

## **Impact of climate change and human intervention on hydrodynamics and environmental conditions in the Ems-Dollart estuary: an integrated data-modelling approach (Climate-Ems/Future-Ems)**

Bilateral Wadden Sea GEORISK Projekt

Thomas H. Badewien, Emil Stanev, Johannes Pein, Anderas Schöl, Kerstin Schrottke Alexander Bartholomä

Huib de Swart, Henk Schuttelars, Pieter Roos, Erik Ensing (Partner Niederlande)

**Bericht der vom BMBF geförderten Teilvorhaben Förderkennzeichen: 03F0635A**

**Work Package 2 – Field data and process analysis (leader: T. Badewien, P2)**

**Other partners involved: P5, P7, P8**

**1. Messung der hydrodynamischen Parameter** (Thomas H. Badewien, ICBM)

### **Einleitung**

Ziel des WP 2 war, neue hydrodynamische Datensätze zu erheben und den Projektpartnern für ihre jeweiligen Aufgaben zur Verfügung zu stellen. Auf insgesamt 11 Messkampagnen in der Tideems, der Emsmündung, sowie dem benachbarten Rückseitenwatt wurden hochaufgelöste Strömungsdaten gewonnen sowie räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Temperatur-, Salzgehalts-, Sauerstoff- und Trübungsdaten gewonnen. Die Messstrategie sowie die genauen Untersuchungsgebiete wurden in enger Abstimmung mit den modellierenden Gruppen entwickelt und ausgesucht. Aus diesen Überlegungen resultierte unter anderem eine Messkampagne, die im Gebiet rund um Möwensteert und in der Osterems stattfand. Modelldaten hatten gezeigt, dass ersteres Gebiet Besonderheiten der Ebb- und Flutdominanz aufweist. Weiterhin zeigten die Modellergebnisse, dass die Osterems eine wichtige Rolle für den Ausstrom der Ems spielt.

Folgende Messkampagnen wurden im Rahmen des Projekts durchgeführt:

- FK Senckenberg 3 Reisen: Sept. 2008 (als Vorbereitung für das Projekt), Juni 2012 und Jan. 2013
- FB Otzum Juni 2012, Jan. 2013, Feb. 2013, Feb. 2014, Juni 2015 (Osterems)
- FB Zephyr Jan. 2013 und Mai 2013
- RF Heincke: He 366 Oct 2011, He 389 Oct 2012, He 410 Oct 2013, He 434 Oct 2014

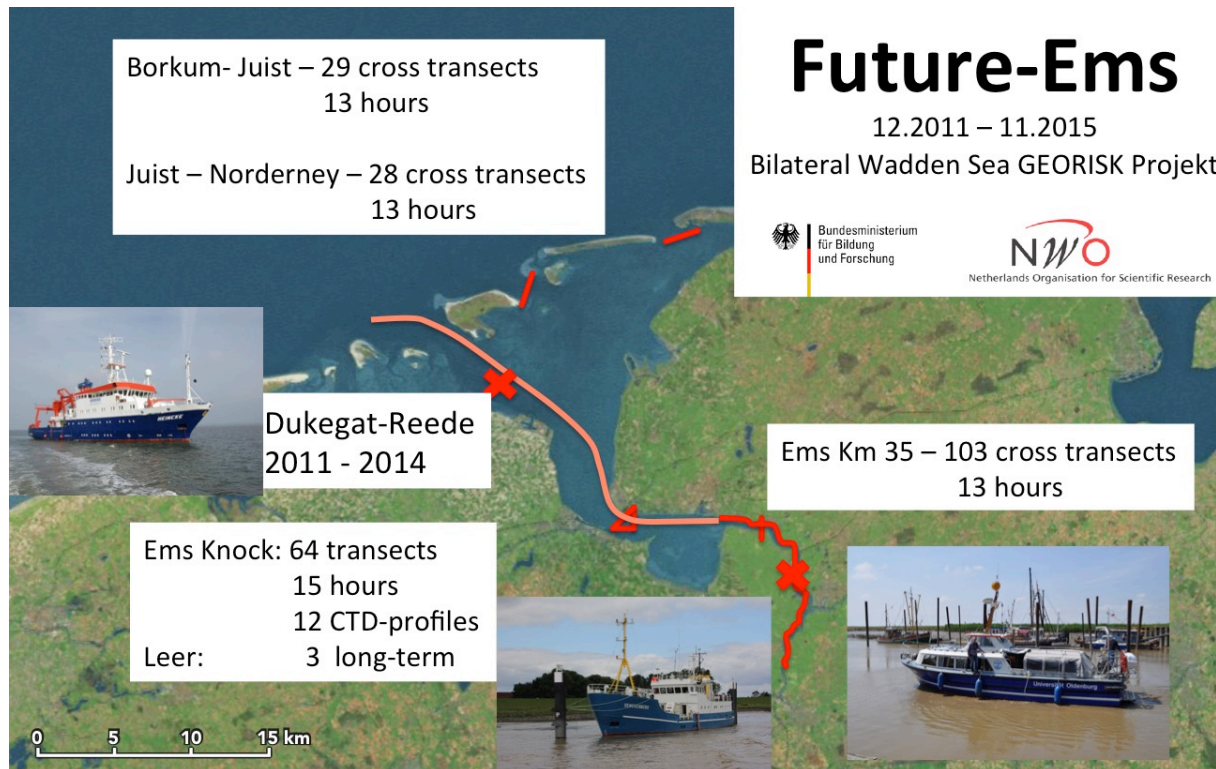


Abbildung 1: Übersicht der hydrographischen Messkampagnen 2011 - 2015

## Ergebnisse

Die auf allen Messkampagnen gewonnenen Daten dokumentieren in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung den Ist-Zustand des Systems Ems zur Zeit des Projekts. Sie dürften auch in Zukunft von Nutzen sein. Die Daten wurden zeitnah über die Webseite allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die Messungen erwiesen sich als sehr wertvoll für die Validierung des komplexen numerischen Modells.

Die während der vier Messperioden von Bord des FS Heincke aus gesammelten Daten geben einen sehr guten Einblick in die hydrographischen Prozesse im Emsästuar und lassen Vergleiche zwischen den Jahren 2011-2014 zu.

Anhand der Parameter Strömungsgeschwindigkeit, –richtung und anhand der Verteilung des Salzgehaltes und der Dichte lässt sich die Einwirkung der Tide gut erkennen: Bei Flut gelangt salzreiches Wasser in die Flussmündung, bei Ebbe strömt dieses mit dem Flusswasser wieder ab.

Strömungsgeschwindigkeit und deren Richtung veränderte sich über die Jahre kaum. Deutliche Unterschiede traten jedoch in der Dichteverteilung auf. Diese Unterschiede beruhen auf Unterschieden des Salzgehaltes und der Temperatur, welche durch äußere Einflüsse, wie die Tide und das Wetter sowie Wellen und Wind, mitbestimmt werden. Die periodische Schwankung der Dichteverteilung innerhalb der einzelnen Messperioden ist auf den Einfluss der Tide zurück zu führen.

Die Daten zeigen, dass in der gesamten Wassersäule der äußeren Ems (Dukegat Reede) die Strömungsgeschwindigkeit gleichgerichtet ist und der Salzgehalt sich zwischen Oberfläche und dem Boden um weniger als 10 % unterscheidet. Dies deutet darauf hin, dass es sich beim Emsästuar um ein gut durchmischtes Ästuar handelt. Durch die Berechnung der Brunt-Väisälä-Frequenz konnte gezeigt werden, dass es sich um stabile Dichteprofile handelt (siehe Abb 2).

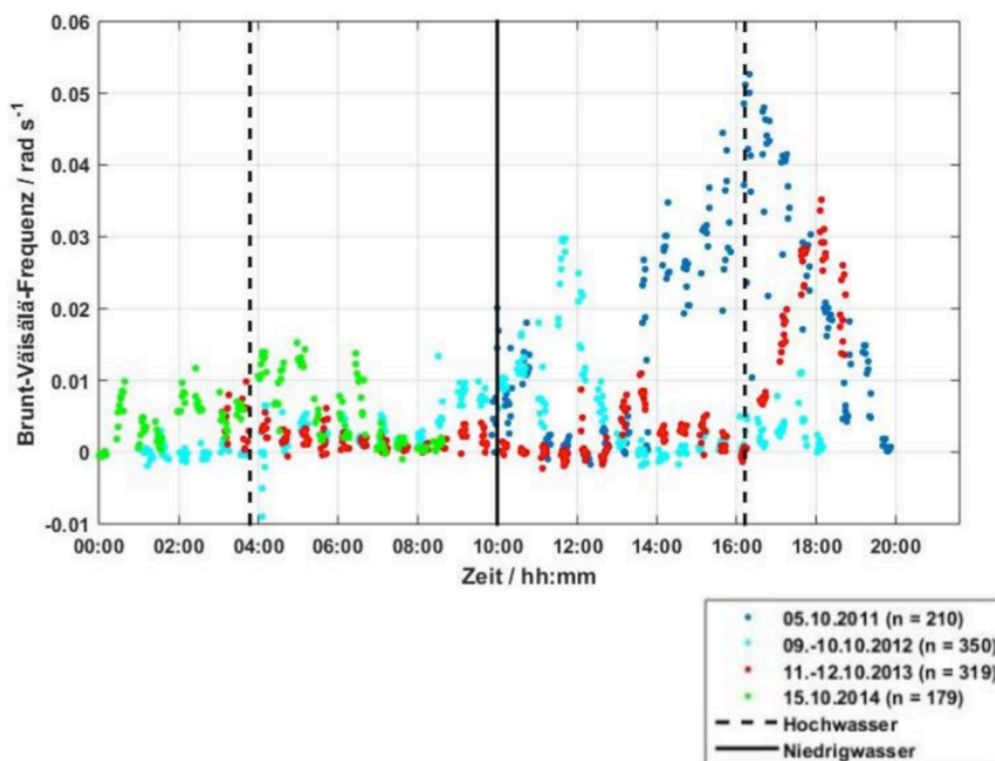


Abbildung 2: Brunt-Väisälä-Frequenz  $N^2$  in  $\text{rad s}^{-1}$  für alle erstellten Profile am 05.10.2011, 09.-10.10.2012, 11.-12.10.2013 und 15.10.2014. Die Daten stammen von Messfahrten an Bord der FS Heincke.

Außerdem konnte ermittelt werden, dass es in drei von den vier Jahren eine Ebbdominanz gab. Dies hat vermutlich positive Auswirkungen auf den Ästuar, da Sedimente so auf natürliche Weise ausgespült werden und dem Versanden der Flussmündung entgegenwirken. 2013 konnte diese Dominanz nicht beobachtet werden, setzte aber 2014 wieder ein. Die geringen Unterschiede zwischen den Jahren deuten darauf hin, dass das Ästuar sich während des Untersuchungszeitraums nicht veränderte. Die Unterschiede, die zu erkennen waren, deuten lediglich auf schwankende Umweltbedingungen hin, die sich jedoch nicht auf die Prozesse im Ästuar auswirken.

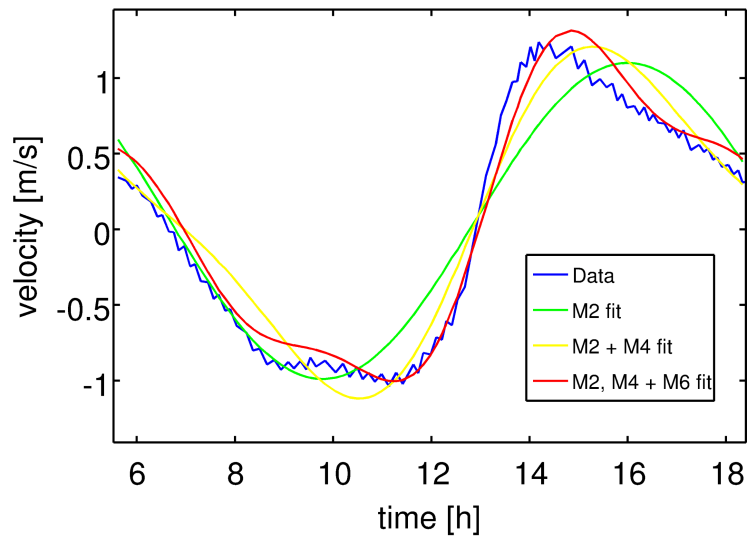


Abbildung 3: Messung (blaue Linie, Juni 2012) und vereinfachte Rekonstruktionen der Gezeiten-Asymmetrie in der Ems bei km 35.

Um die Strömungsstrukturen in der Ems hochaufgelöst zu erfassen, wurde im Juni 2012 bei Ditzum (km 35 der Ems) die Strömungsgeschwindigkeit auf 103 Quertransekten mittels ADCP von Bord der Otzum aus erfasst. Die Messungen fanden über einen vollständigen Gezeitenzyklus statt. Solche hochaufgelösten Messungen quer zum Flussverlauf waren bis dahin noch nie durchgeführt worden.

Die bis dahin zwar bekannte, aber im Detail nicht gemessene Asymmetrie in der Gezeitenströmung (beschleunigter Einstrom bei Flut, verlangsamter Ausstrom bei Ebbe), konnte anhand der Messungen klar nachgewiesen werden. Die hochaufgelösten Daten bildeten die wesentliche Grundlage, um die Simulation der Struktur der Gezeitenströmung der Ems in den theoretischen und realistischen Modellen zu validieren und zu optimieren. Eine vereinfachte Rekonstruktion der Gezeiten-Asymmetrie ist in Abbildung 3 zu sehen.

Nach dem Vorbild dieser Messstrategie, führen inzwischen auch andere Forschungsinstitute und Behörden Messungen in Ästuaren quer zur Strömungsrichtung durch (Ems-Schelde-Workshop 2016).

## 2. Sauerstoffverhältnisse im Ems-Ästuar (Andreas Schöl, BFG)

### Einleitung

Der Sauerstoffhaushalt im Ems-Ästuar ist stark durch die extrem hohen (1 -100 g TRG/l) Schwebstoffgehalte beeinflusst. Der organische Kohlenstoffanteil der Schwebstoffe (ca. 4% TOC am TRG) dient als Substrat für heterotrophe Bakterien und führt zu sehr hohen Sauerstoffzehrungsraten (20-25 mg O<sub>2</sub>/l\*d). Als Folge sind im Sommer regelmäßig Sauerstoffgehalte unter 2 mg/l in der oberen Wassersäule und anoxische Verhältnisse an der Gewässersohle zu messen. Im Vergleich zu weitgehend volldurchmischten Ästuaren wie Elbe und Weser weist das Ems-Ästuar insbesondere in seinem inneren Abschnitt zwischen km 0 (Papenburg) und km 40 (Emden) auf Grund der hohen Schwebstoffgehalte vertikale Dichteunterschiede auf, die auch die Ausbildung von fluid mud Schichten hervorruft. Die damit bewirkte unvollständige vertikale Durchmischung der Wassersäule führt zu zeitlich variablen und räumlich ausgedehnten Schichtungsereignissen. Diese treten meist während geringer Oberwasserabflüsse im Sommerhalbjahr auf. Solche vertikalen Schichtungen sind sehr bedeutsam für die Sauerstoffverhältnisse im Ems-Ästuar, weil durch den verminderten vertikalen Austausch starke Sauerstoffgradienten hervorgerufen werden. Insbesondere die hohen Zehrungsraten in den sohnahen Wasserschichten können nicht durch die atmosphärische Wiederbelüftung ausgeglichen werden und es entstehen anoxische Bedingungen. Ziel der Untersuchungen ist das Auftreten vertikaler Sauerstoffgradienten und das Ausmaß der anoxischen Zonen mit neuen Messstrategien zu erfassen. Dafür wurde ein Längsprofil mit vertikaler Auflösung der Sauerstoffgehalte durchgeführt sowie eine Dauermessstation mit vertikaler Auflösung des Sauerstoffs eingesetzt. Die Untersuchungen fanden mit Unterstützung des WSA (Wasser- und Schifffahrtsamtes) Emden statt.

### Sauerstofflängsprofile mit vertikaler Auflösung

Im Juni 2013 erfolgte auf einer Längsprofilmessfahrt während der Flutphase eine synoptische Erfassung der Sauerstoffverhältnisse im Abschnitt von km 50 bis km 0. Dazu wurden an 6 Stationen vertikale Profile für den Sauerstoff, die Wassertemperatur und die Salinität mittels einer YSI-Multiparametersonde (YSI 6990) gemessen. Die Messstationen wurden zur gleichen Tidephase bei auflaufender Flut angefahren (Tab. 1).

**Tab. 1: Probenahmeschema während der Flutphase am 25.06.2013**

Profil	Km	Zeit
VP 1	km 50	9:05 – 9:35
VP 2	Km 40	10:19 – 10:49
VP 3	Km 30	11:22 – 11:43
VP 4	Km 20	12:17 – 12:52
VP 5	Km 10	13:29 – 13:50
VP 6	Km 0	14:30 – 14:45

Die Ergebnisse für die Messfahrt am 25.06.2013 zeigen eine Abnahme der oberflächennahen Sauerstoffgehalte von 6,5 mg O<sub>2</sub>/l auf 2,2 mg O<sub>2</sub>/l im Abschnitt von km 50 bis km 0 (Abb. 1). Zudem

weisen die vertikalen Profilmessungen an den Stationen von km 20 bis 0 deutliche Rückgänge des Sauerstoffs bis auf 0,2 bis 1,5 mg O<sub>2</sub>/l in den sohlennahen Wasserschichten auf. An diesen Stationen lagen der PSU unter 3 und zeigte keine vertikalen Unterschiede.

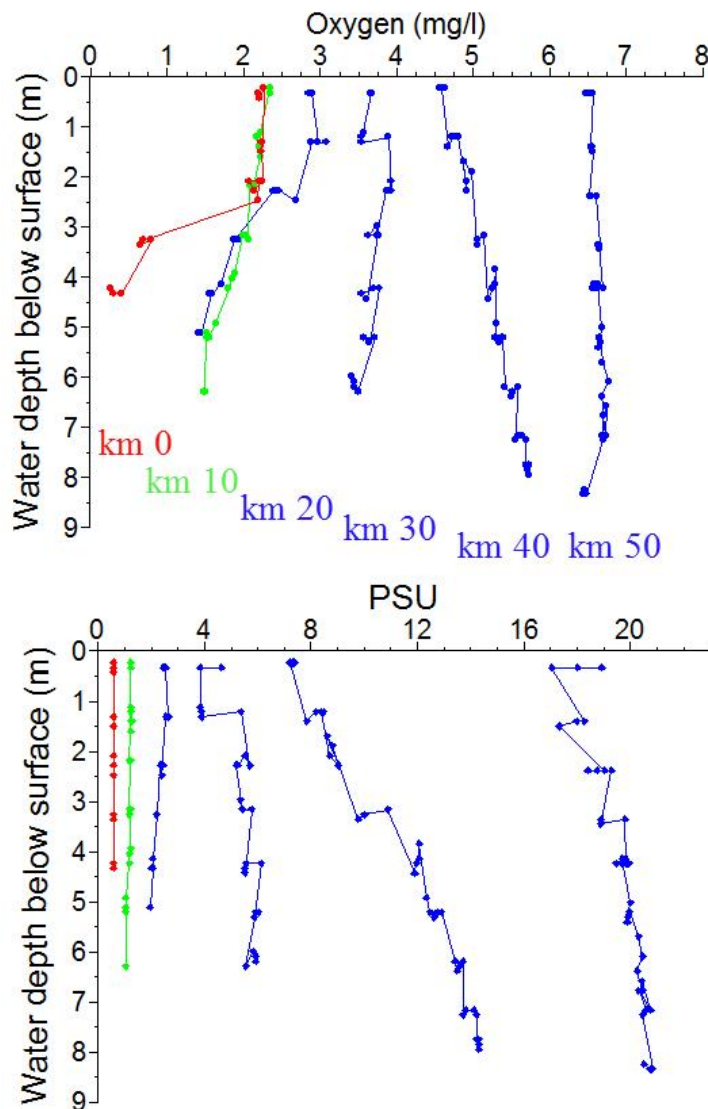


Abb. 1: Längsprofilmessungen mit vertikaler Auflösung des Sauerstoffs und der Salinität während der nachmittäglichen Flutphase am 25.6.2013 im Ems-Ästuar von km 50 (Emden) bis km 0 (Papenburg).

### Kontinuierliche Sauerstoffmessungen mit vertikaler Auflösung an Km 18,3 im Jahr 2013

Am km 18,3 wurde im Jahr 2013 von April bis Oktober eine Bojenmessstation ausgebracht, die mit einer Messkette mit 6 Sauerstoffsensoren (Fa. OXI) in einem Abstand zur Sohle von 0,5m; 1,3m; 1,6 m; 2,3m und 2,6m sowie 0,9m unter der Wasseroberfläche bestückt war (Abb.2).

Eine überblickshafte Betrachtung der Sauerstoffgehalte mit vertikaler Auflösung ergab, dass im Sommer 2013 über längere Zeiträume (Wochen) an km 18,3 sohlennah anoxische Bedingungen vorlagen. Genauere Analysen zeigten, dass die sehr sauerstoffarmen Zeiten nicht durchgehend über eine Tidephase bestanden, sondern in Abhängigkeit der Wassertiefe bzw. Nähe zur Gewässersohle

von kurzen Phasen mit besseren Sauerstoffbedingungen (> 5 % -O<sub>2</sub>-Sättigung) unterbrochen wurden (Tab. 2). Diese höheren Sauerstoffgehalte traten mit den hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei einsetzendem Flutstrom auf.

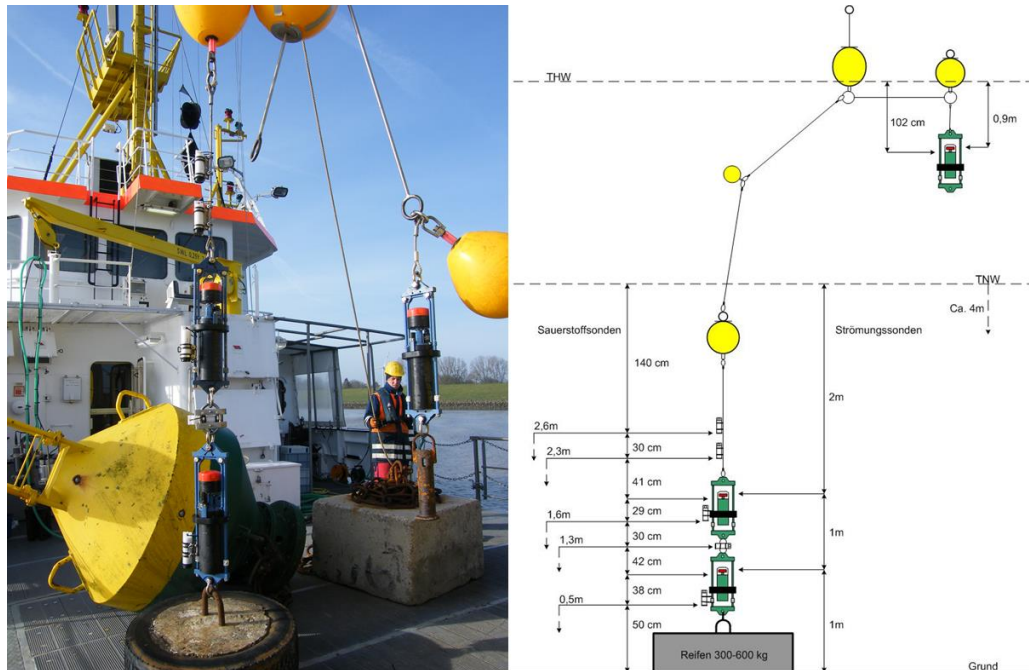


Abb. 2: Design der Bojenmessstation an km 18,3 im Ems-Ästuar mit Messkette für Sauerstoffsensoren in 6 Wassertiefen sowie Multiparametersonden (Fa. ANDERAA) in 3 Wassertiefen.

Tab. 2: Mittlere Dauer (s) pro Tidephase der Überschreitung einer Sauerstoffsättigung von 5 %.

über Sohle / pro Tidephase	0,5 m	1,3 m	1,6 m	2,3 m	2,6 m
Dauer (s) > 5% O <sub>2</sub> -Sättigung	311	3467	5542	5429	5469

### Fazit und Ausblick

Die gewonnenen Ergebnisse belegen die hohe Variabilität der vertikalen Verteilung der Sauerstoffgehalte im Ems-Ästuar und das Auftreten von anoxischen Bedingungen in sohnahen Wasserschichten. Daraus sind Hinweise für ein den heutigen physikalischen Bedingungen des Ems-Ästuars angepasstes Monitoring abzuleiten. Die auch in den Jahren 2014 und 2015 durchgeführten kontinuierlichen Messungen haben einen umfangreichen Datensatz erbracht, der noch weiter ausgewertet werden sollte.

### Dokumentation

Vorträge bei “Future Ems Workshop” 2014 (Antwerp) and 2016 (Amersfoort).

### **3. Schwebstofftransport und Feinsedimente** (Kerstin Schrottke, Universität Kiel und Alexander Bartholomä, Senckenberg am Meer Wilhelmshaven)

#### **Einleitung**

Im Rahmen des Vorhabens wurden von beiden oben aufgeführten Projektpartnern gemeinsam Feldmessungen mit dem Ziel durchgeführt, für Modellierungsansätze relevante, zeitlich hochaufgelöste Datensätze über Tideströmung und Schwebstofftransport zu generieren, gleichzeitig aber auch den Kenntnisstand zur gezeitenbedingten Mobilität kohäsiver Feinsedimente zu erweitern. Besonderes Augenmerk entfiel dabei auf die Erfassung der Dynamik interner Wellen, die wiederkehrend vor allem in den Bereichen des Ems-Ästuars beobachtet werden, die sich durch hohe Schwebstoffkonzentrationen auszeichnen. Es ist bekannt, dass eine ausgeprägte vertikale Dichteschichtung des Fluidkörpers, wie sie in vielen Bereichen des Ems-Ästuars zu beobachten ist, zu einer Reduzierung vertikaler Austauschprozesse führen kann. Somit kommt den internen Wellen, die sich auf eben solchen Grenzflächen ausbreiten, jene aktivieren und sogar bis zur vollständigen Auflösung bringen können, eine besondere Bedeutung hinsichtlich des Sedimenttransportes zu.

Die Datenerhebung erfolgte, neben profilierenden, schiffsgestützten Feldmessungen, auch im Verbund mit den Projektpartnern der anderen Einrichtungen, stationär an einer Messposition im Bereich der maximalen Trübungszone (53°14'10.0N; 007°23'50.6E). An dieser Lokalität wurden bereits mehrfach Zeitreihenmessungen durchgeführt, so dass sich die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Daten, vor allem aus den Kampagnen 06/2012 und 01/2013 mit anderen Aufzeichnungen (hier u.a. 3.-5.09.08) koppeln lassen. Die im folgenden präsentierten Daten basieren auf den stationären Messungen, die von Bord des Forschungsschiffes „Senckenberg“ gemeinsam von den Projektpartnern stationär erhoben und im Labor der Kieler Universität analysiert wurden. Sie stellen einen zusammenfassenden Einblick in den im Vorhaben erarbeiteten Erkenntnisgewinn dar.

#### **Methodik:**

Die Zeitserienmessungen im Gelände erfolgten schiffsgestützt, hauptsächlich mit fest installierten, hydroakustischen Messsystemen (Fächerecholot, parametrisches Sedimentecholot, ADCPs). Flankierend wurden Wasser- und Sedimentproben entnommen. In regelmäßigen Zeitabständen wurden zusätzlich diverse Sonden (CTD, OBS, SVP) zur Messung der Schallgeschwindigkeit, Temperatur, Leitfähigkeit und Trübstoffdichte eingesetzt. Die ADCPs (1200kHz bzw. 600 kHz, Workhorse von RDI-Teledyne) dienten profilierenden Strömungsmessungen (Messzellengröße 25 cm) über mehrere Tidenzyklen und wurden zudem auch zur Abschätzung des Schwebstoffanteils über die Auswertung des akustischen Rückstreusignals herangezogen. Die Einsatztiefe betrug 181 cm (erste Messung ab 231 cm). Die Standardabweichung der Strömungsmessungen beträgt 0,129 m s<sup>-1</sup>. Über Änderungen der akustischen Impedanzen des parametrischen Sedimentecholotes (SES 2000®) der Firma Innomar Technology GmbH) lassen sich vor allem Schichtungsphänomene im Wasser- und Sedimentkörper bei einer vertikalen Auflösung von 6 cm unter Nutzung der Primär- und einer Sekundärfrequenz (100 kHz, hier 12 kHz) erfassen. Die Genauigkeit ist dabei frequenz- und wassertiefenabhängig (z.B. 100/10 kHz: 2/4 cm + 0,02% WT). Zeitweilig kamen 2 Geräte zeitgleich an zwei räumlich unterschiedlichen Positionen am Schiff in 1,5m Wassertiefe zum Einsatz. Dies diente



der Überprüfung von Änderungen in der Ausprägung und Ausbreitungsgeschwindigkeit interner Wellen. Schiffbewegungen wurden mittels eines Bewegungssensors vom Typ (Seatex® MRU-6) kompensiert.

### Ergebnisse:

Der Einsatz ozeanographischer Messsysteme in Einsatzbereichen wie dem des Ems-Ästuars mit komplexen und sich ständig ändernden Zustandsgrößen, insbesondere aber mit hohen Schwebstoffkonzentrationen ist nicht ohne Limitierungen bzw. nur mit Kenntnis der aufeinander wirkenden Einflussgrößen möglich. So zeigen parallel zu den Feldmessungen durchgeführte Laborstudien, dass beispielsweise die Bestimmung der Salinität direkt über die elektrische Leitfähigkeit in hoch konzentrierten Suspensionen zu teils erheblichen Abweichungen führt (Abb. 1), die somit bei Nutzung eben solcher Berücksichtigung finden müssen. Ähnlich verhält es sich mit Messwertabweichungen der Schallgeschwindigkeit in hochkonzentrierten Suspensionen (siehe Held 2013).

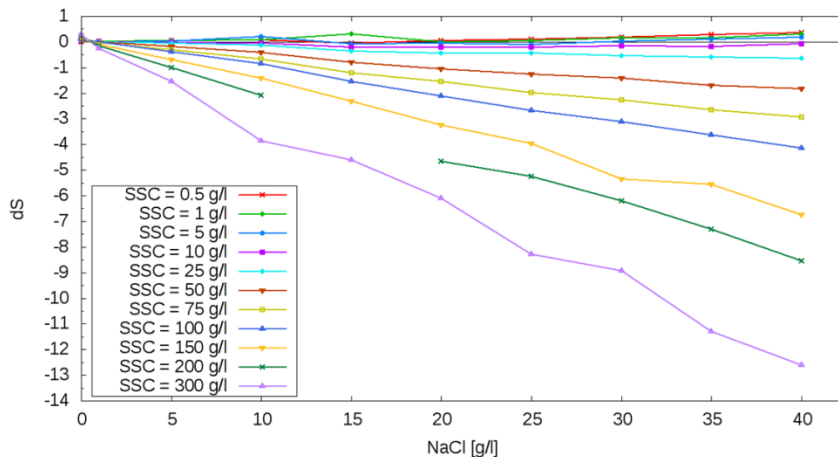


Abb. 1: Abweichung der über die elektrische Leitfähigkeit ermittelten Salinität in Abhängigkeit der Schwebstoffkonzentration (näheres siehe Held 2013, bzw. Held et al. 2014).

Der Wasserkörper im Bereich der mittlerweile weitreichenden Trübungszone im Ems-Ästuar zeigt temporär eine deutliche Schichtung, hervorgerufen durch unterschiedlich hoch konzentrierte Sedimentsuspensionen. So lässt sich der obere Wasserkörper bei mittleren Konzentrationswerten von 1,6 g/l deutlich vom darunter befindlichen, sogenannten „Fluid Mud“ mit Schwebstoffkonzentrationen im Mittel von 38 g/l abgrenzen. Abbildung 2 repräsentiert hier eine ADCP-Zeitreihenmessung an der stationären Lokation zur detaillierten Darstellung insbesondere der Strömungsverhältnisse des oberen Fluidkörpers, hier über eine komplette Ebb-phase.

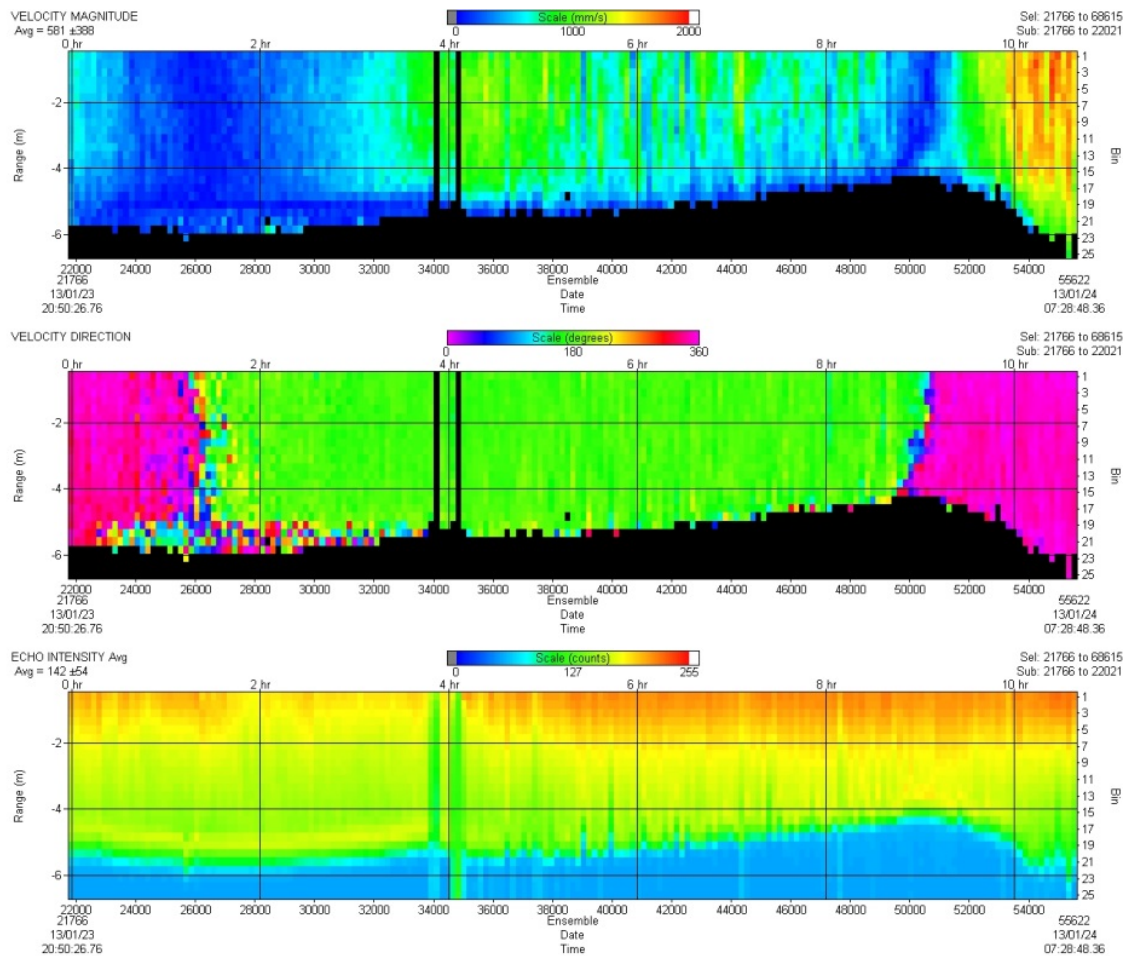


Abb. 2: Stationäre ADCP-Zeitreihe vom 23.01.-24.01.2013 (20h50 bis 07h29) über eine Dauer von 10 Stunden und 40 Minuten mit der vektorgemittelten Fließgeschwindigkeit (Magnitude – oberes Bild), der Fließrichtung (Velocity direction – mittleres Bild) und der Signal-Intensität (unteres Bild) über die Zeit (x-Achse) und die Wassertiefe (y-Achse). Die Aufnahme repräsentiert eine komplette Ebb-Phase von Stauhochwasser (linker Bildrand) bis Stauniedrigwasser (rechter Bildrand). Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung zeigen recht scharfe Wechsel des Flut- und Ebbstromes an, wobei bei der Fließgeschwindigkeit eine deutlich vertikale Zonierung zu sehen ist. Auch die Signalintensität weist eine vertikale Zonierung auf. In diesem Fall war es vor allem der starke Eisgang während der Ebb-Phase für die höheren oberflächennahen Rückstreuungen im Signal verantwortlich.

ADCP und SES Daten spiegeln detailliert wider, dass die beiden Fluidkörper gezeitenbedingt unterschiedlich stark beschleunigt werden, wobei der obere Wasserkörper schneller bewegt wird als jener darunter (Abb. 3). Unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten erzeugen Reibung an der Grenzfläche, d.h. Scherstress, was mit einer Herabsetzung der Richardson Zahl, zur Entstehung von Kelvin-Helmholtz Instabilitäten und schließlich zur Entstehung, bis zu 2 m hoher interner Wellen führt (Abb. 4). Das Brechen der Wellen erfolgt nicht zuletzt durch die Abnahme der vertikalen Schichtungsstabilität, was durch ein Minimum der Brunt-Väisälä Frequenz angezeigt wird. Damit wird eine Durchmischung der beiden Fluidkörper initiiert. Mit diesen aktuellen Untersuchungsergebnissen lässt sich nun nicht nur die der gesamte Lebenszyklus interner Wellen genau dokumentieren, sondern auch untermauern, dass der Mechanismus der Entstehung interner Wellen in der Ems nicht dem entspricht, der oft in der Literatur angegeben wird.

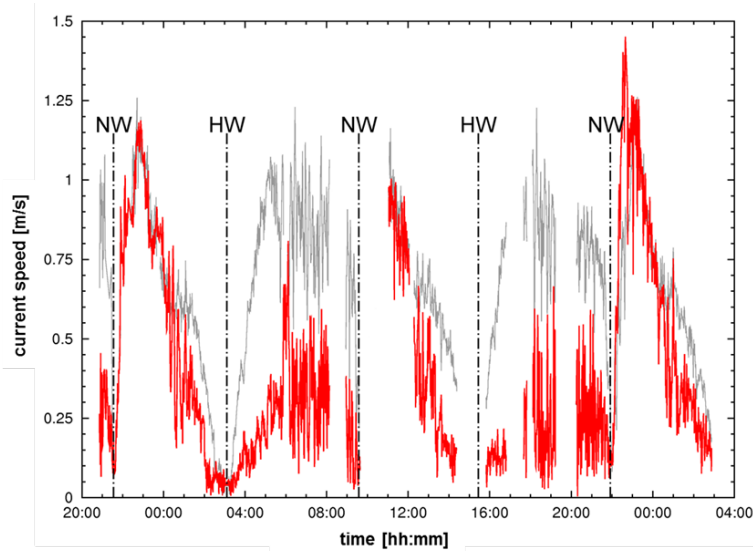


Abb. 3: Zeitreihe der Bewegungsgeschwindigkeiten der zwei Wasserkörper (grau = oberer Wasserkörper, rot = Fluid Mud) im Zeitraum 3.-5.09.08; NW = Niedrigwasser, HW = Hochwasser. (Näheres siehe Held 2013 bzw. Held et. al 2013).

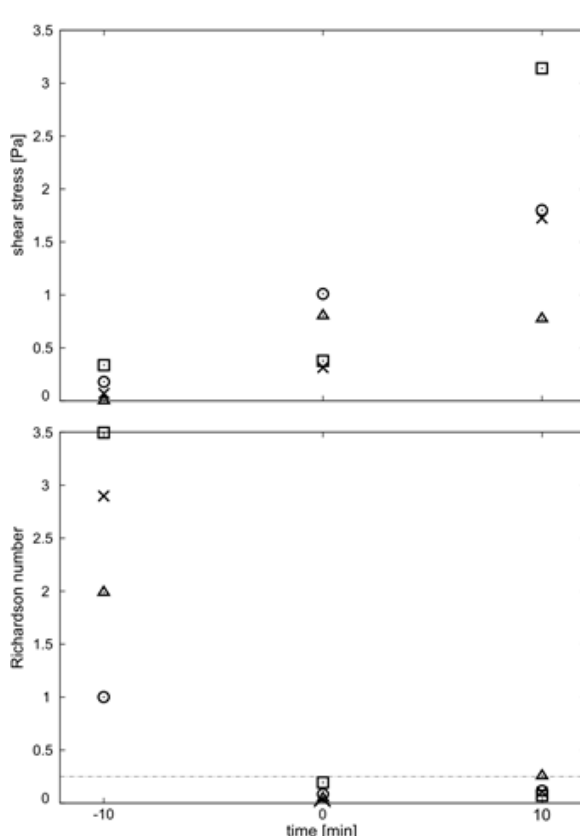


Abb. 4: Scherstress an der Grenzfläche (oberes Bild) und Richardson Zahl (unteres Bild) zu Beginn der Wellenentstehung ( $t=0$ ), hier für Ebbphasen um: 0645 UTC 12.06.12 (Kreuz), 1910 UTC 12.06.12 (Quadrat), 0744 UTC 13.06.12 (Kreis) und 1953 UTC 13.06.12 (Dreieck). Gestrichelte Linie markiert den Grenzwert für die Richardson Zahl, unterhalb derer Kelvin-Helmholtz Instabilitäten auftreten. (Held et. al 2013, leicht modifiziert für Held et. al in Vorbereitung).

**Publikationen:**

Held, P. (2013): The generation and breaking of internal waves on a lutocline in the Ems estuary (Germany), their hydro-acoustic detectability and their contribution to sediment transport dynamics, - Diss. Math.-Nat., Univ. Kiel, 137. S.

Held, P., Schrottke, K., Bartholomä, A. (2013): Generation and Evolution of high frequency Internal Waves in the Ems Estuary. – Journal of Sea Research, 78, 25-35.

Held, P., Kogler, P., Schrottke, K. (2014) Influence of suspended particulate matter on salinity measurements. – Continental Shelf Research, 85, 1-8.

Held, P., Schrottke, K., Bartholomä, A. (in prep): Generation and break down of Internal Waves on a Lutocline in the Ems Estuary (Germany) and their contribution to vertical mixing.

## Work Package 3 Data-model integration (leader: E. Stanev, P4) Other partners involved: P1, P3

Johannes Pein, Emil Stanev (ICBM, HZG)

### Einleitung

Die besondere Motivation des Future-Ems Projektes bestand in sich weitgehend deckenden gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Interessen: Die extrem hohen Sedimentkonzentrationen von der Tideems bis in die Außenems sind einerseits eine ökologische Katastrophe mit hohen wirtschaftlichen Kosten; andererseits sind sie eine wissenschaftliche und möglicherweise ingenieurtechnische Herausforderung. Der wissenschaftliche Ansatz wiederum erlaubt keine großen Sprünge, sondern ausgehend von der vorhandenen Literatur werden neue Hypothesen erstellt und mittels wissenschaftlich anerkannten Methoden und anerkannter Technik hinreichend belegt. Die Grundlage aller Prozesse in der Emsmündung ist die Hydrodynamik. Auch die extrem hohen Sedimentkonzentrationen mit einer gewissen Eigendynamik werden maßgeblich vom Wasser, d.h. den Gezeiten, oberflächennahem Abfluss, windinduzierten Strömungen, bewegt.

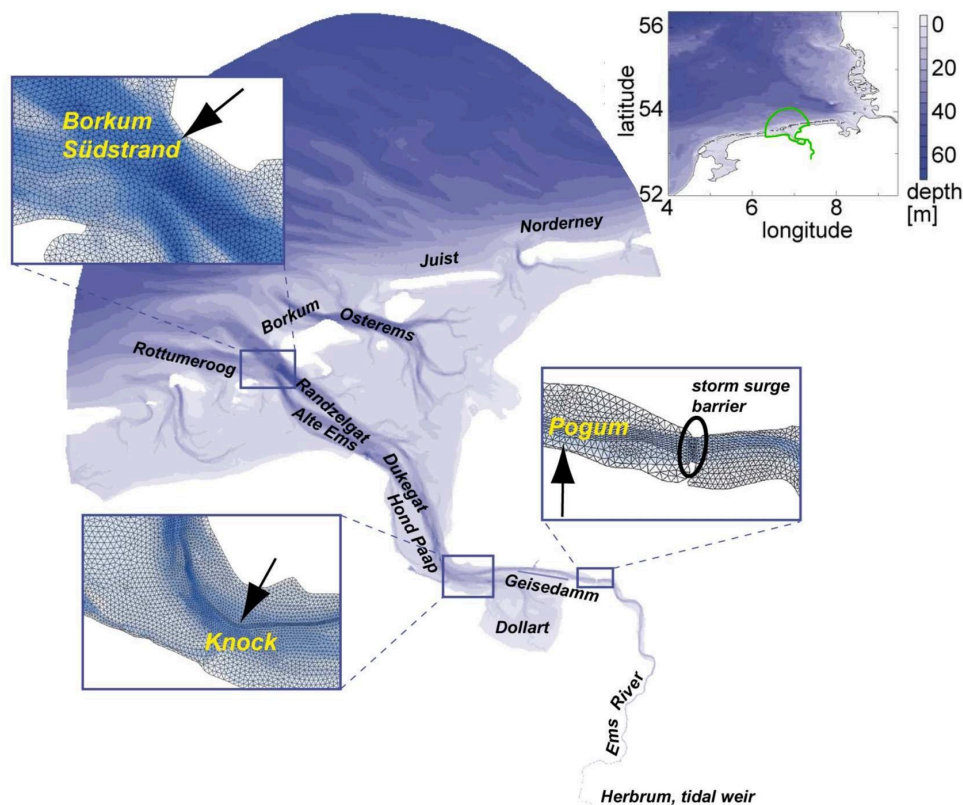


Abb.1: Bathymetrie des Modellgebietes mit geographischen Bezeichnungen. Die Fenster zeigen vergrößerte Ausschnitte des Modellgitters sowie die Positionen der Pegel mittels welcher das Modell validiert wurde.

Zu Beginn des Projektes war die 2D oder tiefengemittelte Hydrodynamik in der Ems aktueller Wissensstand. Diese war mittels punktueller Messungen und mit tiefengemittelten strukturierten Modellen erforscht worden. Um die Hydrodynamik in einem Ansatz in der gesamten Region in allen

Tiefen und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen physikalischen Skalen zwischen offener See und Tideems zu simulieren, bot sich die Anpassung eines unstrukturierten Modellsystems für die Emsmündung an. Die mit diesem neuen Emsmodell erzielten Forschungsergebnisse werden im Folgenden detailliert beschrieben.

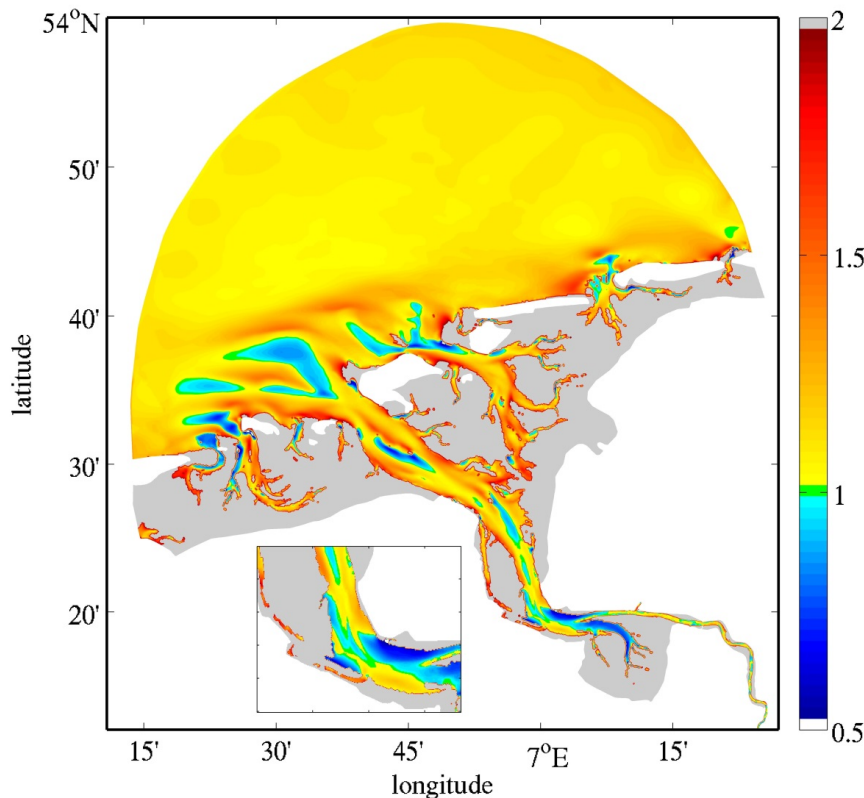


Abb. 2: Karte der Flut- und Ebbedominanz. Gezeigt wird das Verhältnis zwischen stärkster Flut- und Ebbeströmung in permanent von Wasser bedeckten Gebieten. Auffällig ist dass die antreibenden Gezeiten auf dem offenen Meer leicht flut-dominiert sind (warme Farben), und erst im Bereich der Emsmündung und insbesondere im Bereich des Ems-Dollart eine starke Ebbe erzeugt wird.

## Ergebnisse

Die realistische Modellierung ermöglicht die vollständige räumliche Integration der in den Modellgleichungen formulierten Prozesse. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt gegenüber der konzeptionellen Modellierung von den einzelnen Prozessen zu den räumlichen Interaktionen dieser Prozesse. Im Rahmen des Projektes kam der realistischen Modellierung die Aufgabe zu, das System Emsmündung möglichst getreu nachzubilden, d.h. möglichst viele der wichtigsten hydrodynamischen Prozesse zu integrieren. Daher wurden im Projektantrag folgende Ziele formuliert:

- 1) Aufsetzen eines 3D numerischen Modellsystems bestehend aus drei genesteten Modellen mit grober, mittlerer und feinerer Auflösung
- 2) Erweiterung des hydrodynamischen Modells um Wellen- und Sedimentmodule

- 3) Datenassimilation zwecks Durchführung von Zwillingsexperimenten
- 4) Verwendung des Modellsystems für Szenarienläufe

Diese Punkte wurden konkretisiert und unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Fragestellungen umgesetzt.

zu 1) Es ist gelungen ein 3D hydrodynamisches Modell unter Einbeziehung des Skalenüberganges vom offenen Meer bis in die Tideeems aufzusetzen. Hierzu wurde das Modellsystem SELFE (Zhang und Baptista, 2008) an die Emsmündung angepasst. Da dieses Modellsystem unstrukturierte Gitternetze verwendet, ist kein Nesting mehr erforderlich. Das Modell wurde validiert und für die erstmalige Beschreibung und Analyse der 3D Hydrodynamik in der Emsmündung verwendet, und veröffentlicht (Pein et al. 2014).

zu 2) Mit dem Sedimentmodul von SELFE wurden erste Erfahrungen gesammelt. Es ließen sich mit dem rein hydrodynamischen Modell wesentliche Aussagen zur Sedimentproblematik treffen, wie bspw. die Definition der flut- und ebbe-dominierten Gebiete.

zu 3) Die Zielsetzung der Zwillingsexperimente, nämlich Bewertung und Vergleich verschiedener Beobachtungsnetzwerke wurde mittels eines statistischen Verfahrens (Schulz-Stellenfleth und Stanev, 2010; Grayek et al. 2016) verwirklicht. Die statistischen Auswertungen haben für den Ästuarbereich völlig neuartige Ergebnisse über die Effektivität von Messungen und ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung erbracht (veröffentlicht in Pein et al. 2016). Insbesondere hat die Analyse von Salzgehaltswerten aus dem Modell gezeigt, dass es für die Repräsentativität von Messungen entscheidend ist, dass die Messkampagne die spezifischen dynamischen Regime einer Region berücksichtigt.

zu 4) das Modell wurde für mehrere Zeitintervalle initialisiert. Alle Modellläufe basieren auf der aktuellen Bathymetrie und berücksichtigen damit die Vertiefung der Fahrrinne und bauliche Veränderungen wie das Ems-Sperrwerk. Die daraus resultierenden physikalischen Effekte, wie die Dämpfung der Tide durch das Sperrwerk und die Flutdominanz im Bereich der Tideeems, wurden beschrieben und veröffentlicht (Pein et al. 2014). Die in dieser Publikation gezeigte Kartierung der Flut- bzw. Ebbdominanz und die ausführliche Beschreibung der barotropen und baroklinen Prozesse sind für die Ems völlig neu, und haben aus der Ems eines der im Detail erforschten Ästuar gemacht. Die verschiedenen Modellläufe zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Position der Salzgehaltsfront (engl. *salinity front*) in Abhängigkeit vom Abfluss der Ems. Die realistische Modellierung wurde im Rahmen des Projektes auf einen Stand gebracht der international dem *state-of-the-art* entspricht und eine umfassende Beschreibung der wesentlichen Prozesse in der Emsmündung ermöglicht hat. Im letzten Projektjahr wurde ein Aspekt der baroklinen Dynamik bzw. der Wechselwirkungen zwischen barokliner Strömung und der Bathymetrie vertieft, *die secondary circulation*. Diese Strömungen treten senkrecht zur Hauptströmungsrichtung auf und haben einen großen Einfluss auf den Transport und die Verteilung von gelösten oder suspendierten Stoffen im Ästuar. Die Erforschung der *secondary circulation* erfolgte mittels Anwendung von SELFE für verschiedene idealisierte Bathymetrien, und zwar einen gerade Kanal und einen Kanal mit sinusförmigen Mäandern. Die Vergleiche und eine statistische Auswertung der unterschiedlichen Modellläufe resultierten in einer Zerlegung der die *secondary circulation* antreibenden Mechanismen, welche die Genese dieser Strömungen beschreibt. Die Forschungsergebnisse wurden dokumentiert

und für die Veröffentlichung vorbereitet (siehe Anhang). Methodisch wurde mit den idealisierten realistischen Modellläufen die Vergleichbarkeit von konzeptionellen Modellen und realistischen Modellen wesentlich verbessert. Die Arbeiten und wissenschaftlichen Ergebnisse des komplexen Modells wurden in drei zu veröffentlichenden Manuskripten dokumentiert.

## Publikationen

1) The tidal asymmetries and residual flows in Ems Estuary (2014). Pein, JU; Stanev, EV; Zhang, YJ. *Ocean Dynamics*: 1719-1741.

A 3D unstructured-grid numerical model of the Ems Estuary is presented. The simulated hydrodynamics are compared against tidal gauge data and observations from research cruises. A comparison with an idealized test reveals the capability of the model to reproduce the secondary circulation patterns known from theoretical results. The simulations prove to be accurate and realistic, confirming and extending findings from earlier observations and modeling studies. The basic characteristics of dominant physical processes in the estuary such as tidal amplification, tidal damping, overtide generation, baroclinicity and internal mixing asymmetry are quantified. The model demonstrates an overall dominance of the flood currents in most of the studied area. However, the hypsometric control in the vicinity of Dollart Bay reverses this asymmetry, with the ebb currents stronger than the flood ones. Small-scale bathymetric characteristics and baroclinicity result in a very complex interplay between dominant physical mechanisms in different parts of the tidal channels and over the tidal flats. Residual flow reveals a clear overturning circulation in some parts of the estuary which is related to a mixing asymmetry between flood and ebb currents. We demonstrate that while areas close to the tidal river exhibit overall similarity with density controlled estuarine conditions, in large areas of the outer estuary barotropic forcing and complex bathymetry together with the density distribution affect substantially the horizontal circulation.

2) On the impact of salinity observations on state estimates in Ems Estuary (2016). Pein, JU; Grayek, S; Schulz-Stellenfleth, J; Stanev, EV. *Ocean Dynamics* 66.2: 243-262.

The hydrodynamics of Ems Estuary are dominated by tides and their interaction with buoyancy forcing. Such an environment is challenging for any effort to bring together observations and model results. In this study, we investigate how salinity measurements in the Ems Estuary affect the reconstruction of the salinity field. Similar to the traditional observing system experiments, the impact of specific observational arrays is simulated in the framework of statistical experiments. The experimental algorithm mainly relies on the model covariance matrix. Each experiment results in an estimate of the reconstruction error. The analysed observation configurations involve single and multiple, as well as stationary and non-stationary observing arrays. Generally, the reconstruction of the ocean state improves with increasing the density of observations. It appears that certain locations are more favourable for reconstruction than others. In fact, the regions separating the main dynamical realms resist strongest to the reconstruction effort. Extending the covariance matrix by the temporal cross-covariances between the model grid points enables to evaluate the impact of observations taken from a moving platform. This approach further improves the outcome of the experiments, resulting in reconstruction errors near zero with the exception of the tidal river. The



cross-covariance information is able to tackle even the irregular dynamics arising on the border between the different physical regimes.

3) Mixing and secondary circulation in a meandering partially stratified estuary (2016). Pein, JU; Valle-Levinson, A ; Stanev, EV. Under Review.

Numerical model experiments are used to examine the effects of coastline and bathymetric curvature on estuarine dynamics and in particular on secondary flows. The general effects of curvature are demonstrated by comparing experiments with two idealised trumpet-shaped estuaries, one straight and another one with a small meandering section. Meanders increase mixing locally within the water column. Curvature-induced turbulence is found even outside the meandering portion. Coastline curvature in the case studied transforms up to 30% of the along-channel momentum to secondary circulation. Lateral momentum equations in a curvilinear coordinate system elucidate the generation of secondary circulation. Major drivers of lateral flow are the baroclinic pressure gradient force and the curvature-induced centrifugal forcing. However, along-channel advection and Coriolis force also play important roles. Lateral advection appears less relevant in the framework of this study. A multivariate EOF analysis of the forcing terms yields a few modes that govern the secondary circulation. In the idealised case approximately 75 % of the forcing variability are explained by only two modes, a major one dominated by the centrifugal forcing and a minor one dominated by baroclinicity. This statistical framework has also been applied to three profiles of the lateral forcing terms derived from realistic model results of the Ems Estuary. Although the complex bathymetry increases the complexity of the secondary flow simulated, between two and four modes are sufficient to explain more than 70 % of the lateral forcing variability. Except in the region with the strongest curvature the baroclinic pressure gradient force governs the first mode.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0635A gefördert.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b>	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Auswirkungen von Klimawandel und menschlichen Eingriffen auf Hydrodynamik und Umweltbedingungen im Ems-Dollart Aestuar: ein Beobachtungen und Modellierung verbindender Ansatz (Climate-Ems/Future-Ems)		
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Badewien, Thomas H. Stanev, Emil Pein, Johannes Schöl, Anderas Schrottke, Kerstin Bartholomä, Alexander	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 30.11.2015	
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b> 26.01.2016	
	<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht	
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - Fakultät V - Mathematik und Naturwissenschaften - Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) - Abt. Marine Sensorsysteme	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> ICBM	
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03F0635A	
	<b>11. Seitenzahl</b> 1-17	
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMBF	<b>13. Literaturangaben</b> 7	
	<b>14. Tabellen</b>	
	<b>15. Abbildungen</b> 11	
<b>16. Zusätzliche Angaben</b>		
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>		
<b>18. Kurzfassung</b> Im Rahmen dieses Projekts wurden eingebettete Modelle entwickelt, um physikalische und biogeochemische Prozesse in der Ems zu analysieren. Ein wesentlicher Aspekt war, Messdaten zu gewinnen, um die Modelle zu validieren und Schlüsselregionen und -prozesse in der Ems zu identifizieren. Mit Hilfe der Ergebnisse wurde der Einfluss des Klimawandels auf das Ems-Dollart-Gebiet untersucht sowie anthropogene Einflüsse betrachtet. Hierzu war es notwendig, neue hydrodynamische Datensätze zu erheben und den Projektpartnern für ihre jeweiligen Aufgaben zur Verfügung zu stellen. Insgesamt 11 Messkampagnen wurden in der Tideems, der Emsmündung, sowie dem benachbarten Rückseitenwatt durchgeführt. Dabei wurden hoch aufgelöste Strömungsdaten sowie räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Temperatur-, Salzgehalts-, Sauerstoff- und Trübungsdaten gewonnen. Zusätzlich wurde die Dynamik und Variabilität des Flüssigschlicks (fluid mud) untersucht. Ein Schwerpunkt der Untersuchung lag auf den unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten und der Reibung an der Grenzfläche zwischen Flüssigschlick und der darüber liegenden Wassersäule sowie auf der Entstehung interner Wellen. Entsprechend der Zielsetzung gelang es, ein dreidimensionales hydrodynamisches Modell aufzusetzen, das den Bereich von der offenen Nordsee bis in die Tideems abdeckt. Das unstrukturierte Modell wurde validiert und für die erstmalige Analyse der 3D Hydrodynamik in der Emsmündung verwendet. Die Ergebnisse wurden diskutiert und veröffentlicht.		
<b>19. Schlagwörter</b> Tide Ems, hochaufgelöste hydrodynamische Datensätze, Flüssigschlicks (fluid mud), 3D Hydrodynamik, unstrukturierte Modell		
<b>20. Verlag</b>	<b>21. Preis</b>	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 356331-18

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b>	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Impact of climate change and human intervention on hydrodynamics and environmental conditions in the Ems-Dollart estuary: an integrated data- modelling approach (Climate-Ems/Future-Ems)		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Badewien, Thomas H. Stanev, Emil Pein, Johannes Schöl, Anderas Schrottke, Kerstin Bartholomä, Alexander	<b>5. end of project</b> 30.11.2015	<b>6. publication date</b> 26.01.2016
	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet	
	<b>8. performing organization(s) name, address</b> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - Fakultät V - Mathematik und Naturwissenschaften - Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) - Abt. Marine Sensorsysteme	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMBF	<b>9. originators report no.</b>	
	<b>10. reference no.</b> 03F0635A	
	<b>11. no. of pages</b> 1-17	
	<b>13. no. of references</b> 7	
	<b>14. no. of tables</b>	
<b>15. no. of figures</b> 11		
<b>16. supplementary notes</b>		
<b>17. presented at (title, place, date)</b>		
<b>18. abstract</b> Within the project, we developed an embedded model to analyse the physical and biogeochemical processes in the river Ems. One major task was to obtain new data sets to validate the model and to identify key regions and key processes in the river Ems. Based on these results, we analysed how climate change and anthropogenic impacts affect the Ems-Dollart-Estuary. To reach this aim, new hydrodynamic data sets had to be obtained. These were made available to the project partners. Altogether, 11 measuring campaigns were conducted in the tidal Ems, in the mouth of the river Ems as well as in the neighbouring back barrier tidal flats. High resolution current data as well as high resolution data in time and space on temperature, salinity, oxygen and turbidity were obtained. In addition, we looked at the dynamics and variability of the fluid mud layer of the river. We focused on the variability of current speed and friction at the interface between the fluid mud and the water column above as well as on the development of internal waves. We succeeded in setting up a three dimensional hydrodynamic model, which covers the entire area from open North Sea to the tidally influenced part of the river Ems. We validated the unstructured model and applied it to analyse the hydrodynamic conditions of the river Ems. The results were published in various journals.		
<b>19. keywords</b> tidal river Ems, high resolution hydrodynamic data, fluid mud, 3D hydrodynamic unstructured model		
<b>20. publisher</b>	<b>21. price</b>	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 376581-12