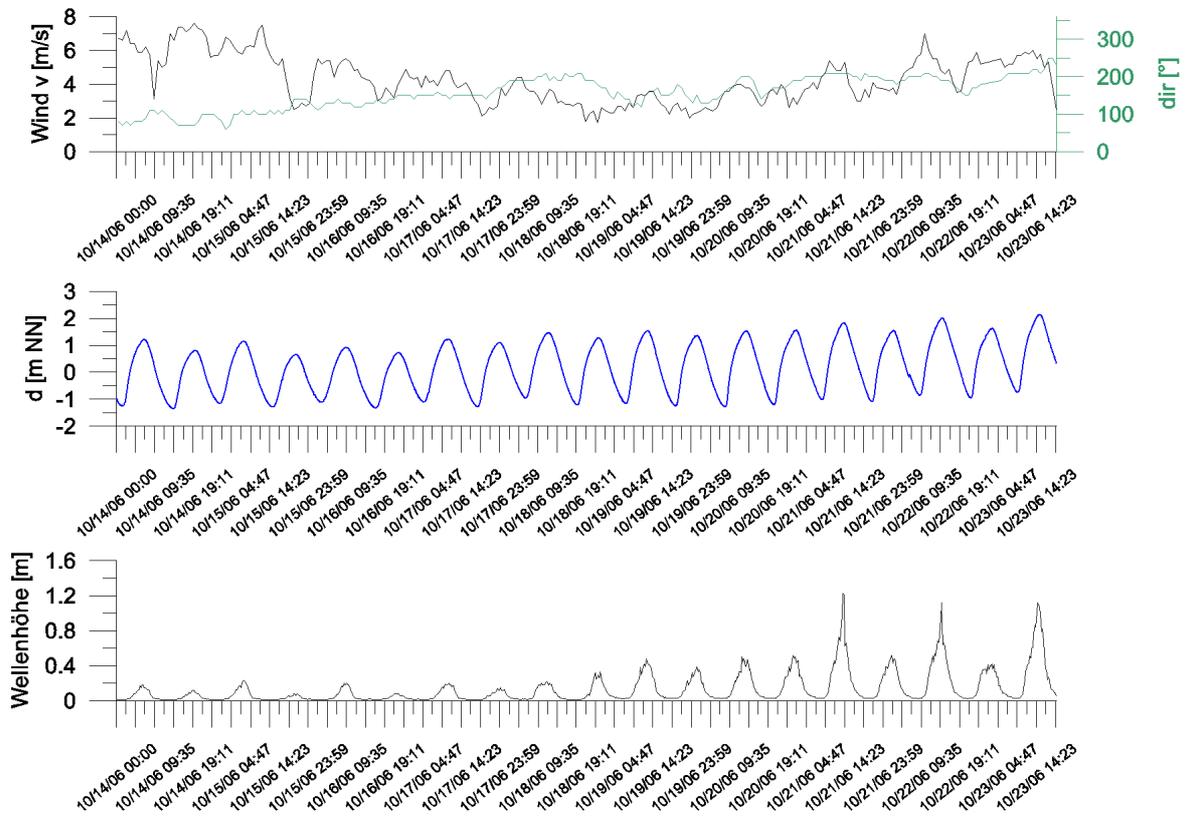


Abbildung B4: Darstellung der Seegangsauswertung; Südlicher Prielrand;
 14.10.2006 – 23.10.2006

Anhang C – Geotechnische Auswertung der Bodenproben

Tabelle C1: Verortung der Bodenproben (in Gauß-Krüger-Koordinaten)

Nr.	Datum	RW	HW
1	20.04.2006	3.495.071	5.970.958
2	28.11.2006	3.495.053	5.970.974
3	28.11.2006	3.495.075	5.970.963

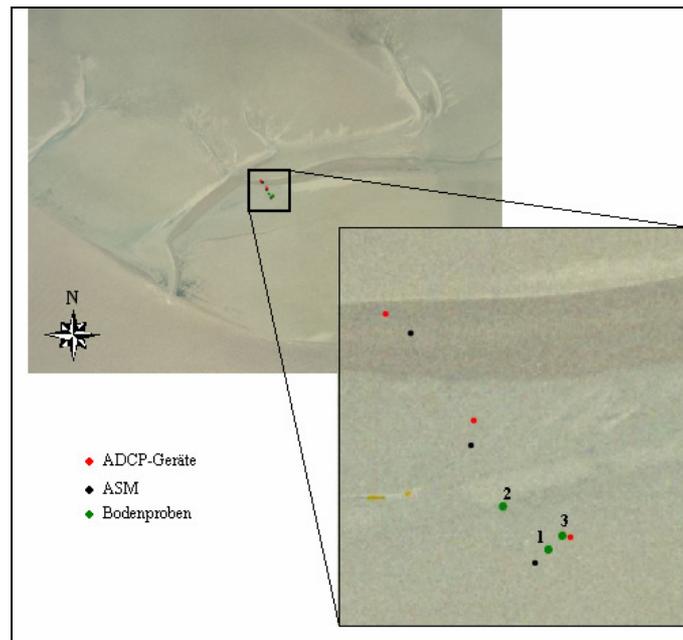


Abbildung C1: Kartierung der Bodenproben

Bodenprobe Nr. 1 vom 20.04.2006
 Entnahmenstelle Südlicher Prielrand (RW 3.495.071, HW 5.970.958)

2																																																																																											
<h3 style="text-align: center;">Korngrößenverteilung</h3>	Datum: 29.05.2006 Bearbeiter: Morten Klöpffer Projektnr: WB6																																																																																										
Bearbeiter: _____ Datum: _____																																																																																											
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Prüfung DIN 18 123 - 6 Entnahmestelle Neufelder Watt Tiefe 0,00 Bodenart: fS, ms, u' U/Cc 2.0/1.2 d₁₀/d₃₀/d₆₀ [mm]: 0.087 / 0.133 / 0.174 Siebanalyse: Trockenmasse [g]: 505.33 Schlämmanalyse: Trockenmasse [g]: 45.86 Korndichte [g/cm³]: 2.560 Aräometer: Bezeichnung: ...56 Volumen Aräometerbirne [cm³]: 70.00 Fläche Meßzylinder [cm²]: 28.27 Länge Aräometerbirne [cm]: 16.40 Länge der Skala [cm]: 15.00 Abstd. OK Birne - UK Skala [cm]: 1.20 Aräometer-Konstante: 0.40 </div>	<h3 style="text-align: center;">Siebanalyse</h3> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Korngröße [mm]</th> <th>Rückstand [g]</th> <th>Rückstand [%]</th> <th>Siebdurchgänge [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>16.0</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>100.00</td></tr> <tr><td>8.0</td><td>0.02</td><td>0.00</td><td>100.00</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.80</td><td>0.16</td><td>99.84</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>2.64</td><td>0.52</td><td>99.32</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>1.53</td><td>0.30</td><td>99.01</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>0.82</td><td>0.16</td><td>98.85</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>2.13</td><td>0.42</td><td>98.43</td></tr> <tr><td>0.125</td><td>371.56</td><td>73.53</td><td>24.90</td></tr> <tr><td>0.063</td><td>84.65</td><td>16.75</td><td>8.15</td></tr> <tr><td>Schale</td><td>41.18</td><td>8.15</td><td>-</td></tr> <tr><td>Summe</td><td>505.33</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Siebverlust</td><td>0.00</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Korngröße [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Siebdurchgänge [%]	16.0	0.00	0.00	100.00	8.0	0.02	0.00	100.00	4.0	0.80	0.16	99.84	2.0	2.64	0.52	99.32	1.0	1.53	0.30	99.01	0.5	0.82	0.16	98.85	0.25	2.13	0.42	98.43	0.125	371.56	73.53	24.90	0.063	84.65	16.75	8.15	Schale	41.18	8.15	-	Summe	505.33			Siebverlust	0.00																																								
Korngröße [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Siebdurchgänge [%]																																																																																								
16.0	0.00	0.00	100.00																																																																																								
8.0	0.02	0.00	100.00																																																																																								
4.0	0.80	0.16	99.84																																																																																								
2.0	2.64	0.52	99.32																																																																																								
1.0	1.53	0.30	99.01																																																																																								
0.5	0.82	0.16	98.85																																																																																								
0.25	2.13	0.42	98.43																																																																																								
0.125	371.56	73.53	24.90																																																																																								
0.063	84.65	16.75	8.15																																																																																								
Schale	41.18	8.15	-																																																																																								
Summe	505.33																																																																																										
Siebverlust	0.00																																																																																										
<h3 style="text-align: center;">Schlämmanalyse</h3> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Zeit [h]</th> <th>Zeit [min]</th> <th>R' [g]</th> <th>R = R' + C_m [g]</th> <th>Korngröße [mm]</th> <th>T [°C]</th> <th>C_T [g]</th> <th>R + C_T [g]</th> <th>Durchgang [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.5</td><td>16.00</td><td>16.40</td><td>0.0740</td><td>20.4</td><td>0.07</td><td>16.47</td><td>4.80</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>14.50</td><td>14.90</td><td>0.0535</td><td>20.4</td><td>0.07</td><td>14.97</td><td>4.37</td></tr> <tr><td>0</td><td>2</td><td>11.80</td><td>12.20</td><td>0.0393</td><td>20.4</td><td>0.07</td><td>12.27</td><td>3.58</td></tr> <tr><td>0</td><td>5</td><td>9.50</td><td>9.90</td><td>0.0256</td><td>20.4</td><td>0.07</td><td>9.97</td><td>2.91</td></tr> <tr><td>0</td><td>15</td><td>7.80</td><td>8.20</td><td>0.0151</td><td>20.4</td><td>0.07</td><td>8.27</td><td>2.41</td></tr> <tr><td>0</td><td>45</td><td>6.50</td><td>6.90</td><td>0.0088</td><td>20.6</td><td>0.11</td><td>7.01</td><td>2.04</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>5.50</td><td>5.90</td><td>0.0055</td><td>20.7</td><td>0.13</td><td>6.03</td><td>1.76</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>5.00</td><td>5.40</td><td>0.0032</td><td>20.8</td><td>0.15</td><td>5.55</td><td>1.62</td></tr> <tr><td>24</td><td>0</td><td>4.00</td><td>4.40</td><td>0.0016</td><td>20.2</td><td>0.04</td><td>4.44</td><td>1.29</td></tr> </tbody> </table>		Zeit [h]	Zeit [min]	R' [g]	R = R' + C _m [g]	Korngröße [mm]	T [°C]	C _T [g]	R + C _T [g]	Durchgang [%]	0	0.5	16.00	16.40	0.0740	20.4	0.07	16.47	4.80	0	1	14.50	14.90	0.0535	20.4	0.07	14.97	4.37	0	2	11.80	12.20	0.0393	20.4	0.07	12.27	3.58	0	5	9.50	9.90	0.0256	20.4	0.07	9.97	2.91	0	15	7.80	8.20	0.0151	20.4	0.07	8.27	2.41	0	45	6.50	6.90	0.0088	20.6	0.11	7.01	2.04	2	0	5.50	5.90	0.0055	20.7	0.13	6.03	1.76	6	0	5.00	5.40	0.0032	20.8	0.15	5.55	1.62	24	0	4.00	4.40	0.0016	20.2	0.04	4.44	1.29
Zeit [h]	Zeit [min]	R' [g]	R = R' + C _m [g]	Korngröße [mm]	T [°C]	C _T [g]	R + C _T [g]	Durchgang [%]																																																																																			
0	0.5	16.00	16.40	0.0740	20.4	0.07	16.47	4.80																																																																																			
0	1	14.50	14.90	0.0535	20.4	0.07	14.97	4.37																																																																																			
0	2	11.80	12.20	0.0393	20.4	0.07	12.27	3.58																																																																																			
0	5	9.50	9.90	0.0256	20.4	0.07	9.97	2.91																																																																																			
0	15	7.80	8.20	0.0151	20.4	0.07	8.27	2.41																																																																																			
0	45	6.50	6.90	0.0088	20.6	0.11	7.01	2.04																																																																																			
2	0	5.50	5.90	0.0055	20.7	0.13	6.03	1.76																																																																																			
6	0	5.00	5.40	0.0032	20.8	0.15	5.55	1.62																																																																																			
24	0	4.00	4.40	0.0016	20.2	0.04	4.44	1.29																																																																																			

Abbildung C2: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 1 vom 20.04.2006

Tabelle C2: Ergebnisse der Sieb- und Schlämmanalyse der Bodenprobe Nr. 1 vom
20.04.2006

Vorhaben: Neufelder Watt				

Entnahmestelle Neufelder Watt				
Tiefe 0,00				
fS, ms, u'				
U/Cc 2.0/1.2				
Datum: 29.05.2006				
Bearbeiter: Morten Klöpffer				
Projekt nr: WB 4				
Labor nr:				

Schlämmanalyse				
=====				
Trockenmasse: 45.86 g				
9 Ablesungen ausgewertet				
Spez. Gewicht: 2.560				
Areometerkonstante: 0.400				
Zeit[m]	Temperatur[C]	Ableseung	Durchmesser[mm]	Durchgang[%]
0.5	20.40	16.00	0.0740	4.86
1.0	20.40	14.50	0.0535	4.42
2.0	20.40	11.80	0.0393	3.62
5.0	20.40	9.50	0.0256	2.94
15.0	20.40	7.80	0.0151	2.44
45.0	20.60	6.50	0.0088	2.07
120.0	20.70	5.50	0.0055	1.78
360.0	20.80	5.00	0.0032	1.64
1440.0	20.20	4.00	0.0016	1.31

Siebanalyse				
=====				
Trockenmasse: 505.33 g				
9 Siebe ausgewertet				
Durchmesser[mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Durchgang[%]	
16.0000	0.00	0.00	100.00	
8.0000	0.02	0.00	100.00	
4.0000	0.80	0.16	99.84	
2.0000	2.64	0.52	99.32	
1.0000	1.53	0.30	99.01	
0.5000	0.82	0.16	98.85	
0.2500	2.13	0.42	98.43	
0.1250	371.56	73.45	24.98	
0.0630	84.65	16.73	8.25	

Schale	41.73	8.25
--------	-------	------

Summe Siebrückstände = 505.88 g

Siebverlust = -0.55 g

Durchmesser bei 10% Durchgang = 0.08664 mm

Durchmesser bei 15% Durchgang = 0.10415 mm

Durchmesser bei 20% Durchgang = 0.11560 mm

Durchmesser bei 30% Durchgang = 0.13273 mm

Durchmesser bei 50% Durchgang = 0.16054 mm

Durchmesser bei 60% Durchgang = 0.17426 mm

Durchmesser bei 85% Durchgang = 0.21498 mm

Abgeleitete Größen:

Ungleichkörnigkeit / Krümmungszahl = 2.0/1.2

kf (Hazen) = 8.71E-5 m/s

kf (Beyer) = 7.13E-5 - 7.88E-5 m/s

kf (Mallet/Paquant) = 2.52E-5 m/s

kf (Seelheim) = 9.20E-5 m/s

Ton: 1.4 %

Schluff: 6.8 %

Sand: 91.1 %

Kies: 0.7 %

Durchgang bei 0.002 mm: 1.4 %

Durchgang bei 0.06 mm: 8.2 %

Durchgang bei 2.0 mm: 99.3 %

Durchgang bei 60.0 mm: 100.0 %

Bodenprobe Nr. 2 vom 28.11.2006

Entnahmenstelle Neufelder Rinne (RW 3.495.053, HW 5.970.974)

Tabelle C3: Siebrückstände der Bodenprobe Nr. 2 vom 28.11.2006

Datum der Entnahme: 28.11.2006		Datum der Auswertung: 12.12.2006			
Ort der Auswertung: Institut für Geotechnik und Baubetrieb TUHH					
d [mm]	Sieb [g]	Sieb + Probe [g]	Masse der Rückstände [g]	Siebrückstände als Massenanteile [%]	Summe der Siebdurchgänge als Massenanteile [%]
16			0	0,00	100
8			0	0,00	100,00
4			0,04	0,04	99,96
2			0,18	0,17	99,80
1			1,25	1,16	98,63
0,5			2,43	2,26	96,37
0,25			2,21	2,06	94,31
0,125			21,78	20,28	74,03
0,063			76,24	70,99	3,04
Schale			3,26	3,04	0,00
Summe Masse der Rückstände:			107,39		

Tabelle C4: Wiegeverluste der Bodenprobe Nr. 2 vom 28.11.2006

Trockene Probe + Behälter	[g]	314,52
Behälter	[g]	207,34
Trockene Probe	[g]	107,18
Verlust = Trockene Probe - Summe Masse der Rückstände		
Verlust =		-0,21
Verlust [%] =		-0,20 < 1% der Einwage = 1,072

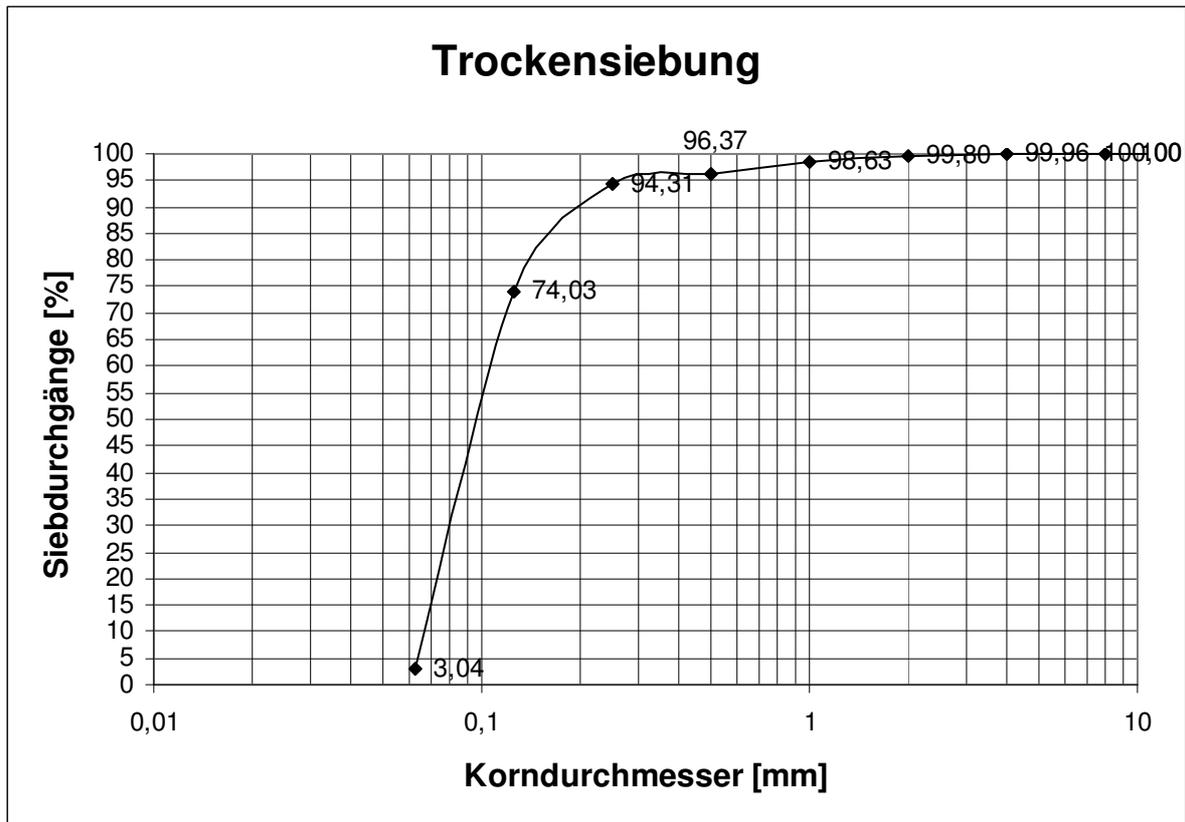


Abbildung C3: Sieblinie der Bodenprobe Nr. 2 vom 28.11.2006

Bodenprobe Nr. 3 vom 28.11.2006

Entnahmenstelle Südlicher Prielrand (RW 3.495.075, HW 5.970.963)

Tabelle C5: Siebrückstände der Bodenprobe Nr. 3 vom 28.11.2006

Datum der Entnahme: 28.11.2006		Datum der Auswertung: 12.12.2006			
Ort der Auswertung: Institut für Geotechnik und Baubetrieb TUHH					
d	Sieb	Sieb + Probe	Masse der Rückstände	Siebrückstände als Massenanteile	Summe der Siebdurchgänge als Massenanteile
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
16			0	0,00	100
8			0	0,00	100,00
4			0	0,00	100,00
2			0,01	0,01	99,99
1			0,12	0,09	99,90
0,5			0,34	0,26	99,64
0,25			0,91	0,70	98,94
0,125			29,69	22,88	76,06
0,063			92,54	71,30	4,76
Schale			6,18	4,76	0,00
Summe Masse der Rückstände:			129,79		

Tabelle C6: Wiegeverluste der Bodenprobe Nr. 3 vom 28.11.2006

Trockene Probe + Behälter	[g]	345,15
Behälter	[g]	215,25
Trockene Probe	[g]	129,9
Verlust = Trockene Probe - Summe Masse der Rückstände		
Verlust =		0,11
Verlust [%] =		0,08 < 1% der Einwage = 1,30

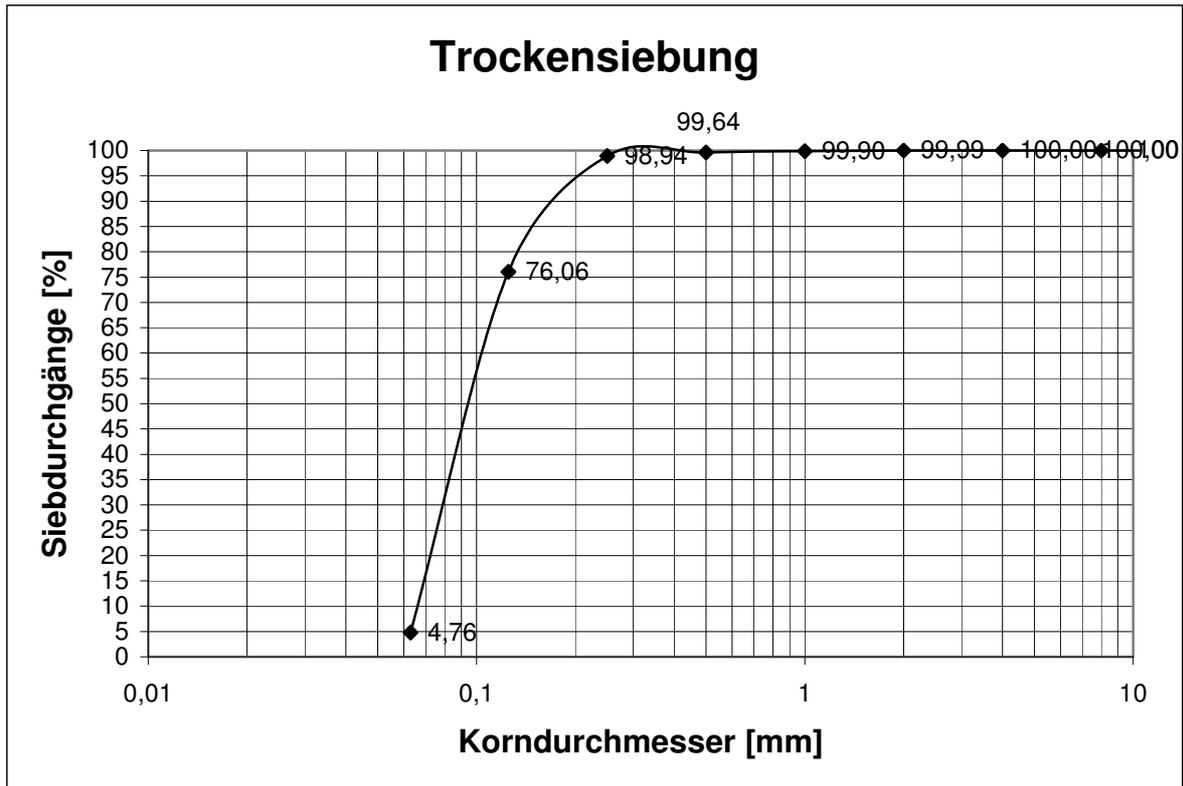


Abbildung C4: Sieblinie der Bodenprobe Nr. 3 vom 28.11.2006

Anhang D – Entnahme und Auswertung von Schwebstoffproben

Tabelle D1: Übersicht über die Schwebstoffproben

Nr.	Datum	Uhrzeit	Position	RW ~	HW ~	Entnahmehöhe über Grund
1	17.07.2006	17:15	ASM Mitte	3.495.042	5.970.997	2,18 m
2	17.07.2006	17:20	ASM Süd	3.495.065	5.970.953	1,30 m
3	14.09.2006	15:30	ASM Mitte	3.495.042	5.970.997	1,25 m

Tabelle D2: Ergebnisse der Schwebstoffproben

	Probe Nr. 1	Probe Nr. 2	Probe Nr. 3
Gewicht Filter + Rückstand [mg]	4538	4222	4546
Gewicht Filter [mg]	3685	3594	3468
Differenz (Schweb- stoff) [mg]	853	628	1078
Volumen der Was- serprobe [l]	1	1	1
Schwebstoffgehalt [mg/l]	853	628	1078

Anhang E – Auswertung topographischer Karten

Tabelle E1: Koordinaten der Eckpunkte der ausgewerteten Quadrate (Gauss-Krüger-Koordinaten)

Nr.	OL		UL		UR		OR	
	RW	HW	RW	HW	RW	HW	RW	HW
I	3.494.710	5.971.666	3.494.710	5.970.666	3.495.710	5.970.666	3.495.710	5.971.666
II	3.495.710	5.971.666	3.495.710	5.970.666	3.496.710	5.970.666	3.496.710	5.971.666
III	3.496.710	5.971.666	3.496.710	5.970.666	3.497.710	5.970.666	3.497.710	5.971.666
IV	3.497.710	5.971.666	3.497.710	5.970.666	3.498.710	5.970.666	3.498.710	5.971.666
VI	3.495.710	5.972.666	3.495.710	5.971.666	3.496.710	5.971.666	3.496.710	5.972.666
VII	3.496.710	5.972.666	3.496.710	5.971.666	3.497.710	5.971.666	3.497.710	5.972.666
VIII	3.497.710	5.972.666	3.497.710	5.971.666	3.498.710	5.971.666	3.498.710	5.972.666

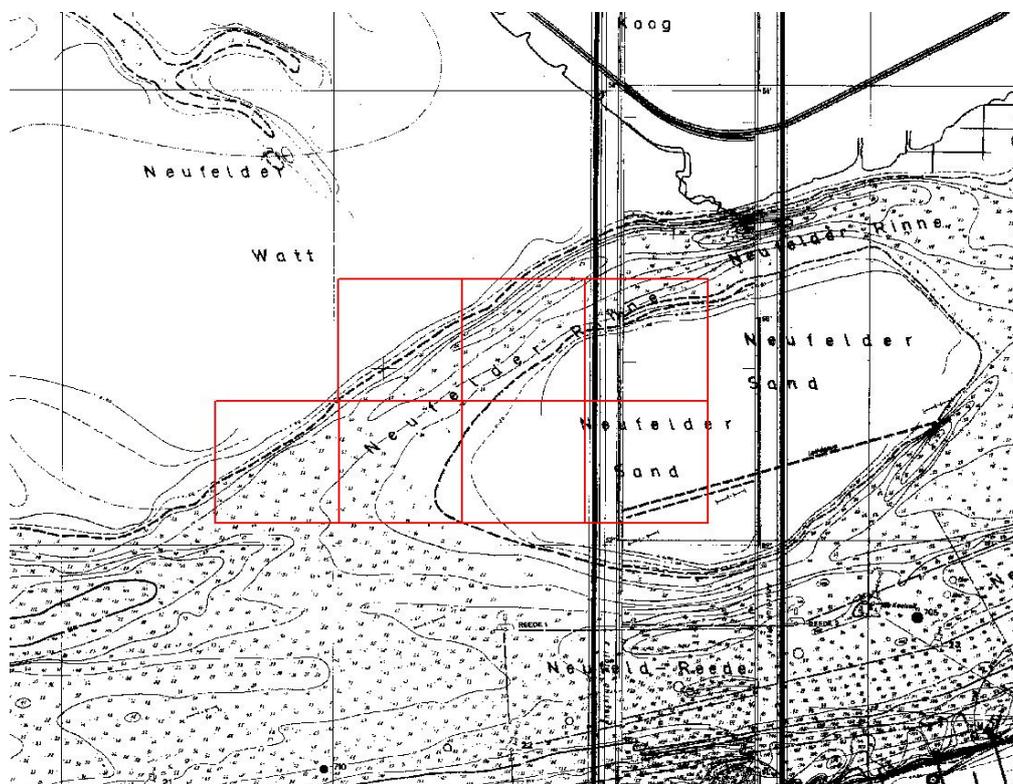


Abbildung E1: Seekarte von 1970

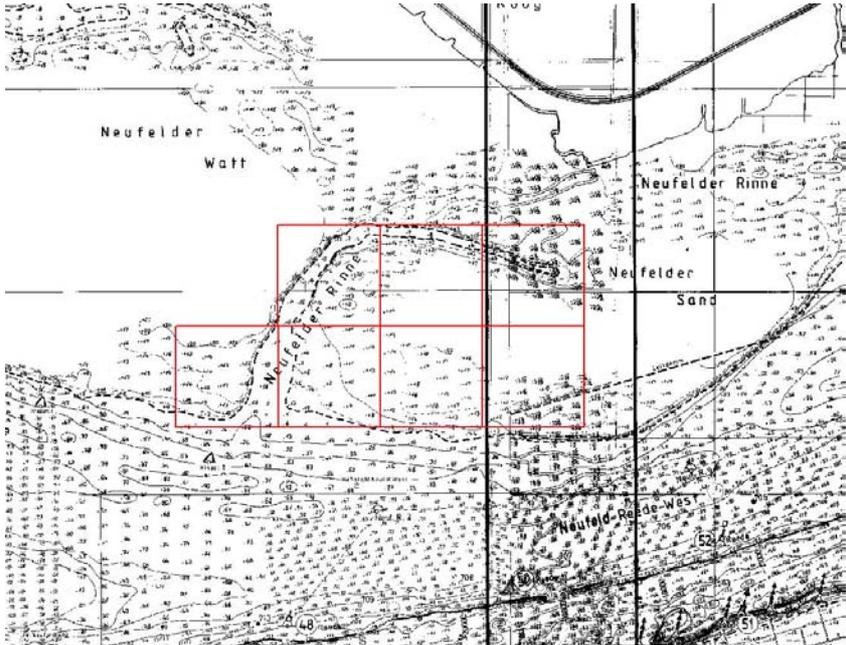


Abbildung E2: Seekarte von 1990

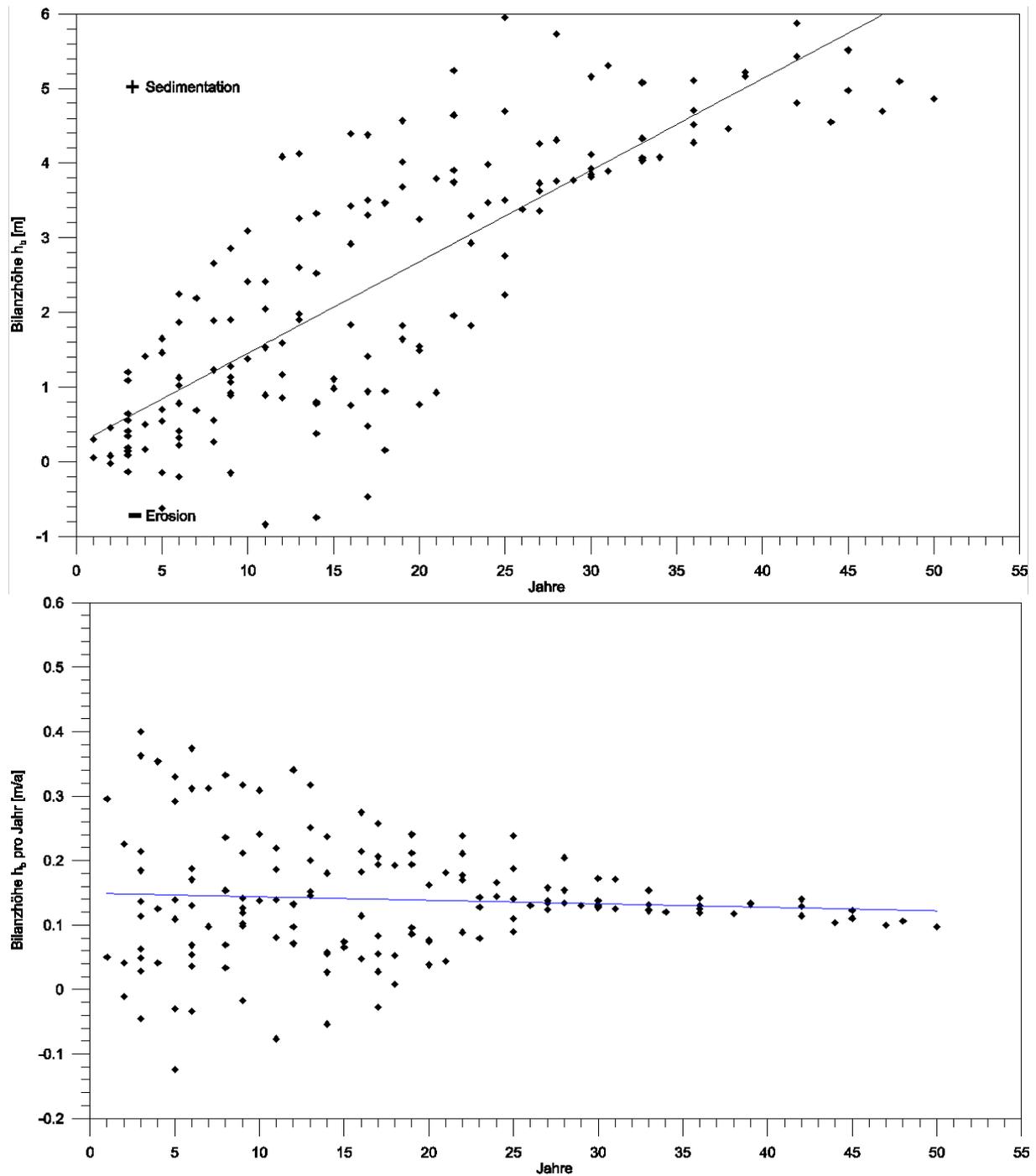


Abbildung E3: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat I (152 Kartenvergleiche)

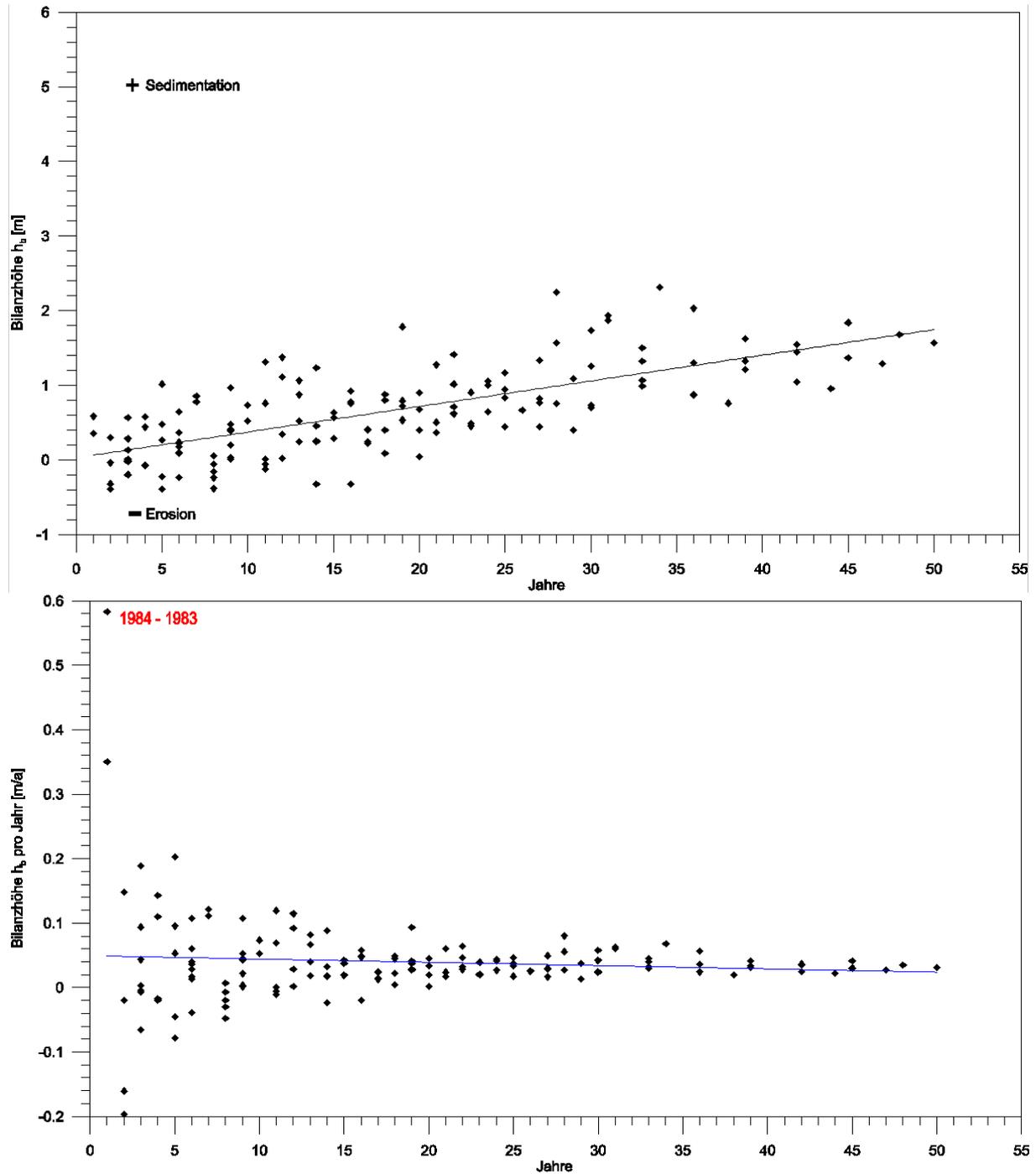


Abbildung E4: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat III (152 Kartenvergleiche)

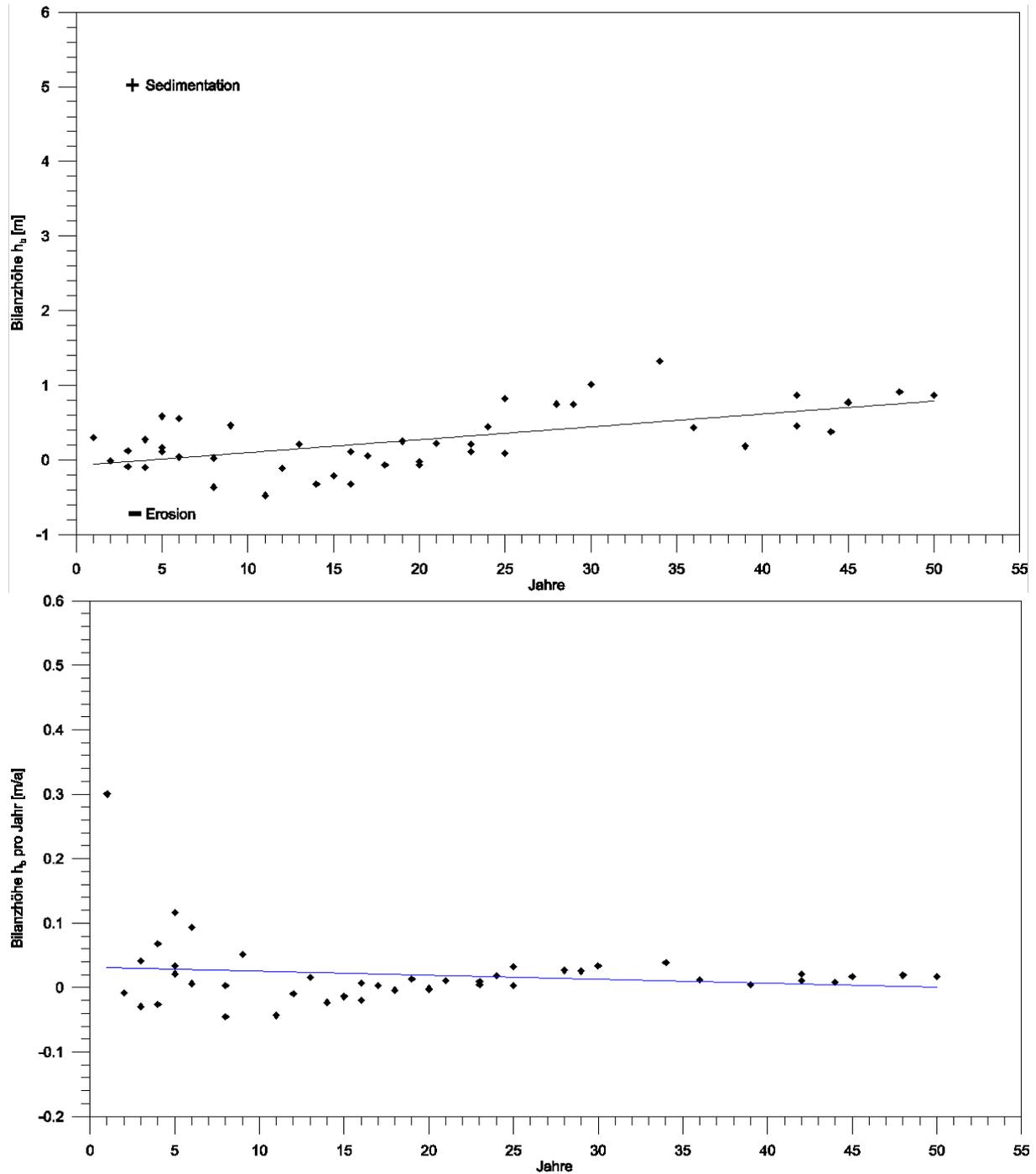


Abbildung E5: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat IV (44 Kartenvergleiche)

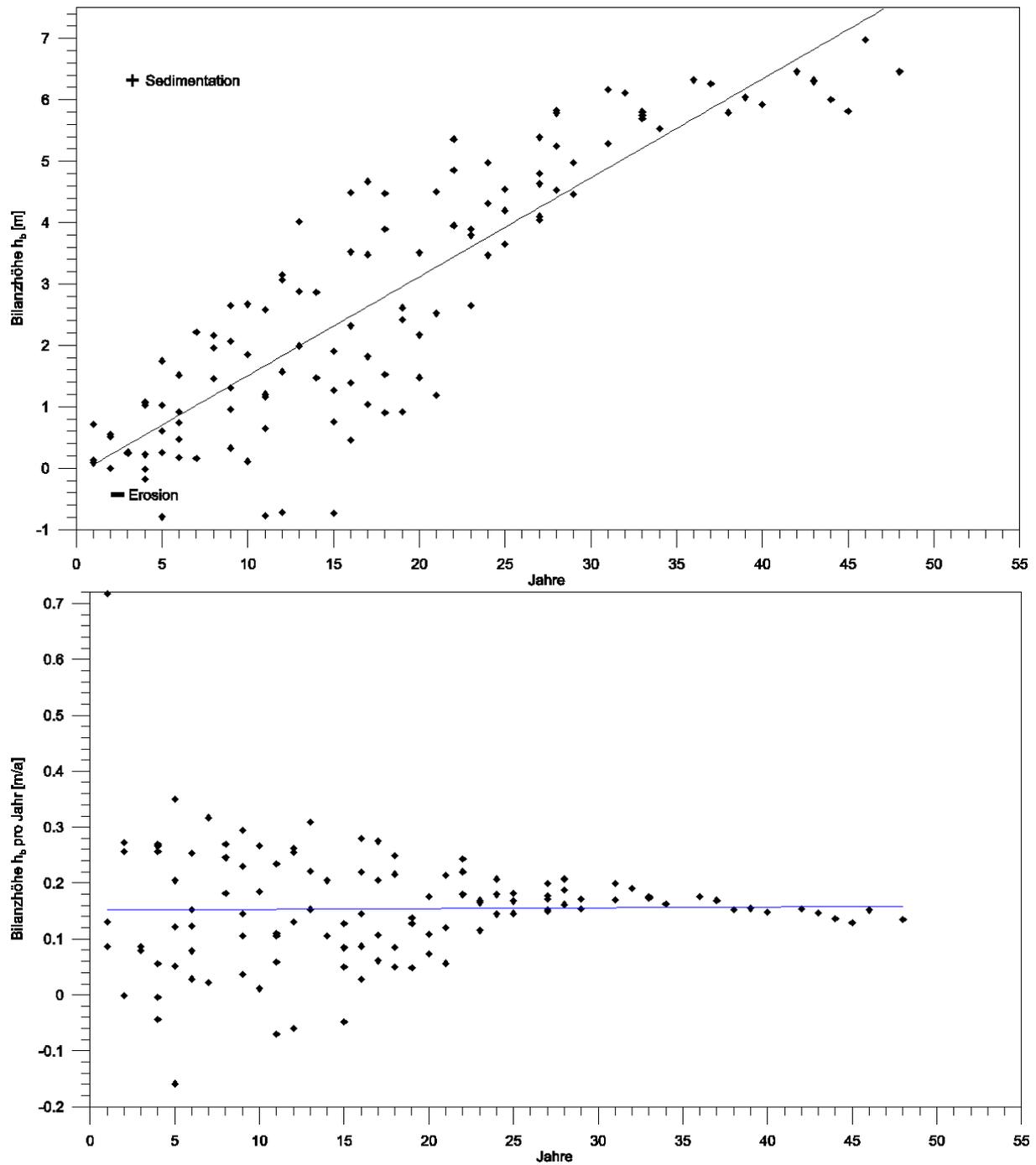


Abbildung E6: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat VI (119 Kartenvergleiche)

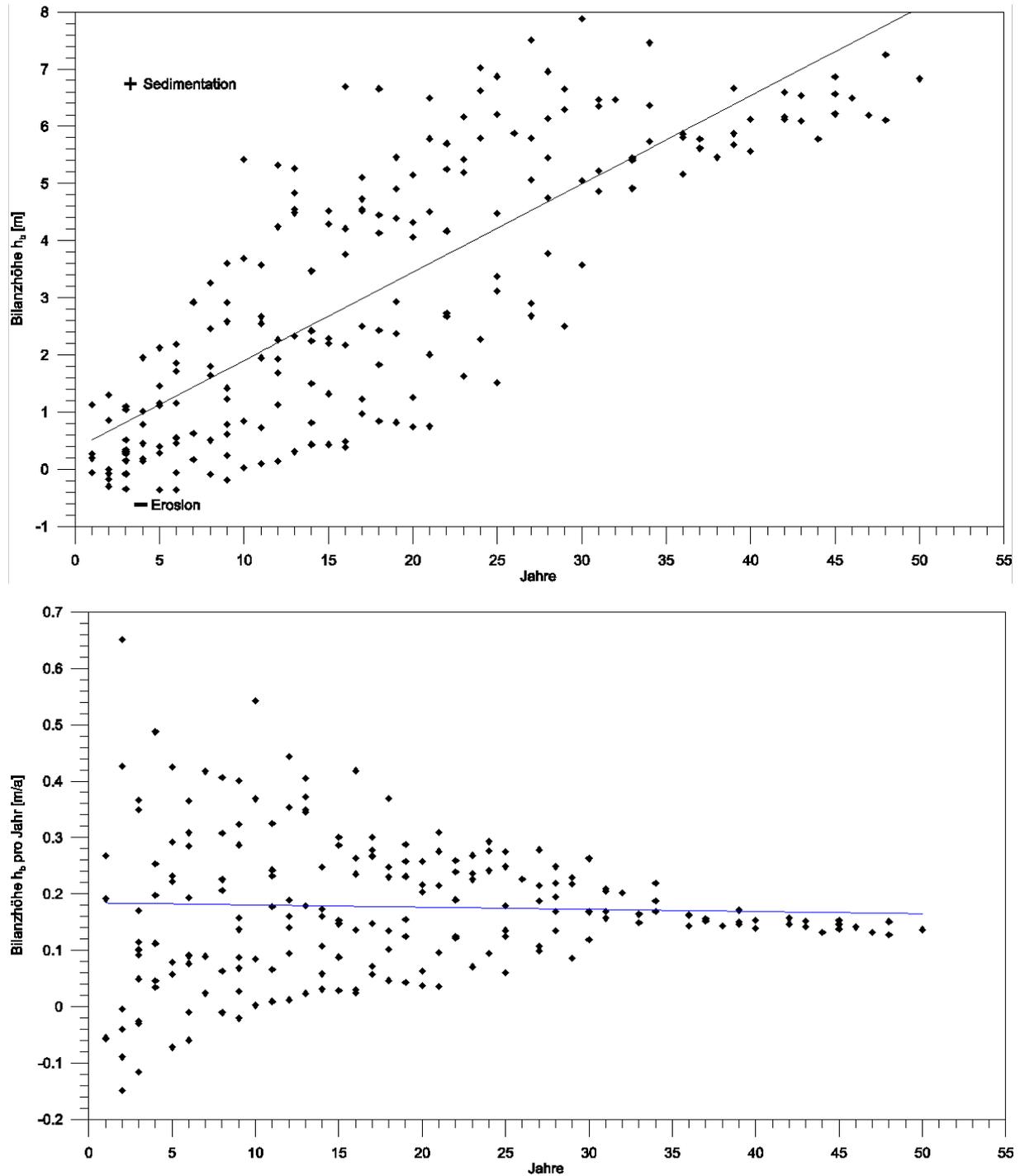


Abbildung E7: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat VII (204 Kartenvergleiche)

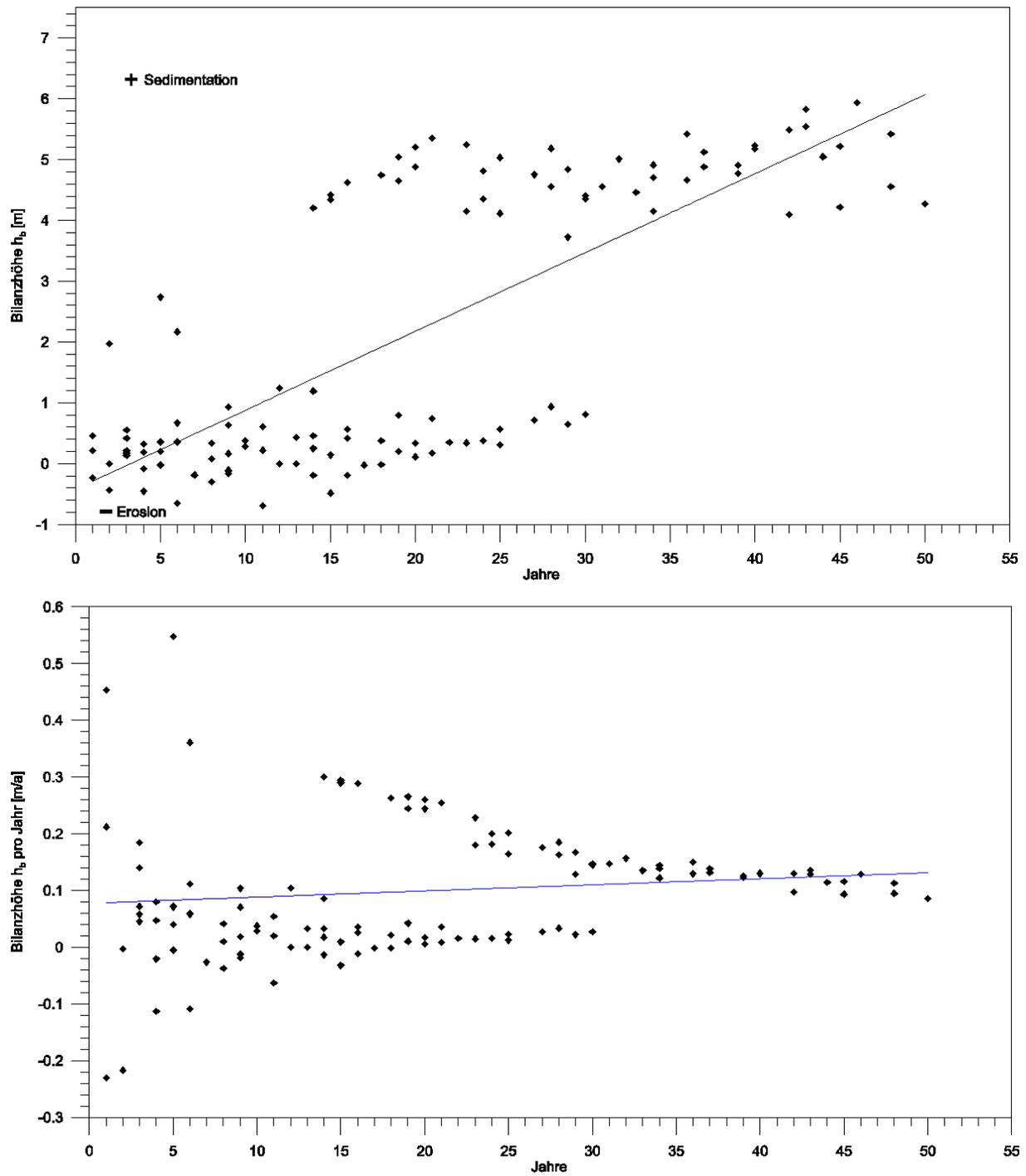


Abbildung E8: Bilanzhöhen und Bilanzraten Quadrat VIII (120 Kartenvergleiche)