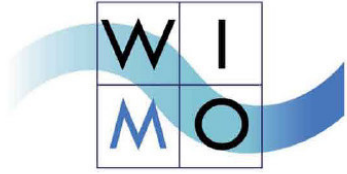


# ABSCHLUSSBERICHT



## Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht



Gemeinschaftlich gefördert von:  
Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK)  
Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU)



## **Danksagung**

Wir danken dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) und dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) für die gemeinsame Finanzierung des Verbundprojekts „Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht (WIMO)“.

Besonderes Merkmal des Projekts war der Austausch mit Kolleginnen und Kollegen vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) und vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR). Für die anregenden Diskussionen und die konstruktive Unterstützung während der Projektlaufzeit möchten wir uns herzlich bedanken.

Mit Prof. Dr.-Ing. Rainer Roosmann, Dr. Folkert de Jong, Dr. Martin Gade, Dr.-Ing. Rainer Lehfeld, Prof. Dr. Manfred Weisensee und Dipl.-Ing. Klaus Wulff stand dem Verbund ein Expertenbeirat mit Rat und Tat zur Seite, der durch kritische und konstruktive Beurteilung des Projektfortschritts zum Erfolg beigetragen hat. Dafür möchten wir uns beim WIMO-Beirat bedanken.



Dieser Bericht wurde editiert und herausgegeben von

Christian Winter  
*MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften*

Verena Backer  
*HWK – Hanse-Wissenschaftskolleg*

Mit Beiträgen von

Christian Hass, Finn Mielck  
*AWI – Alfred Wegener Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung*

Verena Backer, Doris Meyerdierks  
*HWK – Hanse-Wissenschaftskolleg, Institute for Advanced Study*

Daniel Behr, Ulrich Callies, Christina Geimecke, Hajo Krasemann, Jöran März, Joanna Staneva, Justus van Beusekom, Kai Wirtz  
*HZG – Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht*

Sebastian Grayek, Helmut Hillebrand, Dorothee Hodapp, Emil Stanev  
*ICBM – Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg*

Rainer Reuter  
*IfP – Institut für Physik – Universität Oldenburg*

Manfred Ehlers, Richard Jung  
*IGF – Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück*

Christian Heipke, Alena Schmidt  
*IPI – Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, Universität Hannover*

Hans-Christian Reimers  
*LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein*

Marius Becker, Gerald Herrling, Eva Kwohl, Christian Winter  
*MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften*

Winnie Adolph, Hubert Farke, Gerald Millat  
*NLPV – Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer*

Alexander Bartholomä, Ruggero Capperucci, Peter Holler, Ingrid Kröncke  
*SaM – Senckenberg am Meer*

Das Dokument und weitere Informationen sind online im Internet zu finden unter:  
<http://dx.doi.org/10.2314/GBV:860303926>; <http://wimo-nordsee.hosted-by-kfki.baw.de>

Umschlagfoto von NASA Visible Earth, Credit: Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC.

Dieser Bericht soll zitiert werden als:

Winter, C., V. Backer, W. Adolph, A. Bartholomä, M. Becker, D. Behr, C. Callies, R. Capperucci, M. Ehlers, H. Farke, C. Geimecke, S. Grayek, c. Hass, C. Heipke, G. Herrling, H. Hillebrand, D. Hodapp, P. Holler, R. Jung, H. Krasemann, I. Kröncke, E. Kwohl, J. März, D. Meyerdierks, F. Mielck, G. Millat, H.C. Reimers, R. Reuter, A. Schmidt, J. Staneva, E. Stanev, J. van Beusekom, K. Wirtz (2016): *WIMO – Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht – Abschlussbericht*, 158 S. DOI 10.2314/GBV:860303926

# Inhalt

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Einleitung</b> .....                                               | 9  |
| <b>2. Multisensorale Fernerkundung des Wattenmeeres</b> .....            | 13 |
| 2.1 Einleitung.....                                                      | 13 |
| 2.2 Flugzeuggestütztes Laserscanning .....                               | 14 |
| 2.2.1 Stand der Technik .....                                            | 15 |
| 2.2.2 Messungen, Analysen .....                                          | 15 |
| 2.2.3 Ergebnisse.....                                                    | 16 |
| 2.3 Satellitengestützte elektro-optische Sensoren .....                  | 18 |
| 2.3.1 Stand der Technik .....                                            | 19 |
| 2.3.2 Messungen, Analysen .....                                          | 19 |
| 2.3.3 Ergebnisse, Diskussion.....                                        | 20 |
| 2.4 Satellitengetragene Radarsysteme.....                                | 22 |
| 2.4.1 Stand der Technik .....                                            | 22 |
| 2.4.2 Messungen, Analysen .....                                          | 23 |
| 2.4.3 Ergebnisse, Diskussion.....                                        | 23 |
| 2.5 Schlussfolgerungen, Bewertung, Monitoring-Konzepte .....             | 26 |
| 2.6 Ausblick.....                                                        | 26 |
| <b>3. Hydroakustische Methoden im Habitatmonitoring</b> .....            | 29 |
| 3.1 Einleitung.....                                                      | 29 |
| 3.2 Methoden.....                                                        | 29 |
| 3.3 Untersuchungsgebiete .....                                           | 31 |
| 3.4 Ergebnisse, Diskussion.....                                          | 33 |
| 3.5 Schlussfolgerungen, Bewertung, Monitoring-Konzepte .....             | 40 |
| 3.6 Ausblick.....                                                        | 40 |
| <b>4. Die Rolle von Modellen im Monitoring</b> .....                     | 43 |
| 4.1 Einleitung.....                                                      | 43 |
| 4.2 Morphodynamische Modelle für Systemanalysen.....                     | 45 |
| 4.2.1 Methodik .....                                                     | 45 |
| 4.2.2 Ergebnisse.....                                                    | 48 |
| 4.2.3 Monitoringkonzepte.....                                            | 50 |
| 4.3 Bewertung und Optimierung von Standorten für Monitoringsysteme ..... | 51 |
| 4.3.1 Datenbasis der Studie.....                                         | 51 |
| 4.3.2 Methodik .....                                                     | 53 |
| 4.3.3 Ergebnisse.....                                                    | 54 |



|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.4 Zusammenfassung.....                                                             | 56        |
| 4.4 Großskalige Modellierung der Schwebstoffdynamik .....                              | 58        |
| 4.4.1 Physikalische Treiber: Wind, Topografie und Tide .....                           | 58        |
| 4.4.3 Wirkung von Extremereignissen.....                                               | 59        |
| 4.4.4 Biologische Treiber der Schwebstoffdynamik? .....                                | 61        |
| 4.4.5 Schwebstoffdynamik als Quelle von Zonierung und Variabilität im Küstenmeer ..... | 61        |
| 4.5 Statistische Modellierung.....                                                     | 64        |
| 4.5.1 Modellierung des Vorkommens von charakteristischen Makrofaunaarten .....         | 64        |
| 4.5.2 Modellierung benthischer Gemeinschaften in der deutschen AWZ.....                | 65        |
| 4.6 Modellgestützte Charakterisierung von Transportmustern .....                       | 66        |
| <b>5. Darstellung und Bewertung von Deskriptoren .....</b>                             | <b>69</b> |
| 5.1 Einleitung.....                                                                    | 69        |
| 5.2 MSRL Deskriptor D1 Biodiversität .....                                             | 72        |
| 5.2.1 Einleitung.....                                                                  | 72        |
| 5.2.2 Beitrag von WIMO zum Stand der Forschung .....                                   | 72        |
| 5.2.3 Durchgeführte Untersuchungen und Analysen.....                                   | 73        |
| 5.2.4 Ergebnisse und Diskussion .....                                                  | 75        |
| 5.2.5 Schlussfolgerungen und Bewertung.....                                            | 78        |
| 5.2.6 Ausblick.....                                                                    | 78        |
| 5.3 Deskriptor D5 Eutrophierung .....                                                  | 79        |
| 5.3.1 Einleitung.....                                                                  | 79        |
| 5.3.2 Regionale Unterschiede .....                                                     | 80        |
| 5.3.3 Modellstudien zur Eutrophierung .....                                            | 81        |
| 5.3.4 Neue Methoden .....                                                              | 84        |
| 5.3.5 Integrierte Bewertung der Eutrophierung .....                                    | 85        |
| 5.3.6 Schlussfolgerungen und Ausblick .....                                            | 87        |
| 5.4 Deskriptor D6 Meeresgrund.....                                                     | 89        |
| 5.4.1 Einleitung.....                                                                  | 89        |
| 5.4.2 Methoden.....                                                                    | 90        |
| 5.4.3 Ergebnisse.....                                                                  | 90        |
| 5.4.4 Diskussion, Schlussfolgerungen.....                                              | 91        |
| 5.4.5 Bewertung, Ausblick.....                                                         | 92        |
| <b>6. Anwendungen.....</b>                                                             | <b>93</b> |
| 6.1 Einleitung.....                                                                    | 93        |
| 6.2 Risikoanalyse Ölsensitivität .....                                                 | 94        |
| 6.3 Gemeinsame Messkampagne Norderney .....                                            | 100       |
| 6.4 Integratives Projekt IP4 Ems Flüssigschlick .....                                  | 106       |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.1 Einleitung.....                                                    | 106        |
| 6.4.2 Methodik .....                                                     | 106        |
| 6.4.3 Ergebnisse.....                                                    | 107        |
| 6.4.5 Schlussfolgerungen.....                                            | 107        |
| 6.5 Entwicklung Sensornetzwerk „Extremereignisse“ .....                  | 109        |
| 6.5.1 Einleitung.....                                                    | 109        |
| 6.5.3 Methodische und apparative Entwicklungen.....                      | 110        |
| 6.5.4 Experimentelle Erprobungen .....                                   | 113        |
| 6.5.5 Bewertung und Ausblick.....                                        | 114        |
| 6.6 Darstellung von Projektdaten.....                                    | 115        |
| 6.6.1 Einleitung.....                                                    | 115        |
| 6.6.2 Ergebnisse.....                                                    | 115        |
| 6.6.3 Bewertung .....                                                    | 117        |
| 6.6.4 Zusammenfassung und Ausblick .....                                 | 118        |
| <b>7. Integrative Projekte.....</b>                                      | <b>119</b> |
| <b>8. Literaturverzeichnis .....</b>                                     | <b>125</b> |
| <b>9. Anhang .....</b>                                                   | <b>133</b> |
| 9.1. Webbasierter Katalog Monitoringkonzepte.....                        | 133        |
| 9.2. WIMO Junior Fellowships.....                                        | 135        |
| 9.3. Wissenschaftliche Qualifikationen .....                             | 135        |
| 9.4. Veröffentlichungen aus WIMO (Papers, Conference talks&posters)..... | 137        |
| 9.5. Abkürzungen und Glossar .....                                       | 151        |
| 9.6. Projektpartner und Expertenbeirat.....                              | 155        |





## Zusammenfassung

Aussagen zum ökologischen Zustand und der Entwicklung von Küstenmeeren und ein Verständnis der Wirkungsbeziehungen zwischen Organismen, Meeresboden, Wassersäule und biogeochemischen und physikalischen Prozessen können nur durch langfristige Beobachtungen (Monitoring) und Modellansätze erfolgen. Im Rahmen der europäischen Richtlinien zur Überwachung der Meeresumwelt hat die Entwicklung von Monitoringstrategien einen aktuellen Bezug. Im Verbundprojekt WIMO (Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht) wurden Konzepte und Messverfahren entwickelt, die grundsätzliche wissenschaftliche Fragestellungen behandeln und auf die Anforderungen des behördlichen Monitorings im Rahmen der europäischen Gesetzgebung und Vorschriften eingehen. In diesem Abschlussbericht werden die Relevanz und Anwendbarkeit der im Rahmen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie vorgegebenen Deskriptoren am Beispiel der Integrität des Meeresbodens, der Eutrophierung und der Biodiversität diskutiert. Etablierte Messverfahren für die Erfassung der Charakteristik des Meeresbodens und der Wassersäule und neue Technologien werden hinsichtlich ihrer Eignung für das hoheitliche Monitoring bewertet. Die Rolle von Modellen unterschiedlicher Komplexität für die Verknüpfung und Visualisierung von Mess- und Modellergebnissen wird erläutert. In Form eines Katalogs webbasierter Kennblätter wird die Implementierung der im Projekt entwickelten Konzepte in die Planung operationeller, behördlicher Monitoringprogramme vorgestellt. Dies ermöglicht zukünftig allen beteiligten Nutzern die kontinuierliche Überprüfung und Weiterentwicklung von Methoden und die Integration aktueller Informationen.

## Summary

The state and development of coastal marine systems and an understanding of the interaction of organisms, sea floor, water column, and biochemical and physical processes can only be obtained by a combination of long-term monitoring and modelling approaches of different complexity. A need for the development and evaluation of monitoring strategies is driven by a framework of different European and German regulations. The research project WIMO (Scientific Monitoring Concepts for the German Bight) has developed concepts and methods that aim at a fundamental scientific understanding of marine systems and also meet monitoring requirements of European legislation and regulations like the EU Marine Strategy Framework Directive. In this final report examples of common descriptors of ecosystem state like seabed integrity, eutrophication, and biodiversity are discussed. It has been assessed to what extent established measuring procedures used to survey the characteristics of the sea floor, and newly developed technologies are eligible for governmental monitoring. The significance of integrative modelling for linking and visualising results of measurements and models is illustrated. It is shown how new concepts have been implemented into governmental monitoring in the form of web based data sheets. These insights enable continuous analyses and developments in the future.



# 1. Einleitung

C. Reimers (LLUR), D. Meyerdierks (HWK), C. Winter (MARUM)

In Küstenmeeren bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen physikalischen und biogeochemischen Prozessen und Lebensgemeinschaften unter dem zunehmenden Druck menschlicher Eingriffe. Die deutschen Küsten und Bereiche der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) sind in besonderem Maße dem Interesse und der Nutzung verschiedenster Anspruchsgruppen unterworfen. Ein grundlegendes Verständnis von Wirkungsbeziehungen und eine Beschreibung und Bewertung des Zustands der marinen Umwelt setzt spezifisches Wissen über Teilsysteme und deren Interaktionen voraus.

Der Bedarf an fundierten Kenntnissen und umfassenden Informationen über den aktuellen Zustand und die Entwicklung der Meeresumwelt ist in den vergangenen Jahren zunehmend in den Fokus von Forschung, Wirtschaft, Politik, Naturschutz gerückt und stößt auf hohes öffentliches Interesse. Grund dafür ist die fortschreitende Ausbeutung natürlicher Ressourcen, die zunehmende Inanspruchnahme der Meeresökosysteme und die unterschiedlichen Belastungen der Meeresumwelt. Für eine nachhaltige Nutzung und einen effektiven Schutz der Küstengewässer und -meere sind zunächst belastbare Informationen über den Zustand und die Veränderungen dieser Gebiete notwendig.

Die europäische Union hat auf diese Erfordernisse mit einer Reihe von gesetzlich bindenden Richtlinien reagiert und fordert die Überwachung der Küsten- und Meeresgewässer durch die Mitgliedsstaaten. In Regelwerken wie der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH) und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) werden neue Anforderungen an die Erfassung und Beschreibung des Zustands der Meeresumwelt gestellt. So ist das Ziel der MSRL eine Balance zwischen der Nutzung und dem Schutz der Meere herzustellen, um mit geeigneten Maßnahmen einen „guten Umweltzustand“ (good environmental status, GES) der europäischen Meere bis zum Jahr 2020 zu erreichen. Die MSRL erweitert dabei das Konzept der Überwachung von Qualitätskomponenten (WRRL), Arten und Lebensräumen (FFH) um weitere Themenbereiche (Deskriptoren). Die vorgeschriebenen Schritte der Bestandsaufnahme, des Monitorings und der Umsetzung von Maßnahmen erfordern sowohl die Bewertung bestehender als auch die Entwicklung neuer Indikatoren und Verfahren.

In Deutschland wurde das Monitoring der Meeresumwelt bis 2012 von der Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder-Messprogramm (BLMP) für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee koordiniert. Im März 2012 unterzeichneten die Bundes- und Landesministerien ein neues Verwaltungsabkommen, das seitdem die Zusammenarbeit zwischen Bund und Küstenländern im neu gegründeten Bund-Länder-Ausschuss Nord- und Ostsee (BLANO) regelt. Die entsprechenden Arbeitsgruppen sind interdisziplinär ausgerichtet und beteiligen Behörden sowie Experten aus diversen Forschungseinrichtungen. Im Themenbereich Erfassung und Bewertung des Umweltzustands zeigte das Verbundprojekt „Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht (WIMO)“ eine neue Art der Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsprogrammen (Winter et al., 2014).

Im Themenbereich Erfassung und Bewertung des Umweltzustands zeigte das Verbundprojekt „Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht (WIMO)“ eine neue Art der Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsprogrammen. Wissenschaftliche Institutionen der Küsten- und Meeresforschung haben in Kooperation mit zuständigen Behörden Observations- und Monitoringstrategien und Messprogramme entwickelt und erprobt. Das Ziel war die Entwicklung von Messstrategien, die gleichermaßen zu grundlagenorientierten wissenschaftlichen Erkenntnissen und behördlichen Monitoringprogrammen beitragen können. Das Verbundprojekt wurde von 2010 bis 2015 in zwei Projektphasen gemeinsam von den beiden niedersächsischen Ministerien für Umwelt,

Energie und Klimaschutz (MU) und für Wissenschaft und Kultur (MWK) gefördert. Das Verbundprojekt umfasste Arbeitsgruppen der folgenden Partner:

- Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), List/Sylt
- Hanse-Wissenschaftskolleg (HWK), *Institute for Advanced Study* in Delmenhorst
- Die Institute für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) und Institut für Physik (IfP), Universität Oldenburg
- Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF), Universität Osnabrück
- Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)
- Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI), Universität Hannover
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)
- Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM), Universität Bremen
- Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer (NLPV), Wilhelmshaven in Kooperation mit: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen
- Forschungsinstitut Senckenberg am Meer (SaM) in Wilhelmshaven

Das interdisziplinäre Projekt setzte methodische Schwerpunkte in der multisensoralen und hydroakustischen Fernerkundung, der numerischen Modellierung und der direkten Beprobung des Meeresbodens und der Wassersäule. Es war in die drei Projektbereiche PB 1 „Habitaterkundung“, PB 2 „Schwebstoffdynamik“ und PB 3 „Integration“ gegliedert und wurde von einem Expertenbeirat fachlich begleitet. In einem projektinternen Begutachtungsverfahren wurden zusätzlich mehrere integrative Projekte ermöglicht, die in Zusammenarbeit mit Behörden durchgeführt wurden (Abbildung 1)

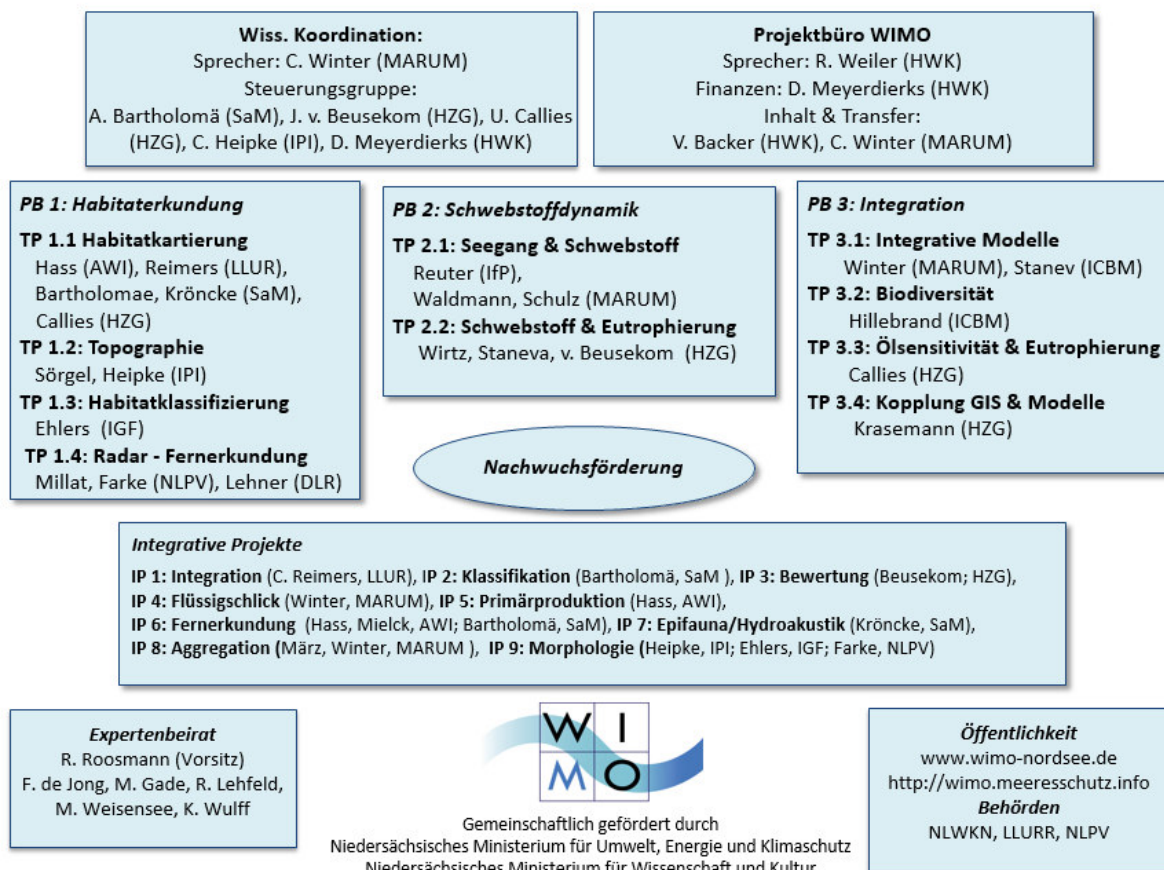


Abbildung 1: Struktur des Projektverbundes in der zweiten Projektphase

In der zweiten Projektphase wurde das Projekt inhaltlich von einer Steuerungsgruppe beteiligter Wissenschaftler unter der Leitung von Christian Winter koordiniert. Das Projektbüro am Hanse-Wissenschaftskolleg in Delmenhorst hatte unter der Leitung von Reto Weiler die Beantragung des Projekts koordiniert und war im Zentralen Projekt „Management und Transfer“ verantwortlich für Projektadministration und Koordination des Berichtswesens. Zusätzlich gestaltete es die interne und externe Kommunikation, den Wissenstransfer und informierte Anspruchsgruppen. Als Erstempfänger war das Projektbüro am HWK verantwortlich für die Kommunikation und finanzielle Berichterstattung gegenüber den beiden finanzierenden Ministerien, regelte die vertragliche und finanzielle Abwicklung zwischen Erst- und Letztempfängern der beteiligten Partnerinstitutionen und Arbeitsgruppen. Die entsprechende Mittelverwendung aller Partner über die Projektlaufzeit von insgesamt sechs Jahren ist separat im Gesamtverwendungsnachweis dargestellt. Darüber hinaus koordinierte das Projektbüro die projektinterne Nachwuchsförderung in Form von WIMO Junior Fellowships und veranstaltete WIMO Summer Schools für Doktoranden. Abgesehen von zwei Statusbriefings und einer Summer School fanden sämtliche Treffen, Tagungen und Workshops des Projekts am HWK statt. Dazu stellte das HWK seine Infrastruktur kostenfrei zur Verfügung. Darüber hinaus finanzierte das HWK diese Veranstaltungen fast ausnahmslos mit Eigenmitteln aus dem Budget des Bereiches Earth.

Zur externen Kommunikation der Projekteinhalte dienten die Webseite [www.wimo-nordsee.de](http://www.wimo-nordsee.de), Presseberichte, öffentliche Tagungen und Workshops, wissenschaftliche Publikationen und Vorträge der Projektpartner auf Fachtagungen (siehe Listen im Anhang).

Dieser Abschlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Verbundprojekts zusammen und verweist weiterführend auf wissenschaftliche Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projekts entstanden. Der Bericht ist gegliedert in die Schwerpunkte des Projektverbundes „Multisensorale Fernerkundung des Wattenmeeres“, „Hydroakustische Methoden im Habitatmonitoring“, „Die Rolle von Modellen im Monitoring“, „Darstellung und Bewertung von Deskriptoren“ und „Anwendungen“. Im Kapitel „Integrative Projekte“ werden die Ergebnisse schließlich zusammengeführt.

Im Anhang sind die erstellten Monitoringkonzepte der Einzelprojekte aufgelistet, die als wesentliches Ergebnis als webbasierter Katalog unter [wimo.meeresschutz.info](http://wimo.meeresschutz.info) vorliegen. Neben den unter WIMO entstandenen wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen sind im Anhang noch ein Glossar, eine Liste aller beteiligten Partner und Mitarbeiter und studentischen Arbeiten verzeichnet.

Zusätzlich zu diesem Abschlussbericht werden die im Verbund WIMO erarbeiteten Ergebnisse in einem Sonderband der von Experten begutachteten internationalen Fachzeitschrift *Geo-Marine Letters* publiziert und damit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.



## 2. Multisensorale Fernerkundung des Wattenmeeres

W. Adolph (NLPV), A. Bartholomä (SaM), M. Ehlers (IGF), H. Farke (NLPV), C. Heipke (IPI), R. Jung (IGF), G. Millat (NLPV), A. Schmidt (IPI)

### 2.1 Einleitung

Das Ökosystem Wattenmeer mit den verschiedenen Lebensräumen Inseln, Vorstrand, Seegatten, Prielen und den bei Niedrigwasser trockenfallenden Sand-, Misch- und Schlickwatten ist ökologisch und sozio-ökonomisch von überragender Bedeutung. Als Remineralisationsraum mit sehr hoher Primär- und Sekundärproduktion hat das Wattenmeer einen großen Einfluss auf die Wasserqualität, hat weltweite Bedeutung für den Vogelzug, ist Kinderstube für eine Reihe von Fischarten und dient als „Wellenbrecher“ dem Schutz der Festlandsküsten. Dieser hohen Bedeutung wird durch einen besonders hohen Schutzstatus Rechnung getragen. Das Wattenmeer ist Nationalpark, EU Natura 2000 Schutzgebiet, fällt unter die EU Wasserrahmenrichtlinie sowie die Meeresschutzstrategie und ist von der UNESCO als Weltnaturerbe anerkannt. In allen genannten Schutzkategorien sind regelmäßige Zustandsbewertungen und Maßnahmen festgeschrieben, sodass ein umfassendes Monitoring des Gebiets vorgeschrieben ist. Mit den seit Jahrzehnten laufenden Monitoringprogrammen „Bund/Länder-Messprogramm“ (BLMP), „Trilateral Monitoring and Assessment Program“ (TMAP) und dem Miesmuschelmonitoring kommen die zuständigen Behörden diesen Verpflichtungen nach. Darüber hinaus werden die verschiedenen Küstenbereiche in unterschiedlicher Zuständigkeit für den Küstenschutz vermessen.

Für die Beschreibung und Bewertung des Zustands mariner Systeme kommen neben umfangreichen in-situ Probenahmen (chemisch- physikalische Parameter, Fauna, Flora, Habitate) und Vermessungen, auch fernerkundliche Methoden zum Einsatz. Satellitengestützte Sensoren, flugzeuggestützte Luftbilder und Laserscan-Verfahren dienen der räumlichen Erfassung von Habitaten wie z.B. Muschelbänken oder bilden als digitale Höhenmodelle Oberflächenstrukturen ab. Für das niedersächsische Wattenmeer wird seitens des NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) und der Nationalparkverwaltung jedes Jahr ausgewählte Bereiche des Wattenmeeres befliegen und dabei Orthophotos und Laserdaten aufgenommen.

Im Rahmen dieses Verbundprojekts wurden Nutzungsmöglichkeiten von Daten neuer, mit hochauflösenden Sensoren ausgestatteter Satelliten und flugzeuggestütztem hochauflösenden Laserscanning (LIDAR) untersucht und weiter entwickelt (Abbildung 2). Für unterschiedliche Anwendungsbereiche müssen einerseits die abzudeckenden Gebiete und andererseits die räumliche und zeitliche Auflösung berücksichtigt werden. Daten der optischen Satelliten RapidEye oder Radarsatelliten TerraSAR-X (SAR – Synthetic Aperture Radar) besitzen im Allgemeinen eine geringere räumliche Auflösung als flugzeuggestützte Sensoren oder Kameras an Drohnen. Andererseits decken sie sehr viel größere Flächen ab und können somit umfassendere Zusammenhänge im Untersuchungsgebiet darstellen. Ferngesteuerte Drohnen können mit ihrer geringen Flughöhe und ihrer kompakten Größe schnell und hochauflösend Daten aufnehmen. Jedoch sind die Aufnahmeflächen meistens sehr klein und die Aufnahmezeit durch die Akkukapazität beschränkt. Die Möglichkeiten flugzeuggestützter Sensoren befinden sich räumlich und zeitlich zwischen Satellitenaufnahmen und Drohnen.

Auf Basis dieser Eigenschaften finden Satellitendaten vor allem Verwendung in der Erfassung von Makrostrukturen wie Schlickfeldern, Muschelbänken, Sandplaten oder in Übersichten oder langfristigen Veränderungsanalysen von Sedimenten, Muscheln, morphologischen Strukturen mit Restwasser oder Salzwiesen. Aufnahmezeitpunkte der Satelliten sind festgelegt und erfolgen immer zur gleichen Zeit (täglich für RapidEye und TerraSAR-X). Flugzeuggestützte Daten sind zwar zeitlich flexibler, die Praxis aber zeigt, dass die erforderlichen Wettervoraussetzungen in Verbindung mit

Niedrigwasser für die Befliegungen größerer Gebiete in unseren Breiten nur selten gegeben sind. Teilweise können wetterbedingt gar keine Messungen durchgeführt werden, wie in der Projektlaufzeit etwa in den Jahren 2012 und 2015. Drohnen kommen zum Einsatz, wenn auf kleinmaßstäbigen Gebieten detaillierte und schnell ablaufende Prozesse beobachtet werden sollen. Auch hier kann eine engmaschige Beobachtung stattfinden. Im Allgemeinen sind elektro-optische Daten und Laserscanner (Satellit oder Flugzeug) auf Aufnahmen am Tag mit wenig bis keiner Bewölkung beschränkt. Dahingegen sind Radar-Sensoren weitgehend unabhängig von Wetter und Tageslicht. Durch diese Flexibilität können auch gezielte Aufnahmen zur Dokumentation der Auswirkungen von Extremereignissen wie Stürmen erfolgen.

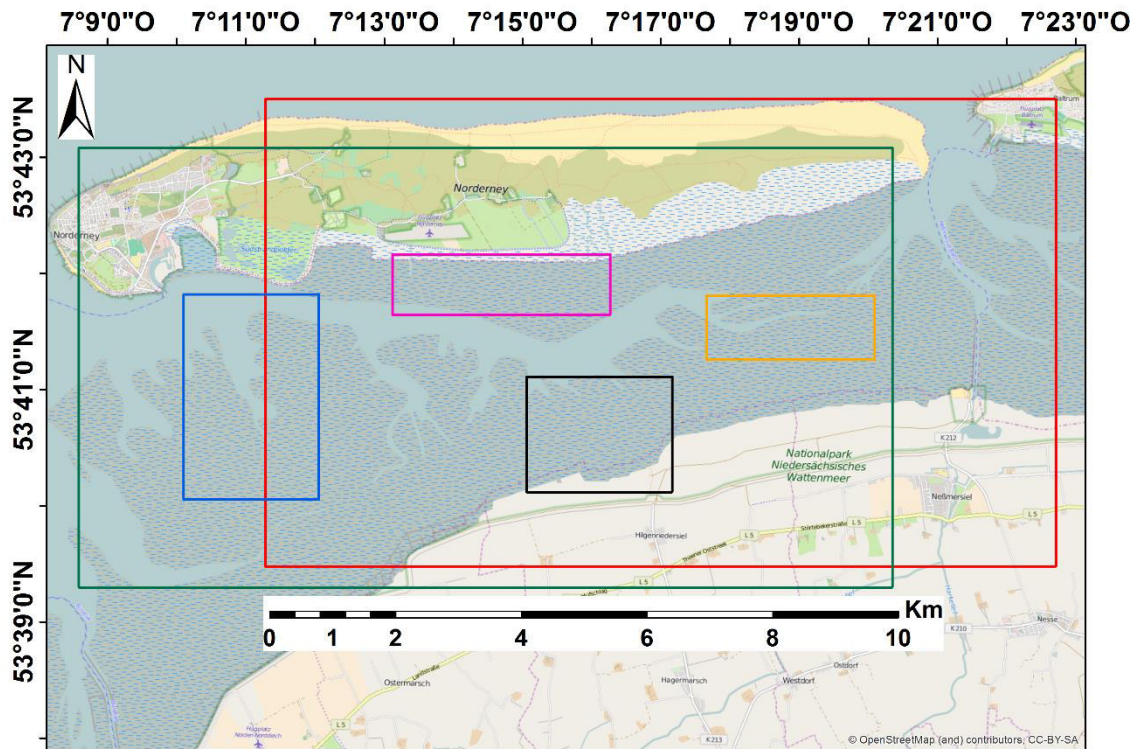


Abbildung 2 Geographische Lage der einzelnen Untersuchungsgebiete für den Laserscanner-Ansatz (blaue und magenta)), den elektro-optischen Ansatz (rot, magenta, schwarz und orange) und den SAR-Ansatz (magenta, orange, grün)

## 2.2 Flugzeuggestütztes Laserscanning

Flugzeuggestütztes Laserscanning ist ein aktives Verfahren, das zur Gewinnung von dreidimensionaler Oberflächeninformation verwendet wird. Es ist auch unter der Bezeichnung Lidar (light detection and ranging) bekannt. Das System sendet mit hoher Frequenz Laserpulse im nahen Infrarotbereich aus, welche an der Erdoberfläche reflektiert und wieder empfangen werden. Dabei wird die Laufzeit der sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden elektromagnetischen Strahlung für Hin- und Rückweg gemessen und daraus die zurückgelegte Strecke (Abstand) berechnet. Bei bekannter Positionierung und Orientierung des Sensors lassen sich daraus die Koordinaten der Oberflächenpunkte bestimmen. Moderne Laserscannersysteme ermöglichen die Erfassung von mehreren Punkten pro Quadratmeter. Die geometrische Genauigkeit der Daten kann mit maximal 20 cm in horizontaler Richtung und 5-15 cm (absolut) oder bis zu 2 cm (relativ) in der Höhe angegeben werden. Als Ergebnis des Laserscannings liegt eine unregelmäßige 3D-Punktwolke vor (x,y,z). Durch Interpolation kann daraus ein digitales Oberflächenmodell (DOM) bzw. nach Filterung der nicht zur Geländeoberfläche gehörenden Objekte wie Gebäude und Vegetation ein digitales Geländemodell (DGM) abgeleitet werden. Neben den



Koordinaten der Oberflächenpunkte wird die Intensität des rückgestreuten Signals von den Systemen erfasst. Sogenannte Full-Waveform-Sensoren (Wagner et al., 2006) zeichnen darüber hinaus den gesamten zeitlichen Verlauf des Signals auf und ermöglichen die Ableitung weiterer physikalischer Eigenschaften der Objektpunkte. Während Laserscanverfahren überwiegend Daten über trockenen Flächen erheben, kann für Anwendungen im Küstenbereich auch eingeschränkt bathymetrisches Laserscanning angewendet werden (Guenther et al., 2000). Hier wird neben Wellenlängen im nahen Infrarot, die an der Wasseroberfläche reflektiert werden, auch grünes Laserlicht ausgesandt, welches im Wasser weniger gedämpft wird, daher mit einem höheren Energieanteil in die Wassersäule eindringen kann und vom Boden reflektiert wird.

Im Teilprojekt 1.2 wurden Daten sowohl vom NLWKN zur Verfügung gestellt, als auch eigene im Rahmen des Projektes erfasste flugzeuggestützte Laserscannerdaten verwendet. Im Projekt wurde zudem untersucht, wie sich diese Technologie auf eine Drohnen-basierte „Low-Budget“-Lösung übertragen lässt, um hochaufgelöste, kleinskalige Untersuchungsgebiete zu erfassen.

### 2.2.1 Stand der Technik

Im Küstenbereich wird flugzeuggestütztes Laserscanning seit einiger Zeit für verschiedene Fragestellungen angewendet. So untersuchten Lee & Shan (2003) die Landbedeckungsklassifikation in Küstenbereichen mit Hilfe eines überwachten Klassifikationsansatzes. Es zeigte sich, dass signifikante Verbesserungen des Ergebnisses auftreten, sobald neben hochaufgelösten optischen Satellitendaten Laserdaten verwendet werden. Bei Starek et al. (2012) erfolgte zunächst eine Ableitung von Profilen aus Laserscannerdaten. Diese bildeten Eingangsdaten für einen binären Klassifikationsansatz mit der Zielsetzung, Strände in Bereiche mit Landzunahmen und –abnahmen einzuteilen. Die Wasser-Land-Trennung ist in Brzank (2008) mit einem überwachten Klassifikationsansatz entwickelt worden. Zudem wurde ein Ansatz zur Ableitung von markanten Geländestrukturlinien vorgestellt. Beides kann einer Verbesserung hochaufgelöster DGMs in Wattgebieten dienen. Der automatischen Extraktion von Prielan widmeten sich Mason et al. (2006). Der Ansatz setzt sich aus einer Kombination unterschiedlicher Bildverarbeitungsverfahren, z.B. zur Extraktion von Linien, und einem wissensbasierten Ansatz zur Zusammenführung einzelner Liniensegmente zusammen. Vegetations- und Habitatsanalysen aus Laserscanning in Küstenbereichen werden bei Nayegandhi & Brock (2009) umfangreich aufgezeigt.

### 2.2.2 Messungen, Analysen

In WIMO wurden Laserscannerdaten verwendet, die mit Sensoren der Firmen TopoSys / Trimble und Riegl aufgezeichnet wurden. Aus der irregulären Punktwolke der Rohdaten wurden mittels Interpolation und Filterung digitale Geländemodelle (DGM) abgeleitet. Mit einem probabilistischen Klassifikationsansatz wurden die Daten hinsichtlich der Bodenbedeckung klassifiziert. Zielsetzung war die Detektion von Land-Wasser-Grenzen. Bei dieser Klassifikation werden statistische Verteilungen geometrischer und physikalischer Merkmale der Untersuchungsgebiete in einem Trainingsschritt definiert, und von einem Modellsystem gelernt. Lokale Merkmalsausprägungen werden mit Kontextinformationen in einem auf Conditional Random Fields beruhenden Ansatz kombiniert. Neben der Land-Wasser-Trennung können weitere Klassen, wie z.B. Muschelbänke, analysiert und somit als Beitrag zur Habitatkartierung geliefert werden. In diesem Zusammenhang lässt sich auch der Einfluss von zusätzlicher Information aus der Auswertung von Full-Waveform-Sensoren auf das Klassifikationsergebnis untersuchen. Mit der Zielsetzung, die Dynamik von Wattgründen / Prielstrukturen zu analysieren, wurden zudem Verfahren zur automatischen Erkennung und Extraktion von Prielan entwickelt: Ein erster Ansatz setzt sich dabei aus einfachen Bildverarbeitungsoperatoren zusammen, die die Detektion der Prielkanten ermöglichen. Die Datensätze unterschiedlicher Zeitpunkte wurden verglichen, und der Betrag und die Richtung der Verlagerung der Priele abgeleitet. In einem zweiten Verfahren wurde das Potential statistischer Samplingmethoden hinsichtlich der

Möglichkeit, Vorwissen über die Ausprägung von Objekten einzubringen, ausgenutzt. Die Verbundenheit von Prielen, deren charakteristische Form sowie die Auftreffwinkel wurden berücksichtigt, um möglichst vollständige Prielnetzwerke zu erkennen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete der Vergleich von DGMs zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Hierbei lassen sich die Veränderungen in der Topographie erkennen und analysieren. Diese wurden am Beispiel der Wattbereiche südlich von Norderney aufgezeigt, da für dieses Gebiet vier Datensätze während der Projektlaufzeit aufgezeichnet wurden. Die in einer projektübergreifenden Messkampagne erfassten GPS-Trajektorien wurden als weitere Höhendaten genutzt. Die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Fernerkundungssensoren sind am Beispiel von Bodenformen im Norderneyer Inselwatt untersucht worden (Capperucci et al., 2013; Adolph et al. 2016 subm.). Eine Analyse der Ausprägung dieser Geländestrukturen in den einzelnen Daten sowie die Zusammenführung der daraus abgeleiteten Ergebnisse bildeten dabei einen projektübergreifenden Schwerpunkt (siehe Kapitel 7, integratives Projekt IP9). Im Bereich eines kleinskaligen, Drohnen-basierten LaserScannings wurde auf vergleichbaren Wattflächen im Jadebusen die Einsatzmöglichkeit eines vertikalen Sektorscanners getestet.

### 2.2.3 Ergebnisse

Der im Projekt entwickelte, probabilistische Ansatz zur Trennung von Land- und Wasserflächen verwendet Daten von Laserscannern mit Wellenlängen im nahen Infrarot. Das Signal reflektiert an der Wasseroberfläche und kann nicht in die Wassersäule eindringen. Die aus der Punktwolke bestimmten geometrischen Merkmale sowie die Intensität des reflektierten Laserpulses und daraus abgeleitete Größen führen zu einer guten Trennbarkeit der Klassen Wasser und Land. In den Prielen des Untersuchungsgebiets werden die Wasserpunkte nahezu vollständig erkannt lediglich im Übergangsbereich zum Land treten einige Fehlklassifikationen auf (Abbildung 3). Für die meisten Testgebiete ergeben sich Vollständigkeits- und Korrektheitsraten von über 90 %.

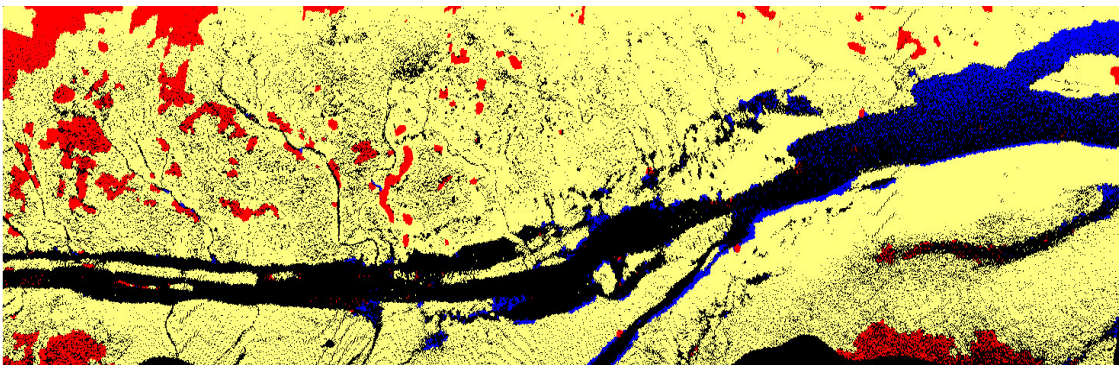


Abbildung 3 Klassifizierte Punktwolke mit Wasser (blau), Wattflächen (gelb) und Muschelbänken (rot). In den schwarzen Bereichen sind keine Daten aufgezeichnet worden. Dies ist auf eine spiegelnde Reflexion des Signals bei Wasserflächen zurückzuführen.

Da das Laserlicht ein monochromatisches Signal ist, wird die weitere Differenzierung in verschiedene Habitatklassen schwierig. Lediglich die Klassifikation von Muschelbänken, die durch eine raue Struktur gekennzeichnet sind, scheint möglich. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass es zu Verwechslungen mit anderen rauen Strukturen im Watt kommt und die Ausdehnung der Muschelbänke nur bis zu etwa 50 % mit den Referenzdaten übereinstimmen. Eine leichte Verbesserung der Ergebnisse kann erzielt werden, wenn Full-Waveform-Information hinzugenommen wird. Hierunter ist die Auswertung der gesamten Wellenform (*full waveform*) zu verstehen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Sensoren, die

lediglich das stärkste rückgestreute Signal aufzeichnen, kann hierbei der gesamte Verlauf des Signals untersucht werden. In der Regel werden hiervon die Signalintensität und die Signalbreite erfasst, welche als Merkmal in dem in WIMO entwickelten Verfahren einfließen.

Für die automatische Erkennung und Ausweisung von Prielstrukturen (Blaues Rechteck in Abbildung 2) wird in einem Samplingansatz die optimale Konfiguration von einzelnen Rechtecken bestimmt (Abbildung 4). Die großen Priele werden vollständig erkannt, lediglich sehr feine Strukturen fehlen. In einem zweiten Schritt kann eine Graphstruktur aus dem Ergebnis abgeleitet werden (Abbildung 4, rechts). Auf diese Weise ist es möglich, die von den Priele gebildeten Netzwerkstrukturen darzustellen. Die Ergebnisse können zudem mit den Laserdaten anderer Zeitpunkte verglichen werden. Hierbei lässt sich feststellen, dass innerhalb eines Zeitraums von 2 Jahren Verschiebungen von über 50 m für größere Priele auftreten können (Schmidt & Soergel, 2013b).

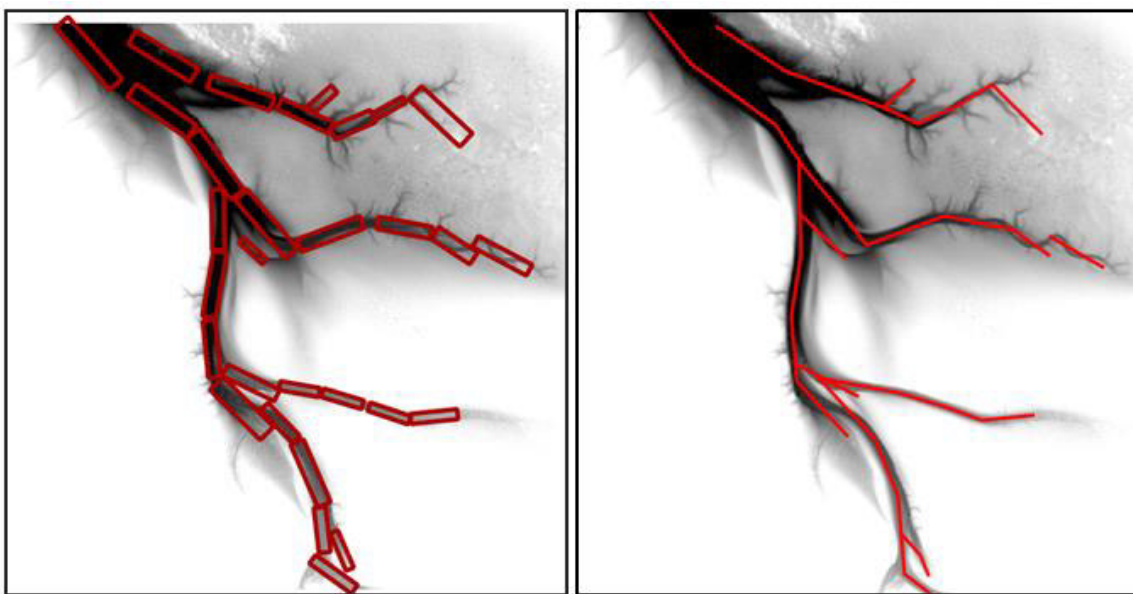


Abbildung 4: DGM überlagert mit dem Ergebnis aus der automatischen Detektion von Prielnetzwerken südlich von Norderney. Zunächst werden die Priele durch einzelne Rechtecke repräsentiert (links), aus denen anschließend eine Graphstruktur abgeleitet wird (rechts). Das untersuchte Gebiet weist hierbei eine Größe von 1.0 km x 1.1 km auf.

Im flächenhaften Vergleich der DGMs von Wattflächen südlich Norderneys zu unterschiedlichen Zeitpunkten treten Höhenunterschiede von bis zu einigen Dezimetern auf. Diese werden zum einen durch die genannten Prielverlagerungen verursacht. Darüber hinaus lassen sich topographische Änderungen bei Muschelbänken sowie bei Bodenformen im südlichen Inselwatt von Norderney beobachten (Abbildung 2). Die Bodenformen weisen eine regelmäßige Struktur von Sandrücken und Tälern mit Höhenunterschieden von 10 – 15 cm auf und befinden sich im Abstand von etwa 100 m im Inselwatt. Eine projektübergreifende Untersuchung dieser Strukturen wurde vorgenommen (Adolph et al., subm.). Aus dem DGM der Laserscannerdaten werden einzelne Profile beispielhaft abgegriffen (schwarze Linie in Abbildung 5, oben) und über die Höhe aufgetragen. In den Profilen zeigt sich die typische Struktur der Bodenformen (Abbildung 5, unten). Mit spektralen Methoden (Fourieranalyse) sind charakteristische Größen der Höhenprofile, wie die Frequenz der maximalen Amplitude, abgeleitet worden. Eine laterale Verlagerung der Bodenformen von einigen Zehnermetern innerhalb von 2 Jahren wurde beobachtet.

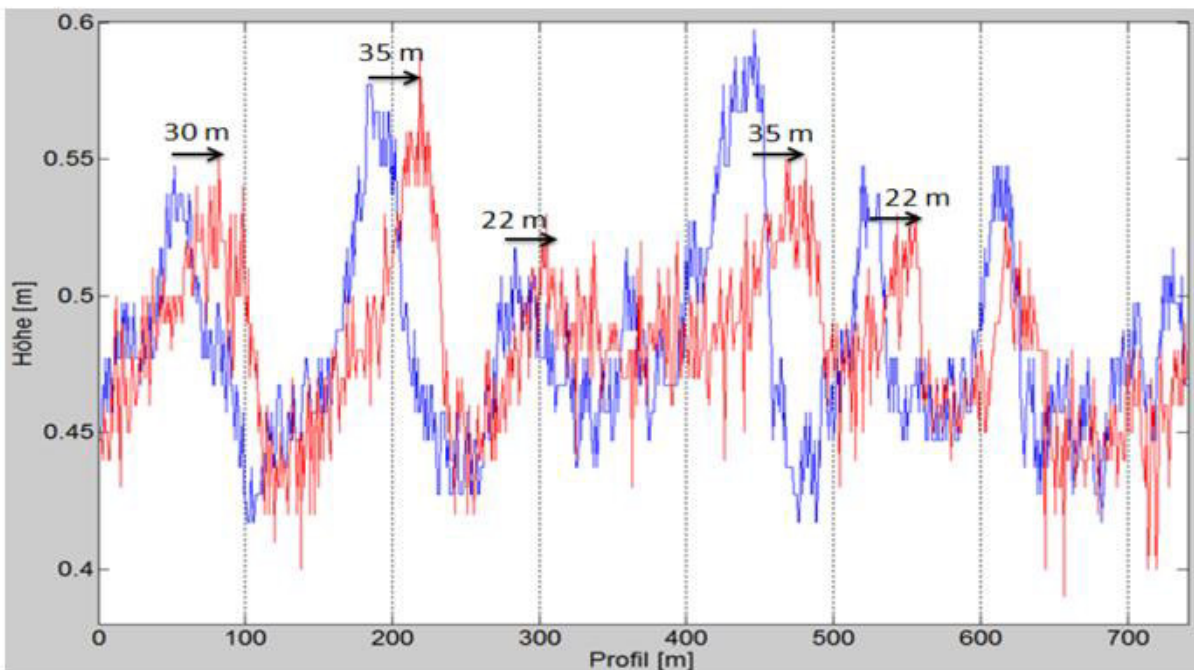
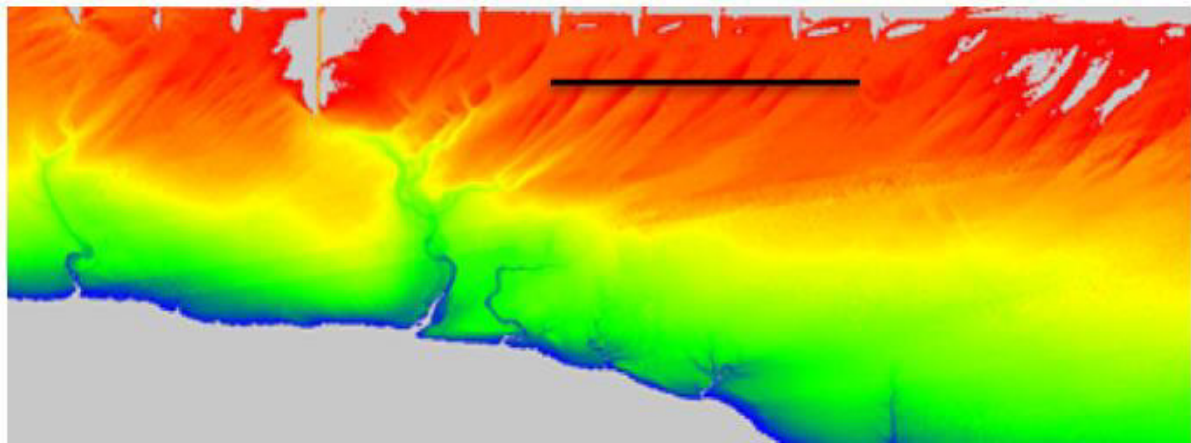


Abbildung 5: DGM südlich von Norderney mit eingezeichneter Profillinie in schwarz (oben) mit einer Länge von 740 m. Das Profil kann über die Höhe aufgetragen werden. Der Vergleich zwischen den Datensätzen von 2012 (blau) und 2014 (rot) macht eine Verlagerung der Strukturen deutlich.

### 2.3 Satellitengestützte elektro-optische Sensoren

Satellitengestützte elektro-optische Sensoren messen die elektromagnetische Strahlung der Erdoberfläche ohne eigene Anregung und gehören so zu den passiven Systemen der optischen Fernerkundung. Sie sind dabei vom Tageslicht und guten Wetterbedingungen (wolkenfrei) abhängig. Jede Oberfläche weist ein unterschiedliches Reflexionsverhalten auf, mit dem sie von anderen Oberflächen unterschieden werden kann. Elektro-optische Sensoren messen dies in unterschiedlichen Bereichen (Bändern) des elektromagnetischen Spektrums. Diese Bänder können sich im sichtbaren Licht (450 nm - 690 nm), nahen Infrarot (780 nm - 3000 nm) oder thermalen Infrarot (> 3000 nm) befinden. Satellitensysteme unterscheiden sich in der Anzahl und der Lage der Bänder im elektromagnetischen Spektrum. Moderne multispektrale Systeme können bis zu 36 verschiedene Bänder aufnehmen (z.B. MODIS) und variieren in der räumlichen Auflösung von 1.5 m bis 1 km (z.B. SPOT, MODIS), manche Systeme erreichen auch Auflösungen von bis zu 0.3 m (WorlView-3). Hyperspektrale Systeme nehmen bis zu 1000 verschiedene Bänder des elektromagnetischen

Spektrums auf. Derzeit befindet sich nur ein Satellit mit einem hyperspektralen Sensor im Orbit (Hyperion), 2018 soll mit dem Deutschen Satelliten EnMap ein weiterer hinzukommen.

Im Teilprojekt 1.3 wurden Aufnahmen der ursprünglichen deutschen Satellitenkonstellation RapidEye verwendet. Der multispektrale Sensor verfügt über 5 verschiedenen Bänder im sichtbaren Licht (3 Bänder) und nahen Infrarot (2 Bänder). Mit einer räumlichen Auflösung von 5 m gehört er zu den hochauflösenden multispektralen Sensoren und ist dadurch gut für das Monitoring im Deutschen Wattenmeer geeignet. Mit einer Anzahl von 5 baugleichen Satelliten und einer Aufnahmebreite von 77 km erreicht das System eine potentielle Wiederholrate von einem Tag. Wegen technischer Einschränkungen (Schwenkzeit, Aufnahmekapazität) und der Firmenpolitik des derzeitigen Betreibers war diese für die letzte Phase des WIMO-Projektes auf nur 45 Tage beschränkt.

### 2.3.1 Stand der Technik

Die Eignung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren für die Klassifikation der Landoberflächen in Gezeitenzonen konnte in den letzten Jahrzehnten nachgewiesen werden. Dabei lag der Fokus vor allem in der Klassifikation von Sedimentarten, Salzwiesen und Muschelbänken mit einem oder auch zwei Sensortypen. Es zeigte sich, dass vor allem Radarsensoren sehr gut für die Ableitung von Muschelbänken geeignet sind und dass für die Nutzung von multispektralen Daten eine Aufnahme möglichst trockener Gelände (Niedrigwasser) erfolgen sollte. Van der Wal und Herman (2005) zeigten, dass eine Kombination von elektro-optischen Daten und Radardaten eine Verbesserung der Sedimenterkennung erzeugen. Dehouk et al. (2011) kombinierten ebenfalls optische Daten und Radardaten, wobei sie signifikante Radarsignaturen für Salzwiesen und Muschelbänke feststellten. Stelzer et al. (2010) sind bisher die einzigen, die mit einer sehr hohen Anzahl an Radarsensoren und optischen Sensoren gearbeitet haben. Die in WIMO untersuchte kombinierte Anwendung elektro-optischer Daten, Radardaten und Laserscannerdaten in Gezeitenzonen wurde bisher noch nicht durchgeführt. Choi et al. (2011) und Eom et al. (2012) beschreiben in ihren Studien die Möglichkeit, Laserscanningdaten zur Ableitung von Prielen und zur Ableitung geometrischen Informationen zur Sedimentklassifikation zu nutzen. Dabei kann durch den Prielverlauf auf die Sedimentart geschlossen werden. Die in WIMO untersuchte kombinierte Ableitung der Landoberfläche aus elektro-optischen Daten, Radardaten und Laserscannerdaten in Gezeitenzonen wurde bisher noch nicht durchgeführt.

### 2.3.2 Messungen, Analysen

Das TP 1.3 nutzte elektro-optische Daten der Deutschen Satellitenkonstellation RapidEye und zusätzlich die Radar und Laserdaten aus TP 1.4 und 1.2 für eine Multi-Sensor Analyse der Landbedeckung im Deutschen Wattenmeer. Das rote Rechteck in Abbildung 2 zeigt die geographische Lage des Untersuchungsgebiets. Die im Projekt WIMO beschafften und aufgenommenen Daten wurden in einem ersten Schritt einer Vorverarbeitung zur Verbesserung der Datenqualität unterzogen. Dabei wurde eine Fast Fourier Transformation und eine Minimum Noise Fraction Transformation auf die RapidEye Bilder angewendet. Da es sich bei der Analyse um multi-temporale Daten handelt, wurde noch eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Die Vorverarbeitung der Spektrometerdaten (Schwarzes und oranges Rechteck in Abbildung 2 zeigen die untersuchten Flächen) beinhaltet die Glättung der Detektorübergänge und eine radiometrische Korrektur. Nachfolgend wurden die Wasserabsorptionsbanden entfernt und eine Rauschglättung mit dem Savitzky-Golay Filter durchgeführt. Aufgrund von natürlichen Beleuchtungsänderungen wurde eine Min/Max-Normierung durchgeführt. Das Ergebnis sind normierte Werte zwischen 0 und 1, welche nicht mehr durch die Beleuchtungskriterien beeinflusst sind.

Mittels eines hierarchischen Entscheidungsbaums wurde das Wattgebiet in die Klassen Wasser, Muscheln, Sand, Schlick, Mischwatt, Salzwiesen und andere Vegetation unterschieden (Jung et al. 2015, Abbildung 6). Hierarchisch bedeutet, dass die Klassen unterschiedliche Prioritäten bei der

Zuweisungsreihenfolge besitzen. In jedem Schritt des Entscheidungsbaums wird eine Klasse zugewiesen, wobei die Klasse mit der höchsten Priorität anfängt. Pixel die bereits einer Klasse zugewiesen wurden und Klassenbeschreibungen die bereits angewendet wurden, werden in den darauffolgenden Schritten nicht mehr berücksichtigt. Die Klasse, die am genauesten zugeordnet werden kann, besitzen die höchste Priorität (Bsp.: Wasser) mit sinkender Priorität für Klassen die schwer zu klassifizieren sind (Bsp.: Schlick). Die elektro-optischen Daten wurden hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften, die Radardaten hinsichtlich ihrer Polarisierung und die Laserdaten hinsichtlich ihrer Höhenwerte auf die Anwendungsmöglichkeiten im Wattgebiet untersucht.

Weitergehend wurde analysiert, ob eine Kombination von Sensoren für eine Klasse einen Vorteil bringt. Der entwickelte Ansatz wurde auf vier verschiedene Zeitpunkte angewendet und die Übertragbarkeit der Parameterwerte untersucht. Aus den Ergebnissen konnte die Veränderungen des Wattenmeers zwischen April 2010 und Oktober 2011 aufgezeigt werden. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurden sie mit einer gängigen überwachten Klassifikation (random forest) verglichen, die als Referenzklassifikation diente. Als Trainings- und Validierungsdaten für die hierarchische Klassifikation (hierarchischen Entscheidungsbaum) und die Referenzklassifikation dienten zum einen in-situ Messungen aus dem DeMarine-Projekt, vom NLWKN, der Nationalparkverwaltung und eigene Messungen. Bedingt durch die nur einmalige Überlappung der Laserdaten mit den Daten von RapidEye, konnte nur eine Szene hinsichtlich der Sedimentklassifikation analysiert werden. Eine Übertragbarkeit des objektbasierten, hierarchischen Klassifikationsansatzes auf zwei weitere Szenen wurde untersucht und erfolgreich durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass dieser gewählte Ansatz mit sehr wenigen Anpassungen übertragen werden kann. In Hinsicht auf die Sedimentklassifikation konnten schlammige Gebiete besser als sandige Gebiete erkannt werden, was wiederum die Sedimentklassifikation aus der hierarchischen Klassifikation leicht verbessern konnte.

Mit einer eigens entwickelten Variablenselektion (Jung 2016) wurden die Sedimentspektren auf ihre Trennbarkeit hin untersucht. Hierbei war es wichtig, allgemein gültige Wellenlängen zu finden. Die wichtigsten Wellenlängen wurden extrahiert und in einer überwachten Klassifikation (random forest) validiert. Die Ergebnisse wurden mit einer populären Methode der Variablenselektion (ReliefF) verglichen und zeigen eine sehr hohe Genauigkeit auf.

### 2.3.3 Ergebnisse, Diskussion

Die Ergebnisse der hierarchischen Klassifizierung werden in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei werden die erzielten Gesamtgenauigkeiten (OA), Herstellergenauigkeiten (PA) und Nutzergenauigkeiten (UA) der Ergebnisse mit und ohne Laserdatenintegration und der Kontrollklassifizierung mit dem Random Forest-Verfahren (RF) dargestellt. In Grün sind die Werte angegeben, die höher als die Referenzklassifikation (random forest) liegen. Zum Beispiel sind die Gesamtgenauigkeiten des hierarchischen Klassifikationsansatzes (elektro-optische Daten und Radardaten) durchgängig höher als die der RF-Referenzklassifikation. Die unterstrichenen Wertebereiche zeigen eine Verbesserung in der hierarchischen Klassifikation im Vergleich zu einer Klassifikation ohne Laserdaten. Das bedeutet, dass die Nutzergenauigkeit von der Klasse Schlick der hierarchischen Klassifikation mit Laserdaten mit dem Wertebereich 20% - 50% höher ist als der Wertebereich der hierarchischen Klassifikation ohne Laserdaten (20%-28%). Trotzdem liegt er noch unter dem Wertebereich der Referenzklassifikation und ist somit in Rot dargestellt. Es zeigt sich, dass der Multisensor Ansatz in der Genauigkeit der einzelnen Klassen zum Großteil höher liegt als die Referenz. Vor allem die Klasse „Muscheln“ wird deutlich besser klassifiziert.

Tabelle 1: Klassifikationsgenauigkeit der Referenzmethode Random Forest, der hierarchischen Klassifikation mit und ohne Laserdaten (LiDAR). Details siehe Text.

| Random Forest                             |             |                |                  |                  |                |
|-------------------------------------------|-------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| OA [%]                                    | 56 - 66     |                | 62 - 78          |                  | 10 - 24        |
|                                           | <i>Sand</i> | <i>Schlick</i> | <i>Mischwatt</i> | <i>Salzwiese</i> | <i>Muschel</i> |
| PA [%]                                    | 62 - 75     | 10 - 23        | 54 - 72          | 63 - 94          | 11 - 52        |
| UA [%]                                    | 77 - 89     | 17 - 69        | 30 - 33          | 82 - 97          | 23 - 72        |
| Hierarischer Entscheidungsbaum ohne LiDAR |             |                |                  |                  |                |
| OA [%]                                    | 64 - 68     |                | 78 - 88          |                  | 33 - 41        |
|                                           | <i>Sand</i> | <i>Schlick</i> | <i>Mischwatt</i> | <i>Salzwiese</i> | <i>Muschel</i> |
| PA [%]                                    | 82 - 86     | 4 - 23         | 28 - 51          | 88 - 96          | 48 - 63        |
| UA [%]                                    | 76 - 80     | 20 - 28        | 37 - 42          | 80 - 95          | 48 - 54        |
| Hierarischer Entscheidungsbaum mit LiDAR  |             |                |                  |                  |                |
| OA [%]                                    | 64 - 71     |                | 78 - 88          |                  | 33 - 41        |
|                                           | <i>Sand</i> | <i>Schlick</i> | <i>Mischwatt</i> | <i>Salzwiese</i> | <i>Muschel</i> |
| PA [%]                                    | 82 - 86     | 23 - 42        | 28 - 46          | 88 - 96          | 48 - 63        |
| UA [%]                                    | 76 - 80     | 20 - 50        | 37 - 51          | 80 - 95          | 48 - 54        |

Schlechtere Ergebnisse werden in einzelnen Sedimentklassen erreicht, wobei nur der Wertebereich der Herstellergenauigkeit in der Klasse „Mischwatt“ deutlich schlechter ausfällt. Es besteht nur ein kleiner Unterschied in der Nutzergenauigkeit der Klasse „Salzwiese“. Insgesamt sind die Ergebnisse für die zusammen gefassten Sedimentklassen sowie für Salzwiesen vielversprechend, die Erkennung von Schlick und Mischwatt ist jedoch weitaus schwieriger, ebenso wie die sichere Klassifizierung von Muschelbänken.

Die Detektion von Wattrinnen / Prielen und ihrer geometrischen Information konnte mit einer recht hohen Genauigkeit durchgeführt werden (72%-92% bzw. 90%-100%). Sogar sehr kleine Prielstrukturen konnten erkannt werden.

Tabelle 2 führt den Mittelwert der Gesamtgenauigkeit für die Trennung von Sedimentspektren mittels aller verfügbaren Wellenlängen (Raw), der entwickelten Variablenselektion ( $J_P$  und  $J_R$ ) und der Referenz ( $R_P$  und  $R_R$ ) auf. Es zeigt sich, dass die entwickelte Methode ähnlich hohe Genauigkeiten erreicht wie die Referenz. Der Vorteil ist jedoch die Rechenzeit von 60 min. Die Referenzmethode brauchte auf derselben Hardware ca. 4 Tage um ein Ergebnis zu erzeugen. Die Ergebnisse zeigen, dass Sedimente mit einer hohen Genauigkeit klassifiziert werden können, jedoch werden spezifische Wellenlängen benötigt, die RapidEye mit seiner spektralen Auflösung nicht abdeckt.

Tabelle 2: Gesamtgenauigkeit für die Trennung der Sedimente mittels Spektrometerdaten und Variablenselektion

| Random Forest |           |                |                |                |                |           |                |                |                |                |
|---------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2013          |           |                |                |                |                | 2015      |                |                |                |                |
| Durchlauf     | Raw       | R <sub>p</sub> | R <sub>R</sub> | J <sub>p</sub> | J <sub>R</sub> | Raw       | R <sub>p</sub> | R <sub>R</sub> | J <sub>p</sub> | J <sub>R</sub> |
| 1             | 68        | 84             | 89             | 78             | 68             | 93        | 93             | 93             | 93             | 100            |
| 2             | 73        | 84             | 78             | 89             | 63             | 100       | 100            | 100            | 80             | 100            |
| 3             | 68        | 79             | 73             | 73             | 73             | 80        | 93             | 86             | 73             | 86             |
| Mittelwert    | <b>69</b> | <b>82</b>      | <b>80</b>      | <b>80</b>      | <b>68</b>      | <b>91</b> | <b>95</b>      | <b>93</b>      | <b>82</b>      | <b>95</b>      |

## 2.4 Satellitengetragene Radarsysteme

Satellitengetragene Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR) „beleuchten“ die Erdoberfläche aktiv mit kurzen, von einer Radarantenne abgestrahlten Impulsen elektromagnetischer Wellen. Der von der Oberfläche des Beobachtungsgebietes reflektierte Signalanteil wird als Radarecho von der Antenne empfangen, aufgezeichnet und zur Ortung und Vermessung des Zieles nach Amplitude, Frequenz, Phase, Polarisation und Laufzeit des Signals verarbeitet (Holpp & Klausning, 2000). Dabei ermöglicht die SAR-Technologie eine wesentliche Verbesserung der geometrischen Auflösung in Flugrichtung, indem die Echos der während des Überfluges abgestrahlten Radarimpulse derart verrechnet werden, als wären sie von einer Reihe von Einzelantennen entlang der Flugbahn aufgezeichnet worden, wodurch eine „synthetische“ Verlängerung der eigentlichen Antenne erzielt wird. Die Rückstreuung des Radarsignals ermöglicht eine zweidimensionale Abbildung des überflogenen Gebietes und liefert wichtige Informationen über Rauigkeit, geometrische Struktur und elektrische Eigenschaften der Oberfläche. Zusätzlich können polarimetrische Aufnahmen die Unterscheidung verschiedener Streumechanismen, Geometrien und Materialeigenschaften der aufgenommenen Objekte ermöglichen, indem deren unterschiedlichen Rückstreuereigenschaften bei horizontal (HH) bzw. vertikal (VV) polarisierten Signalen untersucht werden (Choe et al. 2012, Lee et al. 2012, Gade et al. 2015).

Im Teilprojekt 1.4 wurden Aufnahmen des Satelliten TerraSAR-X verwendet, der seit 2007 in einer Höhe von 514 km arbeitet. Aufnahmen des TerraSAR-X sind unabhängig von Bewölkung und Tageslicht möglich, was einen großen Vorteil für die erreichbare Datendichte darstellt. Der hochfrequente (9,6 GHz) X-Band Sensor mit einer Wellenlänge von 3,1 cm ermöglicht Aufnahmen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 1 m im „High Resolution Spotlight“ Modus mit einer Bildgröße von 5 km x 10 km bis hin zu 18 m räumlicher Auflösung im sogenannten „ScanSAR“ Modus mit einer Aufnahme von 100 km x 150 km (Fritz & Eineder, 2010). Die Wiederholrate für Bilder gleicher Aufnahmegeometrie beträgt 11 Tage. Bilder unterschiedlicher Orbits können häufiger aufgenommen werden. Mit dem Partner-Satellit TanDEM-X, der seit 2010 in Formation mit TerraSAR-X fliegt, erhöht sich nicht nur die Aufnahmekapazität, es werden auch zusätzliche Methoden wie 3D-Aufnahmen, along-track oder polarimetrische Interferometrie ermöglicht.

### 2.4.1 Stand der Technik

Seit dem Start der Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X (X-Band), der COSMO-SkyMed Satelliten-Konstellation (X-Band) und Radarsat-2 (C-Band) liefert eine neue Klasse hochauflösender SAR-Sensoren Bilder mit einer Auflösung im Meterbereich, die zunehmend relevant für die Untersuchung und das Monitoring von Wattenmeerhabitaten und geomorphologischen Strukturen im Gezeitenbereich werden.



Die Untersuchungen zur Anwendung der SAR-Aufnahmen zur Erkennung von Oberflächen spezifischer Rauigkeit im Gezeitenbereich insbesondere zur Unterscheidung und Klassifizierung von Sedimenten (Van der Wal et al. 2005; Gade et al. 2008, Dehouck et al. 2011), Muschelbänken (Dehouck et al. 2011, Kim et al. 2011, Choe et al. 2012, Gade et al. 2015, Nieuwhof et al. 2015) und Salzwiesen (Lee et al. 2012) sind unterschiedlich weit fortgeschritten und müssen weiter untersucht werden. Den Nutzen der SAR-Daten als Input für synergistische multi-sensorale Ansätze für die Fernerkundung der Watten stellen z.B. Stelzer (2010), Dehouck et al. (2011), Gade et al. (2014) und Jung (2015) dar.

Mit dem Ziel, topographische Karten der Wattflächen zu erstellen und die Entwicklung der Watten und Rinnen zu verfolgen, wurden Methoden zur Erkennung von Wasserlinien als Abgrenzung der Wattflächen von sublitoralen Bereichen, Prielen und des überfluteten Watts, von Niedermeier et al. (2005), Heygster et al. (2010), Mason et al. (2010), Li et al. (2014) und Wiehle et al. (2015) erprobt.

#### 2.4.2 Messungen, Analysen

Für den Zeitraum 2011 bis 2015 wurde für das Hauptuntersuchungsgebiet, die Norderneyer Wattflächen, insgesamt 53 Spotlight bzw. High Resolution Spotlight-Aufnahmen (Azimuth Auflösung 1,7 bzw. 1 m) von TerraSAR-X beschafft. Zusätzlich wurden vier Stripmaps (Azimuth Auflösung 3,3 m) aus dem Katalog und 3 Spotlight-Aufnahmen für die Jahre 2008-2009 bezogen. Für Vergleichsgebiete in anderen Bereichen des Wattenmeeres wurden 27 Spotlights aufgenommen und 7 Stripmaps aus dem Katalog bestellt. Die Aufnahmen wurden als Geokodierte Ellipsoid-korrigierte (GEC, Geocoded Ellipsoid Corrected) Intensitätsbilder bezogen, die mit dem Ziel spatio-temporalen Analysen und zum Abgleich mit in-situ- und Monitoringdaten direkt in ein Geographisches Informationssystem (GIS) übertragen werden konnten. Um die Vergleichbarkeit der mit unterschiedlichen Aufnahmegeometrien erfassten Satellitenbilder zu gewährleisten, wurden die Daten mit ERDAS (Earth Resource Data Analysis System) kalibriert. Damit entsprechen die Grauwerte der Pixel der vom Sensor aufgezeichneten Radarrückstreuung aus dem Gelände. Mittels visueller Bildinterpretation wurden die Satellitenaufnahmen auf die Abbildbarkeit für das Watt charakteristischer Habitats und Oberflächenstrukturen wie Muschelbänke, Schill- und Schlickfelder, Senken und Restwasserflächen sowie Prielsysteme und geomorphologischer Oberflächenstrukturen hin untersucht. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Geländeuntersuchungen durchgeführt, bei denen Lage und Abgrenzungen der betrachteten Oberflächen mit GPS und hochgenaue Positions- und Höhenmessungen mit RTK-DGPS (Real Time Kinematik Differential-GPS) eingemessen wurden. Oberflächeneigenschaften wurden protokolliert und mit GPS-Kameras photographisch dokumentiert. Teilweise fanden die in-situ-Erhebungen synchron zu den Satellitenaufnahmen statt, um die Interpretationsergebnisse abzusichern, z.B. für Wasserlinien, Wasserflächen und Wattoberflächen, deren Erscheinung sich mit dem Wasserstand und den (vorausgegangenen) Wetterbedingungen wandelt.

Für die Darstellung der für die Rückseitenwatten der ostfriesischen Inseln charakteristischen Bodenformen, die durch einen Wechsel langgezogener Sedimentrücken im Wechsel mit wassergefüllten Senken gekennzeichnet sind, wurde ein Verfahren entwickelt, das die automatisierte Vektorisierung der wassergefüllten Bereiche ermöglicht. Der Ablauf führt über eine Kombination kantenerhaltender Filter zur Speckle Reduzierung (Frost et al. 1982, Shi & Fung 1994, Pratt 2007) über eine einfache Texturanalyse statistischer Parameter nach Haralick et al. (1973) zu einer unüberwachten ISODATA Klassifikation (Tou & Gonzalez 1974). Mithilfe der erzielten Klassifikationsergebnisse konnte im Rahmen des integrativen Projektes IP9 (Kapitel 7) am Beispiel Norderney die Dynamik dieser Bodenformen von 2009 bis 2015 untersucht werden.

#### 2.4.3 Ergebnisse, Diskussion

Die Auswertung der TerraSAR-X Aufnahmen mit den Mitteln der visuellen Bildinterpretation in Kombination mit Geodaten aus in-situ-Erfassungen und Monitoringdaten zeigt, dass charakteristische

Habitats und Oberflächenstrukturen des Gezeitenbereiches erfasst und in den Intensitätsbildern erkennbar abgebildet werden. Durch die unterschiedlich starke Rückstreuung und deren Textur in den Satellitenaufnahmen lassen sich z.B. Muschelbänke, Schill- oder Schlickfelder, Senken und Restwasserflächen sowie Prielsysteme und geomorphologischer Oberflächenstrukturen unterscheiden, sowie ihre Position und Ausdehnung bestimmen (Abbildung 6) Die geographische Lage des gesamten Untersuchungsgebietes für die TSX Daten zeigt das grüne Rechteck in Abbildung 2.

Auch die Wasserlinie, die Abgrenzung der trockenliegenden Wattflächen von sublitoralen Bereichen, Prielen, Restwasser- oder überfluteten Wattflächen wird lagegetreu abgebildet und kann zur Erstellung topographischer Karten der Wattgebiete und zur Abschätzung der Entwicklung von Wattflächen und Rinnen dienen.

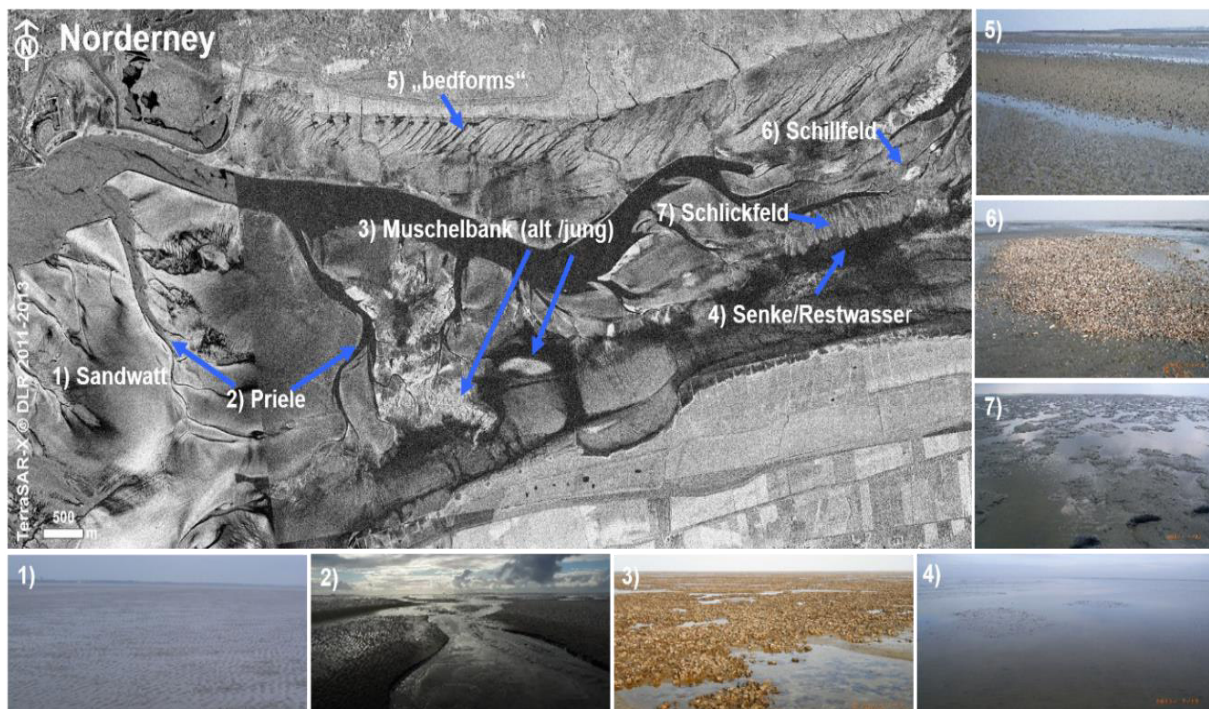


Abbildung 6: TerraSAR-X Aufnahme von Oberflächenstrukturen und Habitats auf Wattflächen zwischen Norderney und dem Festland so wie zugehörige in-situ Aufnahmen . Das in der Satellitenaufnahme dargestellte Gebiet umfasst 4,7 km x 12,2.

Mithilfe der SAR-Aufnahmen lassen sich saisonale Veränderungen wie auch Entwicklungen über mehrere Jahre beobachten. So zeigen sich z.B. Rückstreuintensität und Ausdehnung des mehr als einen Kilometer langen und 200-300 m breiten Schlickfeldes nahe der Wattwasserscheide (Bild 7 in Abbildung 6 und oranges Rechteck in Abbildung 2) in nach dem Winter aufgenommenen Satellitenbildern schwächer ausgeprägt als in Aufnahmen aus dem Sommer. Geländeerfassungen nach dem Winter bestätigten eine weniger mächtige Schlickauflage mit glatterer Oberfläche im Vergleich zum vorangegangenen Sommer. Auch die mehrjährige Entwicklung im Umfeld des Schlickfeldes bildet sich in den Fernerkundungsdaten ab (Abbildung 7): Von 2009 bis 2014 entsteht südöstlich des Schlickfeldes (Position 1) aus einer dichten Ansiedlung des Bäumchenröhrenwurms (*Lanice conchilega*) eine ausgedehnte und feste Bank aus Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) und Pazifischen Austern (*Crassostrea gigas*), im südwestlichen Bereich (Position 2) entsteht aus einzelnen Muschelbulten von 2009 bis 2011 eine lockere Muschelbank, die sich 2014 wieder auf ihren Zentralen Bereich reduziert hat und die in 2011 permanent wasserbedeckte Senke (Position 3) ist 2014 zwischen den beiden Muschelbänken fast vollständig von kleinen Muschelhäufchen und Schlickbuckeln durchsetzt. Die wattseitige Abgrenzung des Schlickfeldes zur Senke unterliegt leichten Veränderungen, dagegen bleibt die Lage der Hauptpriele im Schlickfeld weitgehend stabil (Abbildung 7).

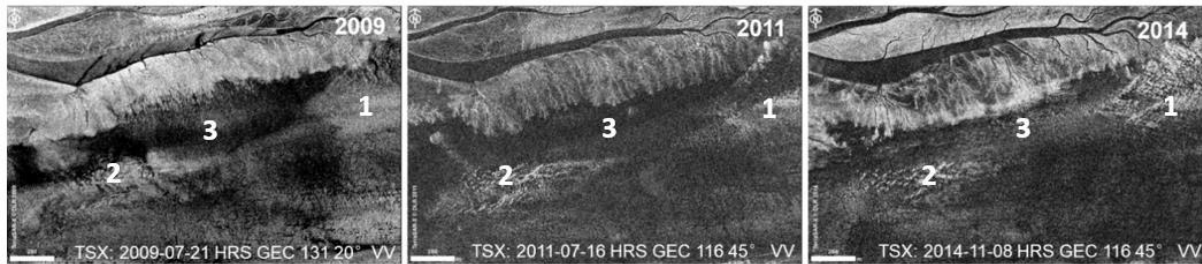


Abbildung 7: Entwicklung der Muschelbesiedlung im Neßmer Watt in TerraSAR-X Aufnahmen 2009, 2011 und 2014. Der Ausschnitt der Satellitenaufnahme zeigt einen Bereich von 1,5 km x 2,3 km nahe der Wattwasserscheide im Norderneyer Rückseitenwatt (7 in Abbildung 6). Die Geographische Lage wird durch das orangene Rechteck in Abbildung 2 repräsentiert.

Anhand der Klassifikationsergebnisse der wassergefüllten Rinnen, die die langgestreckten morphologischen Oberflächenstrukturen der Inselwatten markieren, konnte für Norderney die Dynamik von 2009 bis 2015 untersucht werden wobei durch die Auswertung der TerraSAR-X Daten erstmals eine Verlagerung dieser Strukturen nach Osten dargestellt werden konnte (Adolph et al. 2016 subm.). Aussagen über die Genese dieser Bodenformen und treibende Faktoren ihrer Dynamik konnten im Rahmen dieses Projektes nicht ermittelt werden und gehen über die Möglichkeiten der Fernerkundung weit hinaus. Grundsätzlich werden derartige Oberflächen als Effekte von Strömungen oder Wellen in Zusammenspiel mit Sedimentbeschaffenheit und weiteren Faktoren gesehen und könnten im Hinblick auf den Sedimenthaushalt der Inselwatten von Interesse sein.



Abbildung 8: Verlagerung der wassergefüllten Senken nach Klassifikationsergebnissen von Daten des TerraSAR-X von 2009-2014. Das untersuchte Gebiet im Inselwatt von Norderney (5 in Abb. 4) umfasst 0,6 km x 1,7 km. Die geographische Lage wird durch das magentafarbene Rechteck in Abbildung 2 gezeigt.

Das Beispiel der Bodenformen im Norderneyer Rückseitenwatt demonstriert das Darstellungspotential von SAR-Aufnahmen in Bezug auf geomorphologische Strukturen der Wattflächen, die durch Ansammlung von Restwasser gekennzeichnet sind. Damit werden nicht nur langfristige sondern auch saisonale oder ereignisbezogene Untersuchungen ermöglicht, die das Verständnis für die morphologische Entwicklung der Wattflächen und ihrer Entwässerungssysteme vertiefen können.

Die Ergebnisse von TP 1.4 zeigen, dass Satelliten-SAR Aufnahmen mit räumlichen Auflösungen im Meterbereich für das Monitoring charakteristischer Habitate und Oberflächenstrukturen die durch ihre spezifische Rauheit und deren Texturen gekennzeichnet sind, gut geeignet sind. Durch die weitgehende Unabhängigkeit von Tageslicht und Wetter sind häufige Erfassungen möglich, so dass

zeitliche Entwicklungen und auch die Effekte von Extremereignissen beschrieben und dokumentiert werden können. Die automatisierte Klassifikation und Abgrenzung der für das Wattenmeermonitoring wichtigen Habitate und Strukturen wie auch die Nutzung polarimetrischer Daten sollte weiter verfolgt werden.

## 2.5 Schlussfolgerungen, Bewertung, Monitoring-Konzepte

Die fernerkundlichen Arbeiten zur Habitatkartierung und Klassifikation im Eulitoral wurden entsprechend der Projektvorgaben durchgeführt. Für Laserscan-Daten wurden Algorithmen zur besseren Differenzierung von Morphologie und Sediment entwickelt. Dabei hilft die stärkere Automatisierung im Rahmen von Zeitserienvergleichen, um detaillierte Aussagen zur räumlichen Veränderung morphologischer Elemente, insbesondere der Priele, treffen zu können. Die automatische Land-Wasser-Trennung und die Detektierung von Muschelbänken konnte optimiert werden. Ergebnisse sind in den Publikationen von Schmidt et al. (2015, 2014a, 2014b, 2013a, 2013b, 2013c) veröffentlicht.

Die SAR-Daten des Radarsatelliten TerraSar X bilden strukturierte Wattoberflächen, Habitate und Wasserflächen/-linien sehr gut ab (Adolph & Farke 2015, Adolph et al. 2016 subm.). Eine Aufnahme erfasst ein ganzes Gezeitenbecken oder mehr, dadurch kann die Verteilung von Habitaten und die Entwicklung der Geomorphologie großflächig erfasst und bewertet werden. Die häufigen Überflüge und die Unabhängigkeit von Tageslicht und Wetter ermöglichen eine hohe Dichte der Erfassungen. Die Daten der neuen Radar- und optischen Satelliten (Sentinel 1, 2, 3) sind kostenfrei.

Die intensiven in-situ Erfassungen bilden die erforderliche Basis für die Analyse der hochauflösenden Laserscan- und Satellitendaten und deren Interpretation und Verifizierung.

Insbesondere die Zusammenführung der Laserscannerdaten mit den Fernerkundungsdaten der optischen und Radarsatelliten bedeutet einen wesentlichen Schritt zur Optimierung der Erfassungen hinsichtlich ihrer Anwendung für zukünftige Monitoringstrategien (Jung 2016; Jung et al. 2015; Jung & Ehlers 2014a; Jung, Ehlers & Klonus 2013b). Die Stärken der einzelnen Verfahren sollten zu einem räumlich (Auflösung) wie zeitlich (Häufigkeit der Erfassungen, Kosten) gegliederten Konzept führen. Mit der Integration der Daten von TP 1.2, 1.3 und 1.4 wurde damit in WIMO begonnen, dieser Ansatz sollte weiter untersucht und verfeinert werden.

Die gesamten Ergebnisse wurden auf ihre Verwertbarkeit hinsichtlich der Umsetzung von EG-Richtlinien, wie der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL), der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH) hin überprüft und die Anwendungsmöglichkeiten für die Beschreibung der Deskriptoren (MSRL), Qualitätskomponente (WRRL) und Lebensraumtypen (FFH) dargestellt. Dazu gehörte auch die aktive Beteiligung bei der Entwicklung von Kartierleitfäden für die verschiedenen Habitate im Rahmen der BLANO-Aktivitäten und deren Arbeitsgruppen.

In die WIMO-Monitoring Kennblätter (siehe Anhang) sind folgende Konzepte aus dem Themenbereich Fernerkundung eingegangen: „Morphologische Erfassung (DGM)“, „Hochgenaue Klassifikation und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten“ und „Langzeiterfassung eulitoral Oberflächenstrukturen und Habitate mittels Radarsatelliten-Fernerkundung“.

## 2.6 Ausblick

Die Fernerkundung ist ein prominentes Beispiel für die erfolgreiche Verbindung von Konzepten für wissenschaftliche Beobachtungen, insbesondere für „Long Term Ecological Research“ und

behördliches Monitoring. Einerseits bieten Satellitenbilder die Möglichkeit, großflächig und - im Fall von Radaraufnahmen - ohne Einschränkungen durch Beleuchtungs- und Wetterverhältnisse Daten aufzunehmen. Andererseits liefert die Verbindung mit hoch auflösenden Sensoren wie Laserscannern und in-situ-Aufnahmen die benötigten Informationen auch in dem notwendigen Detailreichtum und der erforderlichen geometrischen Genauigkeit. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die Qualität der Ergebnisse durch die Kombination unterschiedlicher, komplementärer Sensoren gesteigert werden kann. Daneben hat der Automationsgrad der Datenverarbeitung inzwischen ein relevantes Maß erreicht, beispielsweise werden Laserscannerdaten praktisch vollautomatisch ausgewertet. Allerdings sind auch manuelle Verfahren der Datenanalyse nach wie vor notwendig, wie die Arbeiten zur Radarbilddauswertung deutlich gemacht haben. Auch hier ist in WIMO mit der Automatisierung der Auswertungen begonnen worden.

Die Fernerkundung bildet nach den erzielten Ergebnissen ein brauchbares Werkzeug zum Monitoring der deutschen Bucht. Weiterentwicklungen sind bei der Nutzung höherer geometrischer Auflösungen (etwa der optischen Satellitendaten im 1 m Bereich) statt der hier verwendeten RapidEye Daten mit einer Auflösung von ca. 5 m zu erwarten. Gleichzeitig erscheint eine Untersuchung der im Rahmen des Programms Copernicus kostenlos verfügbaren Sentinel Daten der Europäischen Gemeinschaft lohnenswert, da diese nicht nur eine höhere spektrale Auflösung, sondern insbesondere auch eine höhere zeitliche Auflösung besitzen. Auf diese Art lassen sich die in dem Projekt nur am Rande verfolgten Zeitreihenanalysen systematischer durchführen und Synergieeffekte für die Aufgaben des wissenschaftlichen Monitorings ausloten.

Als Schwerpunkte einer weiteren Entwicklung der Fernerkundung im eulitoralen Watt werden vorgeschlagen:

- Weiterführung der Integration unterschiedlicher Sensoren in einem räumlich – zeitlichen Konzept,
- Weiterführung und Weiterentwicklung der automatisierten Analysen,
- Anpassung der Fernerkundung im eulitoralen Watt an neue Sensoren und Techniken, z.B. Sentinel 1, 2, 3.



### 3. Hydroakustische Methoden im Habitatmonitoring

A. Bartholomä (SaM), R. Capperucci (SaM), C. Hass (AWI), I. Kröncke (SaM), F. Mielck (AWI), H.C. Reimers (LLUR)

#### 3.1 Einleitung

Habitate sind die anhand spezifischer abiotischer und biotischer Faktoren sowie anthropogener Einflüsse räumlich abgrenzbaren Lebensräume von Arten. Ihr Zustand und ökologische Wertigkeit muss im Rahmen verschiedener Direktiven wie Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH), Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) festgestellt werden. Eine wesentliche Aufgabe kommt dabei zunächst der flächendeckenden Erfassung unterschiedlicher Habitate zu. Gebiete auf dem Festland, und in den trockenfallenden Bereichen der Küstenzonen sind durch direkte Messungen und fernerkundliche Methoden zugänglich. Im Sublitoral, den ständig unter Wasser liegenden Bereichen der Gezeitenküsten, werden neben der klassischen direkten Probenahme für abiotische (Sedimente) und biotische (Makrobenthos) Parameter zunehmend schiffsgestützte hydroakustische Verfahren eingesetzt. Im Rahmen des Projektes wurden Ergebnisse mehrerer hydroakustischer Habitatkartierungen für zukünftige Monitoring-Konzepte ausgewertet und bewertet, um

- a) die Art und Weise der technischen Konfigurationen verschiedener Messsysteme/Ansätze auf ihre Homogenisierung hin beurteilen und entsprechend konfigurieren zu können,
- b) die systembedingten Limitierungen (Auflösung, Abtastbreiten etc.) in Bezug auf die Ergebniserwartung für die einzelnen Habitate berücksichtigen zu können,
- c) Habitatdynamik und Messartefakte kritisch in Beziehung zu setzen und
- d) auf der Basis der Zeitserien aus den verschiedenen Referenzgebieten die Grundlage und Eingangsparameter für die Habitatmodellierung und deren Validierung zu liefern.

#### 3.2 Methoden

Die flächendeckende sublitorale Habitatkartierung basiert auf der Verschneidung von hydroakustischen Messungen mit sogenannten „Ground Truth“ Daten (Beprobung der Habitate und Videoaufnahmen). Die hydroakustischen Messungen erfolgten mit verschiedenen Sonarsystemen, die an Bord der Schiffe fest installiert („hull mounted“) oder geschleppt eingesetzt wurden. Allen Systemen gemein ist die Aussendung eines Schallsignals, dessen vom Boden rückgestreutes Restsignal wieder aufgenommen wird. Die Art der Auswertung von Rückstreusignalen ist systemabhängig. So wird entweder die gesamte Wellenform des Rückstreuechos (bei Vertikalloten) oder Intensitäten des Rückstreuechos aus den gewinkelten Abtastsystemen (bei Seitensichtsonaren oder Fächerecholoten) für die Beschreibung von Eigenschaften von Seeböden herangezogen. Die Akquise und Speicherung hydroakustischer Daten wird weltweit mit Hilfe verschiedenster Software-Pakete umgesetzt. Aufgrund der jeweils systemspezifischen Software lassen sich nicht alle Optionen mit jeder Systemkonfiguration verknüpfen. Es gibt also systembedingte Beschränkungen, die sich zum Teil in der Qualität der Daten niederschlagen und die Vergleichbarkeit einschränken können.

Nach einer Prozessierung werden die hydroakustischen Rohdaten durch manuell-visuelle und/oder durch algorithmenbasierte halb- oder vollautomatisierte Verfahren klassifiziert. Durch Verschneidung mit den Ground-Truth-Daten aus Bodenproben und Videodaten werden alle Informationen in einer interpretierten Habitatkarte zusammengeführt. Diese Informationen werden dann in Form von elektronischen Karten (in raster- bzw. vektorbasierten Dateiformaten) katalogisiert (Abbildung 9).

In WIMO wurden verschiedene Fächerecholote, Seitensichtsonare und Einstrahlote mit zum Teil integrierten Klassifizierungswerkzeugen eingesetzt. Alle verwendeten Geräte sind für den Flachwassereinsatz bis etwa 100 m Wassertiefe optimiert: Die verwendeten Arbeitsfrequenzbereiche liegen im Spektrum von 100 bis 1000 kHz (Tabelle 3).

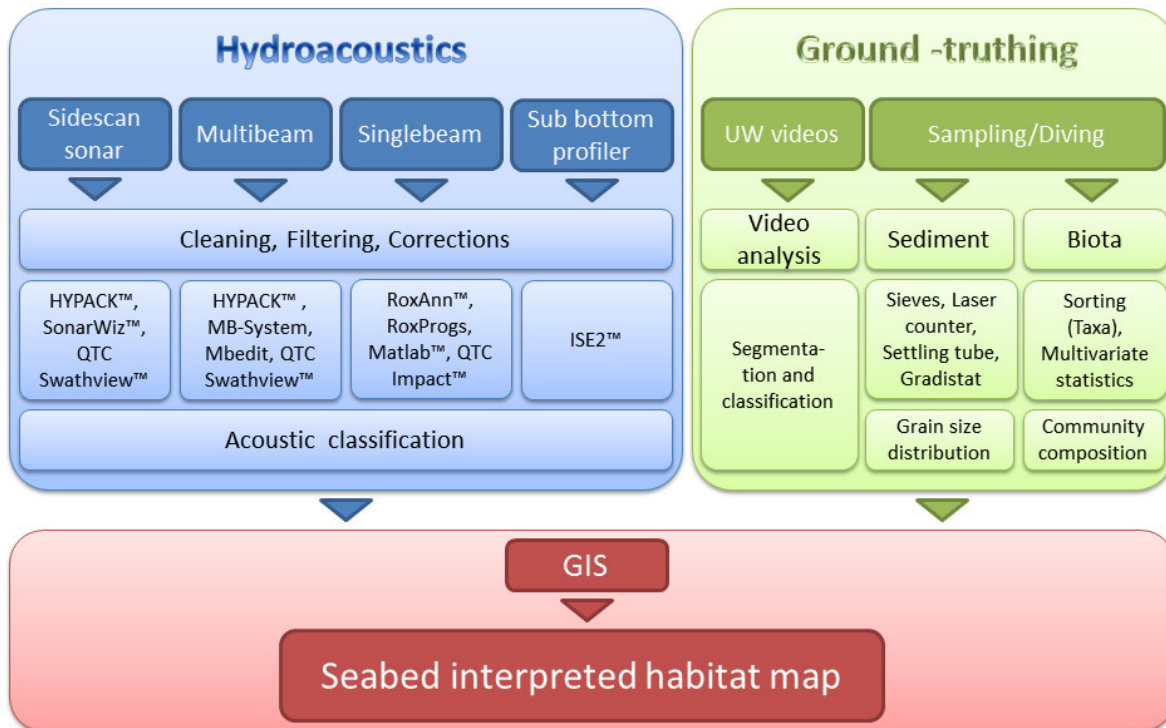


Abbildung 9: Workflow zur Habitatklassifizierung des Meeresbodens

Die Positionierung und Georeferenzierung der Daten wurde mit GPS-Systemen unterschiedlicher Ortsgenauigkeit durchgeführt. Nach Möglichkeit wurden sogenannte LRK (Long Range Kinematik)- bzw. RTK (Real-Time Kinematik) Systeme eingesetzt, die räumliche Genauigkeiten von unter einem Dezimeter erlauben.

Das „Ground Truthing“ erfolgte durch Bodengreifer mit standardisiertem Volumen und verschiedenen Videosystemen. Bildgebende Verfahren können nur im Bereich der offenen Nordsee eingesetzt werden, da in Küstennähe und im Wattenmeer durch Schwebstoffe im Wasser nur geringste Sichtweiten möglich sind. Die Messungen von Daten in der Wassersäule wie Schallgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit und Richtung, Temperatur und Salzgehalt erfolgten mit Schallgeschwindigkeitssonden (SVP), akustischen Strömungs-Doppler-Profilern (ADCP) und Multiparametersonden (Temperatur, Druck, Leitfähigkeit (CTD)).

Im Teilprojekt TP1.1 wurden Messungen von mehreren Schiffen aus gleichzeitig durchgeführt, um einerseits möglichst viele verschiedene Systeme testen zu können und andererseits jegliche Beeinflussung durch variierende Messbedingungen wie Temperatur, Schwebstoffgehalt und Oberflächenänderung des Seebodens etwa durch saisonale Schwankungen auszuschließen. Gezeitenbedingte Veränderungen dagegen konnten nicht ausgeschlossen werden.



Tabelle 3: Eingesetzte Hardware von Fächerecholoten (MBES), Seitensichtsonaren (SSS), Einstrahlloten (SBES), Positionierung und „Ground Truth“-Systemen

| ACOUSTIC SYSTEM                          | FREQUENCY       | MAX SWATH/<br>BEAM ANGLE (horizontal x vertical)                                | SYSTEM RESOLUTION               |
|------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Benthos 1642 Sidescan sonar              | 100/400 kHz     | 100kHz: 500 m/0.5° x 55°<br>400kHz: 250 m/0.5° x 35°                            | n/a                             |
| EdgeTech<br>4200 Sidescan Sonar          | 300/600 kHz     | 300kHz: 400 m/0.5° x 50°<br>600kHz: 200 m/0.45° x 50°                           | 1.3 m<br>> 0.45 m               |
| Imagenex YellowFin 872<br>Sidescan Sonar | 260/330/800 kHz | 260kHz: 200 m/2.2° x 75°<br>330kHz: 200 m/1.8° x 60°<br>800kHz: 50 m/0.7° x 30° | 0.5 m<br>0.125 m<br>n/a         |
| Tritech StarFish 990F<br>Sidescan Sonar  | 1000 kHz        | 1000kHz: 35 m/0.3° x 60°                                                        | < 1 cm                          |
| Tritech StarFish 452F<br>Sidescan Sonar  | 450 kHz         | 450 kHz: 200 m/ 0.8°x60°                                                        | 2.5 cm                          |
| Furuno FCV1000 with QTC<br>View 5.5      | 200/50 kHz      | 7.4° beam angle                                                                 | depends on water depth          |
| AGDS Sonavision<br>RoxAnn GD-X           | 50/200 kHz      | 17% of water depth/10°                                                          | depends on water depth          |
| AGDS Seatronic Echoplus                  | 20-230 kHz      | 8-10° beam angle                                                                | depends on water depth          |
| Innomar SES-2000, parametr.<br>Echolot   | 6/100 kHz       | n/a                                                                             | n/a                             |
| Kongsberg EM710 Multibeam                | 40-100 kHz      | 550% of water depth/140° x 1°                                                   | Vertical resolution in cm-scale |
| Reson 8125 Multibeam                     | 455 kHz         | 400% of water depth/120° x 0.5°                                                 | Vertical resolution in cm-scale |
| POSITIONING SYSTEM                       |                 | GROUND-TRUTH                                                                    | SYSTEM RESOLUTION               |
| D-GPS                                    |                 | Shipek Grab Sampler, 0.04 m <sup>2</sup>                                        | 20 x 20 cm                      |
| RTK-Positionins system<br>Trimble 852    |                 | HELCOM Grab Sampler, 0.1 m <sup>2</sup>                                         | ca. 30 x 30 cm                  |
| LRK-Positioning system Thales            |                 | GoPro Hero3+ underwater camera                                                  | 1920 x 1080 pixel               |
| POSMV Applanix 320-Motion<br>sensor      |                 | GoPro Hero4 underwater camera                                                   | 3000 x 4000 pixel               |
| ISEA Octans 5 Motion sensor              |                 | Kongsberg OE1366 underwater camera                                              | 640 x 480 pixel                 |

### 3.3 Untersuchungsgebiete

In den Teilprojekten wurden hydroakustischen Verfahren, visuelle Systeme und Sediment- und Benthosprobenahmen kombiniert und in verschiedenen Untersuchungsgebieten angewendet. Zusätzlich wurden Daten aus anderen Projekten zusammengeführt, die verschiedene Habitat-Typen in unterschiedlichen Stabilitätszuständen repräsentieren. Die Gebiete reichen von der offenen Nordsee bis in das Eulitoral (Bereich zwischen Hochwasser- und Niedrigwasserlinie) der Küstenzone.

Das Untersuchungsgebiet westlich von Kampen/Sylt weist ein hochdynamisches, sandiges bis feinkiesiges Habitat mit drei Makrofaunagemeinschaften auf (Markert et al. 2013, Mielck et al. 2015). Die Gebiete um Helgoland hingegen sind durch einen felsigen Untergrund gekennzeichnet, der teilweise von Makroalgen besiedelt wird. Mit Hilfe von hydroakustischen Verfahren konnte nördlich von Helgoland die Besiedelungsdichte innerhalb der Kelpwälder bestimmt werden (Mielck et al. 2014). Die Gebiete östlich von Helgoland weisen Sedimente der sandig-feinkiesigen Fraktion mit Geröllen im Nordosten (Steingrund) bis zu sandigen-feinsandigen, teils schlickigen Material im Südosten auf. Das weiter südlich gelegene Küstenvorfeld von Spiekeroog ist neben grobkiesigen bis hin zu siltigen Sedimenten durch ein einzigartiges Relief von „Zungenriffe“ gekennzeichnet, mit welchem die Makrofaunagemeinschaften in enger Beziehung stehen (Markert et al. 2015).

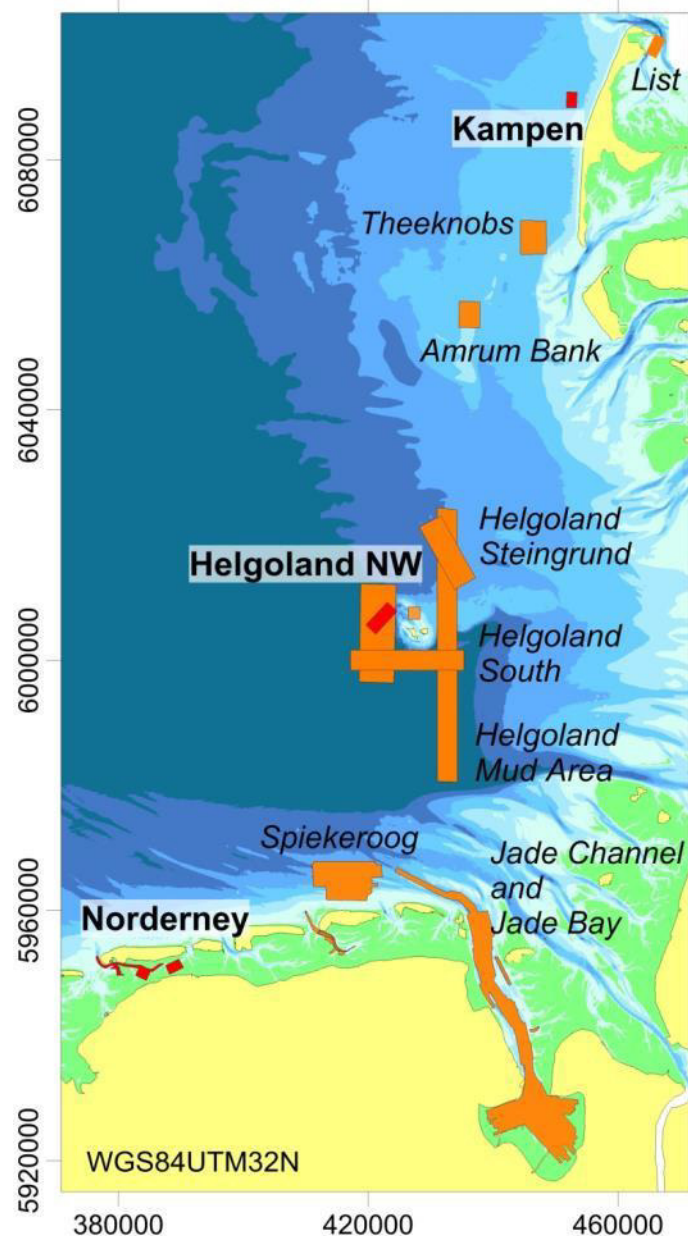


Abbildung 10: Untersuchungsgebiete in der hydroakustischen Habitatkartierung in WIMO – Ergebnisse im Abschlussbericht stammen aus den rot markierten Gebieten rund um Helgoland, westlich von Kampen und aus dem Rückseitenwatt von Norderney.

Die Gebiete der ostfriesischen Inseln mit den Seegatten und den Rückseitenwatten sind durch hochdynamische Umlagerungen der Sande und Schlicke gekennzeichnet, in diesen Bereichen unterliegen die Lebensgemeinschaften ständigen Veränderungen (Herrling & Winter, 2014; Herrling &

Winter, subm). Insbesondere die Ebb-Deltas sowie die Eingänge der Seegatten weisen kaum langfristige Besiedlungsstrukturen auf. Im Bereich der Jade und des Jadebusens findet man Sande und Schlicke sowie zum Teil am Boden anstehende kiesige Reliktsedimente, die teilweise stark durch anthropogene Eingriffe gekennzeichnet sind.

Im äußeren Teil der Jade wirken sich insbesondere die Eingriffe im Rahmen der Erstellung des Hafens Jade-Weser-Port und die morphologischen Veränderungen des Seebodens auf die Makrofauna aus (Gutperlet et al. 2015, subm).

Neben der erstmaligen Erfassung und Kartierung einzelner Gebiete und ihrer Bewertung durch unterschiedliche Mess- und Klassifizierungsverfahren wurden auch Wiederholungsmessungen, sogenannte Zeitserien-Messungen, durchgeführt um einige Gebiete auf ihre Veränderungen hin zu untersuchen. Eine detaillierte Auflistung der Systeme und durchgeführten Arbeiten während einer Fahrt ist beispielhaft in Tabelle 4 dargestellt.

Eine besondere Herausforderung in WIMO bestand in der Erprobung der hydroakustischen Methoden im unteren Eulitoral (zeitweise trockenfallende Gebiete) der Rückseitenwatten. Dazu wurden projektübergreifend mit Kollegen aus den Projekten der Fernerkundung (TP 1.2 bis 1.4) sowie mit dem kommerziellen Unternehmen MILAN gemeinsame Feldkampagnen im Rückseitenwatt der ostfriesischen Insel Norderney durchgeführt. Im Rahmen einer gemeinsamen Messkampagne wurden Daten der verschiedenen Methoden in einem Zeitfenster von nur drei Wochen aufgenommen. Anschließend erfolgte eine Analyse ihrer systemspezifischen Auflösung und der individuellen Möglichkeiten zur Identifizierung spezifischer Habitatparameter. Insbesondere lag auch hier (wie in den hydroakustischen Verfahren) der Fokus auf der Ausweisung von Oberflächenrauheiten, topographischen Strukturen und Trennzonen zwischen freiliegenden und überfluteten Gezeitenflächen.

Tabelle 4: Auszug aus dem Messdatenprotokoll am Beispiel einer Ausfahrt im Gebiet NW-Helgoland

| Helgoland Steingrund July 2014                                                                                                   | System                  | Frequency                            | Swath / Beam angle  | Max horiz. resol./footp | Complete coverage?           | Coverage     | # of profiles        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|
| Ping rate: 3 pings/s v=4kn, 0.686 m/ping<br><br>In field track resolution:<br>20m:2*20tg0.25°=0.174m<br>200m:2*200tg0.25°=1.745m | \$\$\$ Benthos 1624     | LF: 110, 130 kHz<br>HF: 370, 390 kHz | 400 m               | (see box in yellow)     | Y                            | 42.9 sq km   | 9                    |
|                                                                                                                                  | Furuno 200B-8B+ QTC 5.5 | 200 kHz                              | 7.4°                | 4.7-7.9 sqm             | N                            | 99 km        | 9                    |
| In field across track resolution: 1024 samples/channel => 200m/1024=0.195m/pixel                                                 |                         |                                      | System              | Doam                    | Analysis                     | Total length | # of samples/vid eos |
|                                                                                                                                  | UW Videos               |                                      | Analog/GoPro Hero 3 | Video, Photos           | Video analysis               | 3.2 km       | 9                    |
|                                                                                                                                  | Sediment samples        |                                      | Shipek grab sampler | Photos                  | Sieving, Settling, Sedigraph |              | 33                   |

### 3.4 Ergebnisse, Diskussion

Für die Bewertung von Habitatdaten und die Erstellung von Karten sind Informationen über die Qualität der Daten von hoher Wichtigkeit. Systemrelevante Daten wie Abtastfrequenz, Auflösung, Georeferenzierung und Aufnahmebedingungen (Wetter/Seegang) müssen dokumentiert sein. Wurden Daten mit verschiedenen Systemen erstellt, besteht die Frage nach der Vergleichbarkeit. Allgemein muss die Reproduzierbarkeit der Messungen stets gegeben sein. Im WIMO lag daher ein Fokus auf dem Systemvergleich. Darüber hinaus stellte sich die Frage nach dem Einfluss abiotischer und biotischer Faktoren auf die Hydroakustik. Bezüglich der Veränderlichkeit von Habitaten war die

Durchführung von Zeitserienmessungen von besonderer Bedeutung. Dies wird hier an ausgewählten Beispielen dargestellt, und gilt stellvertretend für alle Untersuchungsgebiete.

### 3.4.1 Systemvergleich

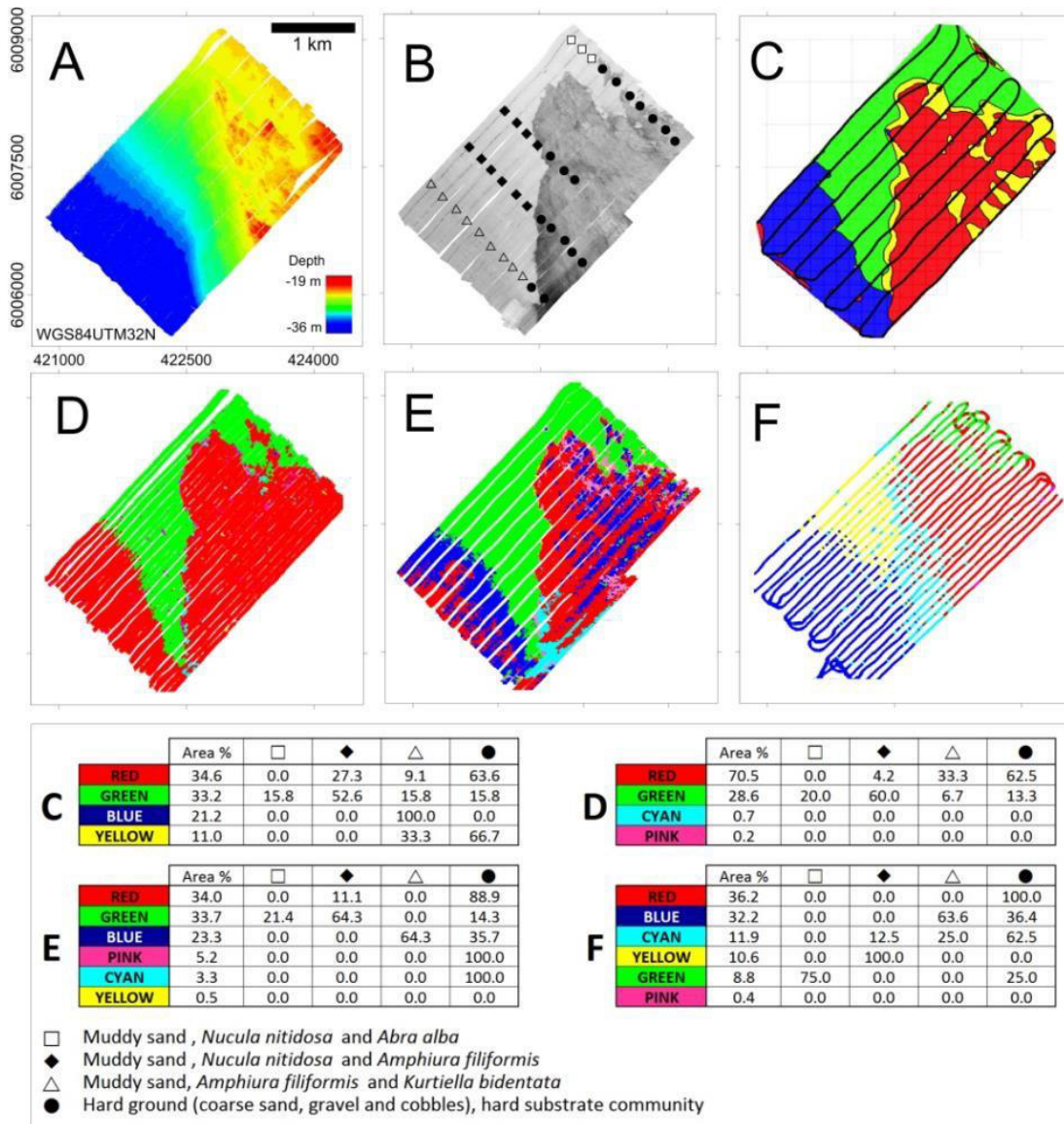


Abbildung 11: Vergleich verschiedener hydroakustischer Systeme und ihrer Prozessierungsmethoden am Beispiel der Diagnosefläche NW-Helgoland mit den in Farben ausgewiesenen klassifizierten Flächenanteilen – mit (A) Tiefenverteilung (Bathymetrie) aus Fächerecholotdaten Reson 8125; (B) Mosaik der Rückstreudaten (100 kHz) und den „Ground Truth“-Bodenproben; (C) Einstrahlrot (SBES) RoxAnn mit (FCA) Seebodenklassifizierung (AGDS Sonavision RoxAnn GD-X); (D) QTC-Swathview – Seebodenklassifizierung auf der Basis von Rückstreudaten des Fächerecholotes (MBES) Reson 8125; (E) QTC-Swathview – Seebodenklassifizierung auf der Basis von Rückstreudaten des Seitensichtsonars Benthos 1624; (F) Einstrahlrot Furuno FCV 1000 (200 kHz)+QTC5.5 mit Seebodenklassifizierung QTC Impact; Die in (B) dargestellten Symbole der Bodenprobenlokationen zeigen die bereits ausgewerteten Sedimenttypen und wesentlichen Makrobenthosarten.

In der ersten Phase des Projektes standen der Vergleich verschiedener Hardware-Komponenten und deren Konfiguration im Vordergrund. Die einzelnen Messsysteme wurden zum Teil zeitgleich oder in sehr kurzen Zeitabständen hintereinander von verschiedenen Schiffen auf gleichen Gebieten eingesetzt. Der Systemvergleich am Beispiel NW-Helgoland (Abbildung 11 und Abbildung 12) zeigt ein Gebiet, das Änderungen des Bodenreliefs (Abbildung 11A), der Sedimente und auch der Makrofauna aufweist, die den Meeresboden besiedeln (Abbildung 11B). Alle Systeme zeigen zunächst die gleiche

grobe großräumliche Trennung von zwei Gebieten, die sich im Seitensichtsonar (SSS)-Mosaik in den unterschiedlichen hellen und dunklen Grautönen (Abbildung 11B) darstellen.

Die dunklen Grauwertbereiche kennzeichnen eine starke Rückstreuung, was auf ein deutlich härteres und raueres Bodenrelief hindeutet. Die höchste Übereinstimmung zwischen Systemen wird mit 85 Flächenprozent der Klassifizierung zwischen RoxAnn (Fuzzy-Clustering-Analyse, „FCA“) (Abbildung 11C) und SSS QTC Swathview (Abbildung 11E) erreicht. In diesem Fall steht die Klasse „Rot“ für eine raue und gleichzeitig harte Bodenoberfläche, die in diesem Fall ein steinig/felsiges Habitat repräsentiert. Die Klasse „Grün“ weist eine glattere und weichere Bodenoberfläche aus, die hier sandiges bis zum Teil schlickiges Bodensubstrat widerspiegelt. Innerhalb dieser groben Unterteilung zeigen die Systeme jedoch Unterschiede in der Flächenausweisung, die um ca. 10% abweichen können. Während innerhalb des großen zentralen Bereiches im Osten die Systeme RoxAnn (Abbildung 11C) und SSS QTC Swathview (Abbildung 11E) weitere Details ausweisen, ist dies in den anderen Verfahren nicht zu sehen. Dagegen strukturiert die QTC Impact Klassifikation (Abbildung 11F) den Übergangsbereich von felsigen zum sandigen Bereichen stärker. Hier lassen sich mit drei Unterklassen die Übergangszonen in einer Fläche ausweisen, die zusammengefasst adäquat zu der Fläche der beiden anderen Verfahren ist. Wenig Details sind aus den Rückstreudaten des Fächercholots (Abbildung 11D) und des *Echoplus* zu erkennen, obwohl hier aufgrund der vorliegenden Tiefendaten eine deutlich bessere Identifikation zu erwarten wäre. Dies gilt auch durchaus für andere Untersuchungsgebiete.

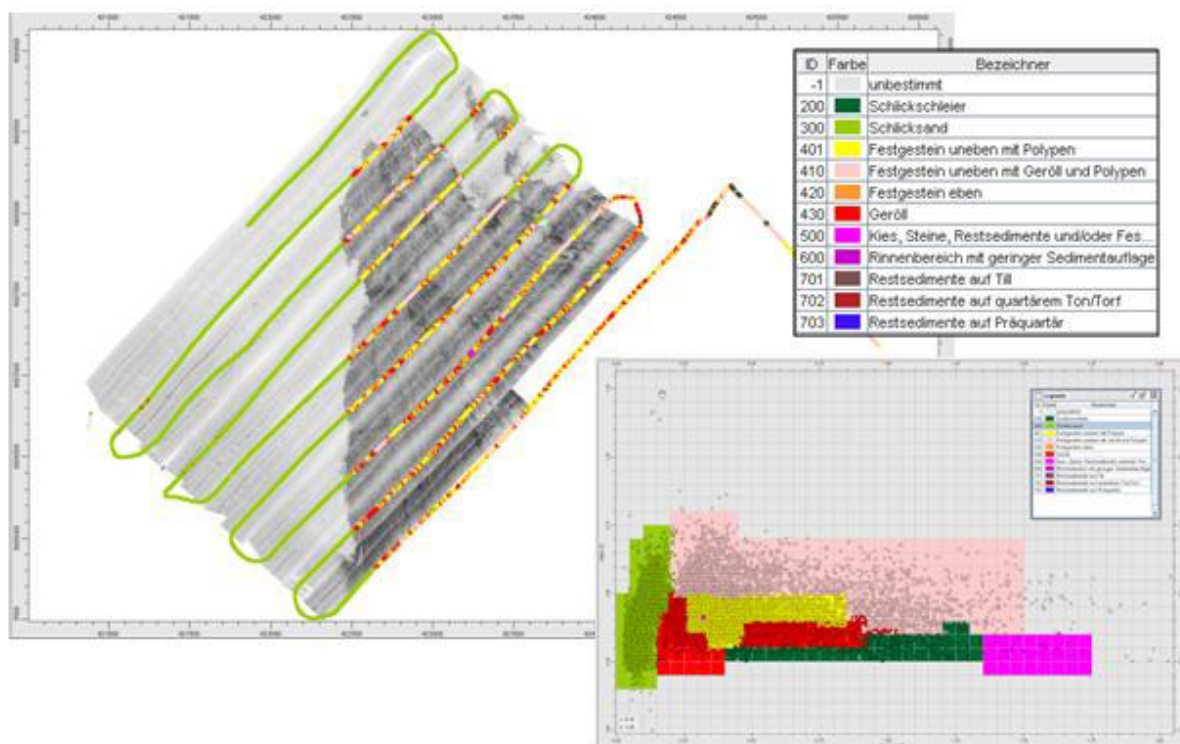


Abbildung 12: Sedimentklassifizierung (farbig) für das Gebiet „NW Helgoland“ mit dem System *Echoplus* (links Trackplot, rechts Rauheit-Härte-Diagramm). Auf dem Trackplot ist das Seitensichtsonar-Mosaik des Senckenberg Instituts hinterlegt.

Wissenschaftlich interessant ist die Differenzierung des südwestlichen Teils des Untersuchungsgebietes. Während bei den Rückstreudaten des Fächerlots (Abbildung 11D) keine unterschiedlichen Klassen ausgewiesen werden können, zeigen das Seitensichtsonar und die Einstrahlplot basierten Systeme hier eine räumliche Differenzierung in Unterklassen. Während das Seitensichtsonar hier noch zwei Klassen klassifizieren kann (Abbildung 11E), zeigen die Einstrahlote zumindest den gesamten Bereich (Abbildung 11C, F). Die „Ground Truth“-Daten in diesem Gebiet

wiesen keine deutlichen Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung auf. In diesem Falle wurde das akustische Signal von dichter Besiedlung von Schlangensterne beeinflusst (s. Kapitel 3.4.2).

Als weiterer Schritt wurden die Ergebnisse der im operationellen behördlichen Routinemonitoring des LLUR eingesetzten Systeme *Echoplus* mit Klassifizierungssoftware Jedi™ (für Einstrahlecholot Daten) sowie das Seitensichtsonar Starfish 451F mit denen der Projektpartner des TP 1.1 abgeglichen. Die vom LLUR eingesetzte Messgerätekombination wird während der Ausfahrten zumeist simultan eingesetzt. Dabei beruht die Klassifizierung der *Echoplus*-Daten, ähnlich wie beim System RoxAnn auf der Analyse des 1. und 2. vom Meeresboden rückgestreuten Signals. Hieraus werden Werte für die Rauheit und Härte der Sedimente und Besiedlungen generiert. Beim Seitensichtsonar werden dagegen die Rückstreustärken (backscatter) zur Klassifizierung herangezogen.

Beim Abgleich des Sedimentklassifizierungssystems *Echoplus* des LLUR mit den hydroakustischen Daten der anderen Partner wurden während der Projektlaufzeit deutliche Fortschritte erzielt. Dies belegt der unten dargestellte Vergleich der Jedi-Klassifizierung aus den Einstrahlecholotdaten mit dem Seitensichtsonar-Mosaik (SaM) für die Diagnosefläche NW-Helgoland (s. Abbildung 12).

### 3.4.2 Einfluss von Makrofaunabesiedlung auf die Hydroakustik

Der Einfluss von Makrofaunabesiedlung wie z.B. von Schlangensteinen oder Muscheln auf die Hydroakustik ist häufig nur indirekt abzulesen. Bei den Einstrahlloten (RoxAnn, Furuno/QTC-View und *Echoplus*) werden sowohl direkte Reflektionen als auch Sekundärechos und deren Wellenform genutzt, um - über Härte und Rauheit - scharf umgrenzte von weichen eher schwach abgegrenzten Übergängen zu unterscheiden. In Verbindung mit der relativen Tiefeninformation sind Fauna und/oder Flora aufgrund der dazu im Verhältnis deutlich weicheren Rückstreuung identifizierbar (z.B. Mielck et al. 2014). Im Gegensatz dazu sind im Seitensichtsonar über die flächige Darstellung häufiger die räumlichen Verteilungsmuster von Besiedlungsflächen zu erkennen. Die Höhe dieser Strukturen lässt sich nur bedingt aufgrund der veränderten Tiefeninformation ablesen. Hohe Dichten von weichen Organismen flach über dem Boden erhöhen das Rückstreusignal, wobei ohne zusätzliche Informationen von Signalmustern nicht bewachsener Flächen diese Habitate nicht eindeutig zu identifizieren sind. Das Beispiel von NW-Helgoland zeigt die Veränderung des akustischen Signals aufgrund räumlich dicht auftretender Schlangensterne (*Amphiura filiformis*) mit mehr als 1500 Individuen/m<sup>2</sup> (Markert 2015). Diese Organismen strecken ihre Arme einige Zentimeter in die Wassersäule, sodass in diesem Falle mehr als 6000 Arme/m<sup>2</sup> die akustische Rückstreuungsintensität und damit die Grauwerte verändern (Abbildung 13). Die Erhöhung der Rückstreuungsintensität in Seitensichtsonar-Aufnahmen nach Südwesten hin korreliert dabei sehr gut mit der zunehmenden Individuenzahl in den Bodenproben (Abbildung 13F). Ein Einfluss des Sedimentes kann dagegen ausgeschlossen werden, da sich die Sedimentzusammensetzung der Sande und Schlicke sowie deren Mischsedimente nur geringfügig und nicht gerichtet verändert (Abbildung 11B; Abbildung 13B). Eine ähnliche räumliche Verteilung und den Einfluss der Biologie zeigen die Daten aus den mit RoxProcS analysierten RoxAnn-Einstrahllootdaten (Abbildung 13C und G).

Eine recht enge Sediment-Benthos-Beziehung zeigt sich im Untersuchungsgebiet Kampen (Abbildung 14A; Abbildung 14C). Mit Hilfe von Seitensichtsonaren konnten zwei eindeutige Habitatklassen bestimmt werden (Markert et al 2013, Mielck et al. 2015). Dabei handelt es sich um gerippte Mittel- bis Grobsandflächen (Class 2, grün), welche von Feinsandgebieten (Class 1, rot) umgeben sind. Die Begrenzungen zwischen diesen sogenannten „Sorted Bedforms“ (Murray and Thieler, 2004) zu den benachbarten Feinsandgebieten verlaufen meist scharf. Aus den Benthosdaten ließ sich eine dritte Lebensgemeinschaft an der Übergangszone von den tiefer liegenden gröberen Sedimenten zu den höher liegenden feineren Sedimenten ausweisen. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass kleinräumige Übergänge zwischen Makrofaunagemeinschaften nicht immer durch hydroakustische

Methoden deutlich aufgelöst werden können (Markert et al., 2013). Während die Übergangszonen in den Seitensichtaufnahmen (Abbildung 14D in blau) nicht besonders deutlich werden, können diese mit dem Bodendiskriminierungssystem RoxAnn (Rauigkeit/Härte) detektiert werden (Abbildung 14A und Abbildung 14B).

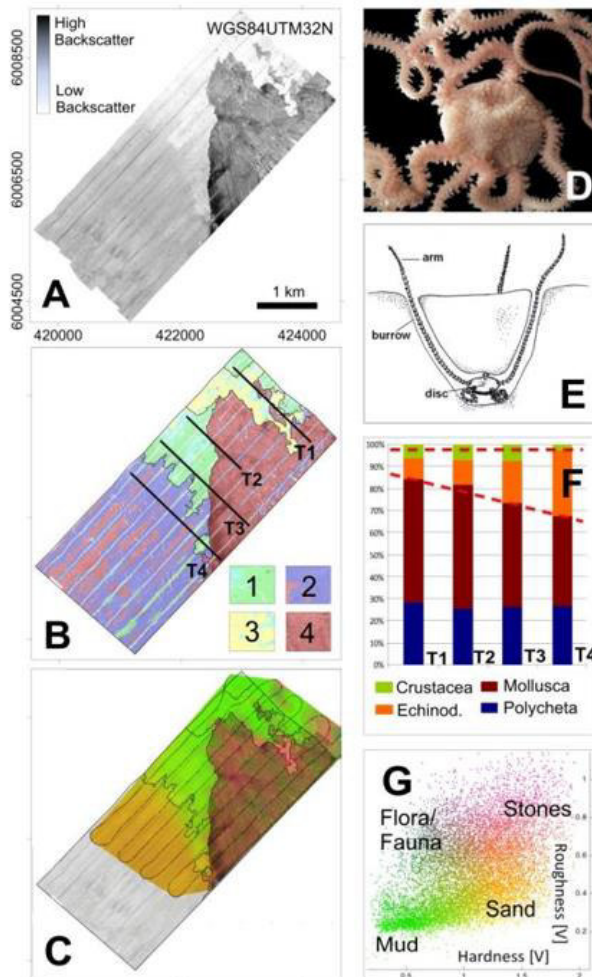


Abbildung 13: Der Einfluss von benthischer Fauna auf die Rückstreuungsintensität von Schlangensterne *Amphipora filiformis* (D;E) mit unterschiedlichen Abundanzen (F) im Gebiet NW Helgoland – auf das Rückstreusignal im Seitensichtsonar (A); und dessen klassifizierten Bodentypen (B) sowie auf das Einstrahlrot RoxAnn (C) und dessen Klassifikation über Rauigkeit und Härte (G).

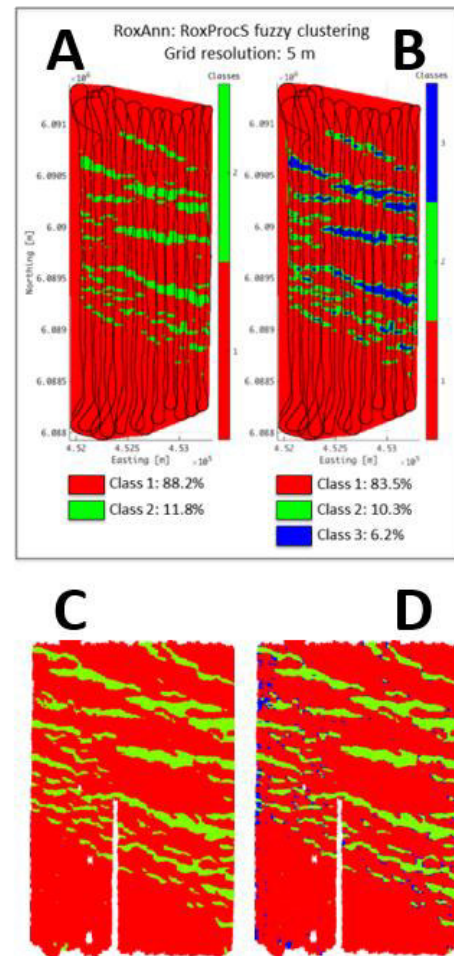


Abbildung 14: Klassifizierung des Gebietes westlich Kampens: (A) RoxAnn-„Fuzzy Clustering“ in zwei Klassen; (B) RoxAnn- „Fuzzy Clustering“ in drei Klassen; (C) SSS-SwathView – 2 Klassen; (D) SSS-SwathView – 3 Klassen-Beide Verfahren weisen die beiden Hauptsedimente (Rot und Grün) aus (A und C). Die aus den Bodenproben ermittelte Randbesiedlung (D: in blau; B: in grün) wird erst bei einer 3-Klassen-Auswertung sichtbar (B und D).

### 3.4.3 Morpho- und Sedimentdynamik am Meeresboden: Darstellung mit Hilfe von hydroakustischen Zeitserien

Die Beschreibung großräumiger Veränderungen des Meeresbodens durch wiederholte hydroakustische Vermessungen ist bereits vielfach auch vor Projektbeginn erfolgt (z.B. Bartholomä 2006, Wienberg & Bartholomä 2005). Im Rahmen der Vermessungen der TP 1.1-Arbeitsgebiete während der WIMO-Projektphase, konnten nun auch erstmals die bereits erwähnten „Sorted Bedforms“ im Vorfeld von Kampen bezüglich ihrer Dynamik intensiv untersucht werden (Mielck et al. 2015).

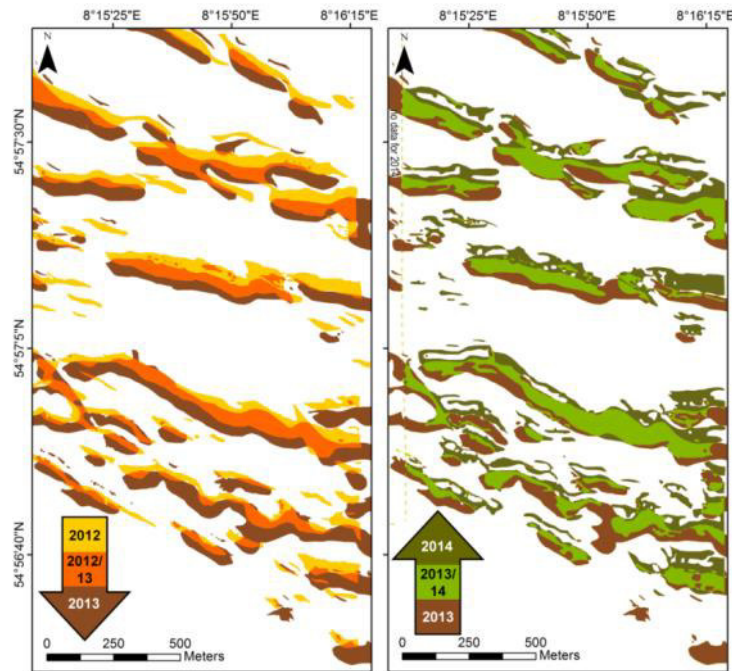


Abbildung 15: Zeitserien zu den Sedimentumlagerungen der sog. „Sorted Bedforms“ westlich Kampen auf der Basis von Seitensichtsonar-Messungen – Während von 2012 bis 2013 eine südliche Verlagerung zu beobachten war (links), ändert Ende 2013 die Transport Richtung nach Norden

Dabei wurde besonders auf die Datenreproduzierbarkeit der vor allem mit Seitensichtsonaren erlangten Daten geachtet. Die Rückstreudaten zeigten hier eine starke Bewegung des feinen Sedimentes, das das konsolidierte Reliktsediment der letzten Vereisung überdeckt. Bei der Ermittlung der Transportrichtungen wurde deutlich, dass es insbesondere im Winter des Jahres 2013 zu starken Veränderungen kam (Abbildung 15). Obwohl es zunächst anders erscheint, bleibt festzuhalten, dass sich nicht etwa die „Sorted Bedforms“ selbst bewegen, sondern dass es die Verlagerungen des angrenzenden Feinsandes sind, die Grobsandbereiche entweder freilegten oder wieder bedeckten. Flachseismische Aufnahmen aus diesem Gebiet zeigen, dass die Feinsande nur eine maximale Mächtigkeit von etwa einem Meter aufweisen. Ein eindeutiger Wandertrend der auch als Wanderfeinsande bezeichneten Sedimente konnte jedoch nicht festgestellt werden. Vielmehr scheinen die Positionen der „Sorted Bedforms“ relativ stabil zu bleiben, während sich der Feinsand je nach windgetriebenen Strömungsanteilen in Richtung Norden bzw. nach Süden verlagert (siehe Pfeile in Abbildung 15). Zwar können auch Tidenströmungen in solchen küstennahen Flachwassergebieten eine große Rolle spielen, jedoch weist die symmetrische Form der „Sorted Bedforms“ auf ein tidenbedingtes Strömungsregime mit entgegengesetzten Ebb- und Flutströmungen von gleicher Stärke hin. Ähnlich wie bei früheren Arbeiten kommen Mielck et al. (2015) für den küstennahen Bereich zu der Schlussfolgerung, dass umfangreichere Mobilisierungen von Feinsanden nur bei Starkwindereignissen stattfinden. Dafür sprechen auch die großen Veränderungen zwischen den



Jahren 2013 und 2014. In diesem Zeitraum zogen zwei Orkane („Xaver“ und „Christian“) über das Untersuchungsgebiet. Diese Starkwindereignisse scheinen sich auch in der Größe und Ausrichtung der Rippelmarken in den Grobsandgebieten zu manifestieren. Warum allerdings über den gesamten Untersuchungszeitraum die Bewegungen in beide Richtungen ähnliche Transportraten aufweisen, konnte nicht abschließend geklärt werden.

### 3.4.4 Hydroakustik im Eulitoral

Der Einsatz hydroakustischer Methoden im Eulitoral stellt in zweifacher Hinsicht eine Herausforderung dar: Zum einen sind Wassertiefen von weniger als 3m für den Einsatz schiffsgestützter hydroakustischer Systeme technisch grenzwertig und der Einsatz von Fächerecholoten und Seitensichtsonaren aufgrund der Frequenz und der Abtastbreite unwirtschaftlich.

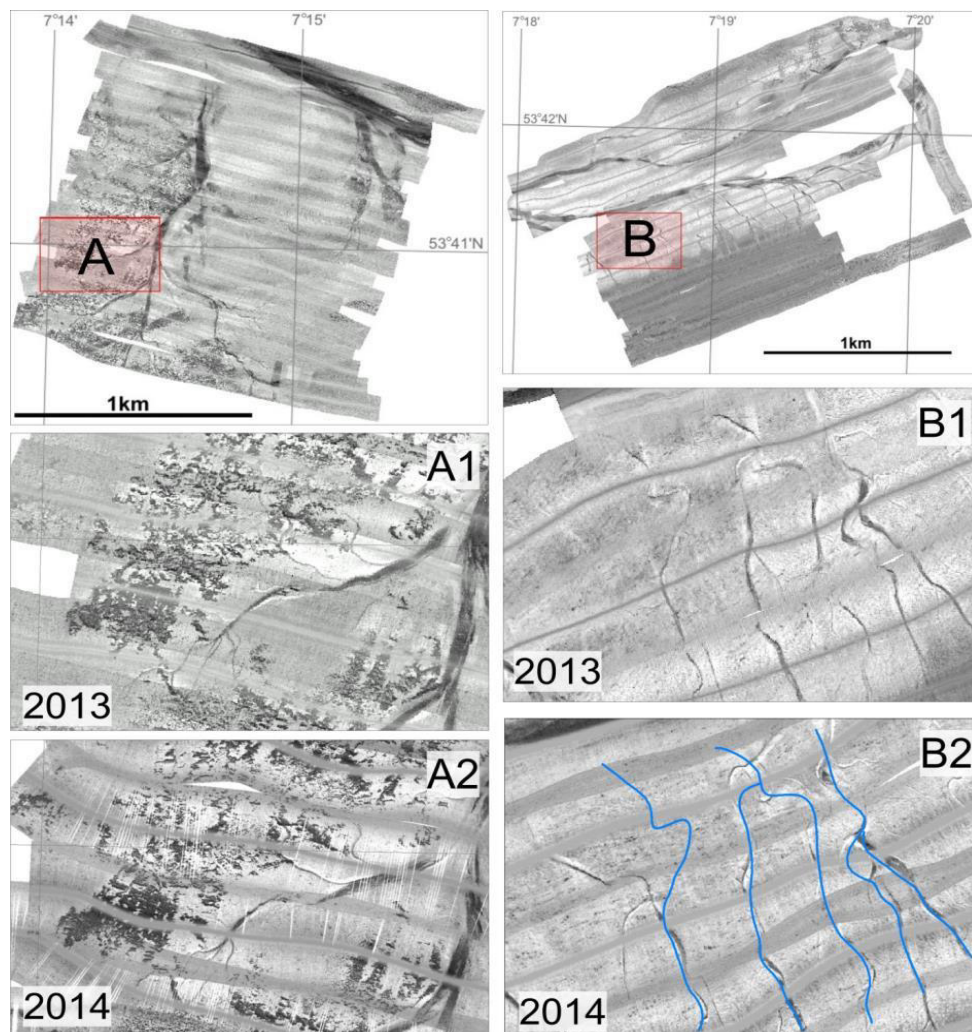


Abbildung 16: Zeitserie von Seitensichtsonarmessungen im Rückseitenwatt der Insel Norderney (siehe dazu Abb.3.2-1) (A) Teilfläche Luetetsburger Plate subregion; (B) Norderneyer Plate – Die Verlagerung der Priele (B2) wird durch die Markierung des Systems von 2013 als blaue Linien in der Aufnahme von 2014 deutlich

Andererseits stoßen luft-basierenden Fernerkundungssysteme in diesen Gebieten ebenfalls an ihre Grenzen. Lassen sich die über Niedrigwasser freiliegenden Flächen noch mit größerem Aufwand erfassen (s. TP 1.2 bis 1.4, sowie Kapitel 6) so bleibt der Übergang ins obere Sublitoral diesen Verfahren aufgrund der starken Wassertrübung durch Schwebstoffe verwehrt. Die trockenfallenden Wattflächen selbst bereiten den gebräuchlichen Fernerkundungsmethoden ebenfalls Probleme. So ist in Abhängigkeit von Sedimentzusammensetzung und Wassersättigung sowie durch

Oberflächenstrukturen die Wattfläche immer wieder teilweise mit Wasser bedeckt. Die auftretenden Oberflächenreflexionen erschweren oder verhindern oft eine eindeutige Identifikation von Eigenschaften der eulitoraler Habitats.

Im Rahmen von WIMO wurde in Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten erstmalig ein Seitensichtsonar auf solchen Arealen in gemeinsamen synoptischen Feldmessungen eingesetzt (Abbildung 16). Die während Hochwasser mit einer Abtastbreite von bis 50m in Wassertiefen von 0.7 m bis 2.5 m befahrenen Areale zeigen in den Rückstreumosaiken sehr detailliert die Oberflächenstrukturen. Komplette Entwässerungssysteme und unterschiedliche Grauwertmuster sind erkennbar. Die besonders kontrastreichen Strukturen im Teilgebiet (A1 und A2 in Abbildung 16) konnten als Miesmuschelbänke identifiziert werden. Auch auf der Teilfläche B1 bzw. B2 (Abbildung 16) B2 findet man kleinere sehr dunkle Grauwerte, die die dort ansässigen Muschelcluster repräsentieren. Diese treten hier allerdings mit feineren Sedimenten auf und verursachen dadurch weichere Kontrastübergänge. Topographische Veränderungen wie die Umlagerung von Prielen lässt sich ebenfalls aus den Sonarbildern der Wattfläche in der Nähe der Wattwasserscheide am östlichen Ende von Norderney ableiten (Abbildung 16B1; B2). Die blauen Linien in Abbildung 16/B2 zeigen die Verlagerung der Rinnen von 2013 im Vergleich zu der dort gezeigten, aktuellen Aufnahme von 2014. Typische Phänomene wie das Kappen von Mäandern, gekoppelt mit einer nach Osten orientierten Entwässerung charakterisieren dieses Zeitfenster.

### 3.5 Schlussfolgerungen, Bewertung, Monitoring-Konzepte

Hydroakustische Methoden ermöglichen die großflächige Kartierung benthischer Habitats mit geringem Zeitaufwand. Eine Kalibrierung der hydroakustischen Klassifikationen durch Probennahmen („Ground-Truth“) für eine Habitatkartierung ist immer unerlässlich, da die hydroakustischen Methoden für sich alleinstehend nicht eindeutig kalibrierbar sind und aufgrund ihrer wassertiefenabhängigen Abtastfenster („Footprint“) kleinräumige Veränderungen in den benthischen Gemeinschaften und deren Strukturen nur begrenzt auflösen können. Bei entsprechender Besiedlungsdichte und spezifischen biologischen Strukturen der Gemeinschaften können die hydroakustischen Signale deutlich beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Messungen verschiedener Habitats zeigen, dass bei hydroakustischen Vermessungen immer ein Vertikalot mit einem zur Flächenabtastung geeigneten System kombiniert werden sollte. Die automatisierte Ergebnisauswertung ist aufgrund der verschiedenen Auswertungsansätze und der bisher noch nicht ausreichenden Homogenisierung zum jetzigen Zeitpunkt nur einer kleinen Expertengruppe möglich. Dies gilt auch für die Interpretation und räumliche Abgrenzung von Habitattypen (z.B. das Thema „Steinfeld“).

Für die Anwendung der Methoden in unterschiedlichen Habitats wurden im Rahmen von WIMO Monitoringkonzepte entwickelt (Konzept 2 „Kartierung sublitoraler Habitats mit hydroakustischen Methoden; Konzept 1 „Makrofaunagemeinschaften“ und Konzept 1b „Epifaunagemeinschaften in steinigen Habitats“).

### 3.6 Ausblick

Im Bereich der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) findet derzeit unter der Federführung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) im ersten Schritt die vollständige Kartierung der Natura 2000-Gebiete mit Hilfe von Seitensichtsonartechnik statt. Eine entsprechende Kartieranleitung wird unter der Koordinierung des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Beteiligung des AWI (Alfred-Wegener-Institut), SaM (Senckenberg am Meer) und CAU (Christian-Albrechts-Universität

zu Kiel) erstellt. Hier stammt bereits ein Teil der eingehenden Expertise aus den Arbeiten von WIMO. In den Hoheitsgewässern sind die Küstenländer für das Monitoring verantwortlich. Dabei führen das LLUR (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume) und der LKN (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz) seit Mitte der 2000er Jahre gemeinsam mit der CAU das Habitatmonitoring in den Küstengewässern Schleswig-Holsteins durch. Entlang der niedersächsischen Küste zeichnet sich der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserbau, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) für die dortigen sublitoralen Gebiete verantwortlich. Unter Einbeziehung von WIMO-Mitgliedern in die Facharbeitsgruppen *Benthos*, *Eutrophierung*, *Nährstoffe und Plankton (EuNäP)*, *Hydrographie*, *Hydrologie und Morphologie (HyMo)* sowie *Biodiversität* der AG Erfassen, Bewerten und Maßnahmen (ErBeM) im BLANO (s. Kap. 1) wird derzeit unter Berücksichtigung der jeweiligen Zuständigkeiten der Landes- und Bundesbehörden an den Monitoring-Konzepten bzw. an vorliegenden Daten weiter gearbeitet. Durch die technische Aufrüstung von hydroakustischen Systemen (Einsatz von Fächerecholoten und parametrischen Systemen) in den zuständigen Behörden ist vor allem die Datenspeicherung, -analyse und -archivierung ein wichtiges Thema, bei dem die Erfahrungen aus Projekten wie WIMO und FONA/KÜNO (Forschung für nachhaltige Entwicklung) in die Diskussion eines nachhaltigen Datenmanagement eingehen. Seit 2010 wird in dem Bund/Länder-übergreifenden, inzwischen in ein VKoopUIS -Projekt (Rahmenvereinbarung zur Weiterentwicklung und Pflege von Konzeptionen und Software für Umweltinformationssysteme) überführten Marinen Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE) an einem Datenverbund zu Küstendaten gearbeitet.

Der flächenhafte Alltagseinsatz von hydroakustischen Verfahren im Behördenmonitoring setzt die Standardisierung der Systeme und Messkonfigurationen auf den Schiffen, sowie eine einheitliche Nachbearbeitung (Postprocessing) der Daten voraus. Dafür ist die Erstellung allgemeiner Regelungen/Leitfäden oder Anleitungen notwendig, wie es sie bereits in akkreditierten Verfahren von z.B. Messstellenmonitoring im Bereich des BLMPs gibt. Ähnlich zu den Leitfäden zu Nord- und Ostseemonitoring oder zur Baugrunderkundung von Windparkanlagen wird zur Zeit unter Beteiligung von WIMO-Mitgliedern unter der Federführung der BSH in Hamburg in Zusammenarbeit mit dem BFN, den Arbeitsgruppen von BLANO sowie den Länderbehörden wie NLWKN und LLUR an einer „Anleitung zur Kartierung des Meeresbodens mittels hochauflösender Sonare in den deutschen Meeresgebieten“ gearbeitet. Während dort vor allem nach im Alltag praktikablen Lösungen gesucht wird, ging WIMO aufgrund seines hohen wissenschaftlichen Anteils einen deutlichen Schritt darüber hinaus. Mittelfristig muss das Ziel der Einsatz von zumindest teilautomatisierten Klassifizierungsverfahren sein, um sowohl zeit- als auch kostendeckend arbeiten zu können. Die hierzu notwendige Expertise und Beratung kann nur aus Projekten wie WIMO erfolgen und sollte zukünftig in Form einer dauerhaft installierten Expertengruppe realisiert werden.



## 4. Die Rolle von Modellen im Monitoring

### 4.1 Einleitung

U. Callies (HZG), C. Winter (MARUM)

Jede Messung von Kenngrößen innerhalb eines natürlichen Systems kann immer nur örtlich oder zeitlich beschränkte Information liefern. So bilden fernerkundliche Aufnahmen wie Satellitenbilder zwar räumlich große Bereiche ab, können aber nur einzelne Zeitpunkte darstellen. Messreihen an Feststationen dagegen beschreiben quasi-kontinuierlich längere Zeiträume, lassen aber oft keine Aussage über die räumliche Struktur der Messgrößen zu. Zur Inter- und Extrapolation von Messwerten und für ein grundlegendes Verständnis des Gesamtsystems werden daher Modelle unterschiedlicher Komplexität verwendet. Modelle erlauben zudem die Durchführung von Parameterstudien und Szenarioanalysen.

Mathematische Modelle zur Simulation mariner physikalischer und biogeochemischer Prozesse sind heute weit verbreitete und anerkannte Methoden in der Küstenforschung und Verwaltung. Modellsimulationen helfen Beobachtungsdaten strukturell einzuordnen und mit Prozessverständnis zu einer bestmöglichen Systemanalyse als Grundlage für eine Beurteilung von Managementoptionen zu verbinden. Unterschiedliche Modellansätze und Anwendungen ergeben sich aus den Fragestellungen und dem Grad des Prozessverständnisses. Wesentlich ist in allen Fällen eine realistische Einschätzung der Modellzuverlässigkeit und der aus verschiedenen Quellen gespeisten Unsicherheiten.

Im Rahmen des Monitorings werden verschiedene Modellansätze verfolgt. Auf der relativ abgesicherten Seite eines breiten Modellspektrums sind Modelle der abiotischen Komponenten angesiedelt, welche größtenteils auf bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten basieren. Diese Modellsysteme werden hier unter dem Begriff prozessbasierte physikalische Modelle zusammengefasst. Diese Modelle berechnen beispielsweise die Meteorologie, Strömungen und Wellen im Küstenmeer, die Verteilung von Temperatur und Salzgehalt, Transportprozesse von Sedimenten, und die Änderungen der Gestalt des Meeresbodens (Morphodynamik).

Im Projekt wurde für das Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer beispielhaft gezeigt, wie Modelle für die Interpolation zwischen lokalen Beobachtungen der Morphologie und Sedimentologie verwendet werden können. Prozessbasierte Modelle wurden hier angewendet, um die Wirkung von Extremereignissen auf die lokale Morphologie und Sedimentologie zu zeigen (Kapitel 4.2).

Entwicklung, Aufbau und Unterhalt von operationellen Beobachtungsnetzwerken stellen einen erheblichen Aufwand für marine Dienstleister dar, weshalb deren Strukturierung gelegentlich hinterfragt und gegebenenfalls sich verändernden Bedürfnissen der Ozeanüberwachung angepasst werden muss. Prozessbasierte Modelle erlauben auch Aussagen über den zu erwartenden Informationsgewinn aus Beobachtungen an bestimmten Orten und somit über die optimale räumliche Strukturierung eines Beobachtungsnetzes bei einer beschränkten Anzahl von Stationen (Kapitel 4.3).

Modellergebnisse erlauben zudem Umweltbedingungen, flächendeckend und über unterschiedlich lange Zeiträume zu rekonstruieren. Dabei gewinnt die Analyse großer vorhandener Datensätze an Bedeutung. So liegen für einen langen Zeitraum (1959-2003) Strömungsfelder in der Datenbank coastDat ([www.coastdat.de](http://www.coastdat.de); Weisse et al., 2009) vor, die mit dem TELEMAC-2D Modell (Hervouet and van Haren, 1996) mit hoher räumliche Auflösung im Bereich des Wattenmeeres berechnet wurden. Mit dem Partikeldriftmodell PELETS-2D wurden im Rahmen von WIMO für Fragestellungen von Eutrophierung (Kapitel 5.3) oder Ölverschmutzung (Kapitel 6.1) Driftwege (Trajektorien) simuliert, um so etwa die mittlere Aufenthaltsdauer des Wassers in einigen ausgewählten Tidebecken oder aber von Ölverschmutzung besonders bedrohte Regionen zu bestimmen.

Viele Prozesse im Ökosystem Küstenmeer sind noch nicht hinreichend verstanden, so dass für eine Modellierung der Wirkungsbeziehungen keine Grundgleichungen zur Verfügung stehen. Für ein Prozessverständnis werden deshalb unterschiedliche Modellansätze kombiniert: So werden vereinfachte, konzeptionelle Modellansätze oder empirische Modelle formuliert, um das Zusammenwirken von Schlüsselprozessen im Küstenmeer in idealisierter Form zu untersuchen.

Im Projektverbund und in Kooperation mit anderen zeitgleichen Forschungsvorhaben (KÜNO MOSSCO: Modular System for Shelves and Coasts, HZG COSYNA: Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas) wurden Modellansätze kombiniert, um die starke Heterogenität im Wattenmeer und der Deutschen Bucht konzeptionell zu verstehen und hinsichtlich der Variabilität quantitativ zu erklären. Diese Ergebnisse machen im Kontext von WIMO die Grenzen eines rein stationsgebundenen Monitorings deutlich und belegen die Notwendigkeit übergreifender und ortsungebundener Monitoringkonzepte. So haben sich in WIMO wichtige Erkenntnisse zu Ursachen von Gradienten relevanter Kenngrößen erst aus der modellgestützten Analyse raumkontinuierlicher Messungen (beispielsweise der COSYNA Messplattform SCANFISH) gewinnen lassen (Kapitel 4.4).

Ein Beispiel für derartige räumliche Gradienten im Kontext relevanter Deskriptoren des Zustands der Meeresumwelt stellen regionale Unterschiede in der Eutrophierung dar (Kapitel 4.5).

Das aus der Synthese von räumlich hoch aufgelöster und konzeptioneller Prozessmodellierung abgeleitete Wissen bildet letztlich den Referenzrahmen, um Veränderungen im Küstenmeer detektieren, (zeitlich) extrapolieren und bewerten zu können. Doch selbst für konzeptionelle, mechanistische Modellansätze reicht je nach Fragestellung das vorhandene Prozesswissen nicht immer aus. Aus diesem Grund wurden beispielsweise im Teilprojekt „Biodiversität“ (Kapitel 5.2) auch statistische Modellansätze angewandt (Kapitel 4.6).

## 4.2 Morphodynamische Modelle für Systemanalysen und die Interpolation zwischen Messkampagnen

G. Herrling (MARUM), C. Winter (MARUM)

Der Zustand der marinen Umwelt wird von natürlichen und menschlich geprägten Einflussgrößen bestimmt. Küstenregionen sind prominente Beispiele für sehr dynamische physikalische Prozesse und Ökosysteme, die in vielen Raum und Zeitskalen eine hohe Variabilität der kennzeichnenden Parameter aufweisen. Für eine Bewertung von Beobachtungen der Umwelt, die sich meist auf einen Zeitpunkt, oder einen Ort beschränken ist neben dem Zustand auch die Kenntnis der natürlichen Schwankungsbreite von Einflussgrößen essentiell.

Habitate in den Küstenmeeren werden weitgehend durch die Struktur (Morphologie) und Art (Sedimentologie) des Meeresbodens und die Bandbreite der physikalischen und biologischen Randbedingungen gekennzeichnet. Die direkte Beprobung des Meeresbodens für Sedimentanalysen und Kartierungen (siehe Kap. 3 „Ground Truth“) sind essentiell für ein Systemverständnis und die Bewertung des Zustands von Gewässern; erfordern aber einen sehr hohen technischen und finanziellen Aufwand. Das behördliche Monitoring des Meeresbodens muss sich daher auf finanziell und zeitlich machbare Dimensionen beschränken. Im Teilprojekt TP 3.1A „Integrative Modelle“ wurde untersucht, wie prozessbasierte morphodynamische Modelle für die Interpolation zwischen Messungen der Bathymetrie und Sedimentologie verwendet werden können.

Im Projekt wurden für das Untersuchungsgebiet des ostfriesischen Wattenmeers unterschiedliche Modelle aufgebaut und auf Fragestellungen zur Hydro- und Sedimentdynamik in verschiedenen Bereichen der Deutschen Bucht angewandt. Dabei stand insbesondere das Verhältnis einzelner und kumulierter Extremereignisse zur langfristig wirkenden mittleren Strömungs- und Transportdynamik im Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses.

### 4.2.1 Methodik

Eine Serie von hydrodynamischen Modellen wurde verwendet, um Randbedingungen für küstennahe Detailmodelle vom Kontinentalen Schelf bis zum Seegebiet der Ostfriesischen Inseln zu generieren. Dabei werden Wasserstands- und Seegangsdaten jeweils vom großräumigeren zum nächst kleinerem Modellgebiet mit zur Küste hin zunehmender numerischen Auflösung übergeben („Nesting“, Abbildung 17). Für den Antrieb des größten (CSM) Modells an den offenen seeseitigen Rändern wurden harmonische Tiden vorgegeben. Atmosphärendruck- und Windfelder der Wettermodelle COSMO-EU und COSMO-DE des Deutschen Wetterdienstes (DWD) werden als meteorologische Randbedingungen für Sturmflutsimulationen verwendet.

Die Modellsysteme bestehen aus gekoppelten Modulen für die Berechnung der dreidimensionalen Hydrodynamik (Strömung und Seegang), des Sedimenttransports (fünf verschiedene Kornfraktionen (150, 200, 250, 350 und 450  $\mu\text{m}$ ) und der Bodenevolution. Während der Simulationen findet eine in beide Richtungen gekoppelte Interaktion des Seegangs und der Strömung statt. Bei jedem Rechenzeitschritt wird die Modellbathymetrie entsprechend den Transportprozessen aktualisiert, was wiederum eine direkte Rückwirkung auf den Seegang und die Hydrodynamik bedeutet. Die Modelle wurden mit verfügbaren Wasserstandszeitreihen amtlicher Pegel kalibriert und verifiziert, z.B. für die Sturmflut „Tilo“ vom 09. Nov. 2007 (Abbildung 17). Auch simulierte Sedimenttransportraten zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Messdaten am ICBM-Messpfahl im Seegatt Otzumer Balje (Bartholomä et al., 2011)

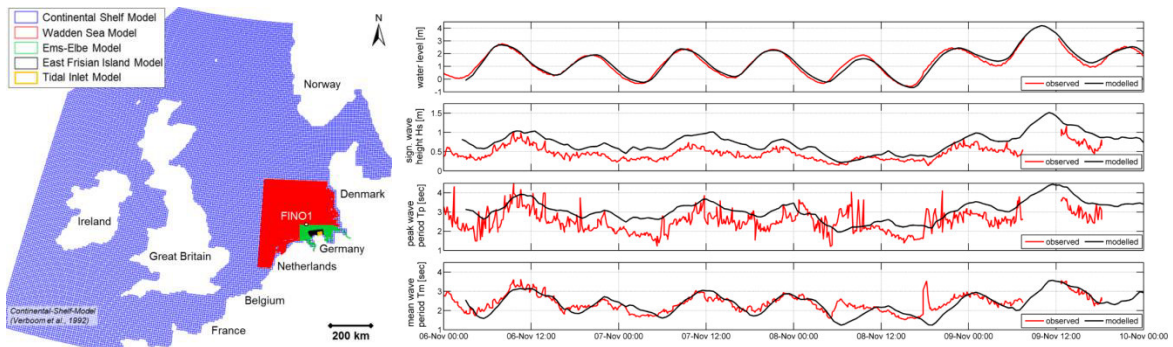


Abbildung 17 Links: Modellkaskade. Rechts: Vergleich von gemessenen (rot) und modellierten (schwarz) Zeitreihen des Wasserstands, der signifikanten Wellenhöhe, der höchsten und mittleren Wellenperioden während eines Sturmflutereignisses im Rückseitenwatt von Langeoog

Der Nachweis der Modellgüte und die wissenschaftliche Untersuchung kleinskaliger morphodynamischer Prozesse fokussierte auf das Untersuchungsgebiet des ostfriesischen Wattenmeers und besonders auf den Vorstrandbereich von Langeoog/Spiekerooog und das dortige Seegatt Otzumer Balje, da hier Daten zur Morphologie und Sedimentologie zur Verfügung standen. Die räumliche Auflösung des Detailmodells ist vergleichsweise hoch, die Gitterelemente haben Kantenlängen um 30 Meter in der Brandungszone vor den Ostfriesischen Inseln Langeoog und Spiekerooog. So können relevante küstennahe Prozesse wie die Refraktion des Seegangs und die welleninduzierte Küstenlängsströmung, die resultierenden Transportraten und die kleinskalige Morphodynamik abgebildet werden. Die hohe räumliche Auflösung ermöglicht auch die Diskretisierung der geomorphologischen Elemente wie Seegatten, Rinnen, Bänke und anderer Bodenformen, wie z.B. der Zungenriffe nördlich der Insel Spiekerooog.

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis einer zweijährigen Simulation der Bodenevolution im Untersuchungsgebiet im Vergleich mit Messungen (Herrling & Winter, subm.). Die berechneten Erosions- und Depositionsraten und -gebiete entsprechen weitgehend den gemessenen und rechtfertigen den Modellansatz für weiterführende Untersuchungen.

Ausgehend von einer zunächst räumlich gleich verteilten Vorgabe der Oberflächensedimente wurde mit dem morphodynamischen Modell die Entwicklung und residuale räumliche Verteilung und Zusammensetzung der Oberflächensedimente für die morphologisch aktiven Bereiche im Seegatt Otzumer Balje und im Vorstrandbereich Spiekerooogs berechnet. Die simulierte Umverteilung der Korngrößen stimmt mit gemessenen Bodenproben überein (Abbildung 20; Herrling & Winter, 2015).



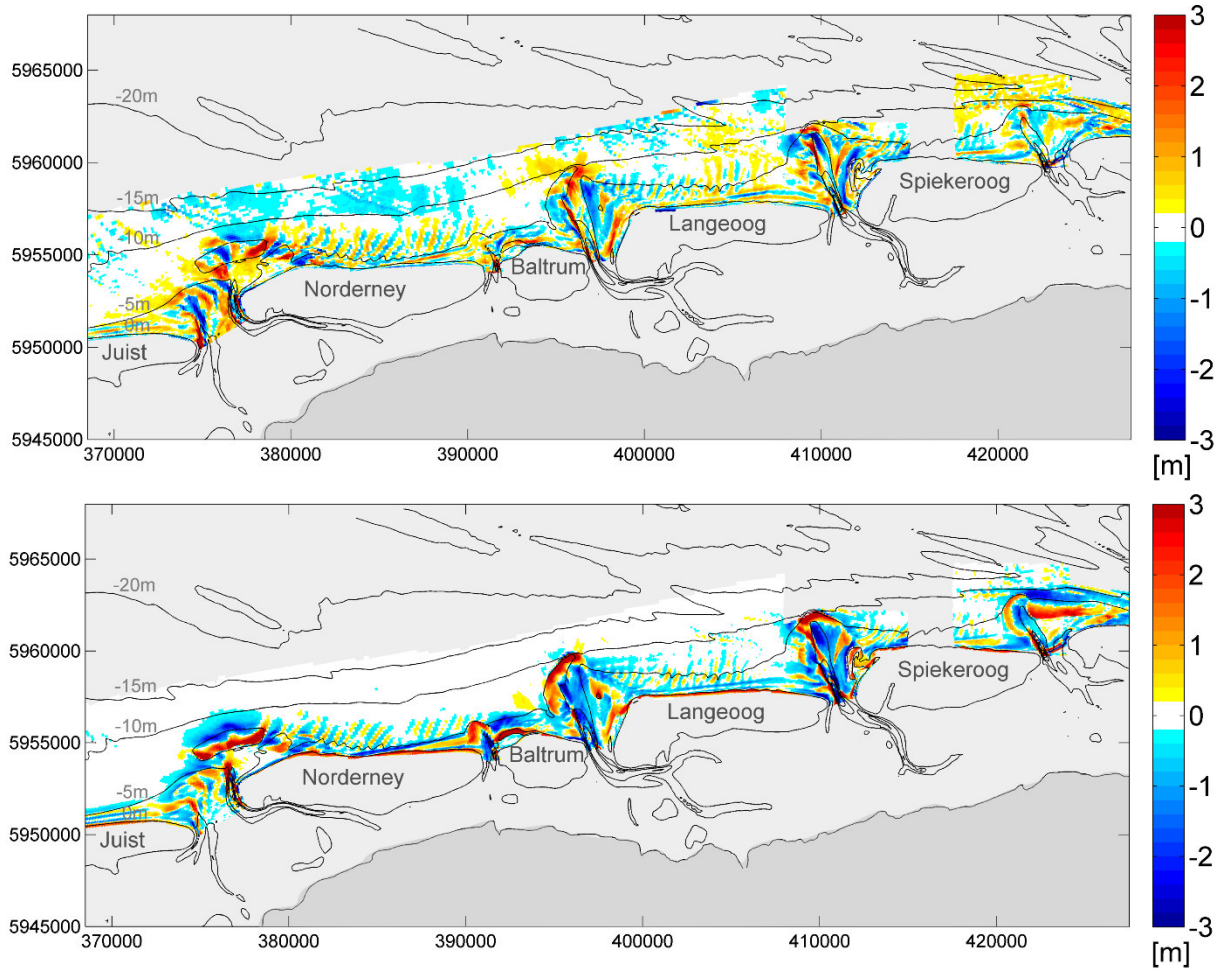


Abbildung 18 Morphologische Entwicklung des Vorstrandbereichs der ostfriesischen Inseln zwischen Sommer 2004 und 2006. Oben: gemessene Sedimentation (positiv) und Erosion (negativ). Unten: Modellergebnis der morphodynamischen Simulation des gleichen Zeitraums.

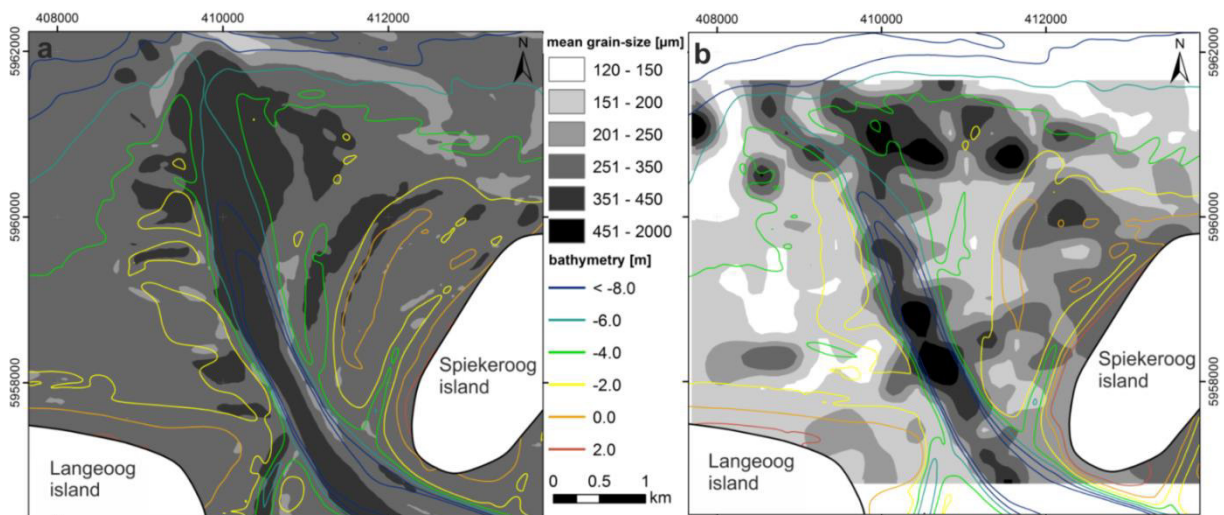


Abbildung 19 Berechnete (links) mittlere Korngrößen im Untersuchungsgebiet und zum Vergleich interpolierte Messwerte von Son et al., 2011.

#### 4.2.2 Ergebnisse

Im Rahmen von Prozessstudien wurden die Modelle eingesetzt, um den Effekt einzelner und kumulierter Extremereignisse auf die Vorstranddynamik im Vergleich zur langfristig wirkenden, mittleren Strömungsdynamik zu ermitteln. Beispielsweise wurde der morphologische Effekt des Sturmflutereignisses Tilo (Nov 2007) simuliert und mit einem Zeitraum gemäßigterer Randbedingungen verglichen. Morphologisch aktive Bereiche wurden identifiziert und Sedimentumlagerungen quantifiziert (Abbildung 20). Deutlich können beispielsweise die Zungenriffe als geomorphologische Einheiten identifiziert werden, die nur während Sturmereignissen aktiv sind.

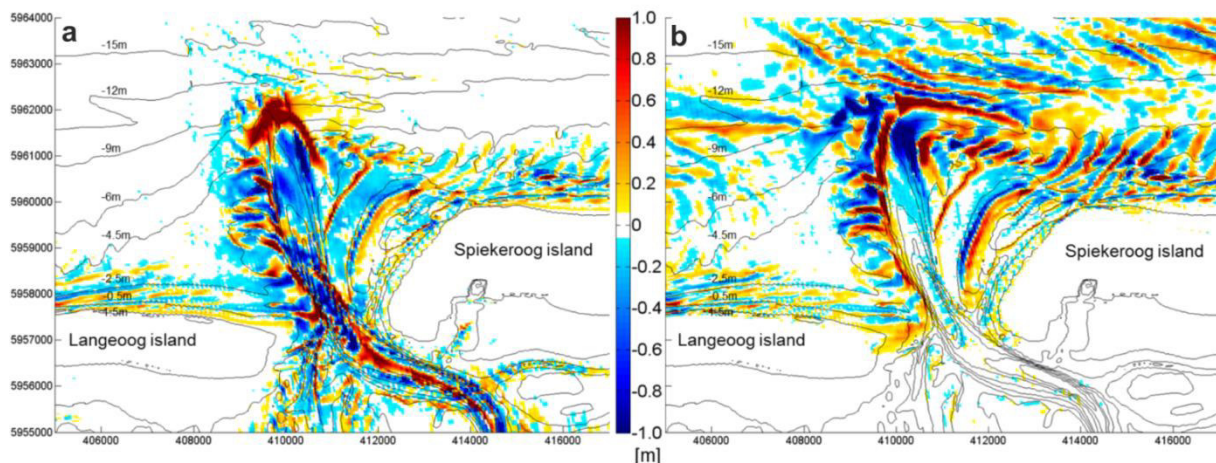


Abbildung 20 Modellierter Sedimentation (rot) und Erosion (blau) durch morphologische Umlagerung während einer repräsentativen Zeitreihe von 6 Monaten mit mittlerer hydrodynamischer Wirkung (a) und einer einzigen Sturmflut (b); beispielhaft dargestellt für das Seegatt Otzumer Balje und den Vorstrandbereich.

Der projektübergreifende Einsatz des numerischen Modells zur Unterstützung von Messkampagnen und für die räumliche und zeitliche Inter- und Extrapolation von Messdaten der Projektpartner führte zu weiteren Untersuchungen über die Eigenschaften des ostfriesischen Wattenmeers. Durch langfristige Simulationsläufe konnten beispielsweise die jährlich gemittelten Durchflüsse über die Wattwasserscheiden quantifiziert werden (Herrling & Winter, 2015). Es zeigt sich, dass ein wesentlicher Teil der Wassermengen über die Rückseitenwatten ausgetauscht wird (Abbildung 21). Diese Kommunikation zwischen den Rückseitenwatten muss bei der Betrachtung von Wattenzugsgebieten für weiterführende Messungen und Studien zu physikalischen oder biogeochemischen Bilanzierungen berücksichtigt werden.

Eine morphodynamische Modellierung des Untersuchungsgebiets für mehrere Jahre ermöglicht die Identifikation und Quantifizierung morphologisch aktiver Bereiche, und die Darstellung der erwarteten Variabilität der Sedimentologie (Herrling & Winter, subm.). In hoher räumlicher Auflösung wurde der morphodynamische Raum (siehe Winter, 2011) des Untersuchungsgebiets berechnet. Diese Größe kennzeichnet die Differenz zwischen dem jeweils höchsten und niedrigsten Niveau des Meeresbodens im Untersuchungszeitraum (hier zwei Jahre). Deutlich wird die morphologische Aktivität der Ebbdeltas und Vorstrandbereiche (Abbildung 22). Analog zu dieser Darstellung wurde auch die Variabilität mittlerer Korngrößen für das Untersuchungsgebiet berechnet (Abbildung 22). Diese Darstellung steht für die Bewertung einzelner Probenahmen hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Repräsentativität zur Verfügung.

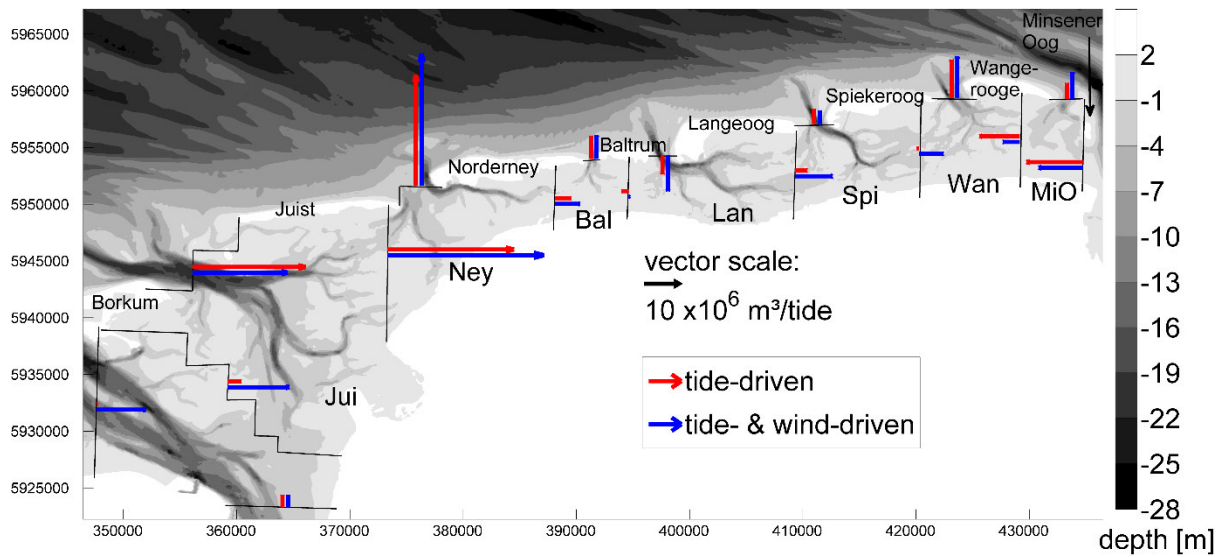


Abbildung 21 Jahresgemittelter Durchfluss durch die Seegatten und Wattwasserscheiden für eine ausschließlich durch Gezeiten gesteuerte Simulation (rot) und eine durch Wind und Gezeiten gesteuerte Simulation (blau) (Herrling & Winter, 2015).

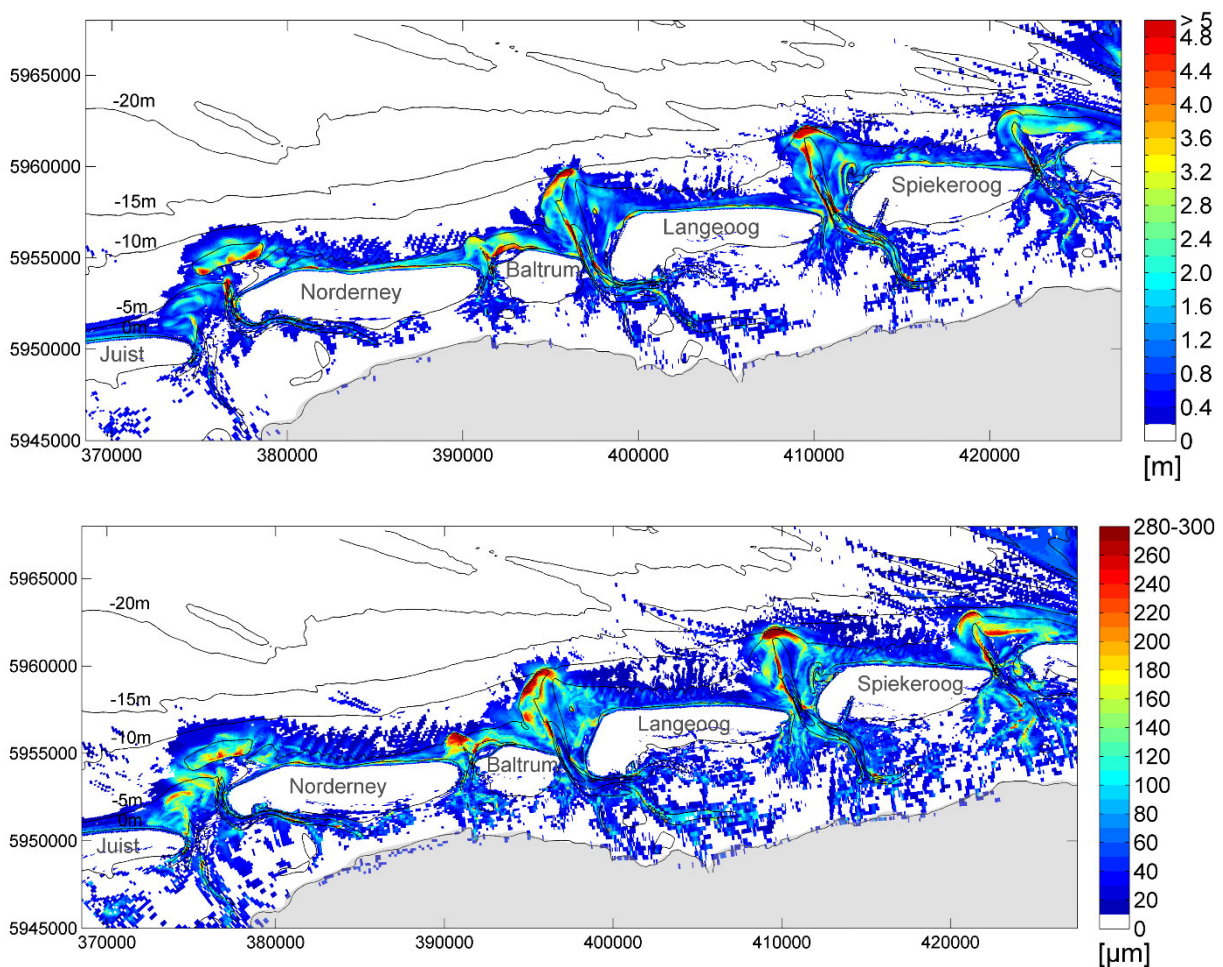


Abbildung 22 Oben: Morphologische Aktivität des Untersuchungsgebiets dargestellt durch den morphodynamischen Raum (bed elevation range) für einen zweijährigen Zeitraum (2004 bis 2006). Unten: Bandbreite (Variabilität) der berechneten Korngrößen. Dargestellt ist die Schwankungsbreite der Korngrößen (Herrling & Winter, subm.).



#### 4.2.3 Monitoringkonzepte

Zur Festlegung der Merkmale eines guten Umweltzustandes GES werden in der MSRL die Deskriptoren D6 (Meeresbodenintegrität) und D7 (Hydrografische Bedingungen) geprüft. In diesem Zusammenhang trägt das Teilprojekt mit dem WIMO Monitoringkonzept „Räumlich und zeitliche Interpolation zwischen morphologischen Zuständen durch Modellsimulationen“ ([www.wimo.meeresschutz.info/](http://www.wimo.meeresschutz.info/)) zu den Merkmalen C1 (Physikalische und hydrologische Merkmale) und C3 (Habitate) bei.

### 4.3 Bewertung und Optimierung von Standorten für Monitoringsysteme

S. Grayek (ICBM), E. Stanev (ICBM)

Aufbau und Unterhalt von operationellen Beobachtungsnetzwerken wie beispielsweise dem Marinen Umweltnetzwerk MARNET des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) stellen einen erheblichen Aufwand für marine Dienstleister dar. Die Leistungsfähigkeit vorhandener Netzwerke sollte gelegentlich überprüft werden, um gegebenenfalls Ressourcen freizustellen oder anzupassen, um so den sich verändernden Bedürfnissen einer marinen Überwachung gerecht zu werden. Generell sind verschiedene modellgestützte Ansätze zur qualitativen und quantitativen Beurteilung von Beobachtungsnetzwerken möglich. Damit können Schwachpunkte diskutiert und Möglichkeiten für Verbesserungen aufgezeigt werden.

Gängige Methoden für die Beurteilung Beobachtungsnetzwerken sind OSE (Observation System Evaluation; Beobachtungssystem-Evaluierung) und OSSE (Observations System Simulation Experiment; Beobachtungssystem-Simulations-Experiment). Während sich OSE mit der Evaluation von existierenden Beobachtungsnetzwerken befasst, werden in der OSSE hypothetische Netzwerke simuliert, um so optimierte Konfigurationen zu konstruieren. Beide Methoden ermöglichen eine quantitative Bewertung der Aussagekraft von Netzwerken und basieren auf Ansätzen, die auch in der Datenassimilation Verwendung finden, um räumlich begrenzte Beobachtung in größere räumliche Skalen einzubetten. Hierfür wird Vorwissen über räumliche Korrelationen verwendet, welches aus numerischen Modellen bezogen wird. Für eine ausführliche Darstellung dieser Methoden sei auf das Schrifttum verwiesen (Hackert et al., 1998; She et al., 2007; Frolov et al., 2008; Sakov and Oke, 2008; Le Hénaff et al., 2009; Schulz-Stellenfleth and Stanev, 2010; Grayek et al., 2015).

Im Rahmen des Projekts TP 3.1B wurde die Fähigkeit eines Beobachtungsnetzwerkes zur Erfassung der thermohalinen Dynamik in der Deutschen Bucht bewertet (Pohlmann 1996a, b). Eine Reihe von OSEs mit unterschiedlicher Netzwerkkonfiguration wurde am Beispiel des Jahres 2010 durchgeführt, um die vorherrschenden räumlichen Korrelationen zu untersuchen und den Einfluss individueller Netzwerkkomponenten auf die Güte einer Vorhersage zu beurteilen.

#### 4.3.1 Datenbasis der Studie

Das MARNET Messnetz in der Deutschen Bucht ist ein Netzwerk von permanenten Stationen, welche vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben werden. Die Positionen der Stationen sind in die Karte in Abbildung 23 eingetragen. Die in der vorliegenden Studie verwendeten MARNET *in-situ* Temperatur- und Salzgehaltsmessungen wurden durchgehend mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung in mehreren Tiefen erhoben.

Durch vorübergehende technische Probleme einiger Sensoren weist der Datensatz jedoch einige Lücken auf. In Abbildung 24 ist die zeitliche Abdeckung durch die MARNET Temperatur- und Salzgehaltsdaten für das Jahr 2010 aufgetragen

Eine Ferry Box ist ein autonomes Mess-, Datenspeicher- und Datenübermittlungssystem das auf Schiffen (Fähren) auf festen Routen betrieben wird. Temperatur- und Salzgehaltsmessungen aus 4-6m Tiefe werden kontinuierlich gespeichert. Schiffe mit einem Ferry Box-System verkehren zwischen Hamburg, Cuxhaven, Chatham, Moss und Halden (schwarze Linie in Abbildung 23); Cuxhaven und Immingham (rote Linie in Abbildung 23); und Büsum und Helgoland (grüne Linie in Abbildung 23) (Petersen et al. ,2007). Die zeitliche Abdeckung des Ferry Box-Datensatzes für das Jahr 2010 ist beispielhaft in Abbildung 24 für Temperatur und Salzgehalte aufgetragen.

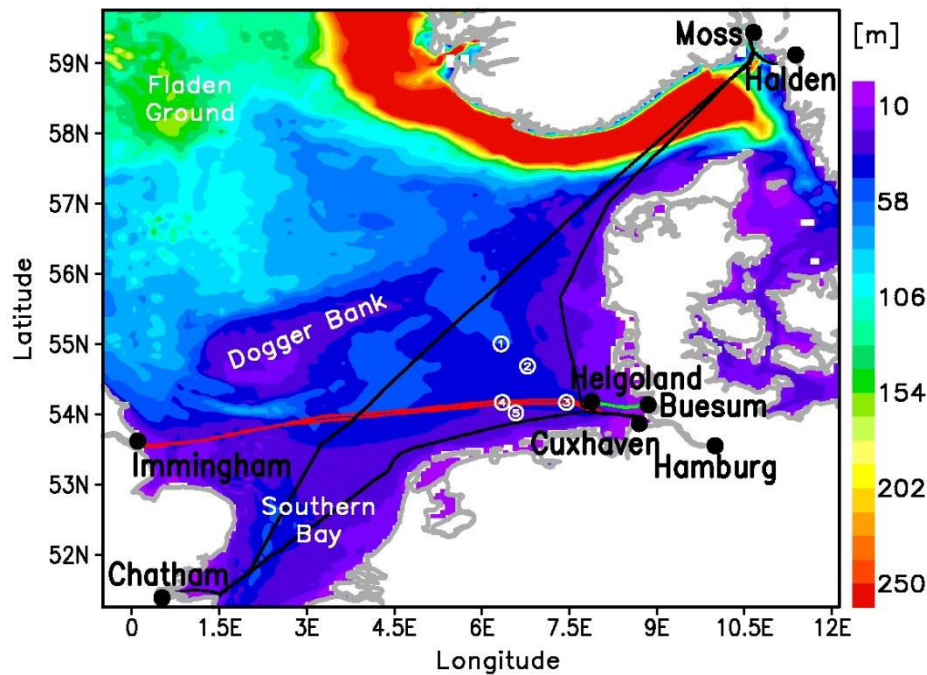


Abbildung 23: Topographie des untersuchten Gebietes mit den im Text genannten Orten. Die schwarzen, roten und grünen Linien zeigen die Schifffahrtsrouten mit genutzten Ferry Box-Messungen. Die weißen nummerierten Kreise zeigen die Positionen der verwendeten MARNET Stationen in der Deutschen Bucht (Nordseeboje II, 1; Nordseeboje III, 2; Deutsche Bucht, 3; Ems, 4; Fino 1, 5)

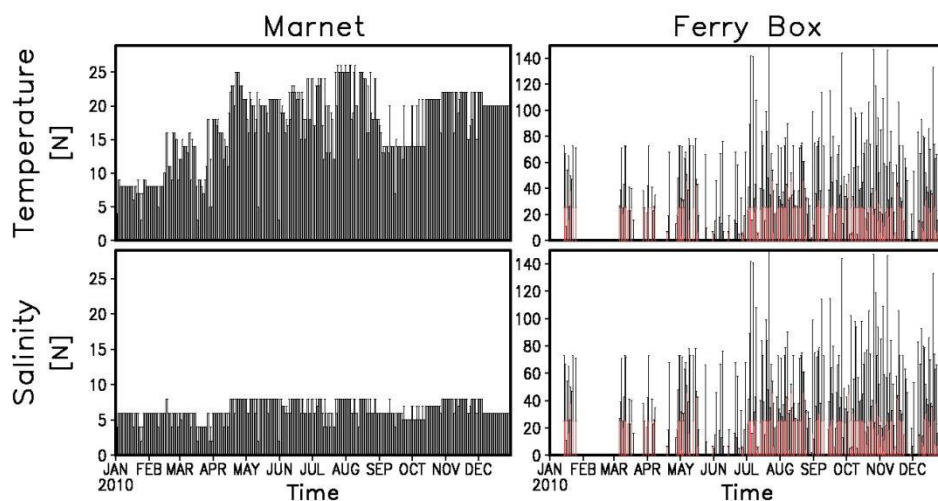


Abbildung 24: Anzahl von Temperatur- (oben) und Salzgehalt- (unten) Beobachtungen der MARNET Stationen (links) und der Ferry Box Routen (rechts) im Jahr 2010 innerhalb des untersuchten Gebietes. Die roten Säulen in den Ferry Box Darstellungen zeigen die Beobachtung innerhalb des Gebietes der Deutschen Bucht, wie es in Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurde.

Daten zur Temperatur der Wasseroberflächen (SST) wurden aus Fernerkundungsdaten gewonnen. Der verwendete SST- ( $\theta^0$ ) Datensatz wurde vom OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis; Donlon et al., 2012) Projekt bezogen. Seine räumliche Auflösung beträgt  $1/20^\circ \times 1/20^\circ$ . Die täglich gelieferten Daten basieren auf Analysen von Daten aus AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) und *in-situ* Schiffs- und Bojenmessungen. Der Datensatz beinhaltet auch Angaben über den absoluten Analysefehler.

Räumliche Korrelationen wurden aus dem 3D-Modellsystem GETM (General Estuarine Transport Model; Burchard and Bolding, 2002) bezogen dessen Anwendbarkeit für den untersuchten Bereich

bereits von Staneva et al. (2009) beschrieben wurde. Das Modell der Nordsee weist eine horizontale Auflösung 3 nm auf und verwendet ein Arakawa C-Gitter mit sphärischen Koordinaten. Für die vertikale Auflösung werden 21 sich nicht überschneidende, äquidistante und dem Terrain folgende Koordinaten ( $\sigma$ -Koordinaten) verwendet.

#### 4.3.2 Methodik

Der folgende Abschnitt gibt einen grundlegenden Überblick über die verwendete Methode und das Design der durchgeführten Untersuchungen. Für eine ausführliche Beschreibung der verwendeten OSE Methode verweisen wir auf die Arbeiten von Schulz-Stellenfleth und Stanev (2010), Grayek et al. (2015) und die darin enthaltenden Verweise auf weitere Arbeiten. Die durchgeführten Untersuchungen werden in Grayek und Stanev (2015) detailliert erklärt.

Die verwendete OSE Methode basiert auf einem Kalman Filter Ansatz. Im Kalman Filter wird ein Optimierungsproblem gelöst, welches die Reproduktion der Beobachtungen mit der dynamischen Konsistenz des rekonstruierten Zustandes verbindet. Das verwendete Merkmal für die dynamische Konsistenz ist der mittlere Abstand der Rekonstruktion zu wahrscheinlichen Zuständen des Gebietes (Rekonstruktionsfehler). Dieses Merkmal wird in den OSEs zur Bewertung von Beobachtungen herangezogen, d. h. Beobachtungen haben dann eine hohe „Wertigkeit“, wenn sie dazu beitragen dynamisch konsistente Zustände des Gebietes aus einem Wahrscheinlichkeitsraum zu bestimmen.

Der zeitliche, räumliche und logische Bezug für die Ergebnisse der OSEs ergibt sich aus dem für die Berechnung des Rekonstruktionsfehlers verwendeten statistischen Vorwissen (Hintergrundstatistik). Der vorliegenden Studie wurde eine Hintergrundstatistik für die südliche Nord See (Deutsche Bucht) aus räumlich/zeitlichen Korrelationen der termohalinen (siehe Glossar) Dynamik des Jahres 2010 zugrunde gelegt, die vom GETM Modell simuliert wurde.

Für die Bestimmung des Rekonstruktionsfehlers werden drei maßgebende Eigenschaften der Beobachtungen berücksichtigt: 1. die räumliche Position aus der sich die Signifikanz der Beobachtung ableiten lässt, 2. der Messfehler, welcher das Signal-Rausch-Verhältnis der Beobachtung widerspiegelt und 3. der Repräsentationsfehler, welcher angibt in wie weit die reale Beobachtung durch die Hintergrundstatistik repräsentiert werden kann.

Die räumliche Position und der Messfehler werden für die jeweilige OSE aus den realen Datensätzen bezogen. Der Repräsentationsfehler muss jedoch abgeschätzt werden. Hierbei gilt eine Beobachtung dann durch die Hintergrundstatistik repräsentierbar, wenn alle in der Beobachtung detektierten physikalischen Prozesse und räumlich/zeitlichen Skalen in einer vergleichbaren Form in der Hintergrundstatistik enthalten sind. Durch vorrangige Arbeiten in Grayek et al. (2011) wurde gezeigt, dass für *in-situ* Messungen in der Deutschen Bucht und einer Hintergrundstatistik aus dem GETM Modell ein Repräsentationsfehler in Abhängigkeit von der simulierten Variabilität des Parameters über einen M2-Tiden-Zyklus zu praktikablen Ergebnissen in der OSE führt. Dieser Ansatz wurde in den hier dargestellten OSEs für die Beobachtungen von MARNET Stationen und Ferry Box Routen verwendet. Für die Beobachtungen aus dem OSTIA Datensatz wurde kein Repräsentationsfehler veranschlagt.

Um räumliche Unterschiede in den physikalischen Gegebenheiten auszugleichen und so ganze Karten von Rekonstruktionsfehlern objektiv bewerten zu können, wird der Rekonstruktionsfehler entlang der Hintergrundstatistik skaliert. Aufgrund des Designs des Kalman Filters ergeben sich hieraus Werte zwischen 0 und 1, welche als prozentualer Anteil (von 0% bis 100%) der wahrscheinlichen Standardabweichung des rekonstruierten Parameters zu interpretieren sind.

Es werden vier unterschiedliche Beobachtungsnetzwerkkonfigurationen diskutiert. Die ersten drei Konfiguration, welche im weiteren Verlauf des Textes mit den Akronymen „OSTIA“, „MARNT“ und

„FEBNT“ geführt werden, bewerten die jeweiligen Datensätze aus OSTIA Analysen, MARNET Stationen und Ferry Box Routen getrennt voneinander. Die vierte Konfiguration, welche mit den Akronym „ISUNT“ gekennzeichnet ist, berücksichtigt die kombinierten *in-situ* Beobachtungen von MARNET Stationen und entlang von Ferry Box Routen. Die Konfiguration ISUNT quantifiziert zum einen den Mehrwert des kombinierten Netzwerks im Vergleich zu den Konfigurationen MARNT und FEBNT und zum anderen die Leistungsfähigkeit von räumlich begrenzten *in-situ* Beobachtung gegenüber den flächendeckenden Beobachtungen aus der Fernerkundung in der Konfiguration OSTIA.

Es wurde jeweils eine OSE für die Temperaturen und eine OSE für die Salzgehalte aus jeder der Beobachtungsnetzwerkkonfigurationen erstellt; außer für die Konfiguration OSTIA, welche nur Temperatur Beobachtungen und keine Beobachtungen für Salzgehalte enthält.

#### 4.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der OSE für Oberflächentemperaturen der Nordsee sind in Abbildung **25** dargestellt. Die Abbildung stellt den Jahresmittelwert des Rekonstruktionsfehlers für das Jahr 2010, farblich kodiert zwischen 5% und 70%, dar. Um die Interpretation zugänglicher zu gestalten wurden die 3D Karten aus der OSE auf zwei Prüfgrößen, vertikaler Mittelwert (Mean) und Differenz zwischen Oberflächenwert und vertikalen Mittelwert (Stratification), reduziert. Die Rekonstruktionsfehler für den vertikalen Mittelwert von ISUNT, OSTIA und MARNT sind klein, mit Werten unter 5%, entlang der Küsten im flachen südlichen Bereich der Nordsee. Das dargestellte Muster lässt sich mit starken Gezeitenströmungen und einer daraus resultierenden starken vertikalen Durchmischung in der Region in Verbindung bringen. Generell lässt sich diese Region durch gut durchmischte Verhältnisse charakterisieren, was auch erklärt, warum die Oberflächenbeobachtungen aus OSTIA genauso aussagekräftig sind wie die *in-situ* Profilmessungen in den ISUNT- oder MARNT-OSEs. Die Leistung der OSTIA-OSE ist im Bereich der südlichen Bucht sogar etwas besser als die der ISUNT- oder MARNT-OSE. Der Grund hierfür ist, dass diese Region nur indirekt durch die MARNET-Stationen beobachtet wird und hier nur wenige Ferry Box-Messungen zur Verfügung stehen. Dies gilt auch für das tiefere Gebiet rund um Fladengrund. Mit Rekonstruktionsfehlern um 30% ist dieses Gebiet jedoch in keiner der OSEs gut erfasst, wobei die Leistung der OSTIA Konfiguration t aber etwas besser ist als die der anderen Konfigurationen. Die Leistung der FEBNT-Konfiguration ist die schlechteste unter den gezeigten OSEs, wobei der niedrigste Wert ca. 40% ist. Alles in allem sind die zu erkennenden Muster mit denen aus den MARNT- oder OSTIA-OSE vergleichbar, was darauf schließen lässt, dass die Position der verwendeten Schifffahrtsrouten keinen Einfluss auf den Jahresmittelwert der Prüfgröße hat. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der ISUNT-OSE und der MARNT-OSE zeigt den Mehrwert der Ferry Box-Messungen gegenüber den MARNET-Beobachtungen, welcher relativ klein ausfällt. Die zusätzlichen Ferry Box-Messungen senken den Rekonstruktionsfehler im Gebiet der südlichen Bucht und im Bereich zwischen Dogger Bank und Fladengrund um ca. 10%. Der relativ geringe Einfluss der Ferry Box-Messung lässt sich dabei vermutlich durch relativ große Datenlücken im verwendeten Datensatz erklären (siehe Abbildung 24).



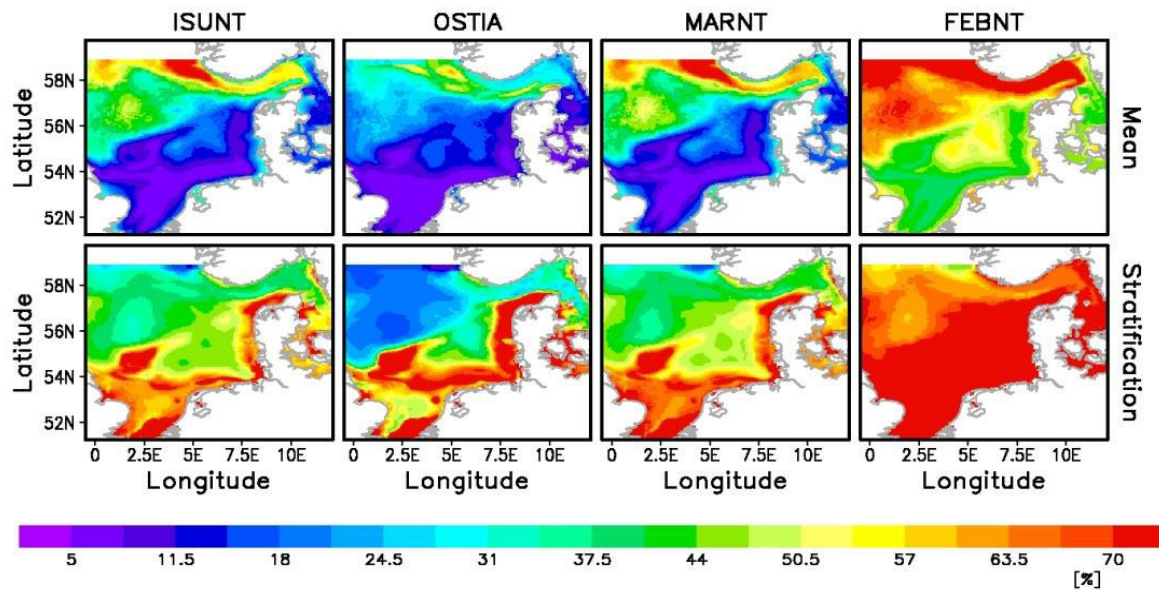


Abbildung 25: Jahresmittelwerte für die Standardabweichung des Rekonstruktionsfehlers für den vertikalen Mittelwert (obere Reihe) und die Stratifizierung (untere Reihe) für die Temperatur in den einzelnen OSEs

Die Muster in den OSEs zur Evaluierung der Leistung der Beobachtungsnetzwerke in Bezug auf die Vorhersage der Stratifizierung (untere Reihe in Abbildung 25) weisen in etwa ein gespiegeltes Verhalten zu den Mustern in den OSEs für die Vorhersage des Mittelwertes auf. Hierbei ist es intuitiv verständlich, dass eine gute Leistung in der Vorhersage des Mittelwertes durch gut durchmischte Verhältnisse in einem Gebiet erklärt werden kann. Dieser Umstand führt aber zu sehr kleinen Werten für die Standardabweichung der verwendeten Prüfgröße für die Stratifizierung, weshalb hier schon kleine Abweichungen in der Rekonstruktion zu hohen relativen Rekonstruktionsfehlern führen. Keine der Beobachtungsnetzwerkkonfigurationen ist in der Lage relative Rekonstruktionsfehler unter 15% zu erreichen. Es sollte trotzdem darauf hingewiesen werden, dass die OSTIA-Konfiguration größere Probleme damit hat die Stratifizierung entlang der Küsten in der Deutschen Bucht vorherzusagen als die ISUNT- oder MARNT-Konfiguration. Dies ist ein Indikator dafür, dass die dichteren Profilmessungen im tieferen Bereich der Deutschen Bucht einen positiven Einfluss auf die Vorhersagbarkeit der Stratifizierung an der Topographiekante entlang des eiszeitlichen Elbästuar haben.

Rekonstruktionsfehler für die Salzgehalte der OSEs sind in Abbildung 26 in gleicher Form wie für die Temperaturen dargestellt. Keine der untersuchten Konfigurationen (ISUNT, MARNT, FEBNT) ist hier in der Lage verlässliche Vorhersagen für größere Regionen und die gewählten Prüfgrößen zu liefern.

Die MARNT-Profilmessungen in der ISUNT- und MARNT-Konfiguration erreichen in einem relativ kleinen Gebiet um die Stationen Rekonstruktionsfehler um 18% für den Mittelwert über Grund (obere Reihe in Abbildung 26) und die Stratifizierung (untere Reihe in Abbildung 26). Dies zeigt, dass die Korrelationslängen für den Salzgehalt in der Nordsee sehr kurz sind. Eine flächendeckendere Rekonstruktion mit Fehlern um 30% wird nur mit der ISUNT-Konfiguration erreicht. Die uneinheitliche Verteilung der Rekonstruktionsfehler für den Mittelwert über Grund weist aber darauf hin, dass in der Rekonstruktion vertikale Fragmentierungen auftreten, welche mit den gewählten Prüfgrößen nicht aufgelöst werden. Im Vergleich der ISUNT-OSE mit der MARNT-OSE zeigt sich ein signifikanter positiver Einfluss der zusätzlichen Ferry Box-Messungen auf die Detektion der Schichtung in der Deutschen Bucht und entlang der nördlichen Seite der Dogger Bank.

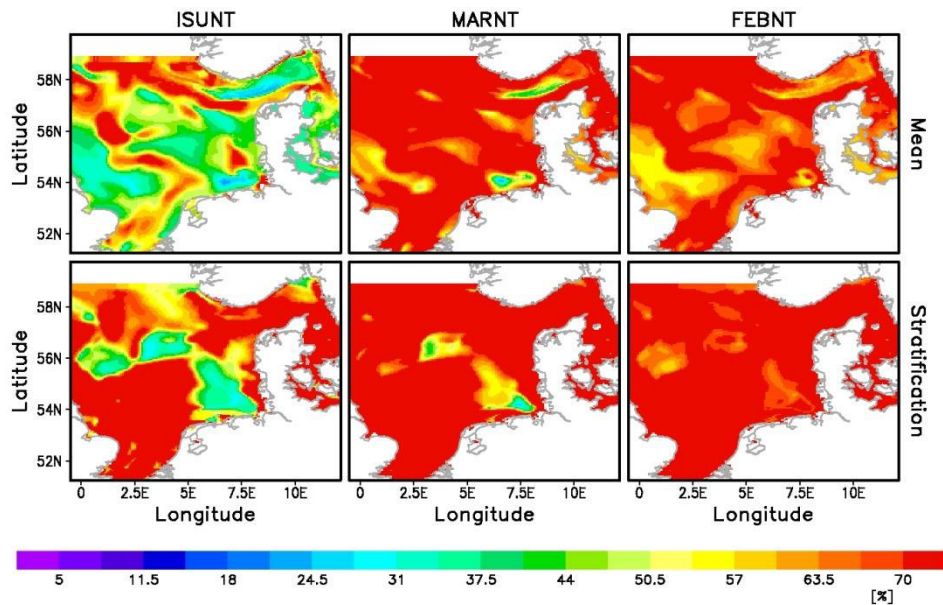


Abbildung 26: Die gleiche Darstellung wie in Abbildung 25 nur für die Salzgehalte in den OSEs (eine Beschreibung der Experimente ist im Text und in der Tabelle 1 dargestellt).

#### 4.3.4 Zusammenfassung

Das Ziel der Studie war es Methoden für eine quantitative Evaluierung des Beobachtungsnetzwerkes in der Deutschen Bucht vorzustellen, und beispielhaft Schwachpunkte bzw. eventuelle Verbesserungen des Netzwerkes zu diskutieren. Wir konnten zeigen, dass sowohl das existierende *in-situ* Beobachtungsnetzwerk (MARNET-Stationen + Ferry Box-Routen) als auch die Fernerkundungsinformationen aus OSTIA in der Lage sind gute Schätzungen für die mittlere Temperatur entlang der Küstenlinie in den flachen südlichen Gebiet der Nordsee und der Deutschen Bucht zu liefern. Für die Gebiete in der südlichen Bucht und des Fladengrunds liegt die Leistung in der OSE auf Basis von Fernerkundungsanalysen von OSTIA aufgrund ihrer guten zeitlich/räumlichen Abdeckung sogar etwas über den Leistungen der OSEs für die anderen Konfigurationen. Die Datensätze der *in-situ* Beobachtungen von den MARNET-Stationen und den Ferry Box-Routen weisen sehr hohe Fluktuationen in der Datenverfügbarkeit für 2010 auf, was sicherlich einen negativen Einfluss auf die Evaluierung der Vorhersagegüte in den entsprechenden OSEs hatte. Insbesondere der Datensatz für die Ferry Box-Messungen enthält längere Zeiträume ohne Daten, was deren Einfluss auf die Ergebnisse der Evaluierung noch weiter limitiert und sich auch in der unzureichenden Vorhersagegüte in den OSEs, welche nur Ferry Box Daten verwendeten, niederschlägt. Es besteht ein gewisses Potential in den Ferry Box-Daten in Kombination mit MARNET-Beobachtungen die Vorhersagegüte in von den MARNET-Stationen weit entfernten Bereichen zu verbessern.

Für das existierende Beobachtungsnetzwerk konnte beispielhaft gezeigt werden, dass Temperatur- oder Salzgehaltsschichtungen für das Gesamtgebiet nur eingeschränkt erklärbar sind.

Profilmessungen von MARNET-Stationen sind nur lokal informativ. Die Kombination von MARNET- und Ferry Box-Beobachtungen zeigte in den OSEs wiederum ein gewisses Potential zur Verbesserung der Vorhersagegüte. Neben der hier vorgestellten Studie ergaben sich aus dem TP 3.1B Beiträge zu den Veröffentlichungen Pein et al. (2016); Kourafalou et al. (2015); Stanev et al. (2015), Stanev et al. (2011); Grayek et al. (2010).

Das Teilprojekt 3.1B trägt zu den Monitoringkonzept „Assimilation gewässerphysikalischer Parameter“ (<http://wimo.meeresschutz.info/>) bei. Relevante untersuchte Indikatoren umfassen, ausgehend von

der Grundausstattung der hydrodynamischen Modelle, jährliche und jahreszeitliche Temperaturprofile, Strömungsgeschwindigkeiten, Auftriebsphänomene, Durchmischungseigenschaften, Trübung, Verweildauer von Partikeln und die räumliche und zeitliche Verteilung der Salinität (MSRL C1). Daraus ergeben sich Beiträge zu den „qualitativen Deskriptoren zur Festlegung des guten Umweltzustands“ Meeresbodenintegrität (MSRL D6) und hydrografische Bedingungen (MSRL D7).

## 4.4 Großskalige Modellierung der Schwebstoffdynamik

C. Geimecke (HZG), J. Staneva (HZG), K. Wirtz (HZG)

Das Küstenmeer ist geprägt durch hohe Transportraten suspendierter Partikel, gut sichtbar in der typischen Trübe der Küstengewässer in den Flussmündungen und Watten (siehe Titelbild). Über ihren Effekt auf die Indikatoren „Stabilität des Meeresbodens“ und „Eutrophierung“ ist die Dynamik der Schwebstoffe ständig im Visier des mit der MSRL beschäftigten Küstenmanagements. Organische Schwebstoffe prägen die Verteilung von Nährstoffen und die Ausbildung von biogeochemischen Gradienten, was zur Bewertung der Küsteneutrophierung zentral ist (EU-Wasserrahmen-Richtlinie und EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). Die Schwebstoffdynamik anorganischer, lithogenen Partikel wirkt sich auf die Sedimentologie und Morphodynamik des Küstenmeeres aus.

Beide Aspekte der Partikeldynamik, der sedimentologische und biogeochemische, werden in der Forschung in der Regel getrennt betrachtet. Im Teilprojekt 2.2 „Schwebstoffdynamik“ wurden in der Datenanalyse wie auch Modellierung erste Ansätze der Integration beider Aspekte geschaffen, was zu wichtigen Fortschritten im Systemverständnis führte. Mit integrativen Modellansätzen war es möglich, das Ausmaß und die Ursachen der starken raum-zeitlichen Ausprägung der Schwebstoffdynamik und einiger direkt davon abhängiger Prozesse wie der Remineralisierung des Partikulären Organischen Materials (POM) aufzuschlüsseln. Gerade in der Adressierung der Variabilität konnte die in WIMO eingesetzte Modellierung wichtige Empfehlungen zur Optimierung des Monitorings liefern, etwa hinsichtlich räumlicher Aspekte wie Standortauswahl und Relevanz ortskontinuierlicher Verfahren oder zur Einschätzung der Repräsentanz einzelner Messwerte.

Die Studie wurde mit dem gekoppelten 3D-Modellsystem GETM (General Estuarine Transport Model) realisiert, das aus den Komponenten Hydrodynamik, Welle und Schwebstoff besteht. Bei Letzterer wurden bei der Modellierung fünf verschiedene Sediment-Größenklassen mit entsprechenden Sinkgeschwindigkeiten betrachtet. Das Modellsystem ist in eine Richtung genestet, d.h. die Ergebnisse des äußeren Modells mit gröberer Auflösung (Deutsche-Bucht-Modell, Auflösung 1km) werden als Randwerte für das innere Modell mit feinerer Auflösung verwendet (hochaufgelöste Küstenmodelle für das ostfriesische Wattenmeer und die Sylt-Römö-Bucht mit einer Auflösung von 200m bzw. 50m). Dazu wurden Setups für die Küstenbereiche erstellt und nach erfolgreicher Validierung in das Deutsche-Bucht-Modell geschachtelt. Die Verwendung eines gekoppelten Modellsystems erlaubt die Simulation verschiedener Sensitivitätsstudien, bei der einzelne Parameter verstärkt, abgeschwächt oder ganz ausgeschaltet sind. Grundlage aller Modellexperimente war der entsprechende Kontrolllauf mit realistischem Antrieb.

### 4.4.1 Physikalische Treiber: Wind, Topografie und Tide

Langfristige horizontale Transportwege von Schwebstoffen im Küstenmeer der Nordsee lassen sich durch Restströmungen abbilden. Diese werden regional unterschiedlich von Wind, Bodentopographie, Dichteverteilung und Bodenreibung beeinflusst. Im Teilprojekt 2.2 wurden Modellexperimente durchgeführt, um den Einfluss des Windes auf die Zirkulation der Deutschen Bucht sowohl in der Stärke der Strömungsgeschwindigkeit als auch in der Richtung der Strömung zu quantifizieren. Im Untersuchungsgebiet der küstennahen Region vor Norderney wird die parallel zur Küste verlaufende Strömungskomponente stärker von Änderungen der Wasserdichte, der Bodentopographie sowie der Bodenrauheit als durch Wind beeinflusst. Der Einfluss der Topografie ist beträchtlich: Aufgrund des steileren Gefälles jenseits des Ostfriesischen Wattenmeers und der niedrigen Wassertiefe in der küstennahen Zone werden die dortigen Oberflächenströmungen stärker durch Bodenreibung gebremst als im Nordfriesischen Bereich, was durch eine Erhöhung der simulierten Strömungsgeschwindigkeit bei Annahme einer einheitlichen Topografie deutlich wird (Abbildung 27, Mitte). Küstenparallele Strömungsgeschwindigkeiten erhöhen sich vor der Nordfriesischen Küste. Durch die unterschiedliche Topografie mit jeweils flacherer/tieferer Küstenzone und dafür

tieferer/flacherer Übergangszone reagieren die beiden Regionen auch unterschiedlich auf Windstress, wobei insgesamt die Sensitivität auf Wind geringer ist als auf die nichtlineare Interaktion von Tiden und Topografie. Bei einer Verringerung der Bodenreibung im Modell ergeben sich signifikante Änderungen der Restströme hauptsächlich im flachen Wasser zwischen Weser -Elbe und Helgoland ohne Barriereinseln (Abbildung 27, rechts).

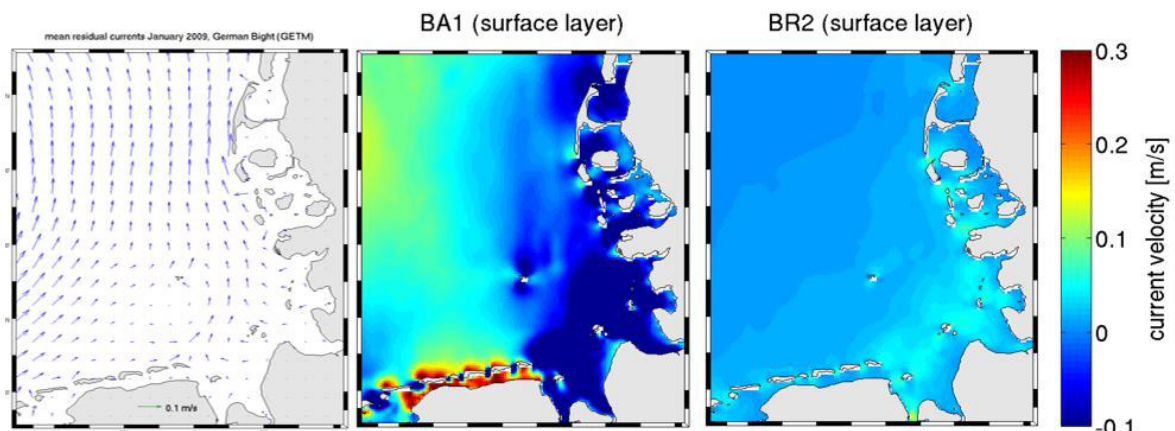


Abbildung 27: Mit dem Modell GETM (General Estuarine Transport Model) berechnete mittlere Oberflächenströmungen für Januar 2009 (links) und Änderung der Strömungsgeschwindigkeit bei gemittelter Topografie (mitte) und halbiertes Bodenrauheit (rechts).

#### 4.4.3 Wirkung von Extremereignissen

Im Unterschied zu organischen und kohäsiven Partikeln findet der Transport sandiger Sedimente in Suspension hauptsächlich während Sturmereignissen statt. Der Einfluss von Extremereignissen auf den großskaligen Sedimenttransport wurde hier am Beispiel des Sturms „Britta“ untersucht, einer der schwersten Stürme des 21. Jahrhunderts mit Spitzen-Windgeschwindigkeiten über 150 km/h. Der Sturm traf die niedersächsische Küste am 1. Nov. 2006 und verursachte dort eine schwere Sturmflut. Mithilfe des gekoppelten Modellsystems wurden Fallstudien mit und ohne Wellen gerechnet, um die Wirkungsweise starken Wellengangs auf unterschiedliche Schwebstoff-Fractionen im ostfriesischen Wattenmeer zu untersuchen.

Die Simulationen zeigen eine starke Erhöhung des Energieeintrags in die Wassersäule, vor allem im gesamten Inselvorfeld und den Tidebecken des ostfriesischen Wattenmeers (Abbildung 28). Bereits vor Eintreffen des Sturmhöhepunkts formt der Wellengang das Verteilungsmuster der suspendierten Sedimente (Abbildung 29).

Nördlich der ostfriesischen Inseln reicht der Energieeintrag im Fall ohne Wellen nicht aus, selbst die leichteste, da kleinste Schwebstoff-Fraktion zu erodieren und in die oberste Wasserschicht zu mischen, während im Fall mit Wellen die Oberflächenkonzentration von Sedimenten dort stark ansteigen.

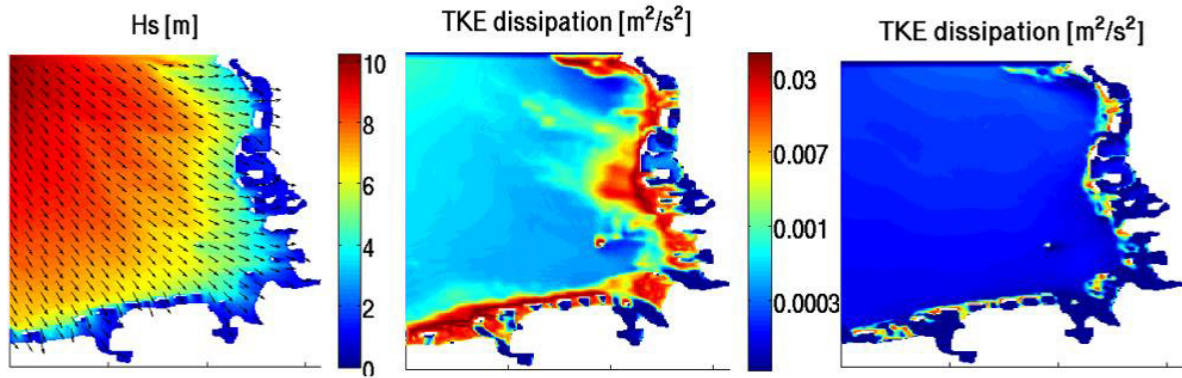


Abbildung 28: a) Signifikante Wellenhöhe [m] in der Deutschen Bucht während des Sturms Britta am 01.11.2006. (b) Mit GETM berechnete Verteilung der Turbulenten Kinetischen Energie (TKE) am 01.11.2006 (c) Zum Vergleich, TKE unter meteorologisch normalen Bedingungen (3.11.2006).

Für weitere Untersuchungen wurde der Transport durch einen horizontalen Transekt zwischen den Inseln Langeoog und Spiekeroog bestimmt. Dazu wurde die kumulative Summe aller Größenklassen über den gesamten Berechnungszeitraum für das jeweilige Szenario berechnet (Abbildung 29, unten).

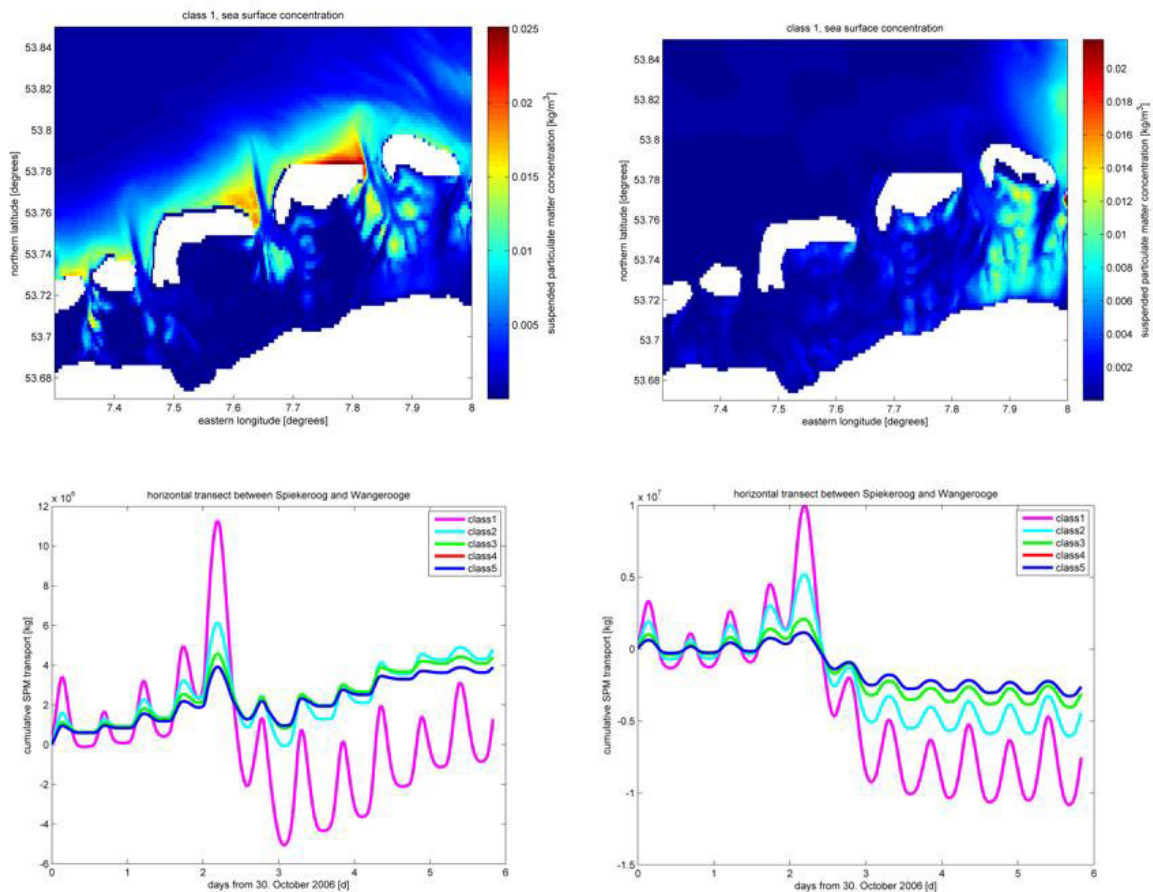


Abbildung 29: oben: Oberflächenkonzentration der kleinsten SPM-Klasse während der ersten Flutphase (30.10.2006) des Simulationszeitraumes, mit Wellen gerechnet (links) bzw. ohne (rechts). unten: Kumulativer Transport von fünf SPM-Größenklassen zwischen Wangeroog und Spiekeroog mit Wellenmodell (links), bzw. ohne (rechts).

Der Verlauf der kumulativen Summen der Oberflächenkonzentration zeigt den Einfluss der Gezeiten, deren Effekt am klarsten für die am langsamsten sinkende Größenklasse erkennbar ist. Durch die hohen Windgeschwindigkeiten während des Sturmhöhepunktes konnten deutlich größere Mengen an Sediment vor der niedersächsischen Küste suspendiert und in die Tidebecken transportiert werden als

in den Simulationen ohne Wellen. Die kumulative Summe insbesondere der schweren Fraktionen bleibt am Ende des Sturmereignisses leicht positiv, d.h. Material wurde im Rückseitenwatt abgelagert. Das Szenario ohne Wellen beschreibt das Gegenteil, d.h. einen Nettoexport, was die Notwendigkeit einer vollständigen Beschreibung der physikalischen Kräfte bei der Simulation des Partikeltransports demonstriert.

#### 4.4.4 Biologische Treiber der Schwebstoffdynamik?

Der Transport der oft relativ leichten organischen Bestandteile des Schwebstoffs wird primär von langfristigen Veränderungen im Reststrom gesteuert. Auf langen Zeitskalen können aber selbst scheinbar sekundäre Prozesse durch Akkumulation eine zentrale Rolle spielen. Dies wurde anhand von Trübungsprofilen deutlich, die von einer semi-autonomen ScanFish-Messplattform als Teil von COSYNA gemessen wurden (März et al 2016). Die Kombination dieser Daten mit berechneten Turbulenzgrößen aus dem numerischen Modell GETM konnte die Sinkgeschwindigkeit von Schwebstoffen in Raum und Zeit rekonstruiert werden. Die Rekonstruktion zeigt ein Maximum der Sinkgeschwindigkeit im nahen Küstenvorfeld der Deutschen Bucht (siehe Abbildung 30). Als Konsequenz kommt es in diesem Bereich zu einem starken Abfall der Schwebstoffkonzentrationen in der oberen Wassersäule, der mit einer Verschiebung der Schwebstoffzusammensetzung zugunsten organischen Materials in Richtung der offenen Deutschen Bucht zusammenfällt. Die Ergebnisse deuten auf eine Übergangszone, die sowohl für den Nährstoff- wie auch Sedimenttransport als natürliche Grenze wirkt. Die resultierende „Schwebstofffalle“ und die damit einhergehende Nährstoffzirkulation könnte eine der natürlichen Ursachen der Eutrophierung des Wattenmeeres bilden (s. Kapitel 4.5).

Erhöhte Sinkgeschwindigkeiten im Küstenvorfeld sind möglicherweise biologisch induziert: Anorganische und organische Partikel sind als individuelle „Primärpartikel“ suspendiert oder in Aggregaten vermengt. Letztere sind sehr groß und – je nach organischer Zusammensetzung - auch relativ schwer, d.h. besitzen eine hohe Sinkgeschwindigkeit. Die Aggregatbildung wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, von denen die „Klebrigkeit“ die wahrscheinlich größte Rolle einnimmt (Alldredge et al 1993, März & Wirtz 2009). Diese Klebrigkeit resultiert wiederum aus Biofilmbildung auf Primärpartikeln und aus hohen Freiwasserkonzentrationen von Planktonausscheidungen in Form von langkettigen Kohlenstoffverbindungen, sog. Exopolymeren.

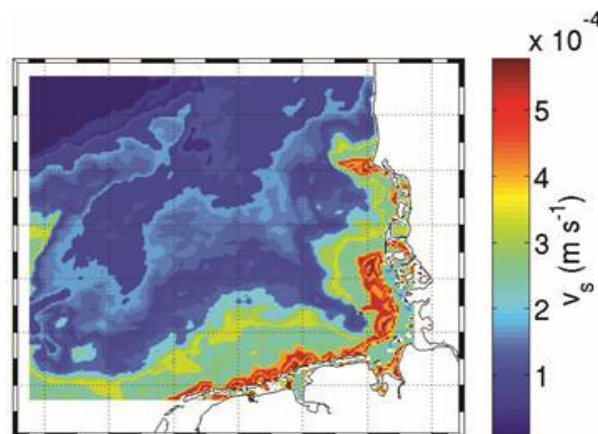


Abbildung 30: Horizontale Gradienten in der jahresgemittelten Sinkgeschwindigkeit des Schwebstoffs, rekonstruiert auf der Basis von ScanFish-Daten und Modellergebnissen aus GETM (März et al, 2016)

#### 4.4.5 Schwebstoffdynamik als Quelle von Zonierung und Variabilität im Küstenmeer

Die komplexen Wirkungsbeziehungen zwischen Hydrodynamik, Transport und Biogeochemie im Küstenmeer erfordern integrative Ansätze um die Schwebstoffdynamik im Flachwasser zu erfassen. Für eine Integration von physikalischen, biologischen, chemischen und geologischen Modulen wurde

im Teilprojekt 2.1 auf die Infrastruktur des Partnervorhabens „Modulares System für Schelfmeere und Küsten“ (MOSSCO) zurückgegriffen.

Die hier verwendeten Anwendungen umfassten sowohl ein idealisiertes Modell eines Küstenquerprofils (Transekt) als auch eine realitätsnahe, dreidimensional-hochaufgelöste Konfiguration. Die modulare Struktur von MOSSCO ermöglichte die Kopplung des Strömungsmodells GETM (bei Erweiterung des Modellgebiets nach Westen zur Berücksichtigung der niederländischen Flußfrachten) mit biogeochemischen Modulen für die Wassersäule und den Meeresboden. Das Modell des idealisierten Transekts zur Erklärung küstennaher Nährstoffgradienten zeigt, dass die Schwebstoff-Akkumulation im Küstenvorfeld eine biogeochemische Zonierung sowohl im Wasser als auch am Boden erzeugt (Abbildung 31). Die Akkumulation ist dabei Folge der residualen, dichteabhängigen Zirkulation. Ergebnisse des Modells OMEXDIA (Ocean Margin Exchange) zeigt, dass diese Akkumulation die Denitrifikationsrate des Küstenvorfeldes verstärkt. Diese prognostizierte Entfernung von Stickstoff aus dem Küstenkreislauf über Denitrifikation könnte eine wichtige Ökosystemdienstleistung darstellen. Die von der Akkumulation und dem benthischen Umsatz abhängigen Nährstoffkonzentrationen des Wattenmeeres und der Deutschen Bucht bilden damit wichtige Zielgrößen der WRRL und MSRL.

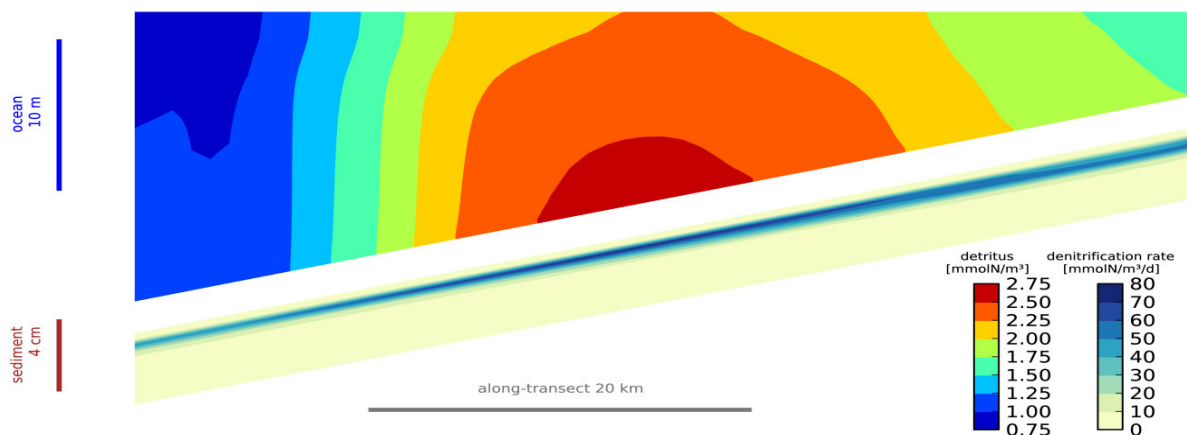


Abbildung 31: Modular gekoppeltes, idealisiertes Transekt-Modell zur Verteilung organischer Schwebstoffe im Küstenvorfeld und zur horizontalen Veränderung der Denitrifikationsrate im Sediment (Hofmeister et al, subm.). Deutlich ist etwa 30km von der Küste eine Zone erhöhter Detritus-Konzentration zu erkennen. Als Folge sind dort auch die simulierten Denitrifikationsraten in der sub-oxischen Bodenschicht erhöht.

Mit einer hochaufgelösten dreidimensionalen Konfiguration des Modells für die südliche Nordsee konnten die Ergebnisse prinzipiell bestätigt werden, da die erhöhten Deposition organischen Materials auf dem Boden des Wattenmeeres und Inselvorfeldes reproduziert wurden (Abbildung 32). Hier zeigten numerische Experimente analog zu den oben gezeigten Sensitivitätsstudien aber auch, dass die Gradientenbildung signifikant von der Erosion und Suspension von Schwebstoffen abhängt. Paradoxerweise erzeugt eine Erhöhung der Erosion in den energetischen Flachwasserbereichen (vgl. Abbildung 27, rechts) und der damit verknüpfte verstärkte Transport des Materials eine Erhöhung der resultierenden absoluten Depositionsrate – zum Teil aufgrund des Imports aus der Übergangszone. Der tiefenabhängige Lateraltransport führt aber auch zu ausgeprägter horizontaler Variabilität in der Auflage organischen Materials, welche absehbar eine ähnliche Variabilität in den angeschlossenen biogeochemischen und ökologischen Prozessen im und am Meeresboden erzeugt. Die mesoskaligen Strukturen erhöhter organischer Deposition in Abbildung 32 (rechts), deren Lage sich im Modell zeitlich moderat verändert, belegen nicht nur die häufig zitierte aber selten quantifizierte Heterogenität der Nordseeküste. Sie definieren auch eine Richtschnur für ein effektives Monitoring, insbesondere zu den wichtigen Indikatorgrößen wie die Stabilität des Meeresboden oder Nährstoffwerte. Vereinzelt,



lokale Messungen schaffen kaum ein repräsentatives und damit auch belastbares Bild. Notwendig sind stattdessen entweder ein dichteres Netz an ortsgebundenen Stationen oder semi-kontinuierliche Verfahren, wie sie verstärkt in COSYNA zum Einsatz kommen, etwa ScanFish, Glider oder Ferrybox.

Anlaufende und zukünftige Modellierungsprojekte (z.B. MOSSCO-Synthese) werden sich einer Einbindung dieser Modellansätze in Monitoringstrategien stellen. Deren Erfolg wird aber kritisch von der Verfügbarkeit von kohärenten Datensätzen abhängen, die etwa unterschiedliche physikalische, geologische und biologische Kenngrößen für einen Untersuchungsstandort umfassen.

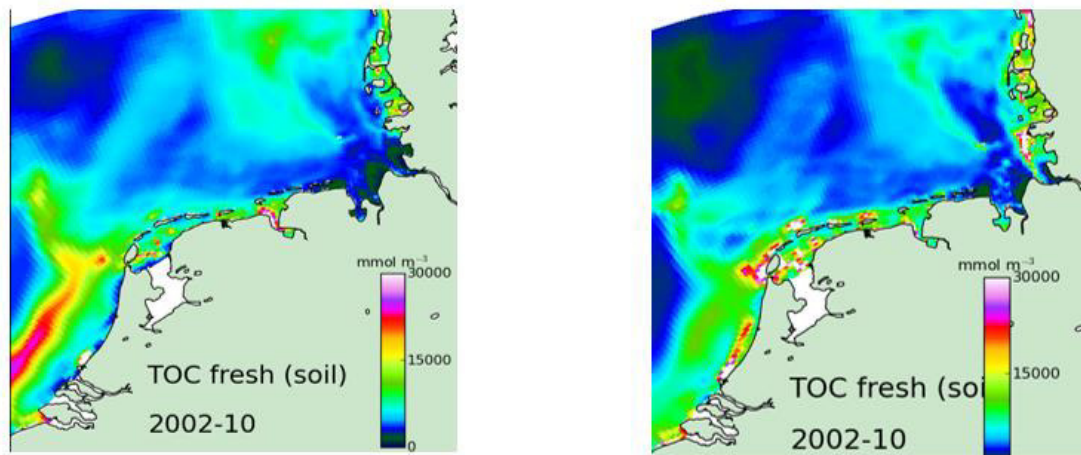


Abbildung 32: Organisch gebundener Kohlenstoff in den obersten 5mm des Meeresbodens der südlichen Nordsee, einmal mit konstanter Resuspension gerechnet (links) und mit variabler, TKE-abhängiger Resuspension (rechts)

## 4.5 Statistische Modellierung

I. Kröncke (SaM), H. Neumann (SaM)

Im Unterschied zur Modellbildung auf Basis von bekannten Grundgleichungen zur Beschreibung der Hydro- und Transportdynamik, werden für die Beschreibung von Wechselwirkungen in Ökosystemen oft statistische Modelle verwendet (Guisan and Zimmermann 2000, Elith et al. 2009). So werden beispielsweise für Aussagen zur Besiedlungsstruktur und -wahrscheinlichkeit (Habitatmodellierungen) verschiedene abiotische Deskriptoren flächenhaft überlagert, um ökologische Nischen von Arten auf Basis ihrer bekannten Vorkommen zu definieren und daraus ihre potentielle Verbreitung flächenhaft in Form von Wahrscheinlichkeiten vorherzusagen (Abbildung 33). Ergebnisse der Habitatmodellierung ermöglichen dabei die Abschätzung von Habitat-Art Beziehungen und die Erstellung von Habitat-/Biotopkarten. Für das benthologische Monitoring ermöglicht diese Art der Habitatmodellierung unter anderem eine wesentliche Verringerung des Probennahme-Aufwands, da die potenzielle Verbreitung von Arten und Gemeinschaften auf Basis weniger Fundorte großflächig vorhergesagt werden kann.

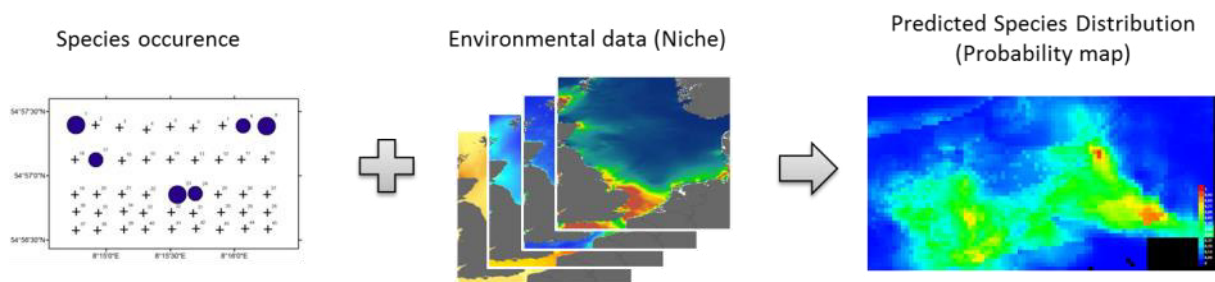


Abbildung 33: Prinzip der Habitatmodellierung. Korrelation zwischen Felddaten von Arten mit verschiedenen Umweltparametern in derselben räumlichen Auflösung ermöglicht die Modellierung der Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Arten.

Im Rahmen von WIMO wurde im Teilprojekt 1.1 diese Art der Habitatmodellierung angewandt, um die Verbreitungsmuster benthischer Makrofaunaarten basierend auf den kleinräumigen Ergebnissen der Diagnoseflächen großräumig zu modellieren, sowie die Modellierung von kompletten benthischen Gemeinschaften zu erproben. Hier wurde die Maximum-Entropy Methode (MAXENT) (Elith et al. 2011) unter Berücksichtigung von 10 Umweltfaktoren (Temperatur (Sommer/Winter), Salzgehalt (Sommer Winter), TOC, Schlickgehalt, Chlorophyll, Primärproduktion, Bodenschubspannung, Bathymetrie) benutzt. Das Modell wurde bereits für die Modellierung von Makrofaunaarten auf Nordsee Skala (Reiss et al. 2011, Neumann et al. 2013) und für die Prognose von Veränderungen in der Verbreitung von Makrofaunaarten in der gesamten Nordsee eingesetzt (Weinert et al. 2016).

### 4.5.1 Modellierung des Vorkommens von charakteristischen Makrofaunaarten der Diagnosefläche Kampen in der deutschen AWZ

Auf Basis von Daten aus dem Untersuchungsgebiet vor Kampen / Sylt konnte die potentielle Verbreitung der dort vorkommenden Makrofaunaarten großräumig für die südöstliche Nordsee modelliert werden. Für den Borstenwurm *Pisone remota* wird das in Abbildung 34 beispielhaft gezeigt: Es war möglich, die potentielle Verbreitung der Art auf Grobsand-Gebieten in der südöstlichen Nordsee vorherzusagen (z.B. Doggerbank, Borkum Riffgrund, Amrumbank). Neben dem Schlickgehalt des Sediments hatte die Bodentemperatur im Sommer einen relativ großen Einfluss auf die Modellergebnisse für *P. remota*. Neben *P. remota* wurden die Habitatmodelle noch für drei weitere Charakterarten der Diagnosefläche Kampen gerechnet (Seeigel *Echinocardium cordatum*, Borstenwürmer *Aonides paucibranchiata*, *Scoloplos armiger*). Ergänzend ist zu erwähnen, dass sich die Modelle unter Berücksichtigung weiterer bekannter Fundorte der entsprechenden Arten in der südöstlichen Nordsee wesentlich verbesserten. Hierfür ist im Wesentlichen die Auflösung (bzw. Rastergröße) der Nischen beschreibenden Umweltfaktoren ausschlaggebend.

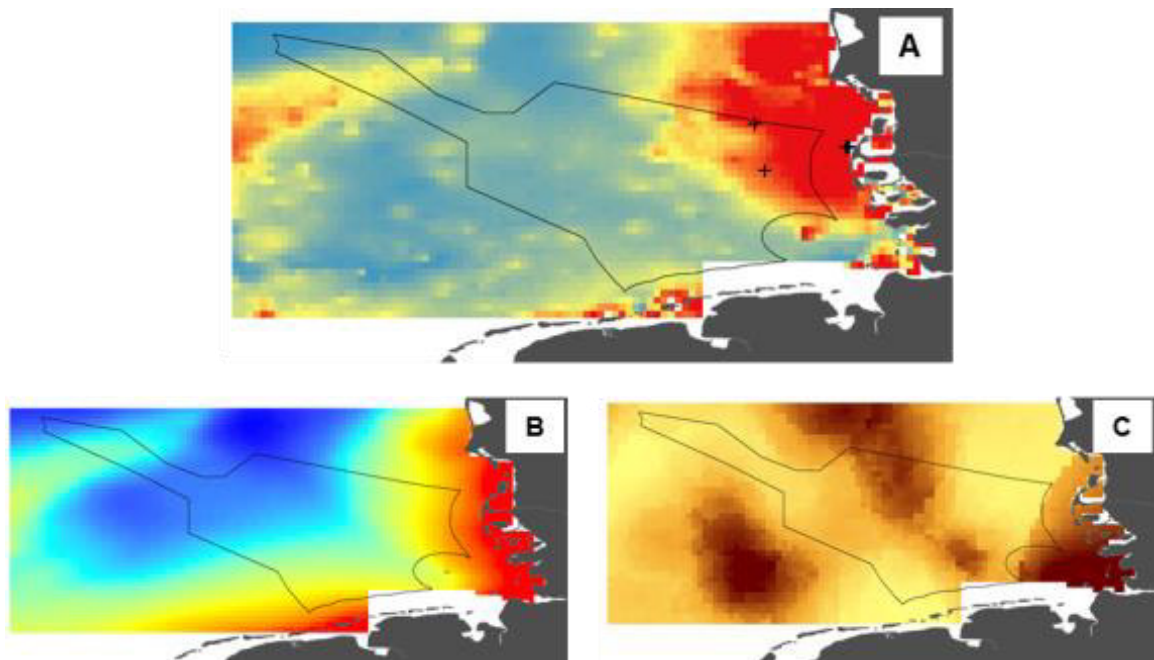


Abbildung 34: Habitatmodell für den Polychaeten *Pisione remota* in der süd-östlichen Nordsee (A) (rot = hohes potentielles Vorkommen). Dem Modell liegen 10 abiotische Faktoren zugrunde, wobei die Bodentemperatur im Juni (B) und der Schlickgehalt des Sedimentes (C) den größten Einfluss auf das Modell hatten.

#### 4.5.2 Modellierung benthischer Gemeinschaften in der deutschen AWZ

Für die Modellierung von Makrofaunagemeinschaften im Teilprojekt 1.1 wurden außerdem großräumige Daten für die deutsche AWZ (Endofauna) und die südliche Nordsee (Epifauna) benutzt. Diese wurden im Vorfeld mit multivariaten statistischen Methoden ausgewertet, um das Vorkommen der Gemeinschaften als Eingangsvariablen für die Modellierung zu bekommen. Neben den bereits genannten Umweltvariablen wurde zudem der Fischereidruck als habitatbeschreibende Variable in die Modelle implementiert, um den Einfluss anthropogener Faktoren auf die Verbreitung von Makrofaunagemeinschaften abschätzen zu können. Die potentielle Verbreitung der Makrofaunagemeinschaften in der AWZ und der südlichen Nordsee konnte erfolgreich modelliert werden und entsprach zu großen Teilen dem Kenntnisstand über die räumliche Verbreitung der Gemeinschaften. Insbesondere in den küstennahen Gebieten hatte die Fischerei einen ähnlich hohen Einfluss wie andere Umweltvariablen (z.B. Wassertemperatur) auf die Modellergebnisse.

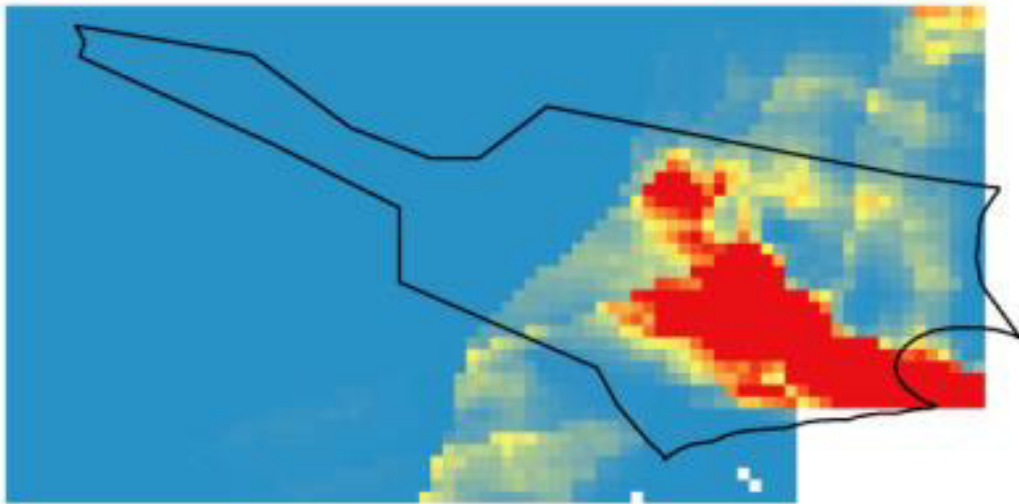


Abbildung 35: Modellierter Epifaunagemeinschaft im Bereich des Oystergrounds (rot = hohes potentiell Vorkommen)

#### 4.6 Modellgestützte Charakterisierung von Transportmustern

U. Callies (HZG), F. Schwichtenberg (HZG)

In Rahmen zweier Fallstudien, die sich mit Transporten in der Deutschen Bucht beschäftigten, wurde auf bereits existierende langfristige Rekonstruktionen atmosphärischer und mariner Strömungsbedingungen zurückgegriffen. Diese verwendeten Modelldaten waren im Rahmen der Klimaforschung erzeugt worden und liegen als archivierte Produkte operationeller Modellierung vor. Bei stark reduziertem Modellieraufwand bieten die Modelldaten Gelegenheit, Ergebnisse langfristigen Monitorings vor dem Hintergrund hydrodynamischer Rahmenbedingungen zu interpretieren. Darüber hinaus wurden die Daten in einer Öl- Risikoanalyse für eine Simulation einer hohen Anzahl hypothetischer Unfälle unter realitätsnahen Bedingungen verwendet. In beiden Studien wurden Rechnungen mit dem Lagrangeschen Transportmodul PELETS durchgeführt. In den Abschnitten 5.3 und 6.2 werden beide Fallstudien im Detail beschrieben, hier sollen lediglich die verwendeten Ansätze kurz zusammengefasst werden.

**Fallstudie Eutrophierung** (siehe Abschnitt 5.3): Eine Fallstudie zum Indikator Eutrophierung verfolgte die These, dass die Dauer des Kontakts mit dem Meeresboden (Eulitoral) das Ausmaß bestimmt, in dem sich Wasser mit Produkten aus dem Abbau organischen Materials im Sediment anreichert. Bei geringen Wassertiefen ist zu erwarten, dass die Anreicherung stärker ist als in tiefem Wasser. Um regionale Unterschiede in der Bedeutung dieses Effektes abzuschätzen, wurden ausgehend von jedem Tidebecken Rückwärtstrajektorien gerechnet. Als Maß für einen Kontakt mit dem Eulitoral wurde dabei die Vorgeschichte jedes Wasserkörpers im Hinblick auf den Zeitanteil analysiert, in welchem er sich in Regionen mit Wassertiefen von < 2 m befand. Um Tidebecken zuverlässig zu charakterisieren, wurde eine sehr große Zahl derartiger Simulationen (alle 28 Stunden innerhalb des Zeitraums 1958-2003) aufgesetzt und basierend auf Strömungssimulationen aus der Datenbank coastDat ([www.coastdat.de](http://www.coastdat.de); Weisse et al., 2009) in die Vergangenheit zurückgerechnet.

**Risikoanalyse Ölsensitivität** (siehe Abschnitt 6.1): Arbeiten zur Sensitivität der Küstenzone auf Ölverschmutzungen konzentrierten sich auf die Identifikation von Regionen, in welchen im Falle einer Verschmutzung das Ausbringen eines chemischen Dispergators mit hoher Wahrscheinlichkeit nutzbringend wäre. Vereinfachend wurde in der Studie „nutzbringend“ dahingehend definiert, dass 100% wirksame chemische Dispersion die in das Wattenmeer eingebrachte Menge der Verschmutzung

um mindestens 95% reduzieren würde. Ob dies erreicht wird, hängt außer vom Ort der Öleinleitung auch von den vorherrschenden Wind- und Strömungsbedingungen ab. Für die Drift unbehandelten Öls an der Wasseroberfläche ist insbesondere der direkte Windschub ein wichtiger Faktor. Durch Dispersion und Einmischen in die Wassersäule wird dieser Windschub unterdrückt bzw. stark reduziert. Auf Basis der Simulationen von 2190 hypothetischen Unfällen im Zeitraum 2008-2014 wurde für jeden Ort in der Deutschen Bucht die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt, dass a) der Seegang einen Einsatz von Dispergatoren erlaubt und b) dieser sich dann auch als nutzbringend im oben definierten Sinne erweist. Die Abschätzung dieser Wahrscheinlichkeiten fußt auf einer konsistenten Beschreibung von Wind, Strömung und Wellen, wie sie die operationelle Modellierung des BSH kombiniert mit der Datenbank coastDat (Wellen) liefern.



## 5. Darstellung und Bewertung von Deskriptoren

J.v.Beusekom (HZG), H. Hillebrandt (ICBM), H.-C. Reimers (LLUR), C. Winter (MARUM)

### 5.1 Einleitung

Die Beschreibung des guten Umweltzustands (GES) im Rahmen der MSRL-Umsetzung erfolgt auf Grundlage von im Anhang I der Richtlinie aufgeführten 11 qualitativen Deskriptoren. Grundsätzlich ist die Anwendbarkeit aller Deskriptoren von den Mitgliedsstaaten für ihre jeweiligen Meeresregionen oder Subregionen zu prüfen, um zu ermitteln, welche für die Beschreibung und Bewertung des GES von Bedeutung sind. Für die deutsche Nordsee wurden alle der folgenden 11 Deskriptoren als relevant erachtet:

- D1 - Biodiversität
- D2 - Nicht-einheimische Arten
- D4 - Nahrungsnetz
- D5 - Eutrophierung
- D6 - Meeresgrund
- D7 - Hydrografische Bedingungen
- D8 - Schadstoffe
- D9 - Schadstoffe in Lebensmitteln
- D10 - Abfälle im Meer
- D11 - Einleitung von Energie

Für die Umsetzung der MSRL ist eine wesentliche Aufgabe der Mitgliedstaaten, zu jedem Deskriptor nach Möglichkeit ein oder mehrere geeignete Monitoringprogramme aufzustellen. Da die Deskriptoren in der Richtlinie jedoch wenig konkret beschrieben werden, hat die EU-Kommission 2010 in einem Beschluss über die Kriterien und methodischen Standards zur Feststellung des guten Umweltzustands von Meeresgewässern dies durch insgesamt 29 Kriterien und 56 Indikatoren nachgeholt. Diese so genannte COM-Decision befindet sich zusammen mit dem Anhang III (Merkmale und Belastungen) derzeit im Revisionsprozess.

Das Verbundprojekt WIMO hat im Rahmen projektübergreifender Analysen Deskriptoren, Merkmale und Belastungen der MSRL und die Qualitätskomponenten der WRRL für verschiedene Lebensraumtypen (FFH Richtlinie) bearbeitet und die Ansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet. In diesem Bericht werden Ergebnisse zu den Deskriptoren D1, D5 und D6 hervorgehoben.

Eine Diskrepanz zwischen theoretischem Konzept und praktischer Umsetzung lässt sich besonders am **Deskriptor D1 Biodiversität** zeigen, da für diesen sowohl die Quantifizierung als auch die funktionelle Indikationsrolle des Deskriptors unklar sind. Zu letzterem hat WIMO einen eigenständigen Beitrag geliefert (Kapitel 5.2), zur Quantifizierung ist in der wissenschaftlichen Literatur eine interessante Kontroverse entstanden, die vor allem durch die Unzulänglichkeit der Messparameter für die Biodiversität entsteht. Während es kaum Zweifel gibt, dass die globale Extinktionsrate ein besorgniserregendes Ausmaß angenommen hat (Barnosky 2011, Mace 2005), ist die Bedeutung der lokalen Biodiversität auf der Ebene einzelner Ökosysteme viel weniger klar. Die Analyse von weltweit verfügbaren Datensätzen zur zeitlichen Entwicklung mariner Artenzahlen zeigt kein eindeutiges Bild. Es gab sogar ein Übergewicht positiver Trends (mehr Arten über Zeit). Negative Trends wurden nur in einem Bruchteil der Datenserien gefunden und zwar in Habitaten mit einem klar dokumentiertem lokalem menschlichem Eingriff (Elahi 2015). Ähnliche Ergebnisse wurden auch für terrestrische Daten beschrieben (Vellend 2013).

Wie kommt es zu dieser Diskrepanz zwischen der dokumentierten Verarmung der globalen Biodiversität, und der augenscheinlichen Konstanz lokaler Biodiversität? Diese Frage ist nicht nur von

grundlegender wissenschaftlicher Bedeutung, sondern auch für den Deskriptor Biodiversität, denn die Bewertungseinheit ist das lokale Ökosystem, nicht der Planet Erde. Die Diskrepanz zwischen den globalen und lokalen Trends wird noch drastischer wenn man sich für gut dokumentierte Organismengruppen die lokalen Populationstrends anschaut. Diese sind sehr oft negativ, gerade für langlebige oder Habitat-bildende Organismen (Lotze 2006). Der primäre Grund liegt in der Unzulänglichkeit des Parameters „Artenzahl“ für die Quantifizierung der Biodiversität. Eine Unzulänglichkeit, die mindestens drei Dimensionen hat:

Zunächst ist Artenzahl ein Parameter, der sich erst sehr spät im Laufe einer Degradierung der Biodiversität ändert. Selbst massive Dominanzverschiebungen in einer Lebensgemeinschaft können ohne Veränderung der Artenzahl beobachtet werden, solange Restpopulationen vorhanden bleiben (Hillebrand 2008). Zum anderen können selbst bei Aussterben von Arten einwandernde Arten die Artenzahl konstant halten, wobei es dennoch zu massiven funktionalen Veränderungen der funktionellen Vielfalt kommen kann: Eine globale Analyse von Aussterbe- und Invasionsereignissen zeigt, dass Top-Prädatoren in Nahrungsnetzen besonders von Extinktion betroffen sind, aber einwandernde Arten vor allem in unteren trophischen Ebenen zu finden sind (Stachowicz 2007). Besonders schwierig ist die Quantifizierung von Artenzahl jedoch aufgrund der erheblichen Anfälligkeit des Ergebnisses für den betriebenen Aufwand: Die Artenzahl und ihre zeitliche Veränderung hängt nicht nur an der Probennahme- und Auswertemethode, sondern am Beprobungsgrad, an der Größe des regionalen Artenpools und der Dominanzverteilung der Arten in einer Gemeinschaft (Chase 2013). Ein besonders schwacher Beprobungsgrad führt zu hohen Schätzungen für Veränderungen der Artenzahl, da bereits leichte Schwankungen der Populationsgröße eine Art unter oder über das Detektionslimit drücken kann. Besonders komplette Inventuren ergeben zwar ein klares Bild der Veränderung der Gemeinschaftszusammensetzung, aber erlauben selbst für sehr selten gewordene Arten die Detektion, was wiederum zu einer geringen Veränderung der Artenzahl führt. Angesichts dieser methodischen Schwächen des Konzeptes „Artenzahl“ ist es wenig verwunderlich, dass die o.g. Metaanalysen über viele Langzeittrends hinweg kein klares Bild liefern, da der Beprobungsgrad, die Dominanzverteilung und die potenzielle Artenzahl (der Artenpool) zwischen diesen Studien variieren. WIMO hat im Rahmen der Analyse der Indikationsrelevanz des Deskriptors Biodiversität versucht, auch diese Schwierigkeiten des Deskriptors Biodiversität einzubeziehen.

Die MSRL zielt auf eine Minimierung der von Menschen verursachten Anreicherung von Nährstoffen in der Meeresumwelt und lässt dies im **Deskriptor D5 Eutrophierung** beschreiben. Um die Bewertung der Eutrophierung unter den Mitgliedstaaten vergleichbar zu machen, wurden folgende Kriterien vorgeschlagen: Nährstoffe; Direkte Auswirkungen wie Phytoplanktonbiomasse, Sichttiefe, opportunistische Makroalgen oder Artenverschiebungen; Indirekte Auswirkungen auf Seegrass oder Sauerstoffdynamik.

Für die Überwachung der Eutrophierung gibt es bereits mehrere langlaufende Programme, die die oben genannten Aspekte abdecken und die teilweise bis in die 1980-er Jahre zurückgehen. Weil das Maximum der Eutrophierung um 1990 erreicht wurde, dokumentieren die Zeitreihen vor allem die rezente Abnahme der Eutrophierung (z.B. QSR 2010). Die laufenden Programme sind sicherlich nicht optimal, aber für die Erfassung von Trends sind vor allem lange, konsistente Zeitreihen notwendig und deswegen ist eine grundsätzliche Erneuerung der Messprogramme auch nicht notwendig. Eine Ergänzung der existierenden Zeitreihen mit dauerhaften Sauerstoffmessungen mit der die Produktionsleistung des Phytoplanktons erfasst werden kann, wird aber vorgeschlagen. Die Bewertung der Zeitreihen hat aber einige grundsätzliche Fragen aufgedeckt, die im Rahmen von WIMO untersucht wurden: regionale Unterschiede der Eutrophierung und die Entwicklung einer gesamtökologischen Bewertung.



Beim Deskriptor **D6 „Meeresbodenintegrität“** wird hinsichtlich der Verbreitung und Ausdehnung der benthischen Habitate zunächst eine hochauflösende geographische und hydromorphologische Beschreibung des Meeresbodens erwartet. Dies ist mit den im Kapitel 2 und 3 beschriebenen Methoden der Fernerkundung und Modellierung auch weitgehend möglich. Die eigentliche Bewertung des Deskriptors erfolgt jedoch anhand der ökologischen Qualitätskomponenten und benthischen Lebensgemeinschaften, für die derzeit noch keine flächendeckende Monitoringstrategie existiert. Hier lässt die Richtlinie außer Acht, dass man physikalische und biologische Komponenten nicht mit gleichen methodischen Ansätzen untersuchen und erst recht nicht bewerten kann.

## 5.2 MSRL Deskriptor D1 Biodiversität

H. Hillebrand (ICBM), D. Hodapp (ICBM)

### 5.2.1 Einleitung

Deskriptor D1 besagt, dass die biologische Vielfalt zu erhalten ist. Die Qualität und das Vorkommen von Lebensräumen sowie die Verbreitung und Häufigkeit der Arten sollen dabei den vorherrschenden physiografischen, geografischen und klimatischen Bedingungen entsprechen. Damit steht der D1 in Verbindung mit fast allen anderen Deskriptoren, insbesondere mit D4 (Nahrungsnetze) und D6 (Meeresbodenintegrität).

In Deutschland gibt es bisher für die Überwachung der biologischen Vielfalt keine eigene Monitoringstrategie (siehe auch Kapitel 5.4). Die Bewertung dieses Deskriptors stützt sich im Wesentlichen auf die Erfassung der Arten und Lebensräume im Rahmen des FFH-Monitorings. In den Küstengewässern spielen zudem die Zustandsbewertungen der biologischen WRRL-Qualitätskomponenten (Phytoplankton, Makrophyten und Makrozoobenthos) eine entscheidende Rolle.

### 5.2.2 Beitrag von WIMO zum Stand der Forschung

Im Rahmen von WIMO beschäftigte sich das Teilprojekt 3.2 mit der funktionellen Relevanz des Parameters Biodiversität, speziell mit der Frage ob eine Veränderung der Biodiversität auch Konsequenzen für zentrale Prozesse in den Ökosystemen hat. Diese Konsequenzen sind seit etwa zwei Jahrzehnten ein zentraler Fokus von experimentellen Biodiversitätsstudien, die – motiviert durch die globalen Aussterbetrends - die Reduktion der Biodiversität in Labor- und Freilandexperimenten simulierten. Diese experimentellen Untersuchungen ergeben system- und organismenübergreifend ein recht konsistentes Bild: Eine geringere Artenzahl in einer Organismengruppe führt zu einer geringeren Effizienz der Ressourcennutzung dieser Gruppe und damit letztlich zu einem geringeren Wachstum dieser Gruppe (Cardinale 2012). Ein konkretes Beispiel: Der Verlust von Arten im Phytoplankton führt zu einer geringeren Ausnutzung der Ressource Licht und zu einer geringeren Primärproduktion (Striebel 2009). Diese funktionelle Konsequenz des Artenverlustes wurde mittlerweile in hunderten von experimentellen Studien in terrestrischen, limnischen (siehe Glossar) und marinen Ökosystemen gezeigt (Cardinale 2012). Im Rahmen der Bewertung von Ökosystemen ist diese funktionelle Konsequenz von besonderer Brisanz, da die biodiversitätsabhängigen Ökosystemprozesse eng an Ökosystemdienstleistungen (ecosystem services, ESS) gekoppelt sind, also dem Menschen zuträglichen Eigenschaften von oder Prozessen in Ökosystemen (Cardinale 2012). Wenn also dem Deskriptor Biodiversität neben der Beschreibung des Zustandes der Lebensgemeinschaft eine darüber hinausgehende Bedeutung zukommt - als Indikator des funktionellen Zustands und der menschlichen Nutzung des Ökosystems - ergibt sich eine besondere Dringlichkeit der Lösung der in Kapitel 5.1 angesprochenen methodischen Probleme.

Der Transfer der experimentellen Ergebnisse in ein natürliches Ökosystem ist jedoch nicht trivial (Hillebrand 2009): In fast allen Experimenten wird der Faktor Biodiversität direkt manipuliert und durch entsprechende experimentelle Herangehensweisen (Absammeln von eindringenden Arten, Nachbesatz verschwindender Arten) konstant gehalten. Zudem werden andere Faktoren (wie Nährstoffverfügbarkeit, abiotische Umweltbedingungen) ebenfalls konstant gehalten, so dass der Effekt der Biodiversität isoliert von anderen Einflüssen quantifiziert werden kann. In natürlichen Systemen verändern sich Biodiversität und abiotische Randbedingungen dagegen gleichzeitig. Daher können sich Funktionen in einem Ökosystem als direkte Konsequenz der abiotischen Veränderung (mehr Nährstoffe => mehr Primärproduktion) oder als indirekte Konsequenz der veränderten Biodiversität ändern.

Das Teilprojekt 3.2 Biodiversität in WIMO hat sich daher primär mit der Frage beschäftigt: Ergeben sich funktionelle Konsequenzen der Biodiversitätsveränderung auch in natürlichen marinen Ökosystemen? Die Beantwortung dieser Frage erfolgte in drei Schritten:

- i) Finden sich in natürlichen Zeitreihen Zusammenhänge zwischen der Biodiversität und Ökosystemfunktionen? Dies konnten wir anhand eines typischen Monitoring-Datensatzes zum Makrozoobenthos analysieren (Hodapp 2014).
- ii) Sind diese Zusammenhänge ursächlich, d.h. bleibt der Effekt der Biodiversität auf Funktion signifikant, wenn die abiotischen Treiber der Biodiversität und der Funktion mitbetrachtet werden? Dies konnten wir exemplarisch an einem umfassenden Datensatz aus dem Phytoplanktonmonitoring evaluieren (Hodapp 2015).
- iii) Unter welchen Bedingungen sind mechanistisch überhaupt funktionelle Konsequenzen der Biodiversitätsänderung wahrscheinlich? Hierzu haben wir ein neues Modell entwickelt, das uns erlaubt, die Bedeutung der Mechanismen, die Biodiversität beeinflussen, und die Konsequenzen dieser Mechanismen für Funktionalität gemeinsam zu betrachten (Hodapp 2016).

Die zweite Frage, welche Informationen außer oder anstelle der Artenzahl sich als Deskriptor der Biodiversität eignen, haben wir inhaltlich am Beispiel der o.g. Makrozoobenthosdaten eruiert. Hierbei haben wir getestet ob ein Charakteristikum der Artenzusammensetzung, die Körpergröße, eine Indikation des Ökosystemstatus erlaubt (Donadi 2015).

#### 5.2.3 Durchgeführte Untersuchungen und Analysen

Zur Beantwortung der Frage 2 und des ersten Punktes unter Frage 1 sollte ein klassischer Monitoring-Datensatz mit allen Qualitäten und Lücken in den erhobenen Daten verwendet werden. Hierbei halfen uns Monitoring-Programme der NLWKN Forschungsstelle Küste zu Makrozoobenthos, zum einen ein langjährig beprobter Transekt zwischen Norderney und dem Festland, zum anderen eine Beprobung des Jadebusens aus den 70er Jahren (Details zu beiden Datensätzen, siehe Hodapp 2014). Wie in vielen solcher Datensätze, ist die Artenzusammensetzung sehr gut aufgelöst, aber potenziell von diesen Arten beeinflusste Funktionen wie Bioturbation, sekundäre Biomasseproduktion, Filtration werden standardmäßig hier nicht mitgemessen. Daher benutzten wir die Biomasse als proximates Maß der Produktivität und stellten Korrelationen zwischen zwei Massen der Biodiversität (Artenzahl, Evenness) und der Biomasse her, sowohl über alle funktionellen Gruppen des Makrozoobenthos als auch innerhalb. Biomasse war im Fall des Norderneytransektes explizit gemessen worden, im Fall des Jadebusens wurde diese basierend auf Literaturwerten aus den Abundanzen (siehe Glossar) errechnet.

Die Norderneydaten erlaubten auch eine Analyse des Zusammenhangs zwischen einem Charakteristikum („trait“) der Arten, Körpergröße, und vorherrschenden Umweltfaktoren. Im Rahmen einer trait-basierten Analyse (siehe Donadi 2015) wurde getestet, ob die Größenzusammensetzung der Fauna einen Rückschluss auf die vorherrschenden Bedingungen ermöglicht.

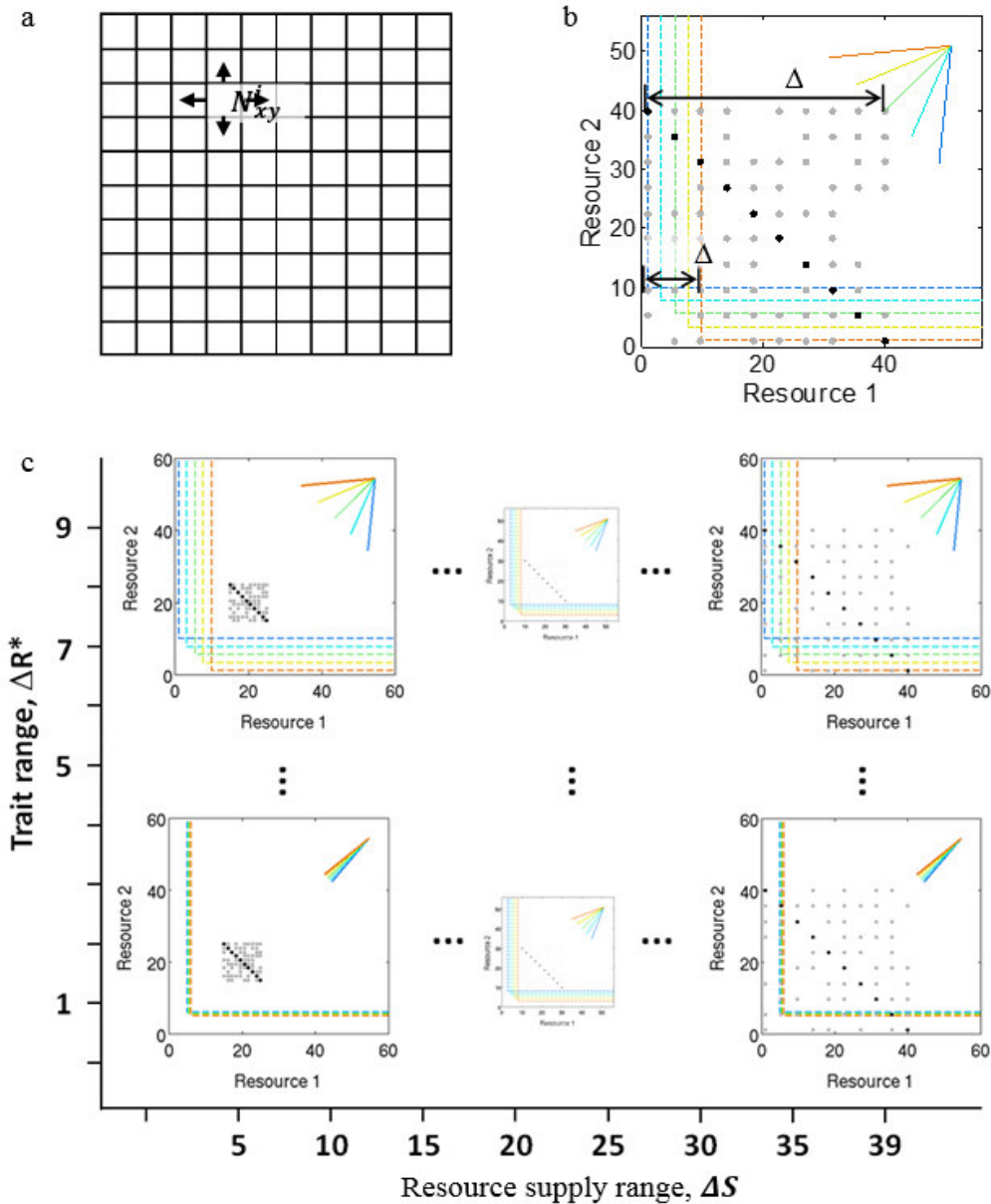


Abbildung 36: Aufbau des Modells. a) In einer Landschaft aus 20 x 20 Zellen (Habitaten) können Arten um zwei Ressourcen (Beispiel: Stickstoff N und P) konkurrieren, die Arten können in benachbarte Zellen einwandern. Jedes Habitat startet mit der gleichen Artenzusammensetzung, das heißt die beschriebenen Veränderungen der Biodiversität etablieren sich nur weil unter bestimmten Randbedingungen mehr oder weniger Arten koexistieren können. b) Die Arten sind anhand ihrer minimalen Bedürfnisse für diese beiden Ressourcen gekennzeichnet ( $R^*$  sensu (Tilman 1982) [17]), die einem trade-off unterliegen (dargestellt durch sich schneidende Nullnettowachstumslinien, i.e. Linien auf denen das Populationswachstum = 0, weil  $R^*$  erreicht ist). Je nach der Diskrepanz der  $R^*$  Werte unterscheiden sich die Arten sehr (hoher Trait range) oder sehr wenig (niedriger Trait range). Unsere Simulationen umfassten 4 Stufen dieses Trait ranges mit steigender Unterschiedlichkeit der Arten (siehe c). Unabhängig davon wurden 8 verschiedene Grade der räumlichen Variabilität der beiden Ressourcen getestet, also wie stark die relativen Verfügbarkeiten der beiden Ressourcen ( $R_1:R_2$ ) variieren. Die 20x20 Habitate unterscheiden sich also in der Verfügbarkeit der Ressourcen (Punkte in Abbildung b), und die Extrema der Simulationsansätze sind also das Zusammentreffen von geringer und hoher Variabilität der Ressourcenverfügbarkeit (Resource supply range) auf geringe und hohe Variabilität der funktionellen Charakteristika der Arten (Trait range, siehe Abbildung c).

Um von diesen korrelativen Ergebnissen zu Kausalitäten zu kommen, wurde ein Datensatz benötigt, der neben der Biodiversität und der Funktion auch die potenziell treibenden abiotischen Variablen wie Temperatur, Nährstoffverfügbarkeit, etc. umfasst. Ein am ICBM etabliertes Monitoring-Programm zum Phytoplankton des Wattenmeers stellte die notwendige Information zur Verfügung. Diese wurde mit Hilfe eines Strukturgleichungsmodells analysiert (SEM, für structural equation model), bei dem die treibenden Variablen direkten Einfluss auf Primärproduktion und Ressourcennutzungseffizienz

(Biomasse pro Einheit verfügbarer Ressource) oder indirekt durch die Veränderung der Biodiversität (Artenzahl und Evenness, zu Details siehe Hodapp 2015).

Wie unter „Ergebnisse“ aufgeführt, zeigten sich in beiden Datensätzen starke Zusammenhänge zwischen Biodiversität und Funktion, was die Frage aufwirft, ob dieser Zusammenhang immer auftritt oder von den Umweltbedingungen bzw. den Traits der Arten abhängt. Trotz der zwei Jahrzehnte währenden Forschung zu Biodiversität und Funktion ist dieser Aspekt bisher nicht untersucht worden. Wir haben im Rahmen von WIMO ein Modell vorgeschlagen, das wichtige Aspekte wie räumliche Heterogenität der Bedingungen, Unterschiedlichkeit der Arten in der Ressourcennutzung und räumliche Dispersion explizit einbezieht [Beschreibung des Modells siehe Abbildung 36]. Die Ergebnisse der Simulationen zu den verschiedenen Szenarien wurden hinsichtlich der Auswirkung auf die Biodiversität und die Biomasseproduktion analysiert. Hierbei wurden – analog zu den empirischen Studien in diesem Bereich – Nettodiversitätseffekte (NDE) berechnet als Unterschied zwischen der realen Produktivität und der erwarteten Produktivität, die sich aus der Produktivität der einzelnen Arten ergeben. Ein NDE = 0 kennzeichnet also eine Produktivität, die genau der Summe der beteiligten Arten entspricht, während ein positiver NDE auftritt wenn eine diversere Gemeinschaft mehr Biomasse produziert als die beteiligten Arten erwarten lassen. Dieser NDE kann zerlegt werden in zwei Mechanismen, der komplementären Nutzung von Ressourcen mit verschiedenen Eigenschaften (complementarity effect, CE) und dem Selektionseffekt (SE), bei dem die erhöhte Produktivität auf den Eigenschaften einer oder weniger Arten beruht (Loreau 2001).

#### 5.2.4 Ergebnisse und Diskussion

Sowohl im Transekt bei Norderney als auch im Jadebusen ist die Biomasse des Makrozoobenthos positiv und signifikant mit der Artenzahl in dieser Gruppe korreliert (Abbildung 37). Standorte mit höherer Biodiversität zeichnen sich also durch höhere Biomasse aus. Dieser Zusammenhang besteht nicht nur für das gesamte Makrozoobenthos, sondern auch für jede der unterscheidbaren funktionellen Gruppen hierin (Abbildung 38). Daher ist der Zusammenhang zwischen Diversität und Biomasse also kein Artefakt eines Übergangs zwischen funktionellen Gruppen (von artenreichen Gruppen mit hoher Biomasse zu artenarmen mit geringer Biomasse), sondern findet sich in um die gleichen Ressourcen konkurrierenden Gruppen. Diese Korrelation erlaubt keine Aussage zur Kausalität der Beziehung, ist aber ein klarer Nachweis, dass der in den experimentellen Biodiversitätsstudien postulierte Zusammenhang in natürlichen Ökosystemen existiert.

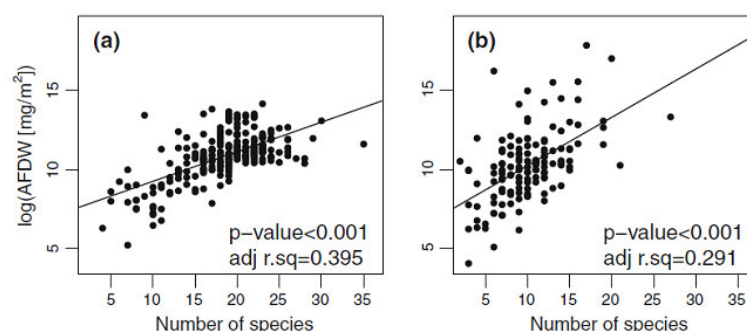


Abbildung 37: Korrelation zwischen Biomasse (aschefreies Trockengewicht) und Artenzahl im Makrozoobenthos vor Norderney (a) und im Jadebusen (b).

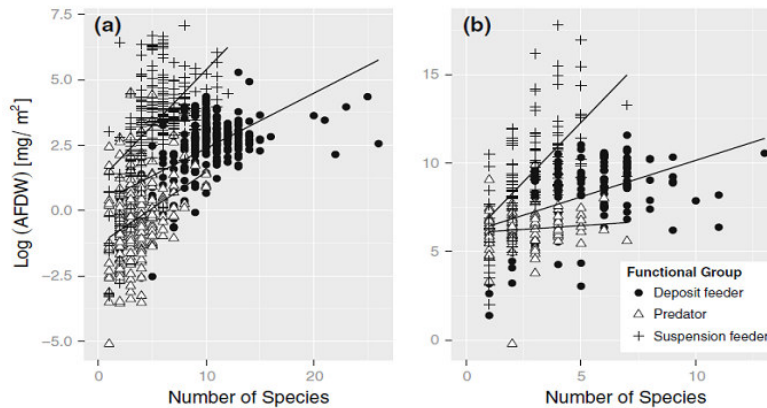


Abbildung 38: Korrelation zwischen Biomasse (aschefreies Trockengewicht) und Artenzahl im Makrozoobenthos vor Norderney (a) und im Jadebusen (b) separiert für drei funktionierende Gruppen.

Mit den Daten des Transekts vor Norderney wurde eine Trait-Analyse in Zusammenarbeit mit Serena Donadi, Fellow am HWK (Hanse-Wissenschaftskolleg) in Delmenhorst, durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Größenklassen des Makrozoobenthos sich entlang der Gradienten von organischem Gehalt im Sediment und der physikalischen Stabilität des Sedimentes aufspannen: die Körpergröße steigt systematisch mit steigendem Anteil organischen Materials und steigender strömungsinduzierter kinetischer Energie am Boden an (Abbildung 39). Die Ausnahme bilden die kleinsten Größenfraktionen, die sich bei geringer Stabilität in Muschelgemeinschaften bei hoher physikalischer Besiedlung ansiedeln konnten. Die Größenverteilung des Benthos erlaubt also funktionelle Aussagen über die Qualität des Habitats. Angesichts der herausragenden funktionellen Bedeutung der Körpergröße in der Biologie (Peters 1983) bieten sich mit einer Aufnahme der Körpergrößen zusammen mit den Abundanzen und Artenzusammensetzungen erheblich weitergehende Schlussfolgerungen zu Prozessen und Zuständen aus Monitoringdaten.

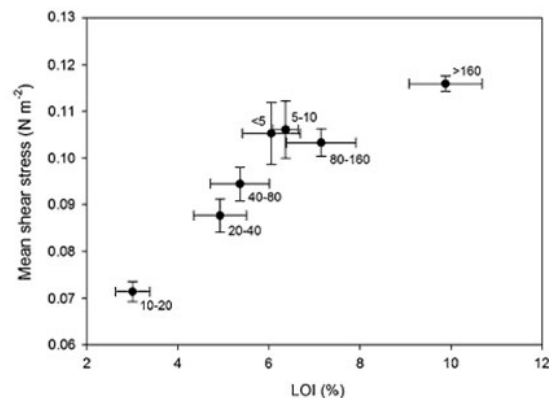


Abbildung 39: Maxima des Auftretens verschiedener Größengruppen des Makrozoobenthos vor Norderney aufgetragen als dort vorherrschende Sedimentbedingungen: Organischer Gehalt des Sediments (Loss on ignition, LOI) und hydrodynamische Belastung (mean shear stress)

Das Strukturgleichungsmodell für das Phytoplankton im Rückseitenwatt der Insel Spiekeroog bestätigt die Ergebnisse aus dem Makrozoobenthos: Eine Veränderung der Biodiversität führt zu einer Veränderung der Produktivität, wobei diese hoch ist wenn die Artenzahl hoch aber die Evenness klein ist (Abbildung 40). Die Dominanz einzelner Arten (Blüten) und die Anwesenheit vieler Arten führen also zu höchster Primärproduktion, und diese Effekte sind stärker als die direkten Effekte der abiotischen Treiber (chemische und physikalische Randbedingungen, Ressourcen in Form von Licht und Nährstoffen). Im Fall der Nährstoffe ist der Effekt auf die Biomasse sogar komplett über die

Veränderung der Biodiversität kanalisiert. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Korrelationen (Abbildung 37 / Abbildung 38) erlaubt das Strukturgleichungsmodell die Schlussfolgerung einer zumindest statistischen Kausalität: Veränderungen der Umweltparameter führen zu einer Veränderung der Biodiversität, die dann wiederum funktionelle Konsequenzen hat. Hierbei sind vor allem Dominanzverschiebungen wichtig (große Effektstärke), während die reine Artenzahl einen geringeren Einfluss hat.

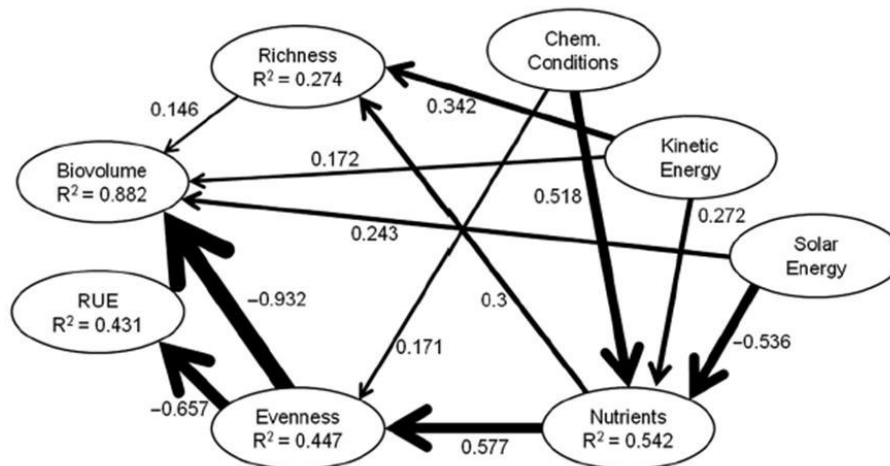


Abbildung 40: Strukturgleichungsmodell für Phytoplankton. Signifikante Beziehung zwischen abiotischen Faktoren (chemisch, physikalisch, Licht, Nährstoffe) zu Biodiversität (Artenzahl und Evenness) und Biomasse (absolut und als resource use efficiency RUE) des Phytoplanktons. Nur signifikante Beziehungen sind gezeigt, Pfeilstärke korreliert zu den Stärken der Effekte (-1 bis +1).

Die empirischen Daten legen also einen Zusammenhang zwischen Diversität und Funktion nahe, aber können den Mechanismus dieses Zusammenhangs nicht eruieren. Um für den Monitoringbereich eine verlässliche Aussage zu treffen, unter welchen Bedingungen es diese funktionalen Konsequenzen gibt, bedarf es eines mechanistischen Modells, das anhand der Umweltbedingungen die Etablierung eines Biodiversitätsgradienten erlaubt und dann sich daraus generierende Funktion vorhersagt. Diese Eigenschaften besitzt das in WIMO etablierte Modell. Während das Modell detaillierte Aussagen macht zur Rolle der exakten Geometrie der räumlichen Heterogenität und der Größe des Artenpools, sind im Rahmen des WIMO Projektes vor allem die Aussagen zu Biodiversitätsmustern und funktionellen Konsequenzen relevant, auf die im Folgenden der Fokus liegt.

Die Anzahl koexistierender Arten steigt mit steigender Variabilität der verfügbaren Ressourcen (resource supply range) und steigender Variabilität der funktionellen Diversität der Arten (trait range), sowohl auf der lokalen Ebene (innerhalb eines Habitats) als auch auf der regionalen Ebene (über die ganze Landschaft) (Abbildung 41 a, b). Auch der Nettodiversitätseffekt ist maximiert, wenn Umweltheterogenität auf hohe Trait-Variabilität trifft (Abbildung 41 c). Das heißt, die höchste funktionelle Bedeutung der Biodiversität ergibt sich in Systemen, die eine hohe räumliche (oder zeitliche) Variabilität der Bedingungen aufweisen, aber nur wenn es eine breite funktionelle Biodiversität gibt, wenn also Arten in ihrer Nutzung dieser Umwelt verschieden sind. Biodiversität von funktionell gleichen Arten oder in einer völlig homogenen Umwelt hat kaum eine funktionelle Bedeutung für Ökosystemprozesse wie Primärproduktion.

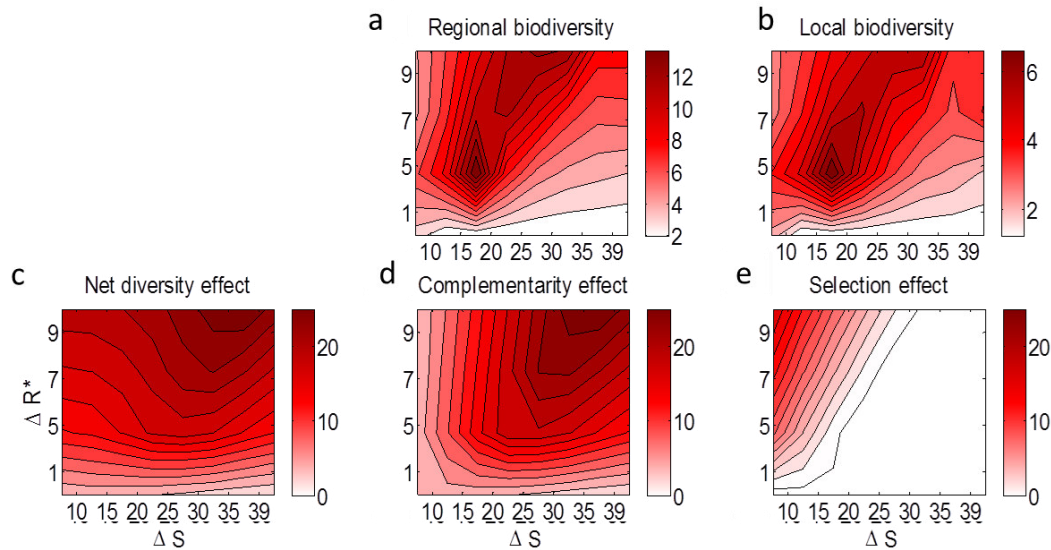


Abbildung 41: Modellergebnisse zu Koexistenz und Funktion, Details siehe Text.

Das Modell erlaubte auch, die Mechanismen dieses Nettodiversitätseffekts zu analysieren, der zum größten Teil auf der funktionellen Komplementarität der Arten beruhte (Abbildung 41 d). Nur bei sehr konstanten Umweltbedingungen können bestimmte Eigenschaften einer Art so vorteilhaft sein, dass es zu nennenswerten Selektionseffekten kommt (Abbildung 41 e).

### 5.2.5 Schlussfolgerungen und Bewertung

Biodiversität ist ein Indikator nicht nur der Artenzusammensetzung eines Lebensraums, sondern auch seines Zustandes und seiner Funktionalität. Dieser Zusammenhang ist von größtem wissenschaftlichen UND angewandten Interesse. Wenn das Ziel des Monitorings die Darstellung des Ist-Zustandes und der Entwicklung eines Ökosystems ist, dann ermöglicht die Analyse der Biodiversität nicht nur eine Inventur der Lebewesen, sondern auch eine Vorhersage über die jetzigen und zukünftigen Prozesse des Energie- und Materieflusses in diesem Ökosystem. Hierzu bedarf es jedoch einer Analyse der funktionellen Diversität, die anhand von Charakteristika der Arten (z.B. Körpergröße) analysiert werden kann.

### 5.2.6 Ausblick

Das Monitoring der Biodiversität ist in einer Reihe von Punkten verbesserungswürdig, um a) ein genaueres Bild der zeitlichen und räumlichen Veränderung zu erlauben und b) funktionelle Konsequenzen dieser Veränderung zu analysieren. Zu a) gehört das Etablieren einer zeitlichen und räumlichen Auflösung, die es erlaubt bei den begutachteten Artengruppen überhaupt Veränderungen in den Populationsdynamiken zu registrieren (Zeitpunkte von Wochen bis Jahren) und punktuelle Messungen in die Fläche zu bringen. Hier sollte ein koordiniertes Verfahren über Bund – und Länderkompetenzen etabliert werden, der im Rahmen eines „Nationalen Biodiversitätsmonitorings“ erlaubt, über gerasterte und langfristige Analysen die Entwicklungstrends abzulesen (Marquard 2013). Zu b) gehört die Aufnahme funktioneller Traits, wie zum Beispiel der Körpergröße, um trait-basierte Analysen zu ermöglichen. Die direkte Messung einer Reihe relevanter Ökosystemfunktionen (z.B. im Bereich des Makrozoobenthos die Bioturbation) in Einzelstudien erlaubt, diese mit Diversitätsaspekten in Verbindung zu bringen.

Zusätzlich empfiehlt sich eine Weiterentwicklung des hier vorgestellten Modells zu zeitlicher und räumlicher Dynamik in der Ressourcenverteilung um den Effekt von Umweltveränderung/ Störungen und Habitat-Konnektivität auf Artengemeinschaften und in Konsequenz auf Funktionen vorherzusagen.



## 5.3 Deskriptor D5 Eutrophierung

J. van Beusekom (HZG)

### 5.3.1 Einleitung

Eutrophierung ist einer der wichtigsten Faktoren, die den Zustand der Meeresumwelt bestimmen. Nährstoffe sind Voraussetzung für ein produktives Ökosystem und deswegen nicht grundsätzlich schädlich. Ein Zuviel an Nährstoffen in Gewässern kann aber zu übermäßigem Wachstum von Organismen (Phytoplankton, Makroalgen) und damit zu einem Überangebot organischer Substanzen und ggf. zu Sauerstoffmangel führen. In der Vergangenheit haben erhöhte Nährstofffrachten tatsächlich entlang der kontinentalen europäischen Küste zu einem solchen Überangebot geführt. In Folge dessen traten Sauerstoffprobleme auf, Seegras verschwand und exzessive Makroalgenblüten entstanden. In den 1970-er und 1980-er Jahren wurden die Probleme erkannt und gegensteuernde Maßnahmen ergriffen (de Jonge, 2006). Seitdem hat sich die Qualität der Meeresumwelt deutlich verbessert (van Beusekom et al., 2009a): Die vom Menschen verursachte Eutrophierung und deren negative Auswirkungen auf das Küstenmeer wie der Verlust der biologischen Vielfalt, die Verschlechterung des Zustands der Ökosysteme, schädliche Algenblüten sowie Sauerstoffmangel in den Wasserschichten nahe dem Meeresgrund sind reduziert. Trotz dieser Erfolge bleibt die Eutrophierung ein Problem, weil nach wie vor die Nährstoff- und Phytoplanktonmengen um ein Vielfaches höher liegen als Referenz- oder Hintergrundwerte ohne menschliches Eingreifen (van Beusekom, 2005; Topcu et al., 2011).

In der MSRL befasst sich Deskriptor 5 mit der Eutrophierung. Drei Kriterien und Indikatoren werden hervorgehoben: 5.1 Nährstoff (Konzentrationen, Nährstoffverhältnisse, z.B. N/P oder N/Si) 5.2 Direkte Auswirkung, (Phytoplankton Biomasse, Artzusammensetzung, Sichttiefe, Makroalgen) und 5.3 indirekte Auswirkungen (Seegrasvorkommen, Sauerstoffmangel).

Sowohl die WRRL (EU-Wasserrahmen-Richtlinie) als die MSRL sind aus deutscher Sicht relevant für das Monitoring des Wattenmeers. Für die offene Deutsche Bucht ist aber nur die MSRL relevant. Deutschland hat im Rahmen der WRRL ein Bewertungssystem für Eutrophierung entwickelt. Es basiert auf Hintergrundwerten für Nährstoffeinträge und die Biomasse des Phytoplanktons. Wichtig ist dabei, dass die Bewertung mit den Nachbarländern abgestimmt ist. Hinsichtlich der Grenzwerte für Phytoplankton (Chlorophyll) konnte insbesondere mit den Niederlanden noch keine Einigkeit erzielt werden. Offen ist die Frage, ob die Zielwerte eines „Guten Ökologischen Zustandes“ (WRRL) für alle Teile des Wattenmeeres gleich sein sollen, oder ob es regionale Unterschiede gibt.

Die Bewertung der Eutrophierung richtet sich nicht nur nach dem Phytoplankton: auch andere Faktoren wie Seegras, Makroalgen oder Phytoplankton-Zusammensetzung (Zellzahl *Phaeocystis*) werden in Betracht gezogen, da alle diese Aspekte wenigstens zum Teil mit der Eutrophierung zusammenhängen. Eine integrierte oder gesamtökologische Bewertung fehlt aber noch.

Übergeordnetes Ziel der WIMO Projekte TP 2.2, 3.2 und IP 6 war die Entwicklung geeigneter Monitoringkonzepte und ein Systemverständnis für das Thema Eutrophierung. In Prinzip besteht für das Wattenmeer und angrenzendes Küstenwasser bereits ein umfassendes Monitoring. Im Rahmen von WIMO wurde deswegen zunächst das Prozessverständnis als Grundlage für die Interpretation der Langzeitdaten aus dem Wattenmeer verbessert. Dabei stand folgende Hypothese im Zentrum:

*Der Import organischer Substanzen aus der Nordsee bestimmt die Eutrophierung des Wattenmeers.*

Aus dieser Hypothese ergibt sich, dass die Grundgedanke der WRRL nicht ohne weiteres mit der Funktion des Wattenmeeres kompatibel ist: Verschiedene Teile des Wattenmeeres sind unterschiedlichen Flusseinzugsgebieten zugeordnet. Der Grundgedanke der WRRL war, dass Maßnahmen in einem Flusseinzugsgebiet zu einer Verbesserung des ökologischen Zustandes führen.

Im Falle kleinerer Einzugsgebiete wie der Ems oder Eider können lokale Maßnahmen dies nicht alleine leisten, weil große Flüsse wie Rhein, Weser oder Elbe die Nährstoffdynamik im Küstenwasser dominieren (z.B. Los et al., 2014) und dadurch Primärproduktion und Import organischer Substanzen beeinflussen. Daraus folgt, dass die Definition des anzustrebenden ökologischen Status im Rahmen der MSRL und WRRL und die dazu gehörende Maßnahmen eng aufeinander abgestimmt werden müssen.

### 5.3.2 Regionale Unterschiede

Bisherige Arbeiten im Rahmen des Quality Status Report (QSR) 2009 des Common Wadden Sea Secretariat haben gezeigt, dass insbesondere die sommerlichen Chlorophyll-Werte den Eutrophierungsstatus des Wattenmeeres gut beschreiben (Proxy 1). In den meisten Teilen des Wattenmeeres korrelieren diese Werte mit den Nährstoffeinträgen. Auch die Summen der herbstlichen Konzentrationen von Nitrit und Ammonium (Proxy 2) korrelieren auf längeren Zeitskalen sehr gut mit den sommerlichen Chlorophyll-Werten. Beide Ansätze zeigen 1) dass viele Teile des internationalen Wattenmeeres ähnliche Werte haben, 2) dass das nördliche Wattenmeer um Sylt und Amrum niedrige Eutrophierungswerte hat und 3) dass das östliche niederländische Wattenmeer hohe Eutrophierungswerte aufweist (van Beusekom et al., 2009a).

Eine Auswertung der organischen Nährstoffe im Wattenmeer bestätigt diese regionalen Unterschiede: Wie bei den beiden Proxies erreicht das gelöste organische Phosphat im östlichen Wattenmeer die höchsten Werte, bei Sylt die niedrigsten Werte (van Beusekom & de Jonge, 2012). Somit bestätigen drei Proxies typische regionale Unterschiede: Den niedrigen Eutrophierungsstatus des nordfriesischen Wattenmeeres, den hohen Status im östlichen niederländischen Wattenmeer und den mittleren Status im restlichen Wattenmeer.

Van Beusekom et al. (2012) gaben eine Übersicht über den Wissensstand bezüglich der Import organischer Substanzen. Neben dem Import können aber auch andere Faktoren die Ausprägung der Eutrophierung beeinflussen. Abbildung 42 zeigt die mögliche Auswirkung der Morphologie von Gezeitenbecken. Es kann vermutet werden, dass bei gleichem Import organischer Substanzen aus der Nordsee die Nährstofffreisetzung in großflächigen Gezeitenbecken (großer Abstand zwischen Insel und Festland) verdünnt wird und in kleinen, schmalen Becken konzentriert wird. Tatsächlich ist das Eutrophierungssignal in schmalen Becken größer als in breiten Becken.

Neben Import und Morphologie der Becken können auch die mittlere Tiefe und Verweilzeiten das Eutrophierungssignal beeinflussen. Hohe Verweilzeiten können zu einer Anreicherung führen, große mittlere Tiefen zu einer Verdünnung des Eutrophierungssignals. Diese Aspekte werden in den unten aufgeführten Modellstudien aufgegriffen.

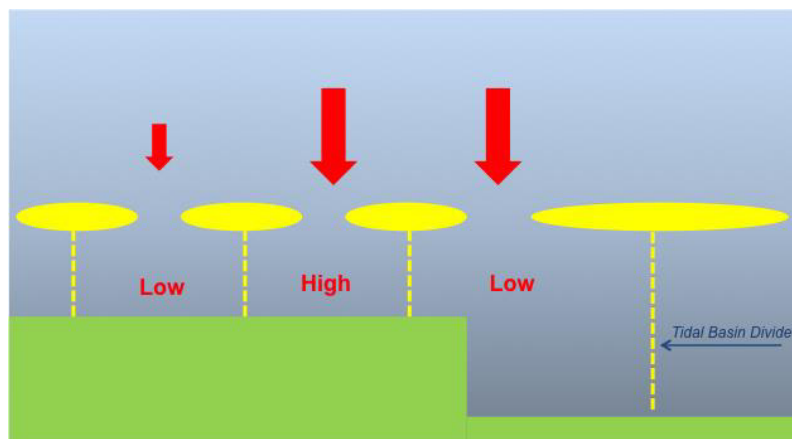


Abbildung 42: Eine konzeptionelle Betrachtung der Auswirkung von Gezeitenbeckenmorphologie und Import auf den Eutrophierungsstatus. (van Beusekom et al., 2012)

### 5.3.3 Modellstudien zur Eutrophierung

Die oben genannten Datenanalysen bestätigen die regionalen Unterschiede im Eutrophierungsstatus des Wattenmeeres. Verschiedene Modellansätze wurden genutzt um den Import und dessen regionalen Unterschieden, sowie der Einfluss des hydrodynamischen Austausches mit der Nordsee (Verweilzeiten, mittlere Tiefe) zu untersuchen.

**Ästuarine Zirkulation und die zur Küste gerichteten Bodenströme:** Die ästuarine Zirkulation entlang des Wattenmeeres kann zu einem Transport von Schwebstoffen und partikulären organischen Substanzen von der Nordsee in das Wattenmeer führen. Mit einem hochauflösenden hydrodynamischen Modell (Kapitel 4.4) wurde für den Zeitraum von 2008-2013 die zur Küste gerichtete Komponente der Strömung berechnet (Abbildung 43). Vor der ostfriesischen Küste wurden Werte um 8 mm/s, vor der nordfriesischen Küste wesentlich kleinere Größen berechnet. Diese Unterschiede unterstützen die These, dass höhere Importe organischen Materials zum höheren Eutrophierungsstatus des ostfriesischen Wattenmeeres beitragen.

Mit einem gekoppelten physikalischen-biogeochemischen Modell (Kapitel 4.4.5) wurde in einer idealisierten Transektkonfiguration der Mechanismus der ästuarinen Zirkulation zur Erklärung von regionalen Unterschieden untersucht: Die stärkeren bodennahen Restströme im ostfriesischen Wattenmeer (siehe auch Abbildung 43) erzeugen wesentlich steilere Nährstoffgradienten (Abbildung 44).

Dieses Ergebnis konnte im Trend durch räumlich hochaufgelöste, dreidimensionale Simulationsrechnungen bestätigt werden (vgl. Kapitel 4.4). In den hochaufgelösten Simulationen werden noch eine Reihe zusätzlicher Faktoren wie etwa windinduzierte Strömungsmuster, mehrere Nährstoffspezies (Stickstoff, Phosphor, Silikat) oder benthisch-pelagische (siehe Glossar) Kopplung berücksichtigt. Die durch eine modellgestützte Datenanalyse identifizierten Gradienten in den Sinkgeschwindigkeiten der organischen Partikel (März et al., 2016) konnten in diesen Modellansätzen noch nicht beschrieben werden. Es wird aber vermutet, dass eine erhöhte Sinkgeschwindigkeit im Übergangsbereich zwischen Wattenmeer und offener Nordsee den Akkumulationsmechanismus der ästuarinen Zirkulation noch weiter verstärkt. Das Ergebnis kann daher als belastbar angesehen werden und hat somit direkte Auswirkung auf die Bewertung des im ostfriesischen Wattenmeer erhöhten Eutrophierungsgrad – als Folge eines hydrophysikalischen Prozesses.

residual currents 1. April-29. June 2009 (bottom layer), German Bight (GETM)

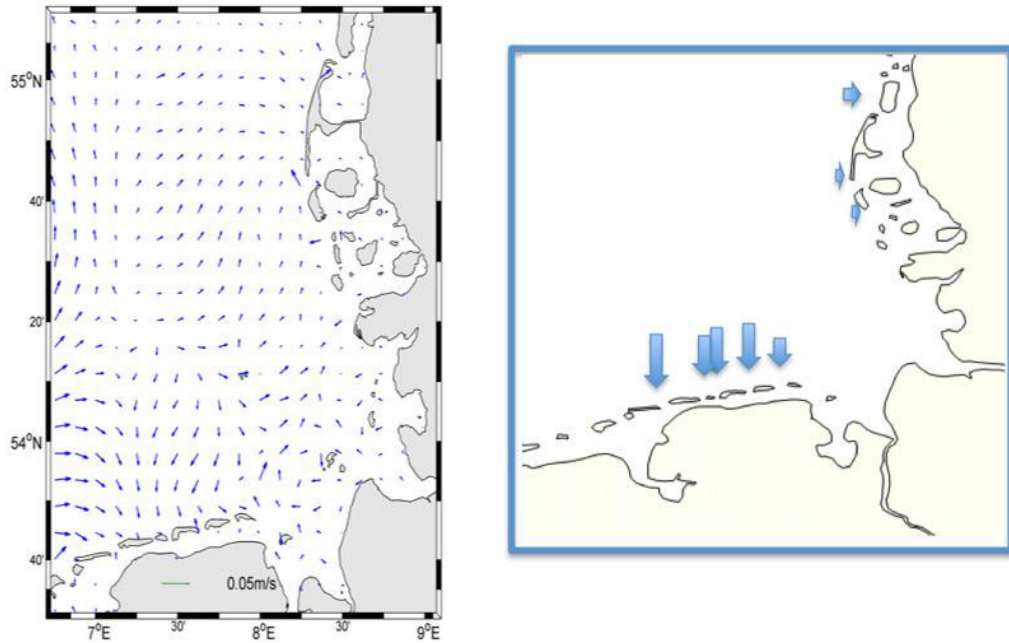


Abbildung 43: Links: Residuale Bodenströme in der Deutsche Bucht; 1. April bis 29. Juni 2009. Rechts: eine Zusammenfassung der mittleren zur Küste gerichteten Strömungen vor dem nordfriesischen und ostfriesischen Wattenmeer.

### gelöster, anorg. Stickstoff [mmolN/m<sup>3</sup>] im Sommer

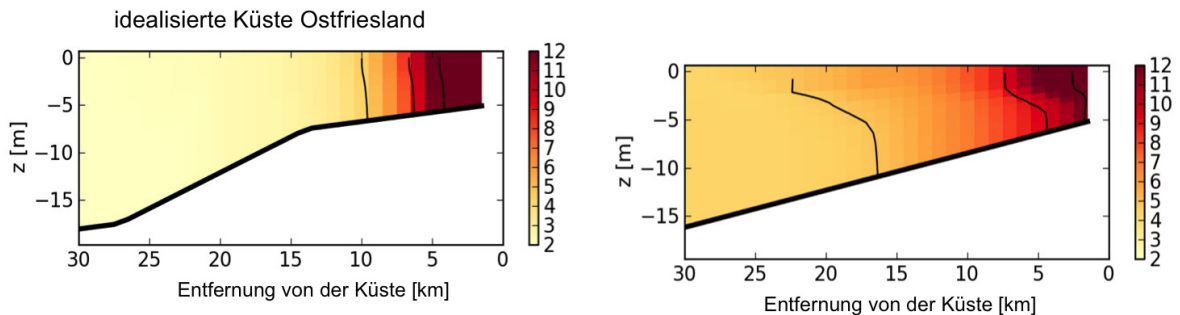


Abbildung 44: Zweidimensionale Simulation der Stofftransporte und resultierenden -Konzentrationen im Küstenmeer. Das hydrodynamische Modell GETM gekoppelt an einem vereinfachten biogeochemischen Modell für die Wassersäule erzeugt verschiedene Nährstoffgradienten in Abhängigkeit zur Topographie und Hydrographie. Deutlich werden die ausgeprägteren Nährstoffgradienten (im Sommer) vor der ostfriesischen Küste (Hofmeister et al, subm.).

**Expositionsduer:** Weiterführend wurde der Einfluss der mittleren Expositionsduer des Wassers in ausgewählten Tidebecken untersucht. Je länger der Kontakt des Wassers mit dem Eulitoral ist, desto stärker kann sich das Wasser mit Produkten anreichern, die während des Abbaus organischen Materials im Sediment entstehen. Aufgrund der geringen Wassertiefe führt diese Anreicherung zu einer stärkeren Konzentrationszunahme als im tieferen Wasser.

Die Ergebnisse beruhen auf Ensembles von simulierten Bahnkurven (Trajektorien), die mit dem Partikeldriftmodell PELETS-2D in der Zeit zurück gerechnet wurden. Diesem Modell liegen

Strömungsfelder aus der Datenbank coastDat (www.coastdat.de; Weisse et al., 2009) zugrunde. Die Simulationen repräsentieren durch den betrachteten 44-jahres Zeitraum ein breites Spektrum möglicher meteo-mariner Bedingungen. Die Simulationen wurden alle 28 Stunden zwischen den Jahren 1959 und 2003 (14088 Simulationen für jedes Tidebecken) gestartet, wobei jeweils 1000 Partikel zu Beginn jeder Simulation gewichtet nach der Tiefe innerhalb jedes betrachteten Tidebeckens verteilt wurden. Die Simulationen geben Aufschluss darüber, wie stark der Kontakt des Wassers zum Eulitoral innerhalb eines definierten Zeitraums war. Als Eulitoralsignal in Prozent wird hier angegeben, wie viel Prozent der vorangegangenen Zeit der Wasserkörper eines Tidebeckens im Eulitoral (Wassertiefe < 2m) verbracht hat.

Insgesamt wurden acht Tidebecken untersucht: Die Becken „Marsdiep“, „Vliestroom“ und „Zoutkamperlaag“ liegen im niederländischen Teil, die Becken „Norderneyer Seegat“, „Norderaue“, „Hörnum Tief“ und „Lister Tief“ im deutschen Teil und „Graadyb“ im dänischen Teil des Wattenmeeres.

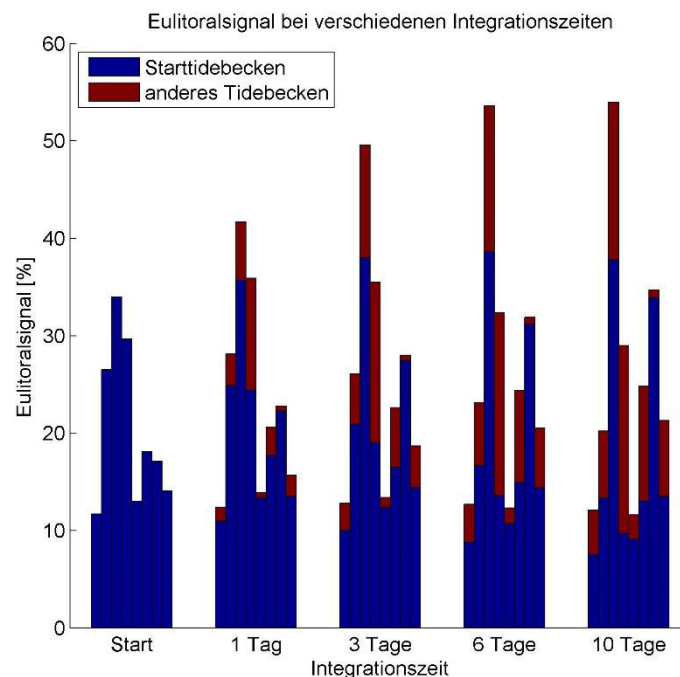


Abbildung 45: Eulitoralsignale bei verschiedenen Integrationszeiten geben den Anteil der Zeit an, die das Wasser eines Tidebeckens bei einer Tiefe < 2m verbracht hat. Die Abfolge der Balken in den Gruppen von links nach rechts lässt sich den Tidebecken von West nach Nordost zuordnen: Marsdiep – Vliestroom – Zoutkamperlaag – Norderneyer Seegat – Norderaue – Hörnum Tief – Lister Tief – Graadyb.

In Abbildung 45 sind die durchschnittlichen Eulitoralsignale aller Tidebecken bei verschiedenen vorangegangenen Laufzeiten dargestellt. Das Signal des Beckens „Zoutkamperlaag“ ist mit ca. 50% am größten. Es repräsentiert den östlichen Teil des niederländischen Wattenmeeres, in dem auch die höchsten Eutrophierungswerte beobachtet wurden. Die niedrigsten Eulitoralsignale (ca. 13%) wurden für die Tidebecken „Marsdiep“ im westlichen Teil des niederländischen Wattenmeeres und „Norderaue“ bei Amrum berechnet. Die Eutrophierung ist bei „Marsdiep“ allerdings durch den direkten Einfluss des IJsselmeeres größer. Bei den betrachteten deutschen und dänischen Tidebecken ist das Eulitoralsignal im „Norderneyer Seegat“ größer als bei den Tidebecken im nördlichen Teil des Wattenmeeres. Abbildung 46 zeigt ein Streudiagramm, in dem für jedes Tidebecken (außer Hörnum Tief, dafür 2 Werte für Lister Tief) die Summe der durchschnittlichen Konzentrationen von Ammonium

und Nitrit im Herbst gegen das jeweilige durchschnittliche Eulitoralsignal dargestellt ist ( $R^2=0,54$ ). Anhand dieser Durchschnittswerte wird bereits deutlich, dass das Eulitoralsignal und somit der intensive Kontakt des Wassers mit dem Wattenmeersediment einen weiteren wichtigen Faktor darstellt, der die Eutrophierung eines Tidebeckens beeinflusst.

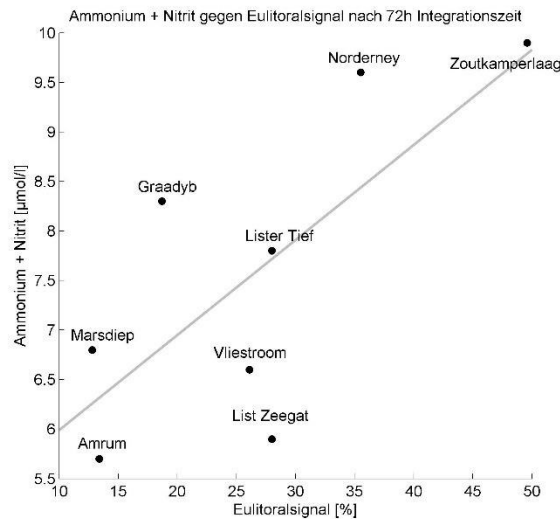


Abbildung 46: Ammonium + Nitrit Konzentration im Herbst (2000 – 2006; aus van Beusekom et al., 2009) gegen das Eulitoralsignal in den jeweiligen Tidebecken ( $R^2=0,54$ ). List Zeegat liegt direkt bei List, Lister Tief befindet sich weiter landeinwärts in dänischen Gewässern.

**Zusammenfassung Modellergebnisse:** Die wichtigsten Ergebnisse der Modellstudien zur Eutrophierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Hydrodynamische Modelle zeigen im Küstenwasser vor dem deutschen Wattenmeer einen zur Küste gerichteten Bodenstrom. Dieser Bodenstrom ist deutlich ausgeprägter vor der nordfriesischen als vor der ostfriesischen Küste.
- Ein erweitertes Modell, welches detailliert die Aggregatbildung, das Absinken und das Zersetzen der Aggregate beschreibt, bestätigt, dass durch den stärkeren Import vor der ostfriesischen Küste stärkere Nährstoffgradienten entstehen als vor der nordfriesischen Küste.
- Die Verweilzeiten im flachen Wasser des östlichen Wattenmeeres sind gegenüber anderer Gebiete erhöht und können zum erhöhten Eutrophierungsstatus beitragen.

Die Modelle bestätigen also die Annahme, dass das Wattenmeer primärproduzierte organische Substanzen aus der Nordsee importiert. Der Einfluss der Importe auf den Eutrophierungsstatus wird durch verschiedene Faktoren modifiziert: Lange Verweilzeiten im flachen östlichen niederländischen Wattenmeer führen dort zu erhöhten Eutrophierungswerten. Ein hydrodynamisch bedingter abgeschwächter Import im nordfriesischen Wattenmeer führt dort zu niedrigeren Eutrophierungswerten.

#### 5.3.4 Neue Methoden

Messgrößen wie die Konzentration von Phytoplankton oder Nährstoffen ermöglichen vor allem bei langen Zeitreihen eine Beschreibung des aktuellen Status. Oft aber sind nicht genügend Daten vorhanden, um die zu Grunde liegenden Prozesse zu analysieren. Bestenfalls können statistische Korrelationen Zusammenhänge andeuten. Mit der Entwicklung von Analyseverfahren für

Dauermessungen anderer Parameter ergeben sich neue Möglichkeiten der Beschreibung des Ökosystems.

In Zusammenarbeit mit Kollegen der Universität Antwerpen (T. Cox) wurden im TP IP 2 wurde ein neues Verfahren für die Auswertung von Dauermessungen verwendet. Die Methode (Cox et al., 2015) basiert auf eine Fourier-Analyse mit der mittlere volumetrische Produktionsraten (meistens über etwa 10 Tage) abgeschätzt werden können (Abbildung 47).

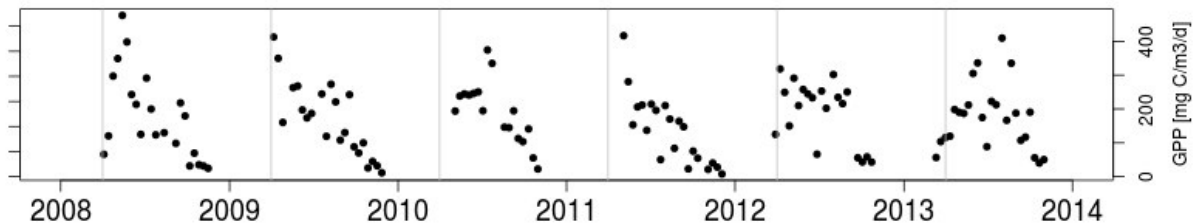


Abbildung 47: Abschätzung der volumetrische Primärproduktion ( $\text{gC/m}^3 \cdot \text{Jahr}$ ) der Jahren 2007 – 2013 am Cosyna-Messpfahl im Hörnum Tief (nördlich Föhr). Basierend auf einer mittleren Tiefe, die der Wasserkörper am Messpfahl erfährt liegt die Produktion pro Quadratmeter bei etwa  $250 \text{ gC/m}^3 \cdot \text{Jahr}$ .

Die Analysen von HZG/COSYNA-Messungen im Hörnum Tief zeigen, dass die Jahresproduktion von etwa  $250 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{Jahr}$  deutlich höher liegen als Vergleichsmessungen im Lister Gezeitenbecken von etwa  $150 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{Jahr}$  (Loebl et al., 2007). Wahrscheinlich trägt auch die benthische Primärproduktion (etwa  $300 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{Jahr}$  im Intertidal; Asmus et al., 1998) zum beobachteten  $\text{O}_2$ -Signal bei: Erste Schätzungen deuten auf einen potentiellen Beitrag von etwa  $75 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{Jahr}$ , was den Unterschied zwischen beiden Schätzungen erklären könnte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Dauermessungen von Sauerstoff ein enormes Potential haben um das Monitoring von einer Bestandsaufnahme hin zu einem prozessorientierten Monitoring weiter zu entwickeln. Das Potential kann aber nur voll zur Geltung kommen wenn die Analysen mit hydrodynamischen Modellen, Ökosystemmodellen und ggf. mit Produktionsabschätzung aus Satellitendaten gekoppelt werden.

### 5.3.5 Integrierte Bewertung der Eutrophierung

Zurzeit steht kein Verfahren zur Verfügung, das die verschiedenen Aspekte der Eutrophierung integriert und mit Nährstoffeinträgen verbindet. Im Folgenden wird ein Verfahren vorgeschlagen, das die drei Deskriptoren der Eutrophierung - Phytoplanktonbiomasse, Verschiebungen in der Artzusammensetzung des Phytoplanktons und Seegras - in Bezug zu Nährstoffeinträgen setzt.

Die **Phytoplanktonbiomasse** (beschrieben als Chlorophyll) ist ein wesentlicher Parameter der Eutrophierungsbewertung. Ausgangspunkt der deutschen Bewertung ist die Abweichung um einen bestimmten Prozentsatz von einem Hintergrundwert. Zurzeit wird die Situation um 1880 als Ausgangspunkt genommen. Diese Bewertung ist subjektiv durch die Wahl des Hintergrundwertes und des Prozentsatzes mit der vom Hintergrundwert abgewichen werden darf.

Eine alternative Betrachtung wäre die Suche nach Schwellenwerten oder Diskontinuitäten: Konzentrationen oder Flussfrachten, bei denen sich eine wesentliche Änderung des Ökosystems vollzogen hat. Eine solche Diskontinuität hat sich beispielsweise in der Artzusammensetzung des Phytoplanktons und in der Seegrasdynamik, nicht aber bei der Gesamtbiomasse des Phytoplanktons vollzogen.

Abbildung 48 zeigt die mittlere Chlorophyll-Konzentration im Sommer (ein Eutrophierungsproxy) bei Sylt (Zeitreihe des AWI) in Abhängigkeit der Nährstofffrachten der Elbe und Weser. Die Biomasse korreliert mit den Nährstoffeinträgen, aber die Variabilität ist groß: Sowohl bei hohen Einträgen wie in

den 1980-er und 1990-er Jahren als auch heute bei sehr viel geringeren Einträgen liegt die Variabilität bei knapp 50%. Die Maxima und Minima liegen jeweils auf einer Linie und eine Diskontinuität ist nicht zu erkennen. Eine ähnliche Situation liegt für die Zeitreihe des NLWKN bei Norderney vor.

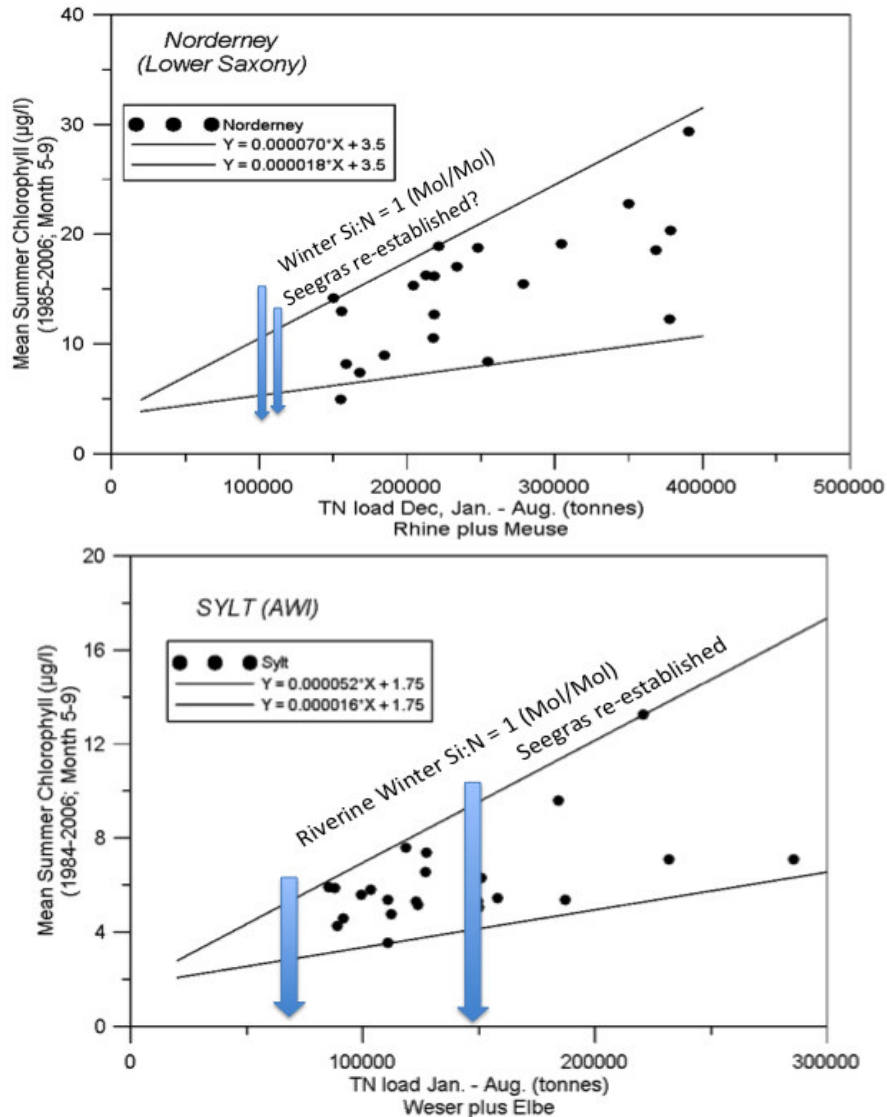


Abbildung 48: Ein Ansatz zur gesamtökologischen Bewertung des Wattenmeeres auf der Basis von Langzeitdaten des AWI (Sylt) und des NLWKN (Norderney)

Eine Diskontinuität in der Artzusammensetzung hat aber stattgefunden: Die Frühjahrsblüte der Kieselalgen wird zurzeit durch Silikatmangel limitiert und genügend Nitrat (N) bleibt übrig für *Phaeocystis*, eine Alge, die nicht auf Silikat (Si) angewiesen ist (van Beusekom et al., 2009b; Cadée & Hegeman, 2002; Gieskes et al., 1973). Kieselalgen nehmen Si und N in einem molaren Verhältnis von etwa 1:1 auf (Brzezinski, 1985). Die Stickstofffrachten bei der das molare Si/N Verhältnis etwa 1:1 ist (aktuelle Winterkonzentration von etwa  $200 \mu\text{M}$  Si und ein Zielwert von  $200 \mu\text{M}$  N), ist in der Abbildung eingezeichnet. Es ist deutlich, dass die heutigen Stickstofffrachten und die heutigen Phytoplanktonbiomassen höher liegen und daher eine weitere Reduktion der Stickstofffrachten notwendig ist. Das erklärte Ziel einer Stickstoffkonzentration von  $2.8 \text{ mg/l}$  für deutsche Flüsse entspricht im Winter tatsächlich einem molaren Verhältnis von etwa 1:1. Für den Rhein ist dieser Wert aber zu hoch: Algenblüten im Rhein und in den Seen des Rheins haben zu einer Abnahme des Silikats geführt (Elster, 1974). Zurzeit liegen die maximalen Konzentrationen bei etwa  $125 \mu\text{M}$  Si. Entsprechend



sollte als erstes Ziel eine Winterkonzentration von 125  $\mu\text{M N}$  angestrebt werden. In Abbildung 48 sind die Konzentrationen für die entsprechenden Zeiträume (Dezember –August oder Januar – August) in Frachten umgerechnet ausgehend.

**Seegras** ist ein wichtiger Indikator des Zustandes von Küstenökosystemen. In vielen Bereichen, auch im Wattenmeer hat die Verbreitung von Seegrasflächen im 20. Jahrhundert abgenommen. Eine der verantwortlichen Faktoren ist die Eutrophierung (Van Katwijk et al., 1997; 1999). Auch im nordfriesischen Wattenmeer sind die Bestände seit den 1930-er Jahren zunächst deutlich zurückgegangen. Seit Mitte der 1990 Jahren verbreitet sich das Seegras im nordfriesischen Wattenmeer aber wieder und heute ist die Verbreitung der intertidalen Beständen wie in den 1930-er Jahren (Dolch et al., 2013). Hier liegt also eine deutliche diskontinuierliche Entwicklung vor. Obwohl viele Faktoren für die Verbreitung des Seegrases verantwortlich sein können (zB de Jonge & de Jong 1992) interpretiere ich die Zunahme des Seegrases seit Mitte der 1990-er Jahre als Reaktion auf das Unterschreiten eines Schwellenwertes der Nährstoffbelastung. Im ostfriesischen Wattenmeer gab es Anzeichen für eine leichte Verbesserung der Seegrasbestände (e.g Schückel & Kröncke, 2013), aber neuere Daten zeigen wieder einen leichten Rückgang (NLWKN, 2015). Insgesamt sind die Bestände kleiner als vor der Eutrophierung (Dolch, pers. Mitteilung). Seegras hat sich im nordfriesischen Wattenmeer ab einer Flussfracht (Elbe + Weser; Jan. – Aug.) von etwa 150.000 Tonnen N und Sommerchlorophyllwerten von etwa 7  $\mu\text{g/l}$  wieder erholt (siehe Abbildung 48). Phytoplankton ist ein guter Indikator des Eutrophierungsstatus. Eine dauerhafte Etablierung von Seegras im ostfriesischen Wattenmeer könnte dementsprechend bei einem Chlorophyllwert von 7  $\mu\text{g/l}$  stattfinden. Um das zu erreichen muss die Rhein/Maas-Fracht (Dez.-Aug.) auf etwa 100.000 Tonnen reduziert werden.

Die MSRL und WRRL basieren ihre Eutrophierungsbewertung auf Indikatoren wie Seegras, Phytoplanktonbiomasse und- Zusammensetzung, sowie Sauerstoff. Für die Bewertung wird meistens eine bestimmte Abweichung von einer bestimmten Referenz genommen. Dieser Vorgang ist relativ subjektiv. Das hier vorgeschlagene Bewertungsverfahren bezieht sich auf Diskontinuitäten in der ökologischen Entwicklung des Es entzieht sich deswegen der Definition subjektiver und deswegen anfechtbarer Grenzwerte.

### 5.3.6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Für die Bewertung des Status von Ökosystemen sind Langzeitdaten essentiell. Die Interpretation von Messdaten - beispielsweise aus dem Wattenmeer - setzt aber ein umfassendes Systemverständnis voraus. In WIMO wurde durch die Kombination von Modellen und Datenanalysen gezeigt, wie das Wattenmeer und die Nordsee eng verknüpft sind: Durch Phytoplankton produzierte Organik wird aus der Nordsee in das Wattenmeer importiert. Regionale Unterschiede in der Eutrophierung entstehen durch unterschiedlichen Import. Weitere Faktoren wie Verweilzeit, Tiefe oder Morphologie modulieren das Importsignal. Es wurde gezeigt, dass Dauermessungen von Sauerstoff genutzt werden können um die Primärproduktion in Küstengewässern zu quantifizieren.

EU Richtlinien zielen auf eine gesamtökologische Bewertung. Eine reine Beschreibung des Status und der Änderungen (auf Grund von Langzeitdaten) reicht dafür meistens nicht aus: Wichtige ökologische Interaktionen und Prozesse werden nicht erfasst. Ziel eines modernen Monitoring sollte daher sein, dass nicht nur Trends aber auch Prozesse erfasst werden. Dafür ist eine Kombination von unterschiedlichen Verfahren notwendig. WIMO hat hier einen wesentlichen Beitrag geleistet und die Integration zeitlich und räumlich hochauflösende Beobachtungen und Modelle gezeigt. Die Auswertung hochauflösender Sauerstoff-Konzentrationen ist hier ein gutes Beispiel.

Neue Messverfahren umfassen undulierende Messsysteme, die die vertikale Verteilung von Sauerstoff, hydrographischen Parametern, Phytoplankton, Zooplankton und Fischen in der Wassersäule gleichzeitig erfassen können. Ein solches Gerät ist beispielsweise am Institut für



Hydrobiologie und Fischereiforschung der Universität Hamburg im Einsatz und wurde für die Innovationsstudie Eutrophierung benutzt. Zurzeit wird in Zusammenarbeit mit dem HZG erörtert, ob das Gerät mit weiteren Sensoren für in situ Primärproduktion und Nitrat bestückt werden kann. Damit stünde ein Gerät zu Verfügung, das das pelagische System zeitlich und räumlich hochauflösend erfassen kann.

Die Arbeit an Langzeitdaten (AWI, HZG) wird im Rahmen des aktuellen QSR Wattenmeer 2016 fortgesetzt. Im Rahmen der Fach AG *Eutrophierung Nährstoffe Plankton* (Fach-Arbeitsgruppe zur Begleitung der behördlichen Monitoringaufgaben) werden in Zusammenarbeit mit der Uni Hamburg und HZG Modelle für Planktoneigenschaften weiterentwickelt. Im Rahmen vom BMBF Projekt NOAH (North Sea - Observation and Assessment Habitats) und vom Institutsübergreifenden Forschungsprogramm PACES der Helmholtzzentren HZG und AWI werden sowohl benthische als auch pelagische Produktion und Veratmung untersucht. Hier wird die Strategie des Innovationsprojekts „Eutrophierung Deutsche Bucht“ weiter geführt in dem Primärproduktion mit mehreren Methoden (Satelliten, Dauermessungen O<sub>2</sub>, Veratmung, Modelle) betrachtet und Zusammenhang mit benthischen Prozessen gebracht wird.

## 5.4 Deskriptor D6 Meeresgrund

R. Reimers (LLUR), A. Bartholomä (SaM)

### 5.4.1 Einleitung

Der Deskriptor D6 Meeresgrund beschreibt das Vorkommen und die Verbreitung benthischer Habitats und Biotoptypen sowie den Zustand der charakteristischen Arten und Lebensgemeinschaften einschließlich der anthropogenen Belastungen. Das Ziel der MSRL ist es, bis 2020 einen Zustand in allen Meeressgewässern zu erreichen, der gewährleistet, dass die Struktur und die Funktionen der Ökosysteme gesichert sind und dass insbesondere benthische Lebensräume keine nachteiligen Auswirkungen erfahren.

In verschiedenen Teilprojekten wurden Vergleichsstudien zur Anwendbarkeit und Qualität verschiedener hydroakustischer Verfahren im Sublitoral und Satelliten- und Flugzeuggestützten Fernerkundungsmethoden im Eulitoral durchgeführt. Methoden zur Klassifikation und Interpretation verschiedener Lebensräume wurden bewertet. Der Vergleich von Daten gemeinsamer Messkampagnen lieferte einen deutlich besseren Überblick zur sinnvollen Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit der Methoden. Diese Untersuchungen zeigen systematisch die Vorzüge und Limitierungen der einzelnen Verfahren in einer unmittelbaren Gegenüberstellung auf. Die dabei abgebildete Dynamik in den Wiederholungsmessungen unterstützt die Ausweisung zukünftiger „Referenzflächen“ für das Monitoring. Es wurde gezeigt, dass numerische Modelle in der Lage sind, Messwerte über den morphologischen und sedimentologischen Zustand in die natürliche Variabilität einzuordnen. Diese Ergebnisse sensibilisieren die verantwortlichen Behörden in der zukünftigen Auswahl der Beobachtungsansätze in den einzelnen Lebensräumen. Der in WIMO erreichte Erkenntnisgewinn führt auch zu einem verbesserten Einsatz der Habitatmodellierung kleinskaliger Lebensräume.

Die verfügbaren Verfahren decken den gesamten Bewertungsraum der deutschen Hoheitszone ab. Verfahrensbedingt stellt die Wasserbedeckung der zu bewerteten Habitats die Grenzen der Anwendbarkeit dar. Für die räumliche Kartierung im Subtidal kommen hydroakustische Verfahren zum Einsatz, die durch punktuelle Beprobungen und dem Einsatz von visuellen Systemen unterstützt bzw. validiert werden. Für die Bereiche mit direktem Zugang zu den Oberflächen im Eulitoral der Gezeitsysteme im Wattenmeer und im Hinterland findet die satelliten- und Flugzeug gestützte Fernerkundung Anwendung.

Für die Zustandsbewertung bestimmter benthischer Arten oder Gemeinschaften werden küstennah vor allem die Daten aus dem WRRM-Monitoring genutzt. In der WRRM ist ein Monitoring benthischer Makroalgen & Angiospermen sowie der wirbellosen Makrofauna obligatorisch, und es existieren bereits Bewertungsverfahren. Bei der benthischen Flora orientieren sich diese vor allem an Effekten der Eutrophierung. So nehmen beispielsweise Tiefenverbreitungen und mehrjährige Formen ab, während die Menge an opportunistischen Algen zunimmt. Entsprechend werden Tiefengrenzen und Ausbreitung von mehrjährigen Formen sowie die Masse an Opportunisten im Monitoring erfasst. Die Bewertung des Makrozoobenthos erfolgt anhand von van Veen-Greiferproben. Für die Nordsee bewertet das M-AMBI-Verfahren die Gemeinschaften aus Greiferproben anhand einer integrierten artspezifischen Zeigereigenschaft hinsichtlich der organischen Belastung. Die Makrofauna des Felssockels von Helgoland wird mit dem MarBIT anhand von drei Habitats bewertet: der Fauna des Felswattes, des Schillgrundes „Tiefe Rinne“ und aus *Laminaria*-Haftkrallen. In Vorbereitung einer Bewertung nach FFH und MSRL wurden in den letzten zwei Jahren zudem Steinriffe in Nord- und Ostsee durch Taucher und UW-Video untersucht.

Die oben genannten Verfahren sollen (ggf. neben einer Bewertung nach WRRM und/oder FFH) auch in die Erfassung für den Deskriptor D1 Biodiversität eingehen (Berg et al., 2015).

#### 5.4.2 Methoden

Die Erfassung des Zustands der bestehenden Vorkommen von Lebensgemeinschaften und deren Lebensraum wird flächig über verschiedene Kartiertechniken erreicht. In Deutschland werden hierzu im Sublitoral vorwiegend hydroakustischen Methoden wie Fächerecholote, Seitensichtsonare und Einstrahl-ot basierte Direktstrahlverfahren genutzt. In den trockenfallenden Bereichen der Gezeitemensysteme wird auf verschiedene Satellitensysteme wie Rapid Eye und TerraSAR-X (SAR – Synthetic Aperture Radar) sowie auf Flugzeug-gestützte Fernerkundung mit Hilfe von Laserscanning (LIDAR) und zunehmend auf Drohnen basierte Systeme gesetzt. Der Einsatz von Satelliten gestützten Systemen erlaubt großflächige Erfassungen von Gebieten. Der Zeitpunkt der Überflüge einzelner Systeme lässt sich nicht immer zeitnah realisieren. Für alle Verfahren notwendig ist ein entsprechendes Groundtrouthing, dass mit Bodengreifern, Vorortbegehungen und Beprobungen sowie durch den Einsatz visueller Erfassung von Video und Foto zur Kalibrierung und Validierung der eingesetzten Methoden verwendet wird.

Morphodynamische Modellsimulationen können für die Prognose von Systemzuständen (Sedimentologie und Morphologie) und für ein Verständnis der natürlichen Dynamik von Zustandsgrößen verwendet werden. Pilotstudien (Herrling und Winter, 2014; subm.) haben das Potential für die Bewertung von Messwerten vor dem Hintergrund der örtlichen und zeitlichen Variabilität gezeigt (Kap. 4.2).

#### 5.4.3 Ergebnisse

Die im Sublitoral durchgeführten Untersuchungen an mehr als zehn Standorten in der südlichen Nordsee fanden mit Hilfe von hydroakustischen Verfahren statt, die alle akustische Signale an den Meeresboden senden, was dort in komplexer Form reflektiert wieder von den Messsystemen aufgefangen werden. In sehr aufwendiger Weise werden die Daten prozessiert, zeitlich und räumlich korrigiert und am Ende klassifiziert und interpretiert (Kap. 3). Dabei spielt vor allem die Härte und Rauheit des Bodens eine Rolle und der Einfluss von überstehender Vegetation wie Großalgen oder Seegraswiesen. Auch die Dichte der benthischen Besiedlung geht in das Signal ein. Mit Hilfe der hinzu gezogenen „Ground Truth“-Daten werden die Informationen in Karten umgesetzt, die zur weiteren Bewertung von Habitaten genutzt werden. Im Bereich des Eulitoral lag der Fokus auf der Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von Daten neuer, mit hochauflösenden Sensoren ausgestatteter Satelliten und flugzeuggestütztes hochauflösendes Laserscanning (LIDAR). Kernthemen waren hierbei die unterschiedliche Auflösung und die Differenzierungsmöglichkeiten räumlich angelegter Makrostrukturen wie Schlickfelder, Muschelbänke, Sandplatten oder in langfristigen Veränderungsanalysen von Sedimenten, Muscheln, morphologischen Strukturen mit Restwasser oder Salzwiesen. Dazu wurden im Bereich des Norderneyer Rückseitenwatt wiederholt Messungen auf verschiedenen Platen durchgeführt, die über die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte auch Aussagen über die Habitatdynamik zulassen.

Im Sublitoral ergab der Systemvergleich der einzelnen Messsysteme eine recht hohe Übereinstimmung in der Ausweisung der wesentlichen Großstrukturen am Meeresboden. Mit über 80% Flächenkorrelation überzeugen die Ergebnisse aus Seitensichtsonarklassifizierung und der Einstrahl-RoxAnn-Klassifizierung am Beispiel nordwestlich Helgoland insbesondere in den Grauwertübergangsbereichen. Die anderen eingesetzten Verfahren liefern fast ebenso große Abweichungen, weisen aber höhere Schwankungen in Einzelbereichen auf. Erfreulich ist die inzwischen doch recht hohe Positionsgenauigkeit der Messdaten, so dass die im Bereich der sogenannten „sorted bedforms“, also sedimentspezifisch unterschiedliche Bodenformen, durchgeführten Zeitserienmessungen die jährliche Transportdynamik der Sedimentumlagerung widerspiegeln. In diesem Zusammenhang konnte auch eine Korrelation von Lebensgemeinschaften und Sedimentbeschaffenheit über die hydroakustischen Daten hergestellt werden.

Auch im Eulitoral waren Bodenformen ein gutes Strukturmerkmal für die Bewertung der Identifikationsmöglichkeiten von LIDAR und Satellitendaten. Generell konnten alle Verfahren die wasserbedeckten Rippeltäler gegen die höher liegenden und meistens trockneren Rippelkämme abgrenzen, die Klassifizierung in der räumlichen Genauigkeit hängt dabei auch von der Auflösung der Systeme ab, die am höchsten im LIDAR deutlich unter einem Meter liegt. Auch hier war mit Hilfe von Zeitserienmessungen die Transportdynamik auf den Bodenformen ablesbar.

Ein interessanter Erkenntnisgewinn und besondere Herausforderung stellte die Verschneidung von Daten aus der Hydroakustik und der „luftgestützten“ Fernerkundung im Eulitoral dar. Auf zwei ausgewählten Platen hinter der Insel Norderney wurden dieselben Gebiete mit Seitensichtsonar bei voller Wasserbedeckung während Hochwasser und mit der konventionellen Fernerkundung während Niedrigwasser vermessen, als die Flächen trocken gefallen waren. Dabei wurde deutlich, dass die Seitensichtsonardaten unabhängig von Wassersättigung der Sedimente eine ähnliche hohe Auflösung wie das LIDAR. Andererseits fehlen in der Hydroakustik genaue Höheninformationen. Besonders die Randbereiche der Miesmuschelbänke und Kanten kleinerer Priele sind nicht eindeutig bestimmbar. Die Verbindung mit Daten anderer Verfahren verschafft hier Abhilfe. Die TerraSARX-Ergebnisse zeigen bei einer räumlichen Auflösung im Meterbereich charakteristische Habitate und Oberflächenstrukturen, die sich durch ihre spezifische Rauheit und Texturen wie es bei den Miesmuscheln der Fall ist, abbilden. Darüber hinaus können Schill- oder Schlickfelder, Senken und Restwasserflächen sowie Prielsysteme und geomorphologische Oberflächenstrukturen differenziert werden. Ähnliches lässt sich auch aus den Spektraldaten von Rapid Eye erreichen: Mit Hilfe neu entwickelter Algorithmen konnten einer hierarchischen Klassifikation (s. Kap. 2) auch Sedimenttypen anhand der Wassersättigung differenziert werden.

#### 5.4.4 Diskussion, Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der hydroakustischen Verfahren zeigt eine generell hohe Übereinstimmung in der flächigen Ausweisung der wesentlichen Seebodencharakteristika. In besonders fein abgestuften Übergangszonen bestehen jedoch deutlich größere Unterschiede in den Ergebnissen, die sich neben dem physikalischen Ansatz vor allem in der Definition der jeweiligen Klassifizierungsverfahren begründen. Das bedeutet zu jetzigen Zeitpunkt, dass die Erfassung von großräumigen Strukturen mit allen Systemen möglich ist, aber detaillierte Abgrenzungen von Übergangszonen stark von der Klassengrenzen innerhalb der Systeme abhängig ist, die von den jeweiligen Bearbeitern festgelegt werden. Hier besteht der dringende Bedarf der Normierung soweit es verfahrenstechnisch möglich ist. Ein erster Ansatz für eine kohärente Bewertung auf der Basis von Seitensichtsonarmessungen besteht in der in Bearbeitung befindlichen Kartieranleitung für die deutschen Meeresgebiete (Zeiler et al. in Vorbereitung, s.a. Kap. 3) die in WIMO erzielten Ergebnisse einfließen (vergl. Kap. 3.1).

Der Einfluss von makrobenthischen Lebensgemeinschaften auf die Hydroakustik ist häufig nur indirekt abzulesen. Ist die Veränderung der Lebensgemeinschaften an deutliche Materialwechsel gekoppelt, lassen sich diese identifizieren. Wie am Beispiel des Gebietes westlich Kampen gezeigt werden konnte, erweist sich jedoch die Erkennung von Lebensgemeinschaften in Bereichen mit Wechseln von Morphologie und Sediment als deutlich schwieriger. Die Identifikation von stark reliefbildenden Formen der Fauna und Flora lassen sich deutlich besser mit den Einstrahlloten (RoxAnn, Furuno/QTC-View und *Echoplus*) über Härte und Rauheit erkennen. Räumliche Muster sind jedoch im Seitensichtsonar oder Fächerecholot zu erkennen.

Im Eulitoral konnte in der Fernerkundung für die LIDAR-Daten durch neue Algorithmen eine bessere Differenzierung von Morphologie und Sediment entwickelt werden, die automatische Land-Wasser-Trennung und die Detektion von Muschelbänken wurden optimiert. Im Bereich von Übergangsbereichen an Miesmuschelbänken und anderen grobklastischen Ablagerungen kann die Identifizierung durch SAR-Daten des Radarsatelliten TerraSar X verbessert werden. Letztere ist

unabhängig von Tageslicht und Wetter und ermöglicht eine deutliche Verdichtung von Zeitserien, die vor allem für die Dynamik mittelfristiger und einzelner Ereignisse relevant ist.

#### 5.4.5 Bewertung, Ausblick

WIMO hat gezeigt, dass die für ein flächendeckendes Monitoring im Sublitoral verfügbare Hydroakustik-Technologie in Verbindung mit einem entsprechenden „GroundTruthing“ die notwendigen Vorsetzungen für die Bewertung von Habitaten schafft. Die Komplexität der Messsysteme selbst, ihre Klassifikationsverfahren und spätere Interpretation setzen für die Zusammenführung hydroakustisch unterschiedlich erfasster Daten eine Standardisierung der Messvorgaben in den Systemen und Messkonfigurationen auf den Schiffen voraus. Darüber hinaus ist eine einheitliche Nachbearbeitung (Postprocessing) der Daten unabdingbar. Dafür ist die Erstellung allgemeiner Leitfäden bzw. Anleitungen notwendig, wie es sie bereits in akkreditierten Verfahren von z.B. Messstellenmonitoring im Bereich des BLMPs gibt. Wie bereits oben erwähnt wird ähnlich den bestehenden Leitfäden an einer „Anleitung zur Kartierung des Meeresbodens mittels hochauflösender Sonare in den deutschen Meeresgebieten“ unter der Federführung des BSH gearbeitet. Diese Anleitung wird viele in WIMO erarbeitete Aspekte für den Alltagsbetrieb nicht berücksichtigen können. Besondere Erwähnung gebührt der Erkenntnis, dass die Erfassung mit nur einer Technologie nicht immer ausreichend ist (s.Kap.3). Es müssen also für besonders heterogene und sensible Habitattypen Systemkombinationen eingesetzt werden, die entsprechend Einzelaspekte besser abbilden. Mittelfristig muss also ein „Mix“ von Daten, kombiniert mit zumindest teilautomatisierten Klassifizierungsverfahren das Ziel sein, um sowohl zeit- als auch kostendeckend arbeiten zu können. Es liegt die Vermutung nahe, dass dies im „normalen Behördenmonitoring“ nur bedingt zu leisten ist, die entsprechende Beratung und Weiterentwicklung sollte durch die dauerhaft vorgehaltene Expertengruppe realisiert werden. Die Möglichkeiten der Einbindung morphodynamischer Modellsysteme hinsichtlich der Ausweisung natürlicher Variabilitäten der Sedimentologie und Morphologie sollte im Einzelfall geprüft werden.

Im Grunde gilt das Gleiche für das eulitorale Monitoring. Der verstärkte Einsatz verschiedener fernerkundlicher Verfahren liefert eine deutliche höhere Auflösung in Raum und Zeit. Insbesondere die Zusammenführung der Laserscannerdaten mit den Fernerkundungsdaten der optischen und Radarsatelliten bedeutet einen wesentlichen Schritt zur Optimierung der Erfassungen hinsichtlich ihrer Anwendung für zukünftige Monitoringstrategien. Die Fernerkundung ist ein prominentes Beispiel für die erfolgreiche Verbindung von Konzepten für wissenschaftliche Beobachtungen, insbesondere für „Long Term Ecological Research“ und behördliches Monitoring. Satellitengestützte Verfahren liefern „Übersichts“-Aufnahmen (zum Teil ohne Einschränkungen durch Beleuchtungs- und Wetterverhältnisse), sehr hoch auflösende Sensoren wie Laserscannern und insitu-Aufnahmen liefern die notwendige Detailtiefe. Mit dem Maß der Automation der Datenverarbeitung steigt die allgemeine Akzeptanz für den täglichen Einsatz, so werden beispielsweise Laserscannerdaten inzwischen praktisch vollautomatisch ausgewertet. Vor allem steigert die Verfügbarkeit Daten höherer geometrischer und zeitlicher Auflösung die Attraktivität im täglichen Einsatz. Ein interessanter Ansatz sind die im Rahmen des Programms Copernicus kostenlos verfügbaren Sentinel Daten der Europäischen Gemeinschaft.

An der Schnittstelle vom Eulitoral zum Sublitoral bietet die Verschneidung von LIDAR- und Seitensichtsonardaten die Möglichkeit zur Verschmelzung beider Bereiche, die zukünftig durch kleinskalig hochauflösende Drohnen-basierte Messplattformen ergänzt werden wird.

## 6. Anwendungen

### 6.1 Einleitung

Das Verbundprojekt WIMO wurde mit einem deutlichen Schwerpunkt auf den Anwendungsbezug der wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Verschiedene Ämter und Behörden waren direkt im Projekt beteiligt oder Gesprächspartner für die Ausrichtung der Forschung in die Anwendbarkeit und Öffentlichkeitsarbeit. Seit Beginn des Projekts wurden im Verbund die sogenannten praktischen Fallstudien Biodiversität und Eutrophierung durchgeführt, die in den Abschnitten 5.2 und 5.3 vorgestellt wurden.

Abschnitt 6.2 beschreibt eine weitere Fallstudie zur Ölsensitivität, die in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Havariekommando durchgeführt wurde. In diesem Teilprojekt wurden detaillierte Partikeldriftmodelle für die Simulation von Ölverschmutzungen entwickelt. Transportrechnungen wurden dabei mit einem Modul verknüpft, welches auch die physikalischen und chemischen Umwandlungsprozesse von Öl in der Meeresumwelt beschreibt.

Projektübergreifende gemeinsame Messkampagnen wurden unter anderem im Rückseitenwatt Norderney durchgeführt (Abschnitt 6.3). Unter Beteiligung mehrerer Teilprojekte wurden hier luftgestützte und hydroakustischen Verfahren und direkte Probenahme bei örtlichen Begehungen auf zwei Messkampagnen an Wattflächen im Herbst 2013 und im September 2014 kombiniert.

Stürme prägen die Dynamik der Systeme im Küstenraum. Die Relevanz von extremen Bedingungen auf die Morphologie, Sedimentologie, Schwebstofftransporte und Ökosysteme wurde in mehreren Modellstudien untersucht. Abschnitt 6.5 beschreibt Ergebnisse eines Teilprojekts, in dem ein Sensornetzwerk entwickelt, das auf die Messung von Wasserstand und Schwebstoffkonzentration während Sturmereignissen optimiert wurde.

Im Rahmen der zweiten Phase des Projekts konnten kurzfristig zusätzliche kleinere Projekte mit integrativem Charakter finanziert werden (siehe Kapitel 7). Exemplarisch werden in Abschnitt 6.4 Ergebnisse des Integrativen Projekts „Ems Flüssigschlick“ gezeigt, das in Zusammenarbeit mit dem NLWKN durchgeführt wurde. Hier wurde ein Messkonzept zur Bestimmung der zeitlichen Dynamik hochkonzentrierter Suspensionen und Flüssigschlick vorgeschlagen. Mit gängiger gewässerkundlicher Messtechnik wie Wasserstandspegeln und punktuellen Strömungs- und Trübungsmessungen lassen sich der Zustand und die Variabilität von Flüssigschlick nicht grundlegend erfassen. In Abschnitt 6.4 wird gezeigt, wie an einer Messstelle simultan die Hydrodynamik und sedimentinduzierte Dichteschichtung erfasst werden kann.

In naturwissenschaftlichen Projekten fallen eine Vielzahl unterschiedlicher Daten an. In Abschnitt 6.6 wird gezeigt, wie im Rahmen des Projekts WIMO mit dem WIMO-WebGIS ein vollwertiges online Tool zur Visualisierung von lokalen und verteilten Projektdaten sowie Daten aus anderen Quellen entwickelt wurde. Daten aus WIMO und auch anderer Quellen können als Webservice angeboten werden. Auch andere Daten können verlinkt werden, etwa Inhalte zentraler Datenbanken, die einen eindeutigen Identifikator aufweisen.

## 6.2 Risikoanalyse Ölsensitivität

C. van Bernem (HZG), U. Callies (HZG), U. Kleeberg (HZG), F. Schwichtenberg (HZG)

Konsequenzen von Ölunfällen hängen stark von der Empfindlichkeit betroffener Gebiete gegenüber einer Verschmutzung mit Öl ab. Insofern baut jede Risikostudie ganz wesentlich auf ein Monitoring vorhandener Habitats und ihrer Sensitivitäten auf. Im Teilprojekt 3.3 wurden diese Informationen größtenteils aus existierenden Daten übernommen. Der Schwerpunkt der Arbeiten im Projekt lag in einer Analyse räumlicher Verteilungen der Gefährdungen, die dann in einem zweiten Schritt mit der räumlichen Verteilung der Sensitivitäten zu einer Beschreibung der Risiken verschnitten werden können.

Detaillierte Driftsimulationen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) auf Basis operationeller hydrodynamischer Simulationen stellen eine wichtige Informationsquelle im Zuge der Bekämpfung von Ölverschmutzungen dar. Neben räumlichen Transporten werden dabei auch physikalische und chemische Umwandlungsprozesse berücksichtigt, die das ausgetretene Öl durchläuft.

Diese gut etablierte operationelle Vorgehensweise des BSH ist methodisch von einer Risikoanalyse zu unterscheiden. Letztere bezieht sich nicht auf ein konkretes Ereignis, sondern berücksichtigt das gesamte Spektrum möglicher Ereignisse unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit und deren potentielle Folgen. Im Teilprojekt 3.3 wurden deswegen umfangreiche Ensemblesimulationen hypothetischer Unfälle zu unterschiedlichen Zeiten (z.B. einmal täglich) ausgewertet. Die erforderlichen Modelldaten mit hoher zeitlicher Auflösung (mindestens stündlich) sind aus verschiedenen Quellen verfügbar, z.B. dem Archiv des BSH oder auch (für noch längere Zeiträume) aus Klima-Datenbanken wie etwa coastDat am HZG. Die Wahl des konkreten Modells kann durch die konkrete Anwendung motiviert sein, so sind etwa die Modellläufe des BSH drei-dimensional baroklin (siehe Glossar), wohingegen die Läufe aus coastDat die Vertikalkoordinate nicht auflösen, dafür aber in Küstennähe auf Grund eines variablen Gitters eine deutlich höhere horizontale Auflösung erreichen (Abbildung 49).

Von Anfang an wurde Wert darauf gelegt, Aspekte der Risikoabschätzung, wie sie in WIMO im Vordergrund standen, technisch mit den operationel verwendeten Modellen kompatibel zu halten. Aus diesem Grunde wurde in der Anfangsphase von WIMO das Ölmodul vom BSH übernommen und mit dem HZG Driftmodul PELETS (Callies et al., 2011) verknüpft. In 2015 wurde dann in Kooperation mit dem BSH auch die Umstellung auf Seatrack Web (Maßmann et al., 2014) mit vollzogen, das offizielle Modell der HELCOM (Baltic Marine Environment Protection Commission - Helsinki Commission). Der Grund für die Verwendung von PELETS bei Ensemble-Simulationen lag nicht in dessen spezifischer Formulierung von Driftprozessen (diesbezügliche Unterschiede zum operationellen Modul des BSH erwiesen sich als von geringer Bedeutung) sondern in der Tatsache, dass PELETS bereits über umfangreiche Programmteile für das statistische Nachprozessieren umfangreicher Ensemble-Simulationen verfügt. Derartige Programmteile sind im operationellen Betrieb der BSH nicht relevant.

Für jeden einzelnen hypothetischen Unfall kann auf Grund der Simulationen abgeschätzt werden, in welchem Maße Gebiete des Wattenmeers betroffen gewesen wären. Als Beispiel zeigt Abbildung 50 Ergebnisse für 1250 angenommene Ölfreisetzungen (all 7 Stunden im Laufe des Jahres 2003) im Gebiet eines Windparks (in der Abbildung rot markiert). Dargestellt sind gemittelte Prozentsätze des freigesetzten Öls, welche innerhalb von 14 Tagen einzelne Tidebecken erreicht bzw. durchquert haben würden. Das Augenmerk ist in der Abbildung weniger auf die absoluten Zahlen als auf die räumlichen Unterschiede zu richten. Man erkennt, wie die Verteilung der betroffenen Gebiete die relative Lage



der angenommenen Quelle zur Küste vor dem Hintergrund vorherrschender Windrichtungen widerspiegelt. Die Darstellung in Abbildung 50 ist allerdings noch dadurch vereinfacht, dass Prozesse wie Verdunstung, Dispersion oder biologischer Abbau vernachlässigt wurden.

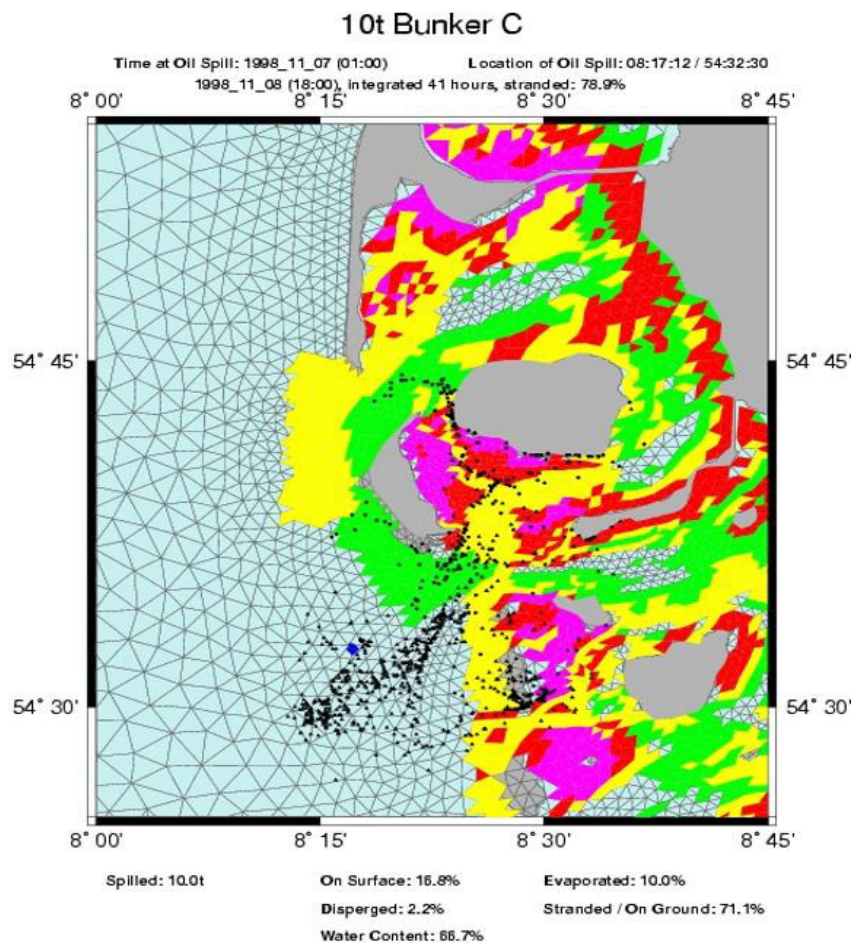


Abbildung 49: Ausschnittsweise Darstellung von Gebieten unterschiedlicher Sensitivität des Wattenmeeres gegenüber Ölverschmutzung (Sensitivitätsgrade ansteigend von grün über gelb und rot zu magenta). Linien repräsentieren das Dreiecksgitter(variable Auflösung) des in coastDat verwendeten Strömungsmodells TELEMAC. Schwarze Punkte markieren die Positionen von Tracer-Partikeln, wie sie im vorliegenden Beispiel aus einer Nachstellung des Pallas-Unfalls im November 1998 (Reineking, 1999) resultieren.

Der wesentliche nächste Schritt hin zu einer wirklichen Risikobewertung besteht im Einbeziehen von Sensitivitätskartierungen, wie sie beim Havariekommando (HK) im Einsatzfall Verwendung finden. Für den Bereich der AWZ (Ausschließlichen Wirtschaftzone) wurden in WIMO Grundlagen einer Sensitivitätsdarstellung entwickelt, die das vorliegende Raster „Wattenmeer“ (Abbildung 49) ergänzen. Probleme bestehen allerdings einerseits in der Verfügbarkeit flächendeckender Daten, andererseits in einer fortschreitenden Änderung der Risikobewertung sowie auch Änderungen der Bedingungen im Benthel/Pelagial (siehe Glossar) durch erhebliche Eingriffe wie den Aufbau von Windparks.

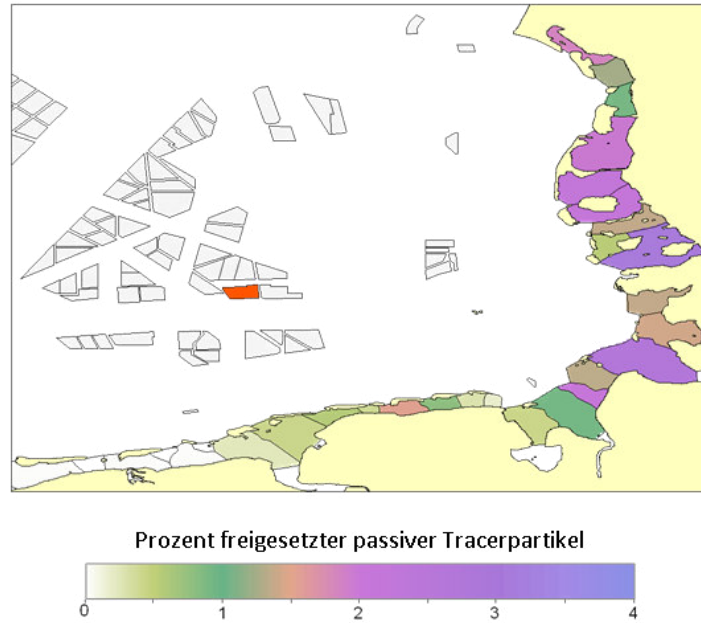


Abbildung 50: Simulierte mittlere Prozentsätze passiver Tracer-Partikel (d.h. physikalisch-chemische Veränderungen des Öls wurden außer Acht gelassen), welche verschiedene Tidebecken durchquerten, nachdem sie in der rot markierten Region innerhalb eines Windparks freigesetzt wurden. Die Ergebnisse sind Mittelwerte über 1250 Simulationen hypothetischer Unfälle, welche im Abstand von 7 Stunden verteilt über das Jahr 2003 gestartet wurden. Die grauen Konturen in der Deutschen Bucht markieren Positionen potentieller Windparks.

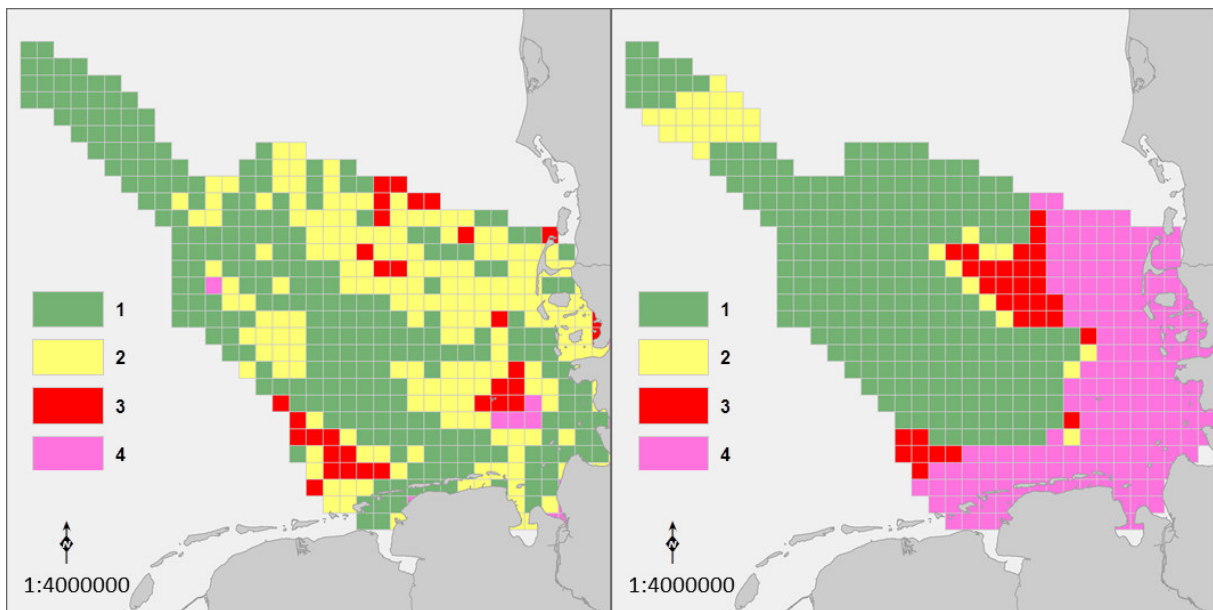


Abbildung 51: Sensitivitätsstufen (Stufe 4 beschreibt maximale Sensitivität), wie sie einerseits aus Sediment-Verteilungen (links) und andererseits aus Natura 2000 Schutzgebieten (rechts) abgeleitet wurden. Zellen des Rasters haben eine Größe von  $10 \times 10 \text{ km}^2$ .

Unter diesen Voraussetzungen wurden als verwertbare flächendeckende Informationen folgende Daten herangezogen:

- Sedimentverteilung (BSH, BGR, LBEG-Stand 2014, Klassifikation nach Figge, 1981) – als wesentliches Kriterium für eine bestehende Sensitivität wurde hier der Anteil riffbildender Sedimente (Nahrungsgebiete Fische, Vögel) und der Anteil von Schluff > 80% (Adsorption, Remineralisierung) angenommen;
- BfN: Sites of Community Importance (SCI) der FFH-RL (Sylter Außenriff: Schweinswale, Sandbänke, Riffe; Borkum Riffgrund: Sandbänke, Riffe; Doggerbank: Sandbänke) und
- BfN: Special Protection Areas (SPA) der EU-VRL – (Östliche Deutsche Bucht: Seetaucherarten, Rastvögel). Diese wurden für den Bereich um Helgoland und für den westlichen Bereich der Deutschen Bucht der Grenzlinie des Küstenmeeres angegliedert.

Es ist zu erwarten, dass im Rahmen nachfolgender Projekte weitere flächendeckende Merkmale die genannten Daten ergänzen werden. Als Resultate des Projektes NOAH (North Sea Observation and Assessment of Habitats) könnten dies z.B. sein: TOC < 20µm (Remineralisierung, Organismengesellschaften) und Fischereiaufwand für kleine und große Kurnetzfischerei (Fischbestände, fischereiliche Schäden). Basierend auf den bestehenden Daten wurden Gebiete in vier Klassen unterschiedlicher Sensitivität eingestuft. Dieser Schritt der Vereinfachung ist erforderlich, um die Ergebnisse für das HK im Einsatzfall handhabbar zu machen. Abbildung 51 zeigt Sensitivitätsklassen, wie sie einerseits aus der Sedimentverteilung und andererseits aus Natura 2000 Schutzgebieten abgeleitet wurden, wobei letztere sowohl die SCIs als auch SPAs einschließen.

Die Projektstudie in WIMO hat durch die Kooperationen mit BSH und HK einen engen Praxisbezug. So wurde im Projektverlauf ein neuer Themenschwerpunkte etabliert im Hinblick auf eine aktuelle Diskussion, über einen möglichen Einsatz chemischer Dispergatoren im küstennahen Bereich, etwa zwischen den 10m und 20m Tiefenlinien. Durch chemische Dispersion werden Ölfilme in kleine Tröpfchen aufgelöst, die dann in den Wasserkörper eingemischt werden können. Durch diesen Prozess vergrößert sich einerseits die Oberfläche des Öls, an der biologischer Abbau ansetzen kann. Andererseits werden aber auch giftige Ölkomponenten leichter und schneller freigesetzt. Die Toxizität des Dispergators selbst stellt bei modernen Produkten hingegen kein zentrales Problem mehr dar.

Die Diskussion, ausgehend von gegenwärtig unterschiedlichen Positionen auf nationaler Ebene (EMSA 2014), wurde insbesondere durch Planungen und Unterstützungsangebote der European Maritime Safety Agency (EMSA) angestoßen. Entscheidungen über eine mögliche Anwendung chemischer Dispergatoren werden erschwert durch hohe Unsicherheiten im Hinblick auf sowohl die Wirksamkeit der Präparate (wegen stark unterschiedlicher Salzgehalte im Gebiet der Deutschen Bucht) als auch mögliche Folgen für das Ökosystem. Erschwerend kommt hinzu, dass dispergiertes bzw. unbehandeltes Öl unterschiedliche Kompartimente (Sediment, Pelagial, Strand usw.) beeinträchtigen würden. Überdies werden durch das Einmischen in die Wassersäule Transportwege der Verschmutzung stark verändert. Eine Entscheidungsfindung ist aber auch nicht unabhängig von kulturellen und gesellschaftlichen Einstellungen. Grundsätzliche Bedenken bestehen, da bei dieser Bekämpfungsmethode vorsätzlich weitere Chemikalien in die Umwelt eingebracht werden.

Die Studie in WIMO war fokussiert auf Auswirkungen des Dispergierens auf den rein physikalischen Vorgang lateraler Transporte. Dieser Effekt ist insofern von Bedeutung, als sich durch ihn die Schadwirkungen unbehandelten Öls oder eines Öl/Dispergator-Gemischs an verschiedenen Orten entfalten. Aus diesem Grunde wird ein reiner Vergleich toxischer Wirkungen beider Alternativen in einer vorgegebenen Umgebung der praktischen Fragestellung nicht voll gerecht.

Im Falle einer konkret vorliegenden Verschmutzung wären spezifische Information bzgl. Wetter und Strömungen als Basis für Driftvorhersagen verfügbar. Im Rahmen der allgemeinen Vorsorgeplanung steht aber die allgemeine Frage im Vordergrund, ob ein Einsatz von Dispergatoren überhaupt in Erwägung gezogen werden sollte. Beurteilt werden muss die Wahrscheinlichkeit, dass durch einen Einsatz von Dispergatoren Umweltschäden vermindern würden. Wesentliches Ergebnis der Ensemble-Simulationen in WIMO ist (siehe Abbildung 52), dass die Region, in der ein 100% wirksamer Dispergator effektiv helfen würde Ölverschmutzungen aus dem Watt herauszuhalten, insbesondere vor Schleswig-Holstein stark mit dem Gebiet zwischen etwa 10m und 20m Wassertiefe überlappt, für welches ein Einsatz von Dispergatoren besonders kontrovers diskutiert wird.

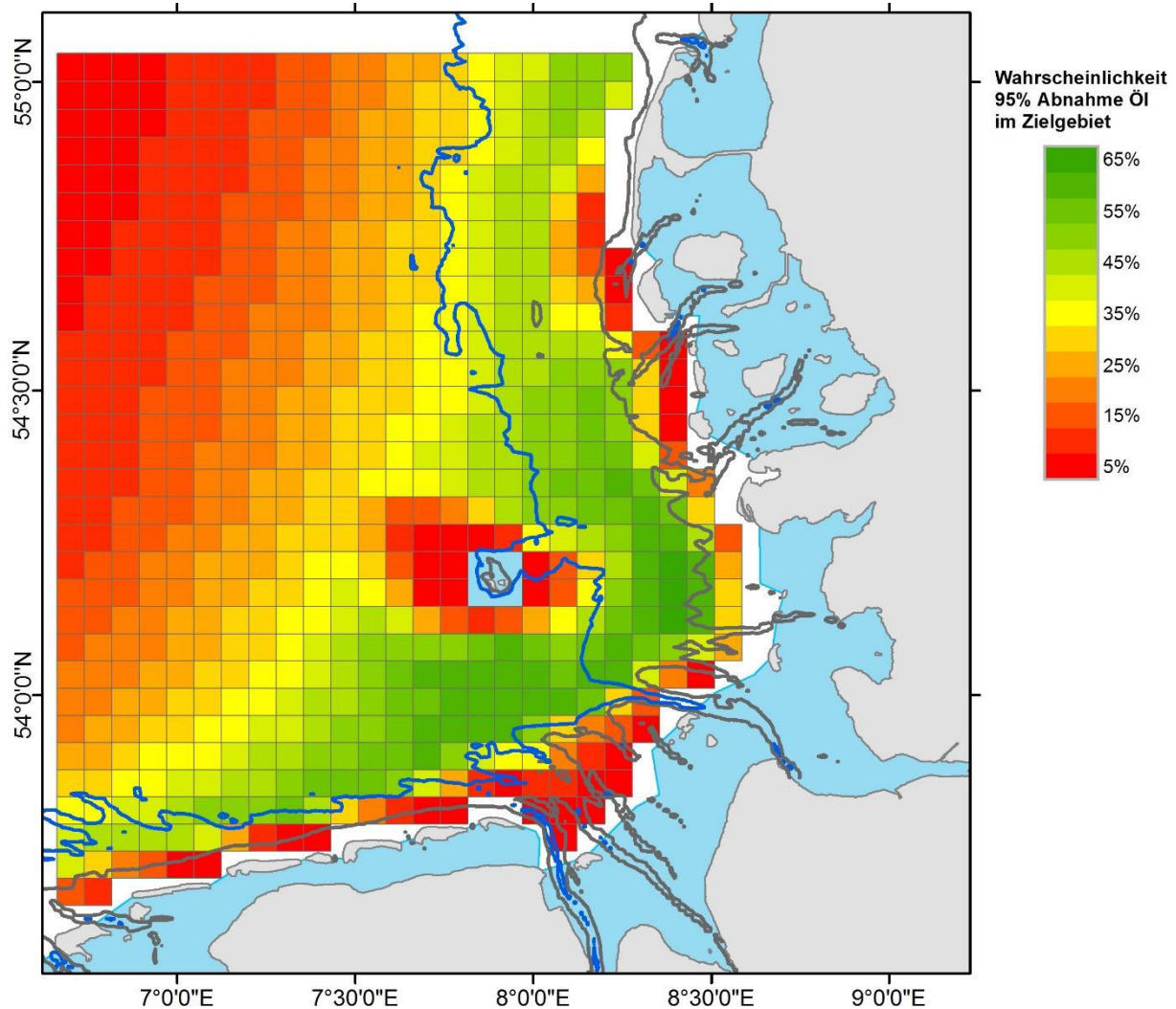


Abbildung 52: Räumliche Verteilung der Wahrscheinlichkeiten, dass ein Einsatz eines 100% effektiven chemischen Dispergators den Eintrag von Öl in empfindliche Flachwassergebiete (blau markierte Regionen) um mindestens 95% reduzieren würde. Die Analyse basiert auf 2190 Simulationen, welche im Zeitraum 2008-2014 aus jeder der 636 Gitterzellen in Abständen von 28 Stunden gestartet und jeweils 7 Tage verfolgt wurden. In idealisierter Weise wurde unbehandeltes Öl als Oberflächenfilm behandelt, dispergiertes Öl hingegen als Komponente des Wasserkörpers. In beiden Fällen wurde keinerlei Abbau angenommen. Eingezeichnet sind Linien von 10m (grau) bzw. 20m Linie (blau) Wassertiefe.

Für dunkelmarkierte Regionen in Abbildung 52 ist der Einsatz von Dispergatoren entweder unnötig oder aber unsinnig. Ersteres trifft auf Regionen weitab der Küste zu, weil von dort das Öl das Watt innerhalb der betrachteten 7 Tage mit hoher Wahrscheinlichkeit ohnehin nicht erreichen würde. In sehr küstennahen Regionen hingegen würde das Öl/Dispergator-Gemisch allein durch die

Tideströmungen ins Watt eingetragen, auf die (im Gegensatz zu durch Windschub bewirkter Drift) das Dispergieren keinen Einfluss hat.

Ein effizienter Einsatz von Dispergatoren setzt einen gewissen Energieeintrag voraus, der die Einmischung von Öl in Wasser erst ermöglicht und darüber hinaus verhindert, dass das Öl wieder auftreibt und sich an der Oberfläche sammelt. Ist der Energieeintrag hingegen zu hoch, so ist der Einsatz des Dispergators überflüssig (abgesehen von technischen Schwierigkeiten bei seiner Aufbringung unter stürmischen Bedingungen). Meist werden Wellenhöhen zwischen etwas 0.5 m und 3 m als erforderlich angegeben (Allen, 1988). Diese Annahme wurde auch im vorliegenden Experiment getroffen. Aus den hydrodynamischen Daten ergab sich, dass damit etwa 20% aller Situationen für den Einsatz des Dispergators ausschieden. Bei der Interpretation der in Abbildung 52 angegebenen Wahrscheinlichkeitsskala ist daher zu berücksichtigen, dass etwa 80% die maximale Wahrscheinlichkeit ist, welche überhaupt erreicht werden könnte.

Die Studien in WIMO haben gezeigt, dass numerische Langzeitsimulationen hydrodynamischer Bedingungen wertvolle Beiträge sowohl zur Interpretation von Monitoringdaten (vgl. Abschnitt 5.3) als auch für Risikoanalysen liefern können. Die leichte Verfügbarkeit solcher Datensätze ist eine Entwicklung, die sich u.a. auch als ein Nebenprodukt der Klimaforschung ergeben hat. Ein Problem besteht allerdings in dem großen Umfang der Ausgaben hydrodynamischer Modelle. Für praktische Anwendungen ist daher die geeignete Kompression der Informationen ein ganz wesentlicher Aspekt. Darstellungen im Sinne von Wahrscheinlichkeiten scheinen ein gangbarer Weg zu sein, detaillierte Ergebnisse aus der Wissenschaft zu aggregieren und in die Anwendung zu überführen. Für diese Vorgehensweise liefert Abbildung 52 ein Beispiel.

Es ist offensichtlich, dass die oben vorgestellten Analysen nicht die volle Komplexität der Prozesse widerspiegeln, welche in eine praktische Entscheidungsfindung hineinspielen. Andererseits ist auch klar, dass viele der zweifelsfrei relevanten Prozesse wie biologischer Abbau, um nur ein Beispiel zu nennen, schwer sicher zu quantifizieren sind. Dies liegt auch oder vielleicht sogar vorwiegend daran, dass viele Parameter, von denen diese Prozesse abhängen, zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung unter großem Zeitdruck kaum oder gar nicht bekannt sind. Auch hier bietet sich daher das Konzept der Angabe von Wahrscheinlichkeiten an, wie sie in einer Net Environmental Benefit Analysis (NEBA) vorausschauend formuliert werden können. Eine praktische Herausforderung besteht dann darin, solch zwar sorgfältig ausgearbeitete aber nicht auf den konkreten Fall zugeschnittene Analyse unter hohem Zeitdruck bestmöglich mit denjenigen Informationen zu verschneiden, welche im konkreten Fall verfügbar gemacht werden können.

Es sei betont, dass mögliche toxische Effekte nicht Gegenstand der beschriebenen Studie waren. Obwohl chemische Dispergatoren der neuesten Generation selbst wenig toxisch sind, erleichtern sie doch die Freisetzung toxischer Ölkomponenten. Die Beurteilung deren toxischer Auswirkungen hängt zu einem gewissen Grade davon ab, welche Komponente des Ökosystems als besonders schützenswert angesehen wird. In jedem Fall sind aber der Grad und die Schnelligkeit der Verdünnung dispergierter Substanzen für biologische Effekte von kritischer Bedeutung. Diesen Aspekt durch Berücksichtigung vertikaler Durchmischung genauer zu quantifizieren könnte ein nächster Schritt auf dem Weg zu einer abschließenden Risikobewertung sein.

### 6.3 Gemeinsame Messkampagne Norderney

W. Adolph (NLPV), A. Bartholomä (SaM), R. Capperucci (SaM), R. Farke (NLPV), H. Hillebrand (ICBM), R. Jung (IGF), A. Kubicki (SaM), A. Schmidt (IPI)

Das Eulitoral (Brandungszone) im Wattenmeer ist durch eine besonders hohe Dynamik der Randbedingungen Strömungen und Wellen, hoher Änderungsraten der Morphologie, Sedimentologie und so auch seiner Habitats gekennzeichnet. Im Projekt konnte gezeigt werden, wie die vollständige Erfassung des Eulitorals und des oberen Sublitorals durch eine Kombination von luftgestützten und hydroakustischen Verfahren möglich ist. Während bei Niedrigwasser die luftgestützten Fernerkundungsverfahren das trockenengefallene Intertidal abtasten können, erlauben die hydroakustischen Methoden die Erfassung desselben Bereiches bei voller Überflutung zum Zeitpunkt des Hochwassers. Das dazugehörige „ground Truth“ durch direkte Beprobung sollte wegen der sich stetig ändernden Verhältnisse zeitnah zu den anderen Messungen erfolgen.

Im Rahmen des Verbundprojekts wurden exemplarisch auf zwei Wattflächen im Norderneyer Rückseitenwatt im Herbst 2013 und im September 2014 Messkampagnen mit verschiedenen Fernerkundungsverfahren durchgeführt (Abbildung 53). Vom Testgebiet Lütetsburger Platte mit einer Größe von ca. 2.5 km<sup>2</sup> und einem ähnlich großen Gebiet auf der Norderneyer Plate wurden unter Zuhilfenahme vorliegender Luftbilder die Daten aus LiDAR-Messungen (Laser-Scan), Szenen der Satellitensysteme Terra SAR-X und RapidEye sowie schiffsgestützten Seitensichtsonarmessungen zusammengeführt. In zahlreichen, gemeinsamen Begehungen von Mitgliedern der einzelnen Arbeitsgruppen wurden vor Ort an verschiedenen Positionen im Watt die unterschiedlichen Geländetypen dokumentiert. Das Messfenster betrug insgesamt knapp sechs Wochen, die Wetterbedingungen waren stabil, jedoch fanden die einzelnen Aufnahmen zu unterschiedlichen Wasserständen statt. Damit unterscheiden sich die in den einzelnen Messverfahren identifizierten Wasserstandslinien. Für die optimale Vergleichbarkeit sollten Daten entsprechend exakt zum Tidenniedrigwasser (luftgestützt) bzw. Tidenhochwasser (Sonar) erfasst werden. Dies ist aber aufgrund der kurzen Stauwasserphase von weniger als einer Stunde in der Realität nicht leistbar. Eine Möglichkeit zur Interpolation und Vorhersage von hydrodynamischen Zustandsgrößen bieten numerische Modelle, die orts- und zeitabhängige Information über den (simulierten) Wasserstand zur Verfügung stellen (Kapitel 4.2). Messtechnisch wurde ein neu eingebrachter Ansatz einer „low-budget“ drohnen-basierten Oberflächenerfassung vorgestellt. Eine Kombination aus Kurzdistanz-Laser-Entfernungsmessung (bis zu 30m über dem Boden) und der Mehrbildgeometrie basierten Objekterkennung erlaubt eine sehr zeitnahe, detaillierte Bodenabtastung mit anschließender Rekonstruktion des Oberflächenreliefs in Form eines digitalen Geländemodells.

Als Ergebnis der Geländekampagnen liegen die prozessierten Daten aus den LIDAR (Laser-Scan)-Messungen, den verschiedenen Satellitendaten, den Geländevermessungen und Gelände-begehungen vor, die manuell in einer Habitatkarte, die hier am Beispiel der Lütetsburger Platte zusammengefasst dargestellt ist (Abbildung 53a). Der Informationsanteil der Einzelsensoren weist dabei unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Auf Basis der Grauwertverteilung in den hydroakustischen Seitensichtsonardaten konnten unabhängig von Wasserstandslinien neun verschiedene Habitattypen für den eu- und sublitoralen Bereich ausgewiesen werden. Es lassen sich dabei abiotische und biotische Bereiche abgrenzen. Die Unterscheidung von Materialrauheit (Korngrößenabhängig) und kleinskaligen Bodenformen wie die von Gezeiten generierten Kleinrippeln ist nur bedingt möglich. Hier helfen die topographischen Daten aus der LiDAR -Vermessung, die eine Abgrenzung von Bodenformen erlauben (Abbildung 53 b). Besonderes Augenmerk lag auf dem Vergleich der Methoden in der Bestimmung der durch hohe Rückstreuwerte und damit dunkle Grauwerte gekennzeichneten Gebiete. Während im Seitensichtsonar durch das Vorkommen ähnlich hoher Werte im Bereich von grobkörnigen Sedimenten, Gezeitenrinnen und Muschelbänken eine präzise Abgrenzung der zuletzt genannten nur

bedingt möglich war, konnte in den Luftbilder eine deutliche Abtrennung der Muschelbänke vorgenommen werden.

Für die Bewertung der Habitate mit Hilfe der anderen Sensordaten wurden alle Datensätze statistisch über die Hauptkomponenten- bzw. die K-Means-Cluster-Analyse auf Ähnlichkeiten ihrer Klassifizierung hin untersucht. Dabei konnten in den Luftbildern fünf Klassen ausgewiesen werden (Abbildung 53 d), von denen die blaue Bereiche Wasserflächen darstellen. Die Klasse „rot“ weist die verschiedenen Muschelbänke mit Ausnahme der südöstlichen Fläche aus. Dies gelingt deutlich besser anhand der Terra SAR-X Szene (Abbildung 53 e). Die Klasse „rot“ grenzt hier die Muscheln deutlich von der feinkörnigeren, schlickigeren Umgebung und einigen topographischen Elementen ab. Die Klassen „gelb“ und „blau“ hingegen erlauben bei dieser Methode keine eindeutige Zuordnung bestimmter Habitattypen. Die Rückstreuwerte der LiDAR-Vermessung (Abbildung 53 g) eignet sich hervorragend zur Abgrenzung der Wasserflächen aufgrund der Laserbrechung auf der Wasseroberfläche. Die Übertragung der Abgrenzung auf die anderen Methoden ist im Grunde nur dann möglich, wenn die Daten simultan erhoben werden, ansonsten sind Abweichungen unvermeidbar. Hohe Ähnlichkeiten zwischen Terra SAR-X und LiDAR zeigen sich in der Klassifizierung der topographischen Rauheit („Rote Klasse“ (Abbildung 53 g und e), die Ausweisung in verschiedene Sedimenttypen ist an dieser Stelle praktisch nicht möglich. Im multispektralen Ansatz von RapidEye-Bildern (Abbildung 53 h) hingegen lassen sich die feinkörnigeren Schlicke gegen die größeren Sande abtrennen (s. auch Jung et al 2015). Jedoch ist auch diese Methode in der Eindeutigkeit der Identifizierung vom Wassergehalt im Sediment abhängig. Tiden- bzw. windgetriebene Wasserstandsschwankungen führen zu einer unterschiedlichen Sättigung des Materials, in der Anwendung bedeutet dies eine genaue Dokumentation der Wasserstandssituation bei der Erfassung der Daten. In diesem Fall weist die „hell-gelbe Klasse“ Bereiche von oberflächlich abgetrockneten Sanden aus.

Die Qualität der Klassifizierung in luftgestützten Verfahren ist vom Wassergehalt im Sediment abhängig. Das führt zu einer gewissen Limitierung in der Anwendung bezüglich tidenabhängiger Wasserstandsänderungen und der damit verbundenen, unterschiedlich starken Entwässerung der Sedimente. Während dies vor allem an steilen Geländeübergängen zu größeren Unterschieden in der Randdefinition von Wasser zu Land führt, weisen Gebiete mit schwachem topographischen Relief ähnliche Klassifizierungsmuster auf. Dem gegenüber erscheint das Seitensichtsonar aufgrund seiner Unabhängigkeit von Wasserständen besser für die Ausweisung von Habitaten geeignet, ist aber aufgrund der geringen Einsatzzeiten (nur zu Hochwasserständen) und der limitierten Abtastbreite im Eulitoral nur sehr limitiert einsetzbar. Die fehlende Unterscheidung verschiedener Bodentypen mit gleicher Rückstreu-Charakteristik lässt sich nur über die Kombination von Rauheit und Reliefdaten (Topographie unterschiedlicher Skalen) umgehen. Der Einsatz der Satelliten-basierten Systeme ist vor allem für großflächige Erfassungen geeignet.

Die Auswertung der unterschiedlichen Sensorauflösungen zeigt, das Raster größer als 10 m x 10 m die Watt-typischen Habitatmuster nicht erkennt. Der Unterschied zwischen 5m x 5m und 1m x 1m (Abbildung 53) zeigt wenig Unterschiede in der Ausweisung der Muster, sodass die bereits nur in 5m x 5m vorliegende Auflösung des Multi-spektralen Ansatzes von RapidEye (Abbildung 53 h) für die Grobansprache mehr als ausreichend erscheint. Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Meßverfahren im Hinblick auf Standardmonitoringprogramme ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

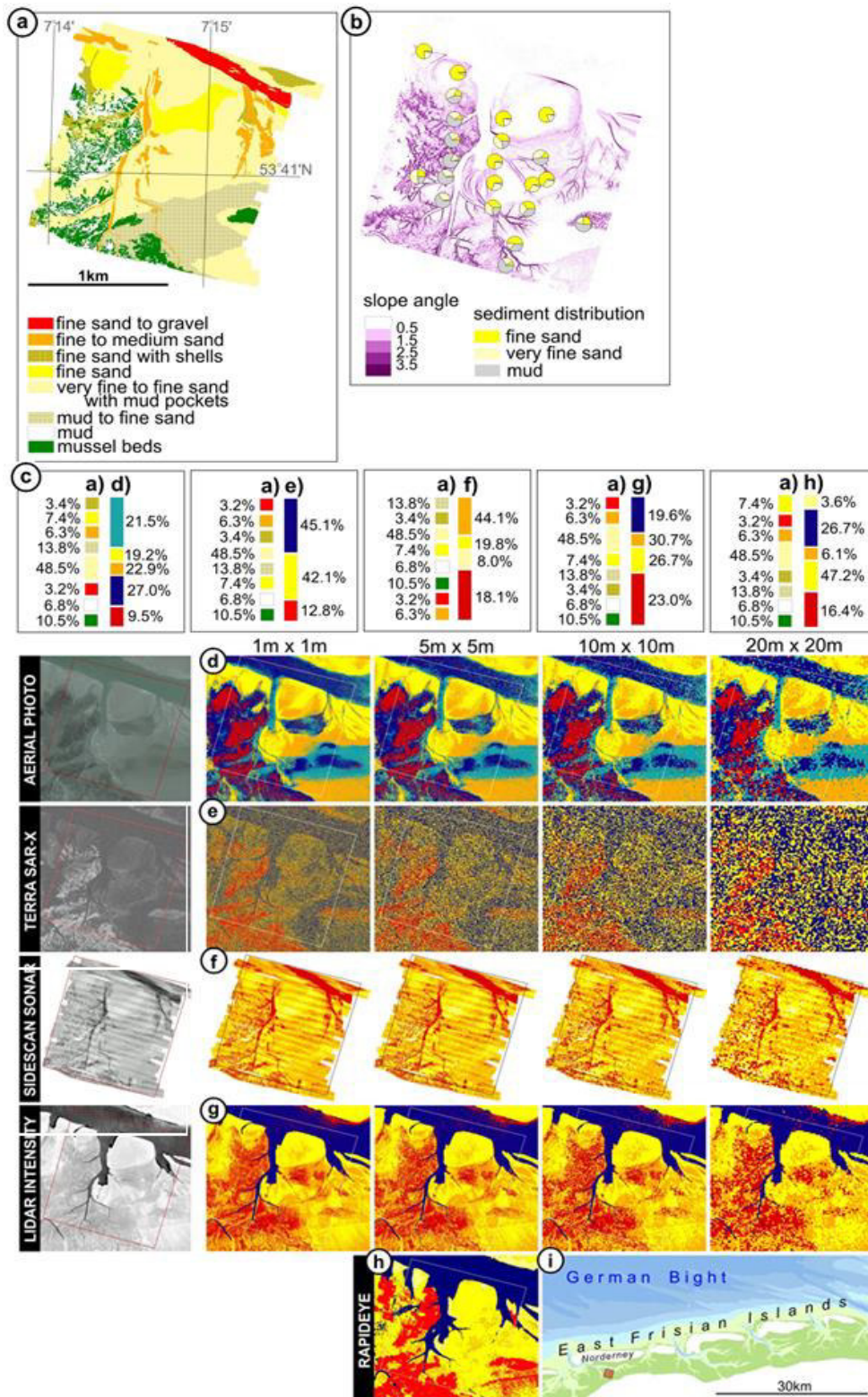


Abbildung 53: Untersuchungsgebiet Lütetsburger Plate im Rückseitenwatt südlich der ostfriesischen Insel Norderney (Abb. 49i) für den Methodenvergleich von a) einer manuell zusammengetragenen Habitatkarte auf der Basis von f) Seitensichtsonar, b) „ground Truth“-Bodenproben und Höhendaten aus g) LIDAR-Messungen. Dem gegenüber gestellt sind (c) die einzelnen Methoden mit ihren Habitatklassen sowie in den Spalten mit unterschiedlicher Auflösung die Klassifizierung von (d) Luftbildern und Satelliten basierten Daten aus (e) Terra SAR X und (h) Rapid-Eye.



Für die großmaßstäbliche Analyse der verschiedenen Oberflächenstrukturen des Eulitorals sind also zunächst die topographischen Daten aus der LiDAR-Messung geeignet, solange die Flächen nicht wasserbedeckt sind. Im unteren Eulitoral bzw. oberen Sublitoral können hydroakustische Systeme wie das Fächerecholot und Einstrahlecholote die notwendigen Tiefendaten liefern. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Scanbreiten der Fächerlote sehr klein ausfallen. Die auffälligste Struktur der Muschelbänke lässt am besten anhand Luftbildern und Terra SAR-X-Aufnahmen mit einer Auflösung besser als 10 m x 10 m mit einer Auflösung von 25 Pixel pro Quadratmeter identifizieren, vor allem in leicht exponierten Gebieten. Seitensichtsonar und LiDAR erlauben deutlich detaillierte Darstellung der Strukturen, doch die scharfe Abgrenzung gegen das Umgebungshabitat ist aufgrund der Konturenunschärfe von kleinskaligen Strukturen wie Rippeln oder Oberflächenbesiedlungen zum Teil nur eingeschränkt möglich. Die identifizierten Sohlformen in LiDAR- bzw. Echolotaufnahmen sind eine gute Orientierung für die Tidendynamik. Für die Differenzierung verschiedener Sedimentfraktionen in Übergangszonen sind mit „ground Truth“ gekoppelte Seitensichtsonaraufnahmen gut zu verwenden.

Die schnelle Erfassung kleinskaliger Strukturen war das Ziel der Entwicklung eines Drohnen-basierten „low-cost“ LIDAR-Systems mit Kameraanbindung (Abbildung 54). Es ermöglicht kleinräumige Befliegungen in hoher Auflösung in Abhängigkeit von der Flughöhe, liefert zum einen laser-basierte Distanz- und Rückstreuendaten und erlaubt zum anderen die volle, bild-basierte Erfassung des Untersuchungsraumes. Im Gegensatz zu Flugzeug gestützten LiDAR-Systemen kann es zeitgenau und kurzfristig während Niedrigstauwasser-Phasen eingesetzt werden. Modernste Mikrokomponenten erlauben mit einem Abfluggewicht von insgesamt unter fünf Kilogramm Überflüge bis zu einer Höhe von 30 m über Grund bei einer Abtastbreite von knapp 100m. Im Gegensatz zu dem in WIMO bestellten kommerziellen System RIEGL LMS-VQ 820G LiDAR mit einer Abtastbreite von 600 m bis 700 m sind mit der Drohne bei einer Flugzeit von etwa 15 Minuten die Erfassung einer Gebietsgröße von 0,6 bis 0,8 km<sup>2</sup> pro Batterieladung möglich. Neben den LiDAR-Daten erlaubt der fast zeitgleiche Kamera-Einsatz auf der Basis der photogrammetrischen Mehrbildauswertung neben der Erstellung eines weiteren digitalen Geländemodells die Nutzung dieser Bilder im klassischen Stil der Luftbildauswertung bezüglich Farben und visuelle Geländeoberflächenansprache. Beide Datentypen zusammengeführt, erlauben eine sehr detaillierte Ansprache von komplexen, kleinskaligen Habitatmustern, die zum Beispiel der Interpretation und Klassifikation anderer fernerkundlicher Verfahren hilft. Der extrem flexible Einsatzbereich und die sehr kurzfristige Bereitstellung dieses Drohnen-basierten Fernerkundungssystems eröffnet viele neue Einsatzmöglichkeiten in zukünftigen Monitoring-Programmen, vor allem dort, wo der unmittelbare menschliche Eingriff nicht erwünscht oder erlaubt ist.

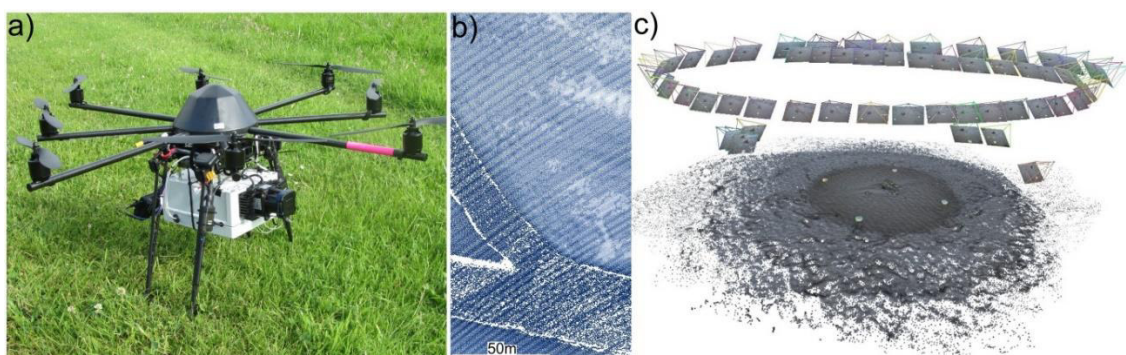


Abbildung 54: Datenerfassung mit Hilfe des neu entwickelten „low-cost“ Drohnen-Messsystems bestehend aus einem Sektor-Laser-Scanner (a) kombiniert mit einem Kamerasystem zu Erfassung von Entfernungsdaten (b) und der Mehrbild-basierten Geländerekonstruktion (c)

Der Vergleich der verschiedenen Messsysteme für ein Habitatmonitoring im eulitoral Wattenmeer (Tab 5) zeigt die Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren unter Einbeziehung der Kosten. Das

Ergebnis zeigt, dass kein System alleine z.Z. die Ansprüche eines Standard-Habitatmonitorings im Wattenmeer erfüllen kann, die Entwicklungen aber sehr erfolgversprechend sind. Besonders die Kombination mehrerer Verfahren, auch in unterschiedlicher zeitlicher Staffelung muss dabei weiter verfolgt werden.

Tabelle 5: Übersicht der verschiedenen Fernerkundungssysteme für den Einsatz im Eulitoral im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit im Standard-Monitoring und dem aktuellen Verwendungstatus

| Sensor                | Lidar                                      | Rapid Eye                | TSX                         | SSS-Starfish 450F                          | Drohne                                     |
|-----------------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Auflösung             | > 20 cm                                    | 5 m                      | 1 m                         | 2.5 cm                                     | 30 cm bei 30 m Flughöhe                    |
| swath                 | 300 – 800 m                                | 77 km                    | 10 km                       | 450 kHz: 200 m /0.8°x 60°                  | 100 m - 0.5 – 0.8 km <sup>2</sup> / 20 min |
| Aufnahmefrequenz      | Bisher nicht regelmäßig                    | 45 Tage                  | 11 Tage                     | Bisher nicht regelmäßig                    | Bisher nicht regelmäßig                    |
| Habitaterfassung      | Nein (außer Muschelbänke)                  | ja                       | ja                          | Ja                                         | Ja                                         |
| Erf. Extremereignisse | Ja, bei zeitnaher Befliegung nach Ereignis | Ja                       | ja                          | Ja, bei zeitnaher Vermessung nach Ereignis | Ja, bei zeitnaher Vermessung nach Ereignis |
| Monitoring/LtER       | ja                                         | Nein                     | ja                          | nein                                       | nein                                       |
| Kosten                | 75 T € /100km <sup>2</sup>                 | 95 € /100km <sup>2</sup> | 3 000 € /100km <sup>2</sup> | 1500 € / 1 km <sup>2</sup>                 |                                            |

(LtER = Long term ecological research)

Das Teilprojekt TP 3.2. war an den Messkampagnen in 2012 und 2013 beteiligt um die mittels Luft- und Satellitenbildern gewonnenen Erkenntnisse zur räumlichen Ausdehnung von Habitattypen anhand von Makrozoobenthosproben zu verifizieren. Hierzu wurden in 2012 die Kernbereiche verschiedener geofernerkundlich identifizierter Habitate beprobt und auf Unterschiede in Artenzusammensetzung überprüft. Abbildung 55 zeigt das Ergebnis einer NMDS (non-metric dimensional scaling) Analyse, welche eindeutige Unterschiede in der Zusammensetzung der Artengemeinschaften der verschiedenen Probenahmestellen beschreibt. Im darauf folgenden Jahr wurden Transekte an den Übergängen zwischen Habitattypen beprobt um wiederum die Kohärenz zwischen der Veränderung von Artenzusammensetzung mit der aus Luftbildern gewonnen Information zu bestimmen. Auch hier wurde eine Übereinstimmung festgestellt.

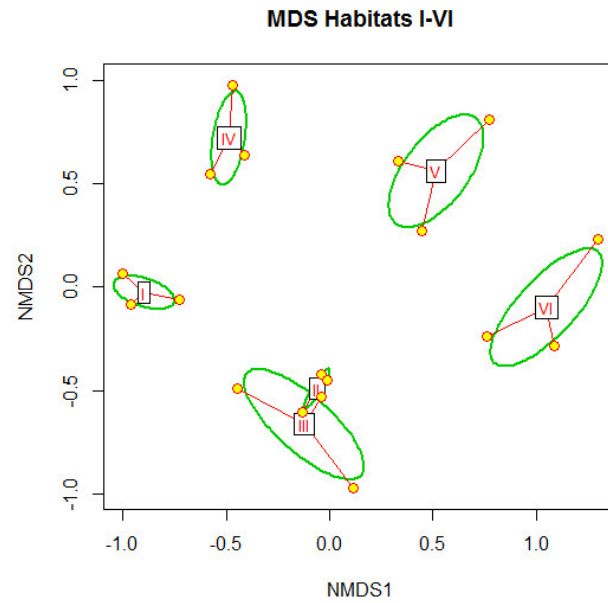


Abbildung 55: Habitattypencharakterisierung nach Zoobenthos-Zusammensetzung. Nonparametric multiple Dimension scaling (NMDS der Zusammensetzung der benthischen Fauna: I Seegrasfeld, II Mischwatt, III Arenicola-Sandwatt, IV Muschelbank (Muschelansiedlung), V Muschelbank (Zwischenräume zwischen Muschelansiedlungen), VI Schlicksenke

## 6.4 Integratives Projekt IP4 Ems FlÜssigschlick

M. Becker (MARUM), E. Kwoll (MARUM), C. Winter (MARUM)

### 6.4.1 Einleitung

Das Ästuar der Ems ist ein prominentes Beispiel für ein System, das durch menschliche Eingriffe stark verändert wurde, und dessen Umweltzustand hinsichtlich ökosystemrelevanter Gütekriterien nicht als gut zu bewerten ist. Die fortschreitende Entwicklung in Richtung einer flutdominierten (landwärts gerichteten) Tidendynamik hat zu vermehrtem Eintrag feinkörniger kohäsiver Sedimente in die Unterems geführt. Die hohen Konzentrationen suspendierter Sedimente übersteigen die Transportkapazität des Systems und führen zur Entstehung sedimentinduzierter Dichteschichtung im Wasserkörper und zur weiträumigen Bildung von FlÜssigschlicklagen, die in der Fahrrinne mehrere Meter mächtig sein können und wiederum die Strömungsdynamik beeinflussen. Hohe Konzentrationen und TrÜbungswerte belasten das Ökosystem und Sauerstoffgehalte liegen im Sommer vermehrt unter den Grenzwerten. Durch den Sedimenteintrag sind darüber hinaus kostenintensive Unterhaltungsmaßnahmen notwendig, um die Schiffbarkeit des Gewässers zu gewährleisten.

Mit gängiger gewässerkundlicher Messtechnik wie Wasserstandspegeln und punktuellen Strömungs- und TrÜbungsmessungen lassen sich der Zustand und die Variabilität von FlÜssigschlick nicht grundlegend erfassen. Profilierende Messungen mit Dichtesonden sind aufwendig und nur im Rahmen zeitlich begrenzter Messkampagnen möglich. Im Rahmen hoheitlicher regelmäßiger Vermessungsarbeiten der zuständigen Behörden werden Mehrfrequenzecholote eingesetzt, um die Lage und Mächtigkeit von FlÜssigschlick entlang des Ästuars zu erfassen. Diese räumlichen Aufnahmen sind jedoch nicht geeignet die zeitliche Dynamik der kennzeichnenden Prozesse innerhalb von Tidezyklen abzubilden. Allgemein sind die Dynamik sedimentinduzierter Dichteschichtungen und deren Auswirkungen auf die Hydrodynamik und Gewässergüte bis heute nicht ausreichend verstanden. Eine Berechnung der Bildung von FlÜssigschlick durch mathematische Modelle ist so immer mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Im Rahmen des integrativen WIMO Projekts „FlÜssigschlick“ wurde ein Messkonzept zur Bestimmung der zeitlichen Dynamik hochkonzentrierter Suspensionen und FlÜssigschlick vorgeschlagen. Dieses Konzept soll der Erhebung von Daten zum Zustand des Gewässers und der Verbesserung des grundlegenden Systemverständnisses dienen. Im Besonderen sollte festgestellt werden, in wie weit das akustische Rückstreusignal eines profilierenden Strömungsmessgeräts genutzt werden kann, um an einer Messstelle simultan die Hydrodynamik und sedimentinduzierte Dichteschichtung zu erfassen. Des Weiteren sollte bewertet werden, ob und wie das Messkonzept operationell in behördliches Monitoring integriert werden kann.

### 6.4.2 Methodik

Das Messkonzept umfasst die Installation und den Betrieb stationärer ADCP Messgeräte (Acoustic Doppler Current Profiler) und entsprechende Datenauswertung. Ein oder mehrere ADCPs werden an einem Schwimmer (Ponton, Floß) angebracht und messen an einem Ort in hoher Messfrequenz (ca. 1 Hz) profilierend Strömungsgeschwindigkeiten und die Stärke der akustischen Rückstreuung durch Schwebstoffe. Das Messkonzept wurde im November 2014 im Rahmen einer Versuchsmessung in der Ems bei Jemgum (Flusskilometer 22, Abbildung 56 a) mit dem Forschungsschiff FK Senckenberg getestet. Im Rahmen dieser Messkampagne wurden zwei ADCPs mit unterschiedlichen Messfrequenzen (600 und 1200 kHz) eingesetzt. Beide Geräte wurden für 18 Stunden auf einer schwimmenden Plattform an der Bordwand angebracht (Abbildung 56 b).

Das ADCP Rückstreusignal (Backscatter) wurde für Wasserabsorption und die Aufweitung des Strahlengangs korrigiert. Zur Messung der Konzentration suspendierter Sedimente (SSC) wurde eine TrÜbungssonde (Optische Rückstreuung, OBS) eingesetzt. Die TrÜbungswerte wurden mit Messungen durch Wasserproben in Hinblick auf die Konzentration suspendierter Sedimente für einen Messbereich von 0 bis 50 g/l kalibriert.

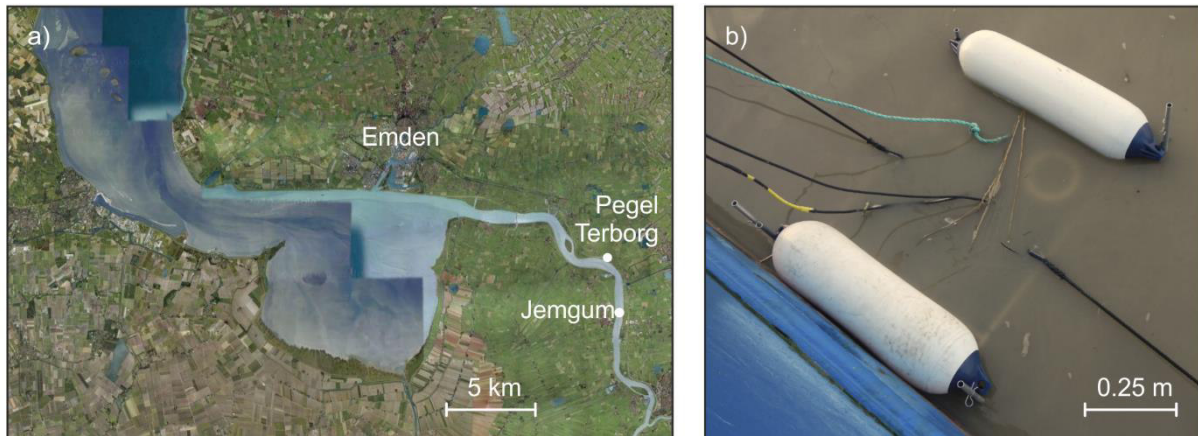


Abbildung 56: a) Untersuchungsgebiet und b) provisorischer Messaufbau

#### 6.4.3 Ergebnisse

Die Daten der Messkampagne umfassen Eigenschaften der Wassersäule für etwa 1.5 Tidezyklen an der Messstelle Jemgum (Abbildung 56 a). An dieser Stelle ist bereits vorher eine mehrere Meter mächtige Schicht hoher Schlickkonzentration an der Gewässersohle festgestellt worden (Wang, 2010). Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten zeigen die deutliche Asymmetrie der Tide (Abbildung 57 a). Jeweils nach Hoch- und Niedrigwasser sind Ebbe und Flut durch einen Unterschied in den Beschleunigungen der Strömung gekennzeichnet.

Während der zweiten Hälfte der Flut bis zum Beginn der Ebbe zeigen die SSC Vertikalprofile einen Konzentrationsanstieg von Sedimenten (Abbildung 57b). Der entsprechende maximale Konzentrationsanstieg beträgt im Mittel 30 g/l/m, trennt die Wassersäule mit niedrigen Konzentrationen von einer hochkonzentrierten Suspension darunter, und wird hier als *Lutokline* bezeichnet. Aus dem ADCP Rückstreusignal (Backscatterprofil) wurden die Lage des maximalen Gradienten berechnet (Abbildung 57 c). Der zeitliche Verlauf des maximalen ADCP Backscattergradienten und der durch die Konzentration der suspendierten Sedimente beschriebenen Lutokline zu Niedrigwasser und während eines Zeitraums von 2.7 h um Hochwasser stimmen überein. Hinsichtlich der vertikalen Position liegen die jeweiligen Maxima der Backscatterwerte und deren maximale Gradienten im Mittel jeweils etwa 0.6 m und 1 m über der Lutokline. Diese Abweichungen in der vertikalen Position erklären sich durch frequenzabhängige Absorptionseffekte der Hydroakustik in hoher Konzentration. Die Änderung in der Intensität des Echolot-Backscatters und ADCP Backscattergradienten ist ein qualitativer Indikator für den Dichteunterschied und indirekt für die Stabilität der Lutokline.

#### 6.4.5 Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Messkonzept umfasst die Auswertung von Daten von Standard ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) zur quasi-kontinuierlichen Messung der Strömung und Dichteschichtung im Ems Ästuar. Anhand des Vergleichs mit Vertikalprofilen suspendierter Sedimente konnte die lokal charakteristische Strömungs- und Schwebstoffdynamik gezeigt werden. Es zeigt sich, dass sich über einer konstanten Flüssigschlicklage im Tidezyklus um Stauwasser temporär eine Lutokline ausbildet, die die darüberliegende freie Strömung von einer hochkonzentrierten Suspension trennt. Diese Dynamik von Strömungen und Bildung temporärer Schichten hoher Konzentration lässt sich durch Auswertung der Messdaten des ADCPs quantitativ darstellen.

Für die Entwicklung eines operationellen Monitoringkonzepts wird zunächst die Installation von mehreren selbstaufzeichnenden oder mit entsprechender Telemetrie erweiterten ADCPs an schwimmenden Pontons entlang des Ems Ästuars empfohlen. Durch angepasste Auswertung der Daten lassen sich Strömungen quantitativ erfassen und qualitativ Dichteschichtungen erkennen. Der

oben gezeigte vertikale Unterschied zwischen der Lage der Lutokline und der Lage des maximalen Backscattergradienten ist als konservativ zu bewerten, d.h. die Lage der Lutokline wird in einer im Vergleich mit direkten Messungen suspendierter Sedimente geringeren Wassertiefe detektiert. Eine Verbesserung der Methodik durch Verwendung anderer akustischer Messfrequenzen und die Korrektur der Absorption durch suspendierte Sedimente ist durch weitere Forschung zu erzielen.

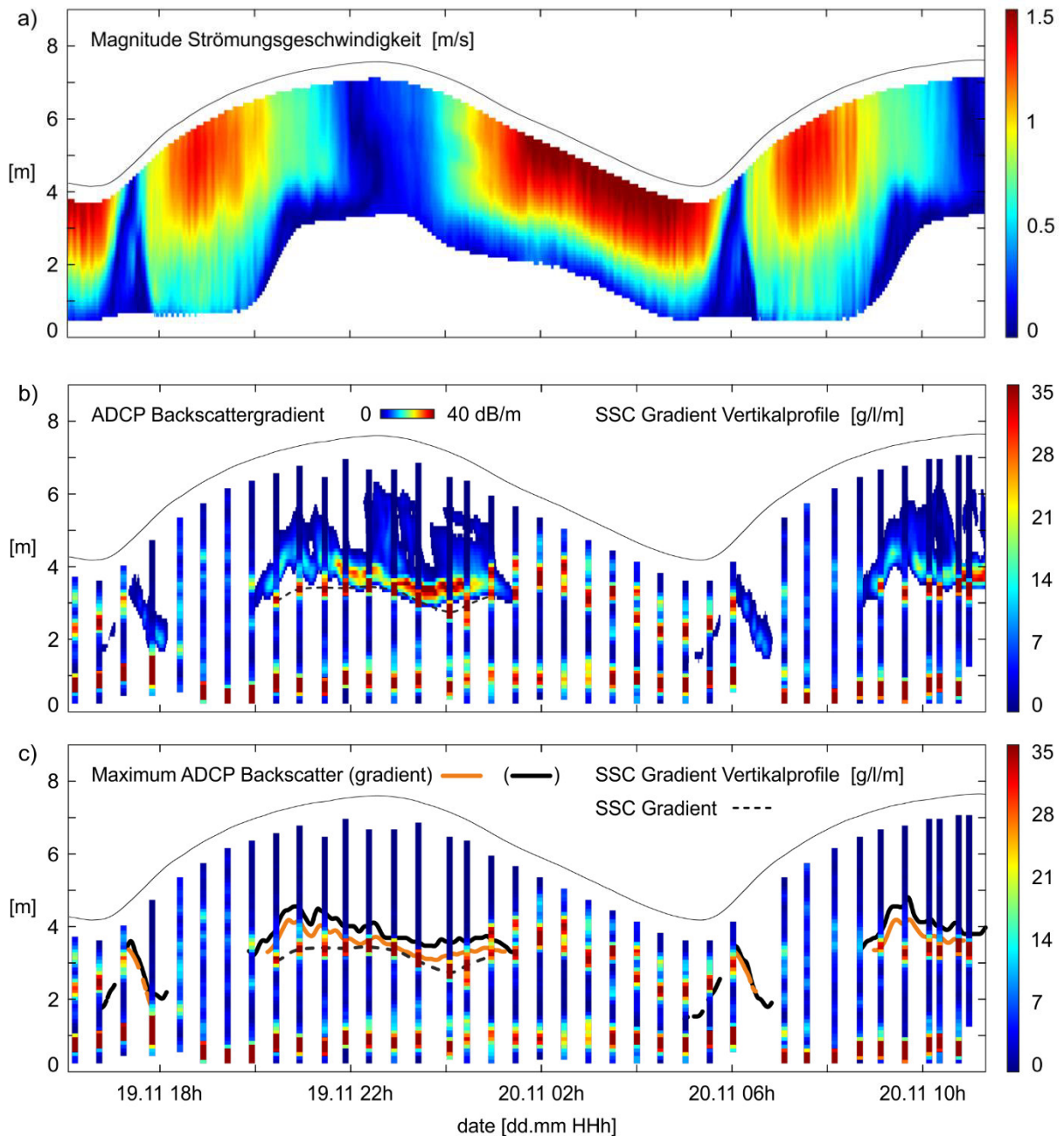


Abbildung 57: a) Magnitude der Strömungsgeschwindigkeit [m/s], b) ADCP Backscattergradient, nur positive Werte sind in Farben hinterlegt. c) Vertikale Position des maximalen Backscatters, des Backscattergradienten, und des Konzentrationsgradienten.

## 6.5 Entwicklung Sensornetzwerk „Extremereignisse“

R. Reuter (IfP), M. Schulz (MARUM), C. Waldmann (MARUM)

### 6.5.1 Einleitung

Ziel des Teilprojekts 2.1 war die Entwicklung eines neuartigen Systems zur flächenhaften Erfassung des Erosions- und Transportverhaltens von Sedimenten und Schwebstoffen, welche durch Seegang bei Extremereignissen mobilisiert werden. Solche Änderungen der Sedimentverteilung, die etwa zu Verlagerungen von Prielen führen, können während Extremwetter mit konventionellen Verfahren nicht beobachtet werden, da sich während Sturmphasen solche Untersuchungen witterungsbedingt von Schiffen aus nicht durchführen lassen. Auch automatisierte Messsysteme wie etwa verankerte Bojen haben sich nicht bewährt, da die darauf installierten Instrumente während der biologisch produktiven Jahreszeiten infolge Bewuchs keine verlässlichen Daten liefern und bei Winterstürmen durch Seegang und Eisbildung zerstört werden. Vielmehr erfordern sie automatisierte Messmethoden, die ereignisgesteuert zur Anwendung kommen, um die für das Verständnis der Sedimentdynamik relevanten Daten zu messen.

Mit den erzielten Erkenntnissen können Daten zu einem erweiterten Systemverständnis oder für den Betrieb und die Bewertung von Modellen erhoben werden. Das Fernziel ist Kenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich präzisere Prognose morphologischer Änderungen des Rückseitenwatts bei künftigen Extremwetterereignissen machen und möglicherweise auch gezielte Maßnahmen gegen kritische Sedimentverlagerungen vorbereiten lassen.

Durch ein Netz von untereinander verbundenen Messstellen, ein sogenanntes Sensornetzwerk, am Meeresboden sollte ein neuer methodischer Ansatz verwirklicht werden, mit dem während Extremereignissen zuverlässig Messergebnisse gewonnen werden. Zwei Parameter können mit spezifischen Sensortypen bestimmt werden:

- a) Der hydrostatische Druck als Maß für den durch die Gezeiten und insbesondere den Seegang veränderlichen Wasserstand
- b) Die spektrale Lichttransmission, aus der sich Daten zum Gehalt des Wassers an gelösten Huminstoffen (Gelbstoff), Phytoplankton und insbesondere an suspendiertem Schwebstoff gewinnen lassen.

Diese Sensoren wurden durch Messungen der Strömungsgeschwindigkeit quer zu Tiderinnen mit einem horizontal akustischen Doppler-Strömungsmesser (H-ADCP) ergänzt.

Mit Messketten von Drucksensoren entlang und quer zur Strömungsrichtung lassen sich räumlich hoch aufgelöste Aussagen zur Charakteristik des Seegangs und der gezeitenabhängigen Wasserstandsänderungen machen. Dies steht im Unterschied zur punktuellen, gefilterten Information des Wasserstands von Küstenpegeln (gemittelte Minutenwerte). Gleichzeitig erlauben Daten zur Transmission des Lichts bei mehreren Wellenlängen die Konzentration und Korngrößenverteilung des Schwebstoffs unmittelbar über dem Meeresboden zu ermitteln. Die Kombination der Druck- mit den Schwebstoffdaten führt dann zu Informationen über Sedimentations- und Erosionsprozesse in Abhängigkeit von Strömung und Seegang.

Ein Schutz der Sensoren gegen Bewuchs bildete einen Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten. Konzeptionell sollen die Sensoren in einer bewuchsgeschützten Struktur im „standby“ verbleiben, bis durch ein mit Telemetrie von Land übertragenes Signal ein Messbetrieb während Extremereignissen initialisiert wird. Dies soll sicherstellen, dass das Messnetz erst dann seine Funktion aufnimmt, sobald etwa ein Starkwindereignis angekündigt ist. Die bis dahin bewuchsgeschützte Struktur soll dafür sorgen, dass die Sensoren zu diesem Zeitpunkt ohne Einschränkungen einsetzbar sind und für mehrere Tage funktionsfähig bleiben.

### 6.5.3 Methodische und apparative Entwicklungen

**Netzwerk und Steuerungssoftware:** Zu Beginn des Projektes standen die Evaluation und der Aufbau eines geeigneten Netzwerksystems im Vordergrund. Als Datenübertragung und -ansteuerung wurde aufgrund der Robustheit auf das CAN-Bus-System (siehe Glossar) zurückgegriffen. Die Elektronik der Netzwerkkontroller wurde modular aufgebaut. Durch Kombination der Platinen ist es möglich, die Controller an die Anforderungen bzw. Schnittstellen unterschiedlicher Sensoren anzupassen (Abbildung 58).

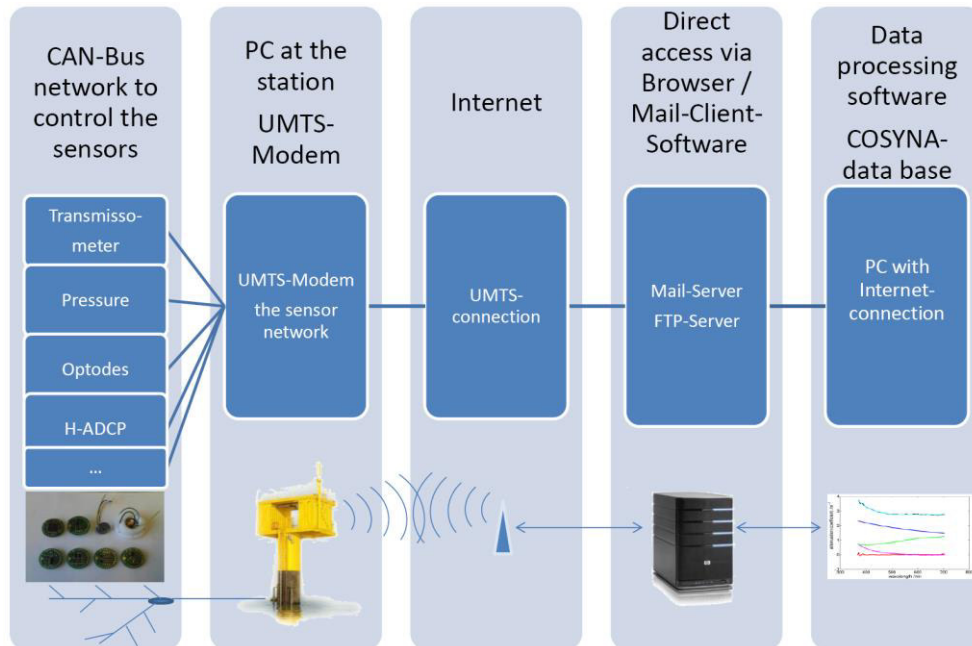


Abbildung 58: Schematische Darstellung des Netzwerks und des Datenaustauschs.

Der physikalische Aufbau des Netzwerkes wurde prototypisch an die Bedingungen der Messstation der Universität Oldenburg im Spiekerooger Seegatt angepasst. Aufgrund der relativ kurzen Stillwasserzeiten von 30 bis maximal 90 Minuten, in der das System von Tauchern ausgebracht oder eingeholt werden muss, ist es sinnvoll, das Netzwerk ausgehend von einer Verteilerbox als einzelne Segmente auszulegen. Die Segmente bestehen jeweils aus drei miteinander verkabelten Sensorpaketen. (Abbildung 59)

Die Messdaten der einzelnen Sensoren werden über das Netzwerk zur Station übertragen und auf einer Speicherkarte gespeichert. Messintervalle und Sensoreinstellungen für das gesamte Netzwerk oder einzelne Sensorgruppen können von Land über ein Funkmodem gesteuert werden. Die aktuellen Messwerte und Netzwerkparameter werden als Datenpakete (ASCII Text Dateien) per E-Mail versendet. Die Größe der Pakete lässt sich an die Netzqualität und die Anzahl der erhobenen Parameter anpassen. Die Einstellung des Messintervalls der Sensoren und anderer Geräteparameter kann auf gleichem Weg geschehen. Die Datenübertragung wurde erfolgreich getestet und ein Provider für den kontinuierlichen Betrieb gefunden.



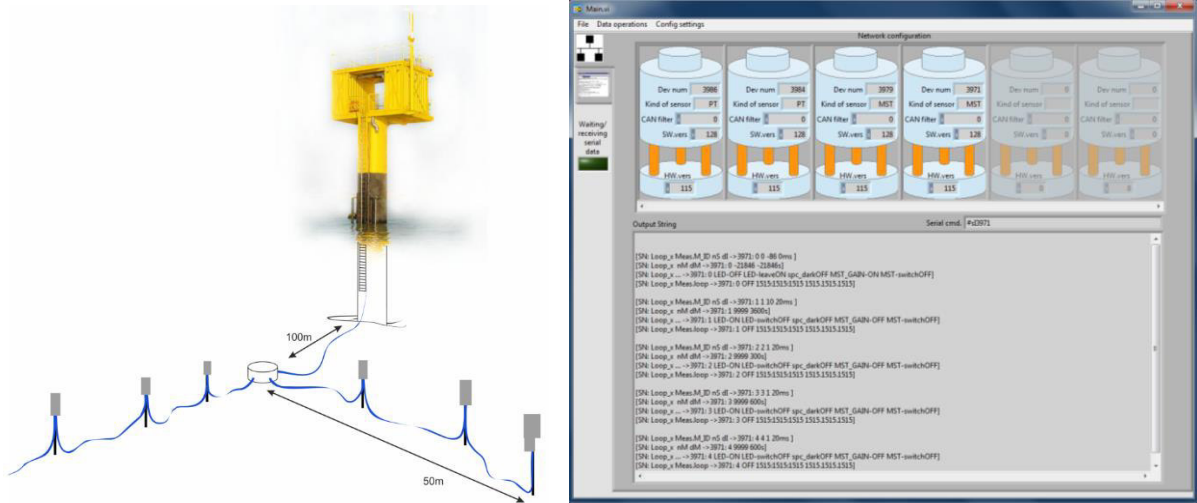


Abbildung 59: Links: Schematische Darstellung der Segmente des Netzwerks bei Auslegung an der Messstation Spiekerrog. Rechts: Grafische LabVIEW-Nutzerschnittstelle für die Steuerung der Sensoren und die Datenspeicherung

Für eine benutzerfreundliche Bedienung des Netzwerks wurde in der Steuersoftware LabVIEW ein eigenständig laufendes Programm entwickelt. Die Befehlseingabe verläuft sehr unkompliziert über eine grafische Oberfläche (Abbildung 59). Eine einfache Routine zur Datenspeicherung wurde ebenfalls implementiert.

**Druckmessung:** Daten des hydrostatischen Drucks geben Aufschluss über den Wasserstand oberhalb des Drucksensors, und bei Verwendung hinreichend schnell registrierender Sensoren auch über kurzfristige Schwankungen des Wasserstands durch Wellen. Da die Prüfung der Hypothese des Seegangs als treibende Größe für die Sedimenterosion ein wesentliches Teilziel des Vorhabens darstellt, wurden für die Messung des Drucks hochwertige Sensoren beschafft, die einen Messbereich von 0 bis 4 bar absolut bei einer Auflösung von  $2 \cdot 10^{-3}\%$  des Maximalwerts bei Datenraten bis 200 Hz überspannen (Abbildung 60). Die Sensoren wurden in ein gegen Biofouling (Bewuchs durch Algen und Bakterien) geschütztes Sondengehäuse eingebaut (s.u.).



Abbildung 60: Ein hochpräziser Drucksensor für die Messung von Wasserstand und Seegang.

**Transmissometrie:** Daten der Lichttransmission ermöglichen Informationen zu absorbierenden und streuenden Substanzen im Wasser zu gewinnen. Optische Wechselwirkungen treten insbesondere mit den blau absorbierenden Huminstoffen (Gelbstoffe, Coloured Dissolved Organic Matter CDOM), durch Phytoplankton oder durch mineralische Trübstoffe auf (Abbildung 61). Letztere stellen in Form suspendierten Sediments eine für das Vorhaben wesentliche Messgröße dar, deren Kenntnis im Kontext von Strömung und Seegang Informationen über Sedimentverlagerungen im Rückseitenwatt

liefern können. Die Rekonstruktion der gemessenen Spektren geschieht mit einem nichtlinearen Invertierungsalgorithmus (Barth 1997) und wurde bereits im Rückseitenwatt experimentell erprobt und validiert (Badewien 2009).

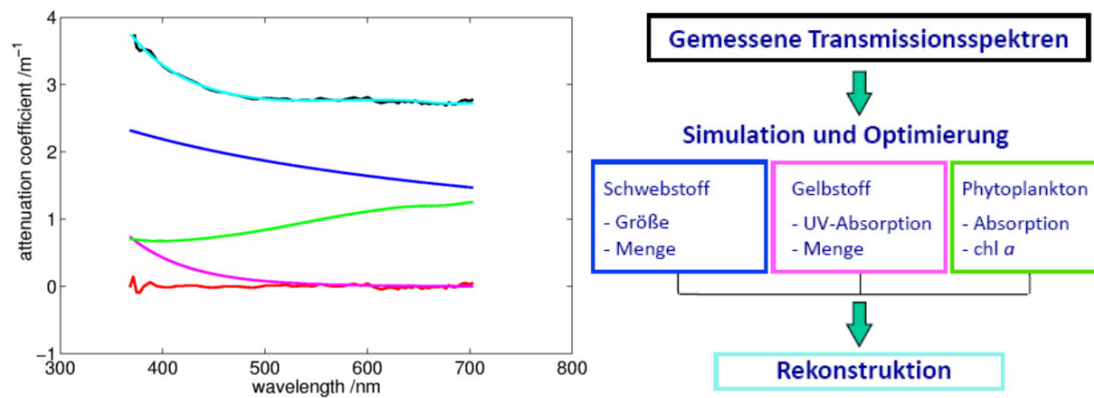


Abbildung 61: Typisches Spektrum des Attenuationskoeffizienten (Lichtabschwächung)  $c$  (schwarze Kurve) und Rekonstruktion durch Teilspektren infolge von Gelbstoff, Phytoplankton und mineralischem Schwebstoff. Die blaue Kurve entspricht der Summe der Teilspektren, die rote Kurve zeigt die Abweichung zwischen gemessenem (schwarz) und rekonstruiertem (blau) Spektrum. Für den Zusammenhang zwischen Attenuationskoeffizient  $c$  und Transmission  $T$  längs eines Wegs  $x$  gilt das Lambertsche Gesetz  $T = \exp(-cx)$ .

Den Aufbau der im Vorhaben entwickelten Transmissometer zeigen Abbildung 62 und Abbildung 63. Als Lichtquelle dient eine Weißlicht-LED, deren Lichtaustritt mit einer optischen Linse parallelisiert wird und durch ein optisches Fenster in den Messraum austritt. Nach Durchlaufen von 50 mm Wegstrecke wird das Licht von einem Tripelprisma reflektiert, durchläuft die Wegstrecke ein zweites Mal, und wird nach Eintreten in das Gehäuse von einem miniaturisierten Spektrometer analysiert. Eine für sehr hohe Trübungswerte entwickelte Sensorvariante registriert das verbleibende Licht nach nur einmaligem Durchlaufen des Messraums; das Tripelprisma entfällt, stattdessen wird dann das Spektrometer in das rechte Gehäuseteil eingebaut.

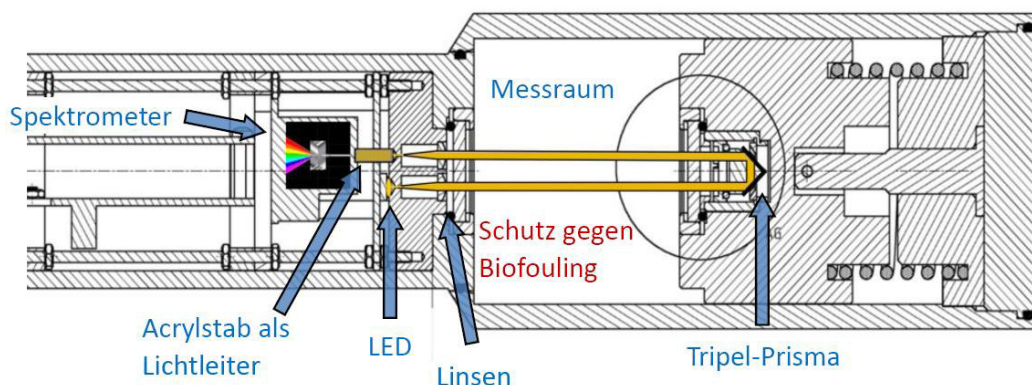


Abbildung 62: Teilzeichnung des Transmissometers mit den für die optischen Funktionen relevanten Komponenten.

Der in der Teilzeichnung dargestellte Messraum ist in geschlossenem Zustand wiedergegeben. Hierdurch ergibt sich ein Schutz gegen Biofouling. Soll der Sensor in Betrieb genommen werden, gibt ein Sprengmechanismus (pyrotechnischer Aktuator) die rechts dargestellte Feder frei, die durch ihre Entspannung die äußere Schutzkappe des Gehäuses nach rechts schiebt und den Messraum somit für das Meerwasser freigibt.

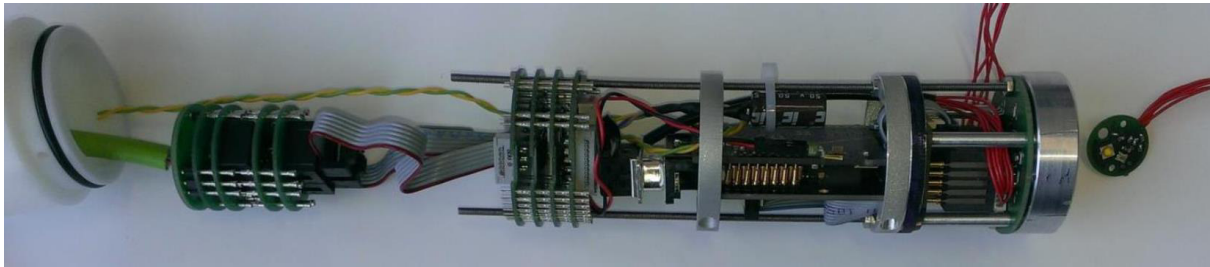


Abbildung 63: Ein Transmissometer in geöffnetem Zustand, von links: Gehäusedeckel, Platinen für Netzwerk und Stromversorgung, Platinen für den Mikrocontroller sowie die Steuerung der LED und des Spektrometers, sowie das miniaturisierte Spektrometer. Die kleine Platine rechts dient der Überwachung der LED-Funktionen.

#### 6.5.4 Experimentelle Erprobungen

Im Projektzeitraum wurden mehrere Testreihen zur Erprobung und Validierung der Funktion des Netzwerks, der Stromversorgung und Datenübertragung sowie der Sensoren unter Laborbedingungen, in Binnengewässern, im Jadebusen sowie im Rückseitenwatt bei Spiekeroog durchgeführt. Ein zentrales Experiment stellte die während der WIMO-Messkampagne im Bereich der Messstation Spiekeroog durchgeführten Untersuchungen dar.

Im September 2013 wurde das H-ADCP mit dem Ziel der Strömungsmessung im Querschnitt des Seegatts an der Station Spiekeroog etwa acht Meter über Grund mit nordwestlicher Orientierung montiert und erfolgreich in Betrieb genommen.

Tests der Transmissometer im Betrieb über das Sensornetzwerk konnten erstmals im Juni 2014 an der Station Spiekeroog stattfinden. Die Sensoren wurden hierfür an der Aufstiegsleiter der Station unterhalb der Hochwasserlinie provisorisch befestigt und zur Steuerung über den CAN-Bus des Netzwerks mit einem Notebook verbunden. Die Sensoren konnten erfolgreich in Betrieb genommen werden. Allerdings wurde ein dauerhafter Probetrieb wegen eines Fehlers in der Datenübertragung des Netzwerks nicht erreicht.

Für den dauerhaften Einsatz der Druck- und Transmissionssensoren über die Wintermonate wurden Bodenverankerungen gebaut und erprobt, an deren Halterohren Träger für die Aufnahme jeweils eines Sensors montiert waren (Abbildung 64). Mit dem Ziel einer schnellen Wartung durch Taucher während der kurzen Stillwasserzeiten waren die Träger mit Schnellverschlüssen an den Rohren befestigt, um diese Einheiten ohne aufwändige mechanische Arbeiten wechseln zu können.

Im September 2014 wurden nach Genehmigung durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Emden fünf Bodenverankerungen nahe der Messstation Spiekeroog in einer Reihe und in Richtung zur Insel mit einem Abstand von 20 m zueinander gebracht (Abbildung 64). Die erste und letzte Verankerung diente der Kennzeichnung des Messfelds durch Bojen. Die drei weiteren Verankerungen trugen jeweils einen Druck- und Transmissionssensor.

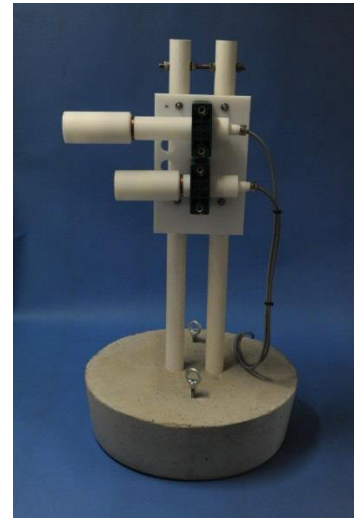
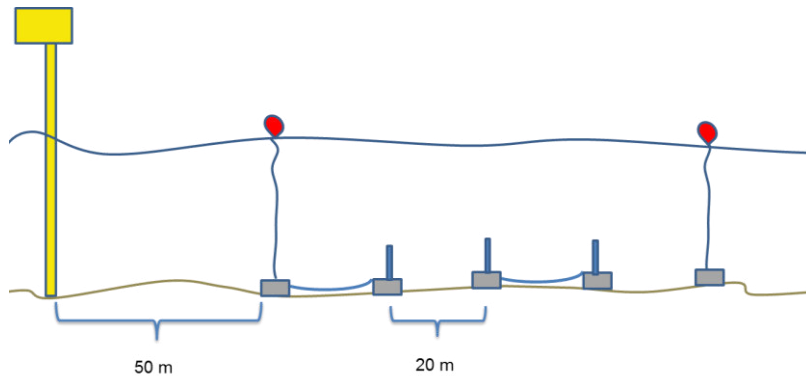


Abbildung 64: Links: Messkette aus fünf Bodenverankerungen bei der Station Spiekeroog. Die Station Spiekeroog ermöglichte die Stromversorgung und die Datenübertragung über ein Mobilfunknetz. Rechts: Bodenverankerung mit je einem auf einer Halterung montierten Druck- und Transmissionssensor

Ein Transmissometer und drei Drucksensoren waren nach der Inbetriebnahme des Netzwerks ansteuerbar. Mit diesen Sensoren wurden noch im Rahmen der Inbetriebnahme verschiedene Testmessungen gestartet und im Anschluss daran eine einwöchige Dauermessung. Nach Abschluss der Messungen konnten die Daten aufgrund eines Fehlers in der CAN-Bus-Übertragung nicht zur Messstation und weiter an die Universität Oldenburg übertragen werden. Der Übertragungsfehler verhinderte auch den Start weiterer Messungen.

Aufgrund schlechten Wetters verzögerte sich die nach zwei Wochen geplante Bergung der Sensoren um fast drei Monate mit der Folge, dass die Bodenverankerungen und Sensoren bei der Bergungsaktion Mitte Februar 2015 zum Teil nicht aufgefunden werden konnten, zum Teil wegen Versandung nicht zu bergen waren. Mitte August konnten die Verankerungen nach aufwändigen Spülarbeiten schließlich freigelegt und geborgen werden.

#### 6.5.5 Bewertung und Ausblick

Ein Beobachtungskonzept basierend auf der Nutzung eines Sensornetzwerkkonzepts für die Erfassung der Parameter Druck und Lichttransmission wurde entwickelt und praktisch umgesetzt. Nach einer Reihe von Tests wurden technische Überarbeitungen an dem System vorgenommen, welche dann schließlich zu der Durchführung von systematischen Feldtests führten. Ein wesentlicher Punkt dieser Feldtests war die Optimierung der Ausbring- und Rückholprozedur des Sensornetzwerks. Hiermit wurde dann die technische Entwicklung innerhalb von WIMO abgeschlossen.

## 6.6 Darstellung von Projektdaten

H. Krasemann (HZG), Daniel Behr (HZG)

### 6.6.1 Einleitung

Im Teilprojekt 3.4 sollte eine Vernetzung von Mess- und Modelldaten aus dem Verbundvorhaben realisiert werden. Über Metadaten und standardisierten Web-Services sollte eine Technologie im Einsatz erprobt werden, die geografischen Daten der beteiligten Projektpartner darstellt und zur Verfügung stellt. Damit sollen Inhalte und Ergebnisse der verschiedenen Forschungsthemen dieses Vorhabens sowohl Endnutzern in Verwaltung, als auch Forschung und Öffentlichkeit zugänglich sein.

Diese im Projektantrag formulierten Ziele sind eng verknüpft mit denen der anderen Projektbereiche. Als eine der Schnittstellen zwischen der breiten Öffentlichkeit und den Projektpartnern, sowie unter den Projektbeteiligten selbst, kommt damit diesem Teilprojekt eine zentrale, verbindende Rolle zu.

### 6.6.2 Ergebnisse

Zunächst wurde ein Prototyp einer WebGIS Oberfläche entwickelt. Das Metadatensystem stand bereits kurzfristig aufnahmebereit zur Verfügung und es wurden Entscheidungen getroffen mit welchen Hardware und open-source Softwarekomponenten die Umsetzung der Projektziele realisiert werden sollen. Am HZG wurde ein Serverrechner für alle weiteren Softwareaufgaben und Entwicklungen im Rahmen des WIMO-Projektes beschafft. Der Speicherplatz wurde für die OpenStreetMap (OSM) Datenbank und Kartenkacheln entsprechend erweitert. Die angepasste OSM Karte wurde in unterschiedliche interaktive Webanwendungen als Hintergrundkarte implementiert, so z.B. das WIMO WebGIS und das COSYNA Datenportal CODM. Zudem wurde die serverseitige Software GeoServer (<http://www.geoserver.org>) und ncWMS (<http://www.resc.rdg.ac.uk/trac/ncWMS>) eingerichtet und zunächst für Geodaten des Projektes realisiert, die im Netz erreichbar waren

Im Laufe des Projekts wurden das WebGIS und die anderen Systeme kontinuierlich weiterentwickelt und mit neuen Features ergänzt, so dass letztendlich mit dem WebGIS (<http://kofserver3.hzg.de/wimo>) ein vollwertiges Tool zur Visualisierung von lokalen und verteilten Projektdaten und Daten aus anderen Quellen bereit steht. Die Einbindung aller Daten erfolgt dabei zumeist über WebMapServices (WMS), Features werden mittels WebFeatureServices (WFS) abgefragt. An externen Diensten wurden im Laufe der Zeit mehrere tausend Informationslayer von ein paar Dutzend Institutionen eingebunden.

Auf Grund von Nachfragen aus anderen Projektbereichen entstand, zusätzlich zum eigentlichen WebGIS eine WebApplikation, die es ermöglicht NetCDF (Network Common Data Format) Daten, die über die Serversoftware ncWMS via WebServices bereitgestellt werden, visuell zu vergleichen (<http://kofserver3.hzg.de/tools/ncmap/select.htm>). Das Tool baut unter anderem auf dem in ncWMS mitgelieferten WebViewer „godiva2“ auf und es können Datensätze aus unterschiedlichen Quellen und auch unterschiedlicher Parameter auf mehreren parallel synchronisierten Karten miteinander verglichen werden. Diese Anwendung hat sich als so vielseitig nutzbar erwiesen, dass sie am HZG im Zusammenhang mit COSYNA weitere Verwendung finden wird.

Sowohl für das WIMO WebGIS als auch die Vergleichsanwendung wird am HZG die Erreichbarkeit unter den bekannten Internetadressen in den nächsten Jahren sichergestellt. Dazu werden alle Anwendungen noch im Jahr 2016 auf einen neuen Server portiert, wodurch sich auch die Performanz erhöhen wird.

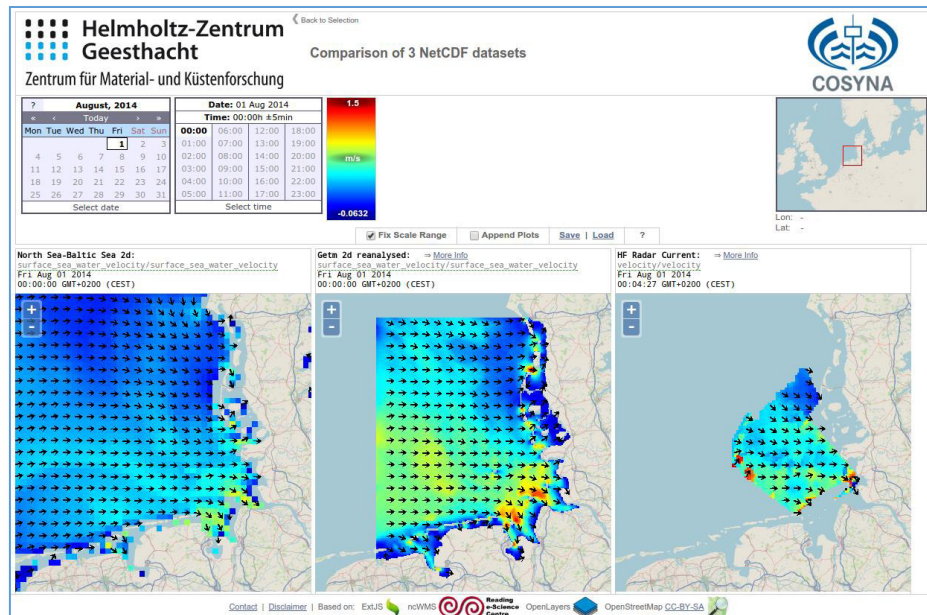
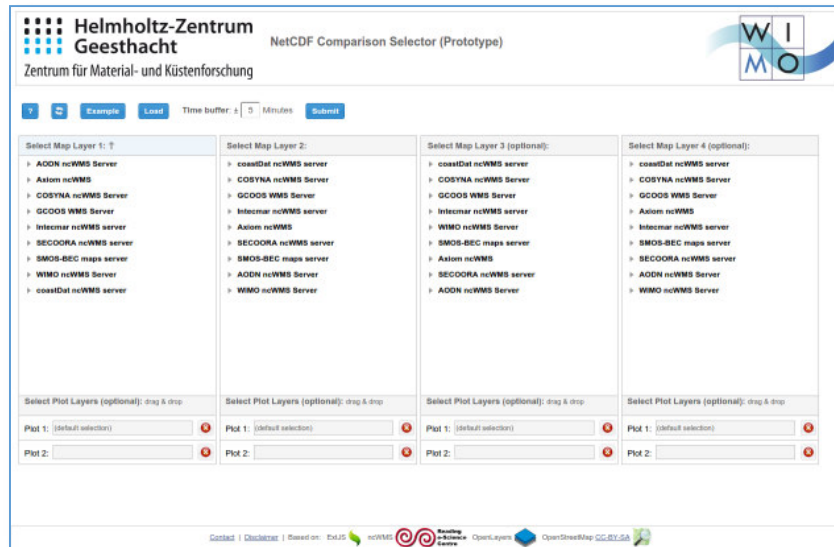


Abbildung 65: NetCDF Vergleichstool. oben die Auswahl- und unten die nachfolgende Kartenseite

Die Strategie zur Datenerhaltung für das gesamte Projekt wurde überarbeitet, da sich abzeichnete, dass die Einbindung der gesamten Ergebnisse aus allen Projektbereichen nicht wie ursprünglich geplant immer als Webservice realisiert werden konnte (s. u.). Die im Zuge des Projektes erhobenen Daten sollen stattdessen bei einer entsprechenden Datenplattform veröffentlicht werden. Ein für die Meeresforschung naheliegendes Beispiel ist die vom AWI betriebene Plattform Pangaea (<http://www.pangaea.de>). Hier wird für die Daten ein DOI (*Digital Object Identifier*) vergeben und sie werden somit als Datenveröffentlichung zitierbar. Damit sind über das WebGIS sämtliche Veröffentlichungen, sowohl Daten als auch wissenschaftliche Texte, unabhängig vom Ablageort mittels DOI auffindbar.

Das ursprünglich geplante Ziel, alle Daten über dynamische Webservices im WebGIS einzubinden, musste dabei aufgegeben werden, da Pangaea diese Dienste aus den Datensätzen nicht automatisch erzeugen kann. Einige der Ergebnisse sind daher im WebGIS nicht in Form interaktiver Karten visualisiert, sondern von den entsprechenden Stellen im WebGIS zur Quelle in Pangaea verlinkt, so wie es auch für alle Arten von Veröffentlichungen außerhalb von Pangaea umgesetzt wurde. Als Alternative für kleinere Datenmengen konnten die Daten zum HZG auf den für WIMO betriebenen Server

transferiert und dort von Mitarbeitern des TP3.4 aufbereitet und für das WebGIS verfügbar gemacht werden.

Über die gesamte Projektlaufzeit bestanden weitere dauerhafte Aufgaben in der Administration und Wartung der aufgebauten Hard- und Softwaresysteme, sowie dem Testen der entwickelten Software auf verschiedenen Betriebssystemen mit verschiedenen Browsern. Außerdem wurden die im WebGIS eingebundenen externen Datenquellen regelmäßig auf Erreichbarkeit und Funktionalität geprüft.

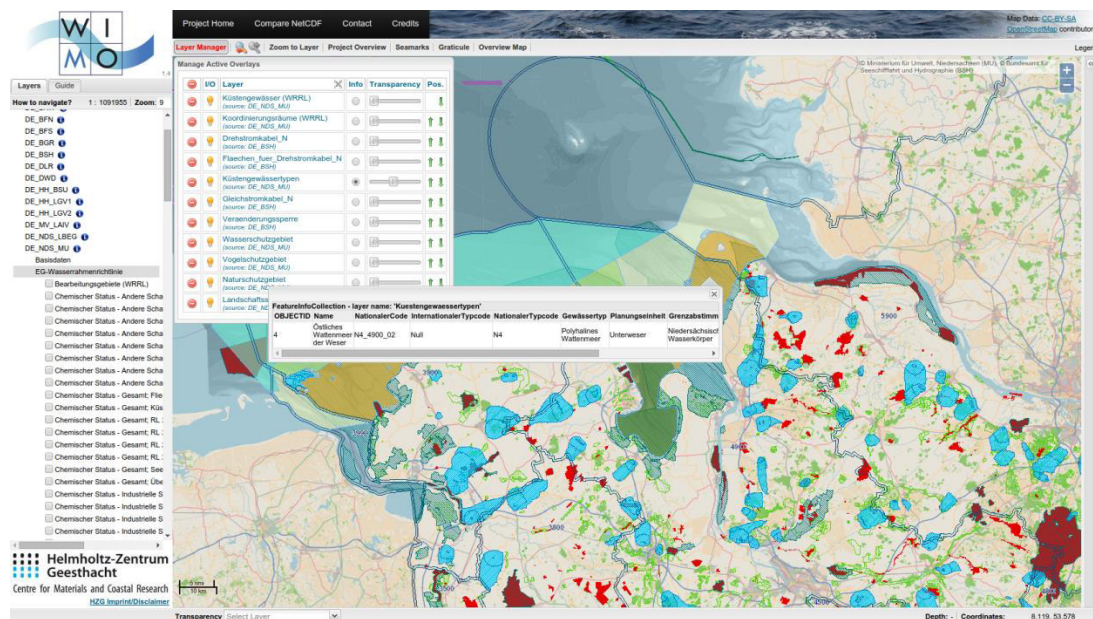


Abbildung 66: Das WIMO WebGIS mit aktiven Layern und Feature Abfragebox (<http://kofserver3.hzg.de/wimo>)

### 6.6.3 Bewertung

Im Rahmen des Projekts wurde eine vollwertige Infrastruktur für die Darstellung und Veröffentlichung von Daten und Metadaten über WebGIS verwirklicht. Es zeigte sich aber, dass die für ein WebGIS notwendige Vernetzung von verschiedenen Anbietern von WebServices in diesem Projekt nur ansatzweise verwirklicht werden konnte. Den am Projekt beteiligten Institutionen war es im Allgemeinen nicht möglich, über die hauseigene technische Infrastruktur die erhobenen Projektdaten planmäßig mittels solcher standardisierter WebServices zur Verfügung zu stellen. Viele Elemente des WebGIS bauen grundsätzlich auf der Existenz solcher WebServices auf und auch das bereit stehende Metadatensystem benötigt zum Einpflegen eben diese Dienste sowie die dazugehörigen Metadaten. Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurde eine optimistische Annahme getroffen, die, ausgehend von den bereits bei vielen Behörden, wie beispielsweise dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, etablierten WebServices, eine Entwicklung solcher Strukturen und Plattformen im Internet auch für die Universitäten und Forschungseinrichtungen prognostizierte. Viele der beteiligten Projektpartner haben allerdings keine solche zentrale Einrichtung zur Datenverteilung über das Netz entwickelt.

Aus der Sicht eines Daten liefernden Teilprojekts war es weder möglich noch sinnvoll allein im Rahmen des WIMO Projektes eine solche Dateninfrastruktur für alle Partner aufzubauen. Sowohl der planerische, finanzielle und personelle Aufwand übersteigt dabei die Möglichkeiten eines interdisziplinären über eine Reihe von Instituten verteilten Projektes wie WIMO. Stattdessen wurde neben der Entwicklung des ausgereiften WebGIS Systems eine pragmatische und operationelle Lösung



für die Darstellung und Vernetzung von Projektdaten der einzelnen Teilprojekte gefunden. Hier werden projektspezifische Inhalte einer zentralen Datenbank (hier Pangaea), welche von den Teilprojekten zur Archivierung und Veröffentlichung von Projektdaten genutzt werden georeferenziert im WebGIS dargestellt. Für die Projektpartner entfällt die Einrichtung eigener Server und Webservices und jeder Datensatz erhält eine elektronische Signatur (DOI, Digital Object Identifier). Eine Darstellung der Dateninhalte (Karten, Zeitreihen, Modellergebnisse) ist allerdings so nicht ohne weiteres realisierbar.

#### 6.6.4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem WIMO-WebGIS steht ein vollwertiges Tool zur Visualisierung von lokalen und verteilten Projektdaten sowie Daten aus anderen Quellen bereit. Die Einbindung aller Daten erfolgt dabei über verschiedene WebServices. Alle dargestellten Daten aus WIMO und auch anderer Quellen müssen dafür als Webservice angeboten werden. Das ist zur Laufzeit von WIMO für Forschungszentren und Behörden realisiert worden. Arbeitsgruppen an Universitäten haben eine solche Infrastruktur bisher oft noch nicht aufgebaut. Für WIMO wurde eine Lösung gefunden, die es erlaubt, Daten zu einer Datenplattform mit Datenkurator, wie z.B. Pangaea, zu kopieren und dann einen eindeutigen Identifikator, ein DOI, zu erhalten. Darüber ist dann im WIMO WebGIS die Information verlinkt.

Eine verbindliche und einheitliche Regelung und Entwicklung einer Dateninfrastruktur, die dann solche WebServices beinhaltet, sollte gemeinsam von größeren Verbänden bzw. Behörden vorangetrieben werden, als Beispiel der HGF sei hier MaNIDA (Marine Network for Integrated Data Access) genannt.



## 7. Integrative Projekte

Im Rahmen der zweiten Phase des Projekts konnte ein internes Verfahren zur Verteilung von Mitteln für kleine und kurze Teilprojekte etabliert werden. Die Mittelgeber genehmigten die projektinterne Vergabe von Restmitteln aus der ersten Phase für kleinere Projekte in der zweiten Phase. Dies ermöglichte die flexible Anpassung von Inhalten an neue Ideen und Entwicklungen. Dabei wurden Projektvorschläge, die die Integration von neuen Methoden in behördliche Aufgaben verfolgten, nach Begutachtung durch den Expertenbeirat ermöglicht. In diesem Rahmen sind mehrere sogenannte Integrative Projekte durchgeführt worden, die hier kurz vorgestellt werden.

### **IP 1 Integration der WIMO-Ergebnisse in die Umsetzung der EG-Richtlinien**

Koordinator: Hans-Christian Reimers (LLUR)

Wissenschaftliche Bearbeitung: Kirsten Binder (LLUR)

Die in WIMO entwickelten wissenschaftlichen Monitoringkonzepte stehen in engem Zusammenhang mit den europäischen Richtlinien für den Schutz der Meeresumwelt. Für die Deutsche Bucht und deren Küstengewässer sind die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH), die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) als besonders relevant zu nennen. So können beispielsweise die WIMO-Projektergebnisse für die Operationalisierung der MSRL-Deskriptoren „Biodiversität“, „Meeresbodenintegrität“ und „Eutrophierung“ genutzt werden. Weiteres Potenzial dieser Konzepte steckt in der Optimierung der Monitoringmethoden für die Qualitätskomponente „Morphologische Bedingungen“ der WRRL und bei der großräumigen Kartierung der FFH-Lebensraumtypen. Die im Projekt erarbeiteten Monitoringkonzepte wurden in einem Katalog zusammengefasst, in dem die neuen Methoden beschrieben, der finanzielle Aufwand abgeschätzt und ihr Bezug zu den Richtlinien dargestellt wird.

Für das nationale Monitoring sind die Arbeitsgruppen des Bund-Länder-Ausschusses für Nord- und Ostsee (BLANO) zuständig. Die Monitoringprogramme für die MSRL wurden im Oktober 2014 an die EU berichtet. Aus diesem Anlass wurde das Monitoringhandbuch neu strukturiert und seine Inhalte aktualisiert. Der WIMO Katalog Monitoringkonzepte soll auf einer Subdomain für F&E-Projekte mit dem Monitoringhandbuch verknüpft werden. Auf diese Weise wird zum einen eine dauerhafte Darstellung der Projektergebnisse für Entscheidungsträger, Experten und Öffentlichkeit über das Projektende hinaus ermöglicht. Zum anderen besteht die Möglichkeit der Verlinkung zu den nationalen Messprogrammen, so dass ein konkreter Bezug zu den Ergebnissen des Projekts hergestellt wird.

### **IP 2 Habitatklassifikation in der eulitoralen Übergangszone**

Koordinator: Alexander Bartholomä (SaM)

Habitate im Küstenraum sind in ihrer Ausbildung von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Abiotische und biotische Parameter steuern die räumliche Ausbildung und zeitliche Entwicklung der einzelnen Habitate. Die Veränderung findet sowohl saisonal und ereignisgekoppelt als auch langfristig statt. Die Prognosequalität solcher Veränderungen insbesondere für die Bewertung der Ökosysteme im Bereich der küstennahen Gebiete wie Inselvorfelder, Wattensysteme und Ästuarie hängt von der Dichte der Daten und der Häufigkeit ihrer Erfassung ab.

Hier bieten die verschiedenen Ansätze in der modernen Fernerkundung eine Vielzahl von Möglichkeiten. Während im Sublitoral immer mehr hydroakustische Methoden eingesetzt werden,

sind es im Eulitoral vor allem die Radar-, Luftbild- und Satellitenbildfernerkundung. Besondere Herausforderungen stellen für beide Sparten der Fernerkundung zum einen die „Land-Meer“-Übergangzone der Flachwasserbereiche mit bis zu wenigen Metern Wassertiefe wie das untere Eulitoral der Watten und zum anderen die skalenabhängige Auflösung dar. Ein besonderes Problem stellt hierbei die Qualitätskontrolle dar, da die Datengewinnung häufig zeitlich deutlich versetzt geschieht und so bereits registrierte Unterschiede ihre Ursache in Messfehlern oder eben bereits in deutlich erkennbare Veränderungen im Gelände haben können. Aufgrund fehlender Referenzpunkte ist eine Kalibrierung nur unzureichend durchzuführen. Dies gilt insbesondere für die kleinerskaligen Rauheiten von juvenilen Muschelbankstadien und kleinen Sohlformen.

Ziel dieses integrativen Projektes war eine koordinierte, zeitgleiche Messung auf verschiedenen Skalen. Im Vordergrund standen dabei Drohnen und flugzeuggestützte Messungen (Laserscanning), die durch Satellit und seeseitige (hydroakustische) Messungen sowie hochaufgelöste RTK-Bodengeoreferenzierung ergänzt wurden. Die Ergebnisse wurden auf ihren Mehrwert und die Umsetzbarkeit in Routinemessung im Rahmen des Habitatmonitorings (MSRL Ind. D6) gemeinsam mit den verantwortlichen Behörden überprüft.

### **IP 3 Bewertung Eutrophierung der offenen Deutschen Bucht**

Koordinator: Justus van Beusekom (HZG)

Ziel dieses Innovationsprojektes war es, die Eutrophierung der offenen Deutsche Bucht mit Hilfe von *in situ* Beobachtungen und Fernerkundung zu erfassen und zu bewerten. Die Arbeit fand in enger Abstimmung mit der Fachgruppe „Eutrophierung Nährstoffe, Plankton“ der Arbeitsgemeinschaft ErBeM des BLANO statt und war ein wesentlicher Beitrag zur Umsetzung der MSRL.

Hier wurde die Hypothese überprüft, dass in der Deutschen Bucht die winterliche Nitratverteilung ein guter Indikator für die jährliche Primärproduktion ist. Voraussetzung dafür ist, dass die Primärproduktion flächendeckend erfasst werden kann. Deswegen wurden vier Methoden für eine realistische Abschätzung der Primärproduktion zusammengeführt: In situ Sauerstoff-Dynamik durch automatische Messsysteme (Marnet, COSYNA), Remote Sensing, *in situ* Messungen während Schiffsausfahrten und Ökosystemmodelle. Die Ergebnisse tragen zu den MSRL Indikatoren D5 (Eutrophierung) und D4.1 (Produktion) bei.

### **IP 4 Ems Flüssigschlick**

Koordinator: Christian Winter (MARUM)

Der Gewässerzustand von Ästuaren zeigt vielfach eine fortschreitende Entwicklung zu einer flutdominierten Tidedynamik und einem daraus resultierenden, flussaufwärtsgerichteten Eintrag von feinkörnigem Sediment. Eine besonders kritische Entwicklung ist in der Unterems zu beobachten. Hier führt der vermehrte Schlickeintrag zu zeitweise meterdicken Ablagerungen von Flüssigschlick, dessen klein- und großräumige Dynamik und Auswirkungen auf die Gewässergüte nicht ausreichend verstanden sind.

In diesem integrativen Projekt wurde ein Messkonzept zur Dynamik des Flüssigschlicks entwickelt. Ziele waren die Erhebung maßgeblicher Daten für ein detailliertes Systemverständnis und zur Kalibrierung numerischer Modelle, und die Entwicklung und Bewertung von Methoden für ein langzeitiges Monitoring (siehe Kapitel 6.3). Das integrative Projekt wurde in Kooperation mit der

Forschungsstelle Küste (FSK) im NLWKN durchgeführt. Es gliedert sich durch seinen integrativen Ansatz sowohl an die WIMO Projekte im PB1 (Habiterkundung) als auch an TP3.1 (Integrative Modelle) an.

### **IP 5 Primärproduktion und Respiration im Pelagial und im Benthos der Deutschen Bucht**

Koordinator: Christian Hass (AWI) in Kooperation mit Justus van Beusekom (HZG)

Die hohe Belastung der Meeresumwelt mit Nährstoffen ist einer der Hauptgründe, warum ein guter Umweltzustand noch nicht erreicht ist. Im Rahmen dieses Projekts wurden verschiedene Methoden kombiniert, um den Zustand der Eutrophierung im Wattenmeer und seine regionalen Unterschiede zu erklären und um die Auswirkung der Nährstofffrachten quantifizieren zu können. Durch die Kombination mehrerer Methoden sollte eine optimierte Abschätzung der Primärproduktion der Deutschen Bucht ermöglicht werden. Die Hypothese, dass die winterliche Verteilung des gelösten Stickstoffs das Produktionspotential der Deutschen Bucht vorhersagt, wurde überprüft. Weitere Daten wurden mit früheren Messungen kombiniert um die Remineralisierungsleistung der Wassersäule und Sedimente zu vergleichen.

### **IP 6 Projektübergreifende Messkampagnen und Weiterentwicklung Fernerkundung**

Koordinatoren: Christian Hass, Finn Mielck (AWI), Alexander Bartholomä (SaM)

Im Rahmen des Teilprojektes 1.1 wurden ausgewiesene Arbeitsgebiete in der Küstenzone der Deutschen Bucht untersucht. Die ausschließlich im Sublitoral liegenden Untersuchungsgebiete wurden mittels verschiedener hydroakustischer Messverfahren hinsichtlich ihrer morphologischen und sedimentologischen Eigenschaften untersucht.

In der letzten Projektphase sind daher gezielte Kurz-Zeitreihen-Messungen im Gebiet List/Ost und der Jaderinne durchgeführt worden, in denen systematisch die Effekte der hohen Morphodynamik der Sohlformen auf die Akustik vertiefend untersucht wurden. Zu den bereits erfolgten Untersuchungen in den Arbeitsgebieten List/Ost wurden bereits die flut- bzw. ebbdominierten Sohlformen untersucht, die ein Indiz für starke Sedimentumlagerungsprozesse darstellen. Im Herbst/Winter 2013/2014 fand im benachbarten Strandabschnitt eine großangelegte Sandvorspülung statt. Stichprobenartig erfolgte Messungen zeigten, dass dieser künstlich herbeigeführte Sedimenteintrag großen Einfluss auf das Untersuchungsgebiet im Sublitoral hatte.

### **IP 7 Messkampagnen Epifauna/Hydroakustik Helgoländer Steingrund**

Koordinatorin: Ingrid Kröncke (SaM)

Sandbänke mit Steingründen wie Borkum Riffgrund, Amrum Bank und der Helgoländer Steingrund sind freiliegende Endmoränenzüge am Meeresboden und gehören zu den seltenen und räumlich sehr begrenzten Habitaten in der Deutschen Bucht. Diese Habitate zeichnen sich insbesondere in Bezug auf die benthische Epifauna durch einen hohen Artenreichtum aus. Sie bieten Arten Schutz, sowie geeignete Laich- und Brutplätze und gelten daher als bedeutender Trittstein für die Ausbreitung von Arten in der südlichen Nordsee (inkl. gebietsfremder Arten). Aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung sind diese Habitate besonders schützenswert und bereits ausgewiesene Schutzgebiete im Rahmen der Flora-Fauna-Habitatrichtlinie (FFH Gebiet Borkum Riffgrund und Amrum Bank). Das Monitoring von Steingründen ist aufgrund ihrer Bodenbeschaffenheit vergleichsweise schwierig. Klassische Probennahmen mit Greifer und schleppendem Gerät sind bei felsigem Substrat

problematisch bzw. unmöglich und eine minimalinvasive Probennahme ist nur durch Taucher oder visuelle Methoden (UW Foto/Kamera) möglich. Die Hydroakustik gilt als eine vielversprechende Methode für das großflächige Monitoring solcher Gebiete. Ohne eine entsprechende „Ground Truth“ ist eine Klassifizierung von Sediment- und Habitattypen aber auch bei Einsatz von hydroakustischen Methoden unmöglich. Das Erheben von „Ground-Truth“-Daten in Steingründen ist nur durch visuelle Methoden (UW Foto/Kamera) möglich, die eine hohe benthologische Expertise bei der Bestimmung der Tiere mittels Foto- oder Filmaufnahmen voraussetzt.

In 2015 wurden zwei videogestützte Feldkampagnen im Helgoländer Steingrund durchgeführt, der sich durch einen vergleichsweise hohen Anteil an felsigem Substrat auszeichnet. Die Gebiete des Helgoländer Steingrundes mit besonders auffälligen hydroakustischen Signalen wurden auf den Expeditionen intensiv mit Hilfe von UW Kamerasystemen beprobt und gis-gestützt ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in den WIMO Katalog Monitoringkonzepte eingebracht werden und damit die existierende Lücke für das Monitoring steiniger Habitate schließen.

### **IP 8 Einfluss der Küstenübergangszone auf den Eutrophierungsgrad im Wattenmeer**

Koordinatoren: Jöran März (MARUM), Christian Winter (MARUM), Justus van Beusekom (HZG), Kai Wirtz (HZG)

Regionale Unterschiede von Nährstoffkonzentrationen in den niederländischen und deutschen Wattenmeergebieten haben im Zuge der Implementierung der europäischen Meeresschutzrahmenrichtlinie (MSRL) zunehmend Aufmerksamkeit erfahren. Bislang existieren unterschiedliche Ansätze, um diese regionalen Unterschiede zu erklären. Einer davon geht von einem komplexen Zusammenspiel von hydrodynamischen und biologischen Faktoren auf den Schwebstoff- und damit partikelgebundenen Nährstofftransport aus: im Küstenvorfeld kann es zu einer mehr oder weniger starken Ausprägung einer Übergangszone kommen, in der verstärkt Aggregation und Sedimentation von Schwebstoffen stattfindet und damit partikelgebundene Nährstoffe in residuale, bodennahe küstenwärtige Strömung einbringt.

In diesem integrativen Projekt wurde der Frage nachgegangen, inwieweit die veränderliche Struktur von Schwebstoffaggregaten Einfluß auf die Größendynamik und damit schließlich auch auf Sinkgeschwindigkeiten hat. Dies wurde beispielhaft anhand eines in der Jade gewonnenen Datensatzes mithilfe eines mathematischen Modells analysiert.

### **IP 9 Ableitung der Ausprägung und Dynamik von für Inselwatten charakteristischen wellenförmigen morphologischen Oberflächenstrukturen im Eulitoral vor Norderney – Eine gemeinsame Analyse von Daten optischer Satelliten, Radarsatelliten Laserscann-Verfahren und Feldmessungen**

Koordinatoren: Christian Heipke (IPI), Manfred Ehlers (IGF), Hubert Farke (NLPV)

Wind und Sturmereignisse führen zu Sedimenttransport und beeinflussen damit die Ausprägung der Habitate. Zu den Strukturen, an denen sich signifikante Änderungen beobachten lassen, gehören ausgedehnte Felder mit wellenförmigen Erhebungen und Senken wie sie in den Inselwatten aller Ostfriesischen Inseln auftreten. Im Watt vor Norderney weisen diese Strukturen Erhebungen von ca. 20 cm in regelmäßigen Abständen von bis zu 100 Metern auf. Ihr Auftreten in allen Inselwatten und ihre so in anderen Wattbereichen nicht beobachtete charakteristische Erscheinung werfen Fragen nach ihrer Funktion und Dynamik auf. Das Beispiel dieser Bodenformen bot eine sehr gute Möglichkeit,

das für eine Monitoringstrategie im Eulitoral notwendige Zusammenspiel verschiedener Sensoren zu testen und zu demonstrieren und damit einen wesentlichen Beitrag für WIMO zu liefern.

Ziel dieses Projektes war es, eine gemeinsame Auswertung von optischen Daten, Radar- und Laserscannerdaten durchzuführen und am Beispiel der *Bodenformen* im Norderneyer Inselwatt, die sich in allen Daten gut abzeichnen, exemplarisch ein alle drei Methoden integrierendes Monitoringkonzept zu entwickeln. Hierbei stand die Bestimmung des Wanderverhaltens der *Bodenformen*, abgeleitet aus einer Zeitreihe von Fernerkundungsdaten, im Vordergrund. Die Zeitreihe wurde durch RTK-Messungen verdichtet. Darüber hinaus ließen sich Aussagen zu der Sedimentzusammensetzung (optische Daten), Rauigkeit (Radardaten) und geometrischen Ausprägung der Strukturen (Laserscannerdaten) ableiten. Die Ergebnisse sind unter Adolph et al., (subm.) zur Veröffentlichung eingereicht.



## 8. Literaturverzeichnis

- Adolph W., Farke, H. (2015): *Distribution and dynamics of intertidal geo-morphological structures and habitats - application of TerraSAR-X data for environmental monitoring of the Wadden Sea combined with extensive in-situ verification (WiMo)*. Poster, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE 36), 11.-15.5.2015, Berlin, Germany.
- Adolph, W., Schückel, U., Son, C.S., Jung, R., Bartholomä, A., Ehlers, M., Kröncke, I., Lehner, S.; Farke, H. (2016): *Use of TerraSAR-X data for spatio-temporal studies on intertidal bedforms of the Wadden Sea*. Geo-Marine Letters. *subm.*
- Adolph, W. et al. (subm.): *Multi-sensoral tidal flat remote sensing - Bedforms in the upper Island flats of Norderney recorded satellite SAR and optical sensors and by airborne lidar*. submitted to GMLE.
- Allredge, A., Passow, U., Logan, B. E. (1993): *The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean*. Deep Sea Research I: 40, 1131-1140
- Allen, A. A. (1988): *Comparison of Response Options for Offshore Oil Spills*, Proceedings of the Eleventh Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Environment Canada, Ottawa, ON, 289-306.
- Asmus, R., Jensen, M. H., Murphy, D., Doerffer, R. (1998): *Primärproduktion von Mikrophytobenthos, Phytoplankton und jährlicher Biomasseertrag des Makrophytobenthos im Sylt-Rømø Wattenmeer, Ökosystem Wattenmeer: Austausch, Transport und Stoffwandlungsprozesse*. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 367-392.
- Badewien, T. H., Zimmer, E., Bartholomä, A., Reuter, R. (2009): *Towards a continuous measurement of suspended particulate matter (SPM) in turbid coastal waters*, Ocean Dynamics, 59(2), 227-238.
- Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G.O.U., Swartz, B., Quental, T.B., Marshall, C., McGuire, J.L., Lindsey, E.L., Maguire, K. C., Mersey, B., Ferrer, E.A. (2011): *Has the earth's sixth mass extinction already arrived?*, Nature 471, 51-57. (DOI: 10.1038/nature09678)
- Bartholomä, A. (2006): *Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight*. Geo Mar. Lett. 26 (3), 177-184. (DOI: 10.1007/s00367-006-0030-6)
- Barth, H., Grisard, K., Holsch, K., Reuter, R., Stute, U. (1997): *Polychromatic transmissometer for in situ measurements of suspended particles and gelbstoff in water*, Applied Optics, 36, 7919-7928.
- Berg, T., Fürhaupter, K., Teixeira, H., Uusitalo, L., Zampoukas, N. (2015): *The Marine Strategy Framework Directive and the ecosystem-based approach – pitfalls and solutions*, Mar Poll Bull 96, 18-28.
- Blossier B., Bryan, K.R., Daly, C. J., Winter, C.: *Assessment of beach monitoring frequency and spacing based on temporal and spatial scales of shoreline morphodynamics at Sylt, Germany*. submitted to GMLE
- Brzank, A. (2008): *Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten, Dissertation*, Deutsche Geodätische Kommission Reihe C 622, Beck Verlag, München.
- Brzezinski, M. A. (1985): *The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables*, Journal of Phycology 21, 347-357.
- Burchard, H., Bolding, K. (2002): *GETM-a general model, Scientific documentation*, No EUR 200253 Commission, printed in Italy, 157pp.
- Cadée, G. C., Hegeman, J. (2002): *Phytoplankton in the Marsdiep at the end of the 20th century; 30 years monitoring biomass, primary production, and Phaeocystis blooms*, Journal of Sea Research 48, 97-110.
- Callies, U., Plüß, A., Kappenberg, J., Kapitza, K. (2011): *Particle tracking in the vicinity of Helgoland, North Sea: a model comparison*, Ocean Dynamics 61, 2121-2139.
- Chase, J.M., Knight, T.M. (2013): *Scale-dependent effect sizes of ecological drivers on biodiversity: Why standardised sampling is not enough*, Ecology Letters 16, 17-26. (DOI: 10.1111/ele.12112)

- Capperucci, R.M., Adolph, W., Hodapp, D., Jung, R., Schmidt, A., Holler, P., Bartholomä, A., Ehlers, M., Sörgel, U., Hillebrand, H., Farke, H. (2013): *From 630 km to the ground: a new multiscale approach to scientific habitat monitoring of intertidal and subtidal areas*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, Rome, Italy, May.
- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S. (2012): *Biodiversity loss and its impact on humanity*, Nature 486, 59-67. (DOI: 10.1038/nature11148)
- Choe, B., Kim, D., Hwang, J., Oh, Y., Moon, W. M. (2012): *Detection of oyster habitat in tidal flats using multi-frequency polarimetric SAR data*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 97, 28–37.
- Choi, J.-K., Eom, J., Ryu, J.-H. (2011) : Spatial relationship between surface sedimentary facies distribution and topography using remotely sensed data: Example from the Ganghwa tidal flat, Korea. Marine geology, 280, 205 – 211.
- Cox, T. J., Maris, T., Soetaert, K., Kromkamp, J. C., Meire, P., Meysman, F. (2015): *Estimating primary production from oxygen time series: A novel approach in the frequency domain*, Limnology and Oceanography: Methods 13, 529-552.
- Daly, C. J., Winter, C., Bryan, K.R. (2015): *On the morphological development of embayed beaches*. Geomorphology. doi:10.1016/j.geomorph.2015.07.040
- Dehouck, A., Lafon, V., Baghdadi, N., Roubache, A., & Rabaute, T. (2011): *Potential of TerraSAR-X imagery for mapping intertidal coastal wetlands*. Proceedings 4th TerraSAR-X Science Team Meeting, Oberpfaffenhofen, Germany. [http://terrasar-x.dlr.de/papers\\_sci\\_meet\\_4/oral/LAN237\\_dehouck.pdf](http://terrasar-x.dlr.de/papers_sci_meet_4/oral/LAN237_dehouck.pdf)
- De Jonge, V. N., De Jong, d. J. D. J. (1992): *Role of tide, light and fisheries in the decline of Zostera marina L. in the Dutch Wadden Sea*. Netherlands Institute for Sea Research Publication Series, 20, 161 - 176.
- De Jong, F. (2006): *Marine eutrophication in perspective. On the relevance of ecology for environmental policy*, Springer-Verlag, Berlin.
- Dolch, T., Buschbaum, C., Reise, K. (2013): *Persisting intertidal seagrass beds in the northern Wadden Sea since the 1930s*, Journal of Sea Research 82, 134-141.
- Donadi, S., Eriksson, B.K., Lettmann, K.A., Hodapp, D., Wolff, J.-O., Hillebrand, H. (2015): *The body-size structure of macrobenthos changes predictably along gradients of hydrodynamic stress and organic enrichment*, Marine Biology 162, 675-685. (DOI: 10.1007/s00227-015-2614-z)
- Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., Wimmer, W. (2012): *The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system*, Remote Sensing of Environment, 116, 140–158. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>)
- Elith, J., Leathwick, J.R. (2009): *Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time*. Annu Rev Ecol Evol Syst 40, 677-697.
- Elahi, R., O'Connor, M.I., Byrnes, J.E.K., Dunic, J., Eriksson, B.K., Hensel, M. J. S., Kearns, P. J. (2015): *Recent trends in local-scale marine biodiversity reflect community structure and human impacts*, Current Biology 25, 1938–1943. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2015.05.030>).
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J. (2011): *A statistical explanation of MaxEnt for ecologists*. Diversity and Distributions 17, 43-57.
- EMSA (2014): *Inventory of National Policies Regarding the Use of Oil Spill Dispersants in the EU Member States 2014*, European Maritime Safety Agency: 136pp.
- Elster, H. J. (1974): *Wechselwirkungen zwischen Chemie und Biologie bei der Eutrophierung des Bodensees*, Vom Wasser 43, 1-14.
- Eom, J., Choi, J.-K., Ryu, J.-H., Woo, H.J., Won, J.-S. & Jang, S. (2012): *Tidal channel distribution in relation to surface sedimentary facies based on remotely sensed data*. Geoscience Journal 16 (2), 127 – 137.
- Figge, K (1981): *Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Blatt: 2900, Maßstab: 1:250000)* Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg
- Fritz, T.; Eineder, M. (2010): *TerraSAR-X, Ground Segment, Basic Product Specification Document. CAF - Cluster Applied Remote Sensing*. DLR (TX-GS-DD-3302, Issue 1.7).



- Frolov, S., Baptista, A., Wilkin, M. (2008): *Optimizing fixed observational assets in a coastal observatory*, Continental Shelf Research, 28, 2644–2658.
- Frost, V. S., Stiles, J.A., Shanmugan, K.S., Holtzman, J.C. (1982): *A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise*. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 4 (2), 157–166.
- Gade, M., Alpers, W., Melsheimer, C., Tanck, G. (2008): *Classification of sediments on exposed tidal flats in the German Bight using multi-frequency radar data*. Remote Sensing of Environment 112 (4), 1603–1613.
- Gade, M., Melchionna, S., Stelzer, K., Kohlus, J. (2014): *Multi-frequency SAR data help improving the monitoring of intertidal flats on the German North Sea coast*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 140, 32–42.
- Gade, M., Melchionna, S., Kemme, L. (2015): *Analyses of multi-year synthetic aperture radar imagery of dry-fallen intertidal flats*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-7/W3, 941–947.
- Gieskes, W. W. C., van Bennekom, A. J. (1973): *Unreliability of the 14C-method for estimating primary production in eutrophic Dutch coastal waters*, Limnology and Oceanography 18, 494 - 495.
- Guenther, G., Cunningham, A., Rocque, P.L., Reid, D. (2000): *Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry*. In: Proc. 20th Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, EARSeL, Dresden, Germany, 16-17 June 2000
- Guisan, A., Zimmermann, N.E. (2000): *Predictive habitat distribution models in ecology*. Ecol Model 135, 147-186.
- Grayek, S., Staneva, J., Schulz-Stellenfleth, J., Petersen, W., Stanev, E.V. (2011): *Use of FerryBox surface temperature and salinity measurements to improve model based state estimates for the German Bight*, Journal of Marine Systems 88(1), 45-59. (DOI:10.1016/j.jmarsys.2011.02.020)
- Grayek, S., Stanev, E.V., Schulz-Stellenfleth, J. (2015): *Assessment of the Black Sea observing system. A focus on 2005- 2012 Argo campaigns*, Ocean Dynamics, 1–20.
- Grayek, S, Staneva, J., Schulz-Stellenfleth, J., Petersen, W., Stanev, E.V. (2010) *Use of FerryBox surface temperature and salinity measurements to improve model based state estimates for the German Bight*. Journal of Marine Systems, Volume 88, Issue 1, October 2011, Pages 45-59
- Gutperlet, R., Capperucci, R. M., Bartholomä, A., Kröncke, I. (2015): *Benthic biodiversity changes in response to dredging activities during the construction of a deep-water port*, Mar Biodiv 45, 819-839, DOI 10.1007/s12526-014-0298-0
- Hackert, E. C., Miller, R.N., Busalacchi, A.J. (1998): *An optimized design for a moored instrument array in the tropical Atlantic Ocean*, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012) 103, 7491–7509.
- Haller, M., Janssen, F., Siddorn, J., Petersen, W., Dick, S. (2015): *Evaluation of numerical models by FerryBox and Fixed Platform in-situ data in the southern North Sea*, Ocean Science Discussions 12, 355–401.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, Itz`hak (1973): *Textural Features for Image Classification*. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 3 (6), 610–621.
- Hervouet, J. M., van Haren, E. (1996): *Recent Advances in numerical methods for fluid flows*. In: Anderson, M. G., Walling, D. E. and Bates, P. D., Floodplain Processes. 183-214.
- Heygster, G., Dannenberg, J., Notholt, J. (2010): *Topographic Mapping of the German Tidal Flats Analyzing SAR Images with the Waterline Method*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 48 (3), 1019–1030.
- Hillebrand, H., Bennett, D.M, Cadotte, M.W. (2008): *Consequences of dominance: A review of evenness effects on local and regional ecosystem processes*, Ecology 89, 1510-1520.
- Hillebrand, H., Matthiessen, B. (2009): *Biodiversity in a complex world: Consolidation and progress in functional biodiversity research*, Ecology Letters 12, 1405-1419. (DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01388.x)
- Hodapp, D., Kraft, D., Hillebrand, H. (2014): *Can monitoring data contribute to the biodiversity-ecosystem function debate? Evaluating data from a highly dynamic ecosystem*, Biodiversity and Conservation 23, 405-419. (DOI: 10.1007/s10531-013-0609-y)

- Hodapp, D., Meier, S., Muijsers, F., Badewien, T.H., Hillebrand, H. (2015): *Structural equation modeling approach to the diversity-productivity relationship of wadden sea phytoplankton*, Marine Ecology Progress Series 523, 31-40. (DOI: 10.3354/meps11153)
- Hodapp, D., Blasius, B., Hillebrand, H., Ryabov, A. (2016): *The influence of environmental and trait dimensionality on community structure and the biodiversity-productivity relationship*, Ecology 97: online early
- Holpp, W., Klausning, H. (2000): *Radar mit realer und synthetischer Apertur. Konzeption und Realisierung*. München [u.a.]: Oldenbourg.
- Jung, R. (2016): *A Multi-Sensor Approach for Land Cover Classification and monitoring of tidal flats in the German Wadden Sea*. Universität Osnabrück, Dissertation.
- Jung, R., Adolph, W., Ehlers, M., Farke, H. (2015): *A multi-sensor approach for detecting the different land covers of tidal flats in the German Wadden Sea — A case study at Norderney*. Remote Sensing of Environment 170, 188–202.
- Jung, R., Ehlers, M. (2014a): *A hierarchical classification of the German tidal flats using a multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach*, Proc. EaRSEL Symposium 34<sup>th</sup>, Warsaw, Poland, 16. – 20.06.2014.
- Jung, R., Ehlers, M. (2014b): *A multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach to quantify change in the German tidal flats*, Vortrag auf dem IntensC Workshop, DLR Oberpfaffenhofen, Deutschland, 27 – 28.05.2014.
- Jung, R., Ehlers, M. (2014c): *Multisensorale Fernerkundung zur Klassifikation und Veränderungsanalyse im Deutschen Wattenmeer*, Poster, RESA Workshop, Bonn, Deutschland, 05. – 06.03.2014
- Jung, R., Ehlers, M., Klonus, S. (2013a): *High Resolution Remote Sensing Images for Tidal Lands Change*, YOUMARES4, Oldenburg, Deutschland, 11. - 13. August.
- Jung, R., Ehlers, M., Klonus, S. (2013b): *High Resolution Classification and Change Detection of the German Coastal Tidal Zone using Multisensoral Remote Sensing Data*, Proc. ISRSE 35, Beijing, China, 21. - 26. April.
- Kim, Duk-jin, Moon, W. M., Kim, G., Park, S.-E., Lee, H. (2011): *Submarine groundwater discharge in tidal flats revealed by space-borne synthetic aperture radar*. Remote Sensing of Environment 115 (2), 793–800.
- Kourafalou, V.H., De Mey, P., Le Hénaff, M., Charria, G., Edwards, C.A., He, R., Herzfeld, M., Pasqual, A., Stanev, E., Tintoré, J., Usui, N., Van Der Westhuysen, A., Wilkin, J., Zhu, X. (2015): *Coastal Ocean Forecasting: system integration and validation*. Journal of Operational Oceanography, Volume 7 No 3, 129-148
- Lee, D.S., Shan, J. (2003): *Combining LiDAR elevation data and IKONOS multispectral imagery for coastal classification mapping*. Marine Geodesy 26, 117–127
- Lee, Y.-K.; Park, J.-W., Choi, J.-K., Oh, Y., Won, J.-S. (2012): *Potential uses of TerraSAR-X for mapping herbaceous halophytes over salt marsh and tidal flats*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 115, 366–376.
- Le Hénaff, M., De Mey, P., Marsaleix, P. (2009): *Assessment of observational networks with the Representer Matrix Spectra method application to a 3D coastal model of the Bay of Biscay*, Ocean Dynamics, 59, 3–20, (DOI:10.1007/s10236-008- 0144-7, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-008-0144-7>).
- Li, Z., Heygster, G., Notholt, J. (2014): *Intertidal Topographic Maps and Morphological Changes in the German Wadden Sea between 1996–1999 and 2006–2009 from the Waterline Method and SAR Images*. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing 7 (8), 3210–3224.
- Loebl, M., Dolch, T., van Beusekom, J. E. E. (2007): *Annual dynamics of pelagic primary production and respiration in a shallow coastal basin*. Journal of Sea Research 58, 269-282.
- Los, F. J., Troost, T. A., Van Beek, J. K. L. (2014): *Finding the optimal reduction to meet all targets—Applying Linear Programming with a nutrient tracer model of the North Sea*. Journal of Marine Systems 131, 91-101.

- Loreau, M., Hector, A. (2001): *Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments*. Nature 412, 72-76.
- Lotze, H.K., Lenihan, H.S., Bourque, B.J., Bradbury, R.H., Cooke, R.G., Kay, M.C., Kidwell, S.M., Kirby, M.X., Peterson, C.H., Jackson, J.B.C. (2006): *Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas*. Science 312, 1806-1809.
- Mace, G.M., Masundire, H., Baillie, J., Ricketts, T., Brooks, T., Hoffmann, M., Stuart, S., Balmford, A., Purvis, A., Reyers, B., Wang, J., Revenga, C., Kennedy, E., Naeem, S., Alkemade, R., Allnutt, T., Bakarr, M., Bond, W., Chanson, J., Cox, N., Fonseca, G., Hilton-Taylor, C., Loucks, C., Rodrigues, A., Sechrest, W., Stattersfield, A.J., Van Rensburg, B.J., Whiteman, C. (2005): *Biodiversity*, Biodiversity in ecosystems and human wellbeing: Current state and trends, Hassan, H., Scholes, R., and Ash, N., Editors.
- Maerz, J., Wirtz, K. (2009): *Resolving physically and biologically driven suspended particulate matter dynamics in a tidal basin with a distribution-based model*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 84, 128-138.
- Maerz, J., Hofmeister, R., van der Lee, E. M., Gräwe, U., Riethmüller, R., Wirtz, K. (2016): *Evidence for a maximum of sinking velocities of suspended particulate matter in a coastal transition zone*, Biogeosciences Discuss., doi:10.5194/bg-2015-667
- Marquard, E., Dauber, J., Doeringhaus, A., Dröschmeister, R., Frommer, J., Frommolt, K.H., Gemeinholzer, B., Henle, K., Hillebrand, H., Kleinschmit, B., Klotz, S., Kraft, D., Premke-Kraus, M., Römbke, J., Vohland, K., Wägele, W. (2013): *Biodiversitätsmonitoring in Deutschland: Herausforderungen für Politik, Forschung und Umsetzung*. Natur und Landschaft 88, 337-341.
- Markert, E., Holler, P., Kröncke, I., Bartholomä, A. (2013): *Benthic habitat mapping using hydroacoustic and ground-Truthing methods in coastal waters of the German Bight*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 129, 94-104.
- Markert, E., Kröncke, I., Kubicki, A. (2015): *Small scale morphodynamics of shoreface-connected ridges and their impact on benthic macrofauna*. J. Sea Res. 99, 47-55.
- Maßmann, S., Janssen, F., Brüning, T., Kleine, E., Komo, H., Menzenhauer-Schumacher, I., Dick, S. (2014): *An operational oil drift forecasting system for German coastal waters*. Die Küste 81, 255-271
- Mason, D. C., Scott, T. R., Wang, H.-J. (2006): *Extraction of tidal channel networks from airborne lidar data*. ISPRS Journal of Photogrammy and Remote Sensing 61 (2), 67–83.
- Mason, D.C., Scott, T.R., Dance, S.L. (2010): *Remote sensing of intertidal morphological change in Morecambe Bay, U.K., between 1991 and 2007*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 87 (3), 487–496.
- Mielck, F., Bartsch, I., Hass, H.C., Wöfl, A.C., Bürk, D., Betzler, C. (2014): *Predicting spatial kelp abundance in shallow coastal waters using the acoustic ground discrimination system RoxAnn*, Estuarine Coastal and Shelf Science 143 , 1-11. (DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.016>)
- Mielck, F., Holler, P., Bürk, D., Hass, H.C. (2015): *Interannual variability of sorted bedforms in the coastal German Bight (SE North Sea)*. Continental Shelf Research 111, 31-41. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.016>)
- Meyer, E. M., Pohlmann, T., Weisse, R. (2011): *Thermodynamic variability and change in the North Sea (1948-2007) derived from a multidecadal hindcast*, Journal of Marine Systems 86, 35–44.
- Murray, A.B., Thielner, E.R. (2004): *A new hypothesis and exploratory model for formation of large-scale inner-shelf sediment sorting and “rippled scour depressions”*. Cont. Shelf Res. 24 (3), 295–315.
- Nayegandhi, A., Brock, J. C. (2009): *Assessment of coastal-vegetation habitats using airborne laser remote sensing*. Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management, X. Yang (Ed.), Berlin, Heidelberg: Springer, Kapitel 16, 365-389.
- Neumann, H., de Boois, I., Kroencke, I., Reiss, H. (2013a): *Climate change facilitated the range expansion of the non-native angular crab *Goneplax rhomboides* (Linnaeus, 1758) into the North Sea*. Mar Ecol Prog Ser 484, 143-153.

- Niedermeier, A., Hoja, D., Lehner, S. (2005): *Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data*. Ocean Dynamics 55 (2), 100–109 (DOI:10.1007/s10236-005-0114-2).
- Nieuwhof, S., Herman, P., Dankers, N., Troost, K., van der Wal, D. (2015): *Remote Sensing of Epibenthic Shellfish Using Synthetic Aperture Radar Satellite Imagery*. Remote Sensing 7 (4), 3710–3734.
- NLWKN (2015): *Jährliche Untersuchungen ausgewählter Seegrassbestände im niedersächsischen Wattenmeer*.
- Pein, J. U., Grayek, S., Schulz-Stellenfleth, J., Stanev, E. V. (2016): *On the impact of salinity observations on state estimates in Ems Estuary*. Ocean dynamics, DOI 10.1007/s10236-015-0920-0
- Petersen, W., Colijn, F., Hydes, D., and Schroeder, F. (2007): *FerryBox: From On-line Oceanographic Observations to Environmental Information*, Eurogoos publication No. 25, SHMI, 601 76 Norkoepping, Sweden (ISBN 978-91097828-4-4).
- Pohlmann, T. (1996a): *Predicting the thermocline in a circulation model of the North Sea Part I: model description, calibration and verification*, Continental Shelf Research 16, 131–146.
- Pohlmann, T. (1996b): *Calculating the development of the thermal vertical stratification in the North Sea with a three dimensional baroclinic circulation model*, Continental Shelf Research 16, 163–194.
- Pratt, W. K. (2007): *Digital image processing*. PIKS Scientific inside. 4. Aufl. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.
- Reineking, B. (1999): *The PALLAS accident*, Wadden Sea Newsletter 1, 22-25
- Reiss, H., Cunze, S., König, K., Neumann, H., Kröncke, I. (2011): *Species distribution modelling of marine benthos: a North Sea case study*. Mar Ecol Prog Ser 442, 71-86.
- Sakov, P., Oke, P. R. (2008): *Objective array design: Application to the tropical Indian Ocean*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 25, 794–807.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U., Heipke, C. (2015): *A Graph Based Model for the Detection of Tidal Channels using Marked Point Processes*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 115-121.
- Schmidt, A., Niemeyer, J., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2014a): *Contextual Classification of Full Waveform Lidar Data in the Wadden Sea*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U., Heipke, C. (2014b): *Extraction of fluvial networks in lidar data using marked point processes*, IntArchPhRS vol. XL-3, ISPRS Technical Commission III Symposium, Zurich, Switzerland, September 2014, 297-304
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2013a): *Water-Land-Classification in Coastal Areas with Full Waveform Lidar Data*, In: PFG 2 (2013), S. 71-81.
- Schmidt, A., Soergel, U. (2013b): *Monitoring and change detection of Wadden Sea areas using Lidar data*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W2, ISPRS2013-SSG, 11 – 17 November 2013, Antalya, Turkey.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2013c): *Monitoring concepts for coastal areas using lidar data*, IntArchPhRS vol. XL-1/W1, Hannover, 2013.
- Schückel, U., Kröncke, I. (2013): *Temporal changes in intertidal macrofauna communities over eight decades: A result of eutrophication and climate change*, Estuarine, Coastal and Shelf Science 117, 210-218.
- She, J., Høyer, J. L., Larsen, J. (2007): *Assessment of sea surface temperature observational networks in the Baltic Sea and North Sea*, Journal of Marine Systems, 65, 314–335.
- Shi, Z., Fung, K. B. (1994): *A Comparison of Digital Speckle Filters*, Proceedings of IGARSS 94, 2129–2133.
- Stachowicz, J.J., Bruno, J.F., Duffy, J.E. (2007): *Understanding the effects of marine biodiversity on communities and ecosystems*, Annual Review of Ecology Evolution and Systematics 38, 739-766. (DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095659 ).

- Stanev, E. V., Schulz-Stellenfleth, J., Staneva, J., Grayek, S., Seemann, J., Petersen, W. (2011): *Coastal observing and forecasting system for the German Bight – estimates of hydrophysical states*, *Ocean Sci.*, 7, 569-583.
- Staneva, J., Stanev, E. V., Wolff, J.-O., Badewien, T. H., Reuter, R., Flemming, B., Bartholomä, A., Bolding, K. (2009): *Hydrodynamics and sediment dynamics in the German Bight. A focus on observations and numerical modelling in the East Frisian Wadden Sea*, *Continental Shelf Research* 29, 302-319.
- Staneva, J. V., Stanev, E. V., Wolff, J. O., Badewien, T. H., Reuter, R., Flemming, B., Bartholomä, A., Bolding, K. (2009): *Hydrodynamics and Sediment Dynamics in the German Bight*, *Continental Shelf Res.* 29 (1), 302-319.
- Starek, M.J., Vemula, R., Slatton, K.C. (2012): *Probabilistic detection of morphologic indicators for beach segmentation with multitemporal LiDAR measurements*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (11 Part 2), 4759-4770.
- Stelzer, K., Geißler, J., Gade, M., Eskildsen, K., Kohlus, J., Farke, H., Reimers, H.-C (2010): *DeMarine Umwelt: Operationalisierung mariner GMES-Dienste in Deutschland. Integration optischer und SAR Erdbeobachtungsdaten für das Wattenmeermonitoring*. Jahresbericht 2009 - 2010.
- Striebel, M., Behl, S., Diehl, S., Stibor, H. (2009): *Spectral niche complementarity and carbon dynamics in pelagic ecosystems*, *American Naturalist* 174, 141-147 (DOI: 10.1086/599294).
- Son, C.S., Flemming, B.W., Bartholomä, A. (2011): *Evidence for sediment recirculation on an ebb-tidal delta of the East Frisian barrier-island system, southern North Sea*, *Geo-Mar Lett.* 31, 87-100.
- Topcu, D., Behrendt, H., Brockmann, U., Claussen, U. (2011): *Natural background concentrations of nutrients in the German Bight area (North Sea)*, *Environmental Monitoring and Assessment* 174, 361-388.
- Tou, J. T., Gonzalez, R. C. (1974): *Pattern Recognition Principles*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- Tilman, D. (1982): *Resource competition and community structure*, Princeton University Press. 296pp.
- van Bennekom, A. J., Wetsteijn, F. J. (1990): *The winter distribution of nutrients in the southern bight of the North Sea (1961-1978) and in the estuaries of the Scheldt and the Rhine/Meuse*, *Netherlands Journal of Sea Research* 25, 75- 87.
- van Beusekom, J. E. E. (2005): *A historic perspective on Wadden Sea eutrophication*, *Helgoland Marine Research* 59, 45-54.
- van Beusekom, J. E. E., Bot, P., Carstensen, J., Goebel, J., Lenhart, H., Pätsch, J., Petenati, T., Raabe, T., Reise, K., Wetsteijn, B. (2009a). *Eutrophication. Thematic Report No. 6*. in H. Marencic and J. de Vlas, editors. Quality Status Report 2009, WaddenSea Ecosystem. No 25. Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Monitoring and Assessment Group, Wilhelmshaven, Germany.
- van Beusekom, J. E. E., Loebl, M., Martens, P. (2009b): *Distant riverine nutrient supply and local temperature drive the long-term phytoplankton development in a temperate coastal basin*, *Journal of Sea Research* 61, 26-33.
- van Beusekom, J. E. E., de Jonge, V. N. (2012): *Dissolved organic phosphorus: An indicator of organic matter turnover?*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 108, 29-36.
- van Beusekom, J. E. E., Buschbaum, C., Reise, K. (2012): *Wadden Sea tidal basins and the mediating role of the North Sea in ecological processes: scaling up of management?*, *Ocean & Coastal Management* 68, 69-78.
- van der Wal, D., Herman, P.M.J., Wielemaker-van den Dool, A. (2005): *Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery*. *Remote Sensing of Environment* 98 (1), 96–109.
- van Katwijk, M. M., Schmitz, G. H. W., Gasseling, A. P., van Avesaath, P. H. (1999): *Effects of salinity and nutrient load and their interaction on Zostera marina*, *Marine Ecology Progress Series* 190, 155-165.
- van Katwijk, M. M., Vergeer, L. T. H., Schmitz, G. H. W., Roelofs, J. G. M. (1997): *Ammonium toxicity in eelgrass Zostera marina*, *Marine Ecology Progress Series* 157, 159-173.

- van der Wal, D., Herman, P.M.J., Wielemaker-van den Dool, A. (2005): *Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery*, Remote Sensing of Environment 98, 96–109.
- van der Wal, D., Herman, P.M.J. (2007): *Regression-based Synergy of Optical, Shortwave Infrared and Microwave Remote Sensing for Monitoring the Grain-size of Intertidal Sediments*, Remote Sensing of Environment 111, 89 – 106.
- Vellend, M., Baeten, L., Myers-Smith, I.H., Elmendorf, S.C., Beausejour, R., Brown, C.D., De Frenne, P., Verheyen, K., Wipf, S. (2013): *Global meta-analysis reveals no net change in local-scale plant biodiversity over time*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110, 19456-19459. (DOI: 10.1073/pnas.1312779110).
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N., (2006): *Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60, 100-112
- Wang, L. (2010): *Tide driven dynamics of subaqueous fluid mud layers in turbidity maximum zones of German estuaries*. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, pp. 110.
- Weinert, M., Kröncke, I., Mathis, M., Neumann, H., Pohlmann, T., Reiss, H. (2016): *Modeling climate change effects on benthos: distributional shifts in the North Sea from 2001 to 2099*. Estuar. Coast. Shelf Sci. 175: 157-168.
- Weisse, R., von Storch, H., Callies, U., Chrastansky, A., Feser, F., Grabemann, I., Guenther, H., Winterfeldt, J., Woth, K., Pluess, A. (2009): *Regional meteorological-marine reanalyses and climate change projections: Results for Northern Europe and potential for coastal and offshore applications*, Bulletin of the American Meteorological Society 90, 849-8.
- Wiehle, S., Lehner, S. (2015): *Automated Waterline Detection in the Wadden Sea Using High-Resolution TerraSAR-X Images*, Journal of Sensors, S. Article ID 450857.
- Wienberg, C., Bartholomä, A. (2005): *Acoustic seabed classification of a coastal environment (outer Weser Estuary, German Bight) - a new approach to monitor dredging and dredge spoil disposal*, J Continental Shelf Res 25, 1143-1156.
- Winter, C., Herrling, G., Bartholomä, A., Capperucci, R., Callies, U., Heipke, C., Schmidt, A., Hillebrand, H., Reimers, C., Bremer, P., Weiler, R. (2014): *Wissenschaftliche Konzepte für ein Monitoring des ökologischen Zustands des deutschen Küstenmeeres*. Wasser und Abfall 07-08/2014; 21-26, DOI: 10.1365/s35152-014-0685-7

## 9. Anhang

### 9.1. Webbasierter Katalog Monitoringkonzepte

In den Teilprojekten wurden Konzepte für das Monitoring im Rahmen der „Qualitativen Deskriptoren“ der MSRL und „Merkmale“ und „Belastungen“ der MSRL, Qualitätskomponenten der WRRL und Lebensraumtypen nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH) entwickelt und bewertet (Tabelle 6). Die erstellten Konzepte sind unter

[wimo.meeresschutz.info](http://wimo.meeresschutz.info)

mit Titel, Beschreibung, Ansprechpartnern, Bezug zu den Richtlinien der MSRL, WRRL, und FFH aufgeführt. Messmethoden sind dort erläutert, Aufwand und die Kosten werden aufgeführt, sowie eine Bewertung und Einschätzung der Vor- und Nachteile des jeweiligen Monitoringkonzepts werden im Einzelnen angegeben (Abbildung 67).

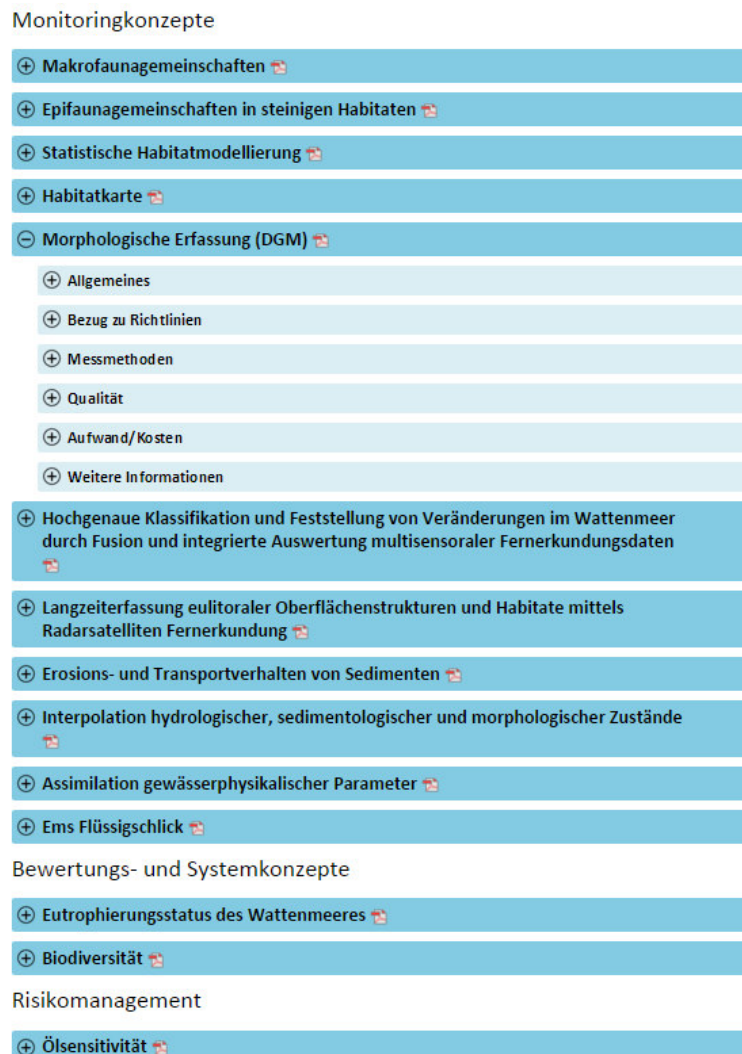


Abbildung 67: Auszug aus [www.wimo.meeresschutz.info](http://www.wimo.meeresschutz.info): Monitoringkonzepte

**Tabelle 6: Zuordnung der erstellten Monitoringkonzepte zu den Institutionen und Teilprojekten**

| Institution                                                                                                                                              | Abkürzung       | Projektleiter/in                                                                                              | Teilprojekt (TP)                               | Konzept                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|
| Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, List/Sylt                                                                     | AWI             | Dr. Christian Hass<br>Dr. Justus van Beusekom                                                                 | TP 1.1<br>TP 2.2                               | 1, 2<br>8                  |
| Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg                                                                                       | ICBM            | Prof. Dr. Emil Stanev<br>Prof. Dr. Helmut Hillebrand                                                          | TP 3.1<br>TP 3.2                               | 11<br>12                   |
| Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück                                                                                      | IGF             | Prof. Dr.-Ing. Manfred Ehlers                                                                                 | TP 1.3                                         | 5                          |
| Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht                                                                                               | HZG             | Dr. Rolf Riethmüller<br>Dr. Joanna Staneva<br>Prof. Dr. Kai Wirtz<br>Dr. Ulrich Callies<br>Dr. Hajo Krasemann | TP 1.1<br>TP 2.2<br>TP 2.2<br>TP 3.3<br>TP 3.4 | 1, 2<br>8<br>8<br>13<br>14 |
| Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover                                                                                    | IPI             | Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke                                                                               | TP 1.2                                         | 3, 4                       |
| Institut für Physik, Universität Oldenburg                                                                                                               | IfP             | PD Dr. Rainer Reuter                                                                                          | TP 2.1                                         | 7, 8                       |
| Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek                                                         | LLUR            | Dr. Christian Reimers                                                                                         | TP 1.1                                         | 1, 2                       |
| MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen                                                                                      | MARUM           | Prof. Dr. Michael Schulz<br>Dr. Christian Winter                                                              | TP 2.1<br>TP 3.1                               | 7, 8<br>9, 10              |
| Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Wilhelmshaven<br>in Kooperation mit:<br>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen | NLPV<br><br>DLR | Dr. Gerald Millat<br>Dr. Hubert Farke<br><br>Dr. Susanne Lehner                                               | TP 1.4<br><br>TP 1.4                           | 6<br><br>6                 |
| Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven                                                                                                                       | SaM             | Dr. Alexander Bartholomä<br>PD Dr. Ingrid Kröncke                                                             | TP 1.1<br>TP 1.1                               | 1, 2<br>1, 2               |



## 9.2. WIMO Junior Fellowships

Die WIMO Junior Fellowships ermöglichten zwei besonders qualifizierten Nachwuchswissenschaftlern eine Einbindung ihrer Forschung in den Themenbereich des behördlichen Monitorings. Die selbst vorgeschlagenen wissenschaftlichen Projekte erweiterten das Themenspektrum des Verbundprojekts. Auf diese Weise wurde internationale Kompetenz eingebunden und das Projekt nutzbringend ergänzt.

Dr. Christopher Daly war WIMO Junior Fellow von September 2013 bis August 2014 und arbeitete zum Thema Monitoring der Dynamik von Stränden. Er entwickelte Methoden zur Auswertung von Kamerabildern für die Rekonstruktion von Küstenlinien. Seine Arbeit hat zu den Veröffentlichungen *Daly et al., 2015* und *Blossier et al., subm.* beigetragen.

Dr. Chang Soo Son war WIMO Junior Fellow von März 2013 bis Februar 2014 und hat sich mit dem sedimentologischen und lithostratigraphischen Aufbau der großskaligen Sohlformmuster südlich der Insel Norderney befasst (*Sediment Dynamics and Morphodynamics in the Inter- and Subtidal Zone of the East Frisian Coast with Central Focus to Norderney Island*). Dies wurde in enger Kooperation mit der Nationalparkverwaltung in Wilhelmshaven (TP 1.4) und deren Aktivitäten in DeMarine durchgeführt.

## 9.3. Wissenschaftliche Qualifikationen

### Doktorarbeiten

Adolph, W. (seit 01.01.2011) Arbeitstitel: *Remote sensing large-scale surface structures in the Wadden Sea. Application of TerraSAR-X data to assess spatial distribution and dynamics of geomorphic structures and habitats for monitoring and long-term ecological research*, Universität Osnabrück

Geimecke, C. (seit 01.02.2011) Arbeitstitel: *Hydrodynamic and sediment dynamics of the German Bight*, Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Herrling, G. (2015): *Morphodynamics of Barrier Island Systems*, Universität Bremen, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-00104460-11>

Hodapp, D. (2014): *The suitability of biodiversity as indicator for ecosystem functioning*, Universität Oldenburg

Jung, R. (2016): *A Multi-Sensor Approach for Land Cover Classification and monitoring of tidal flats in the German Wadden Sea*, Universität Osnabrück <https://repositorium.uni-osnabrueck.de/handle/urn:nbn:de:gbv:700-2016040714380>

Klonus, S. (2012): *Optimierung und Auswirkungen von ikonischen Bildfusionsverfahren zur Verbesserung von fernerkundlichen Auswerteverfahren*, Universität Osnabrück, 267 pp. <https://repositorium.ub.uni-osnabrueck.de/handle/urn:nbn:de:gbv:700-2012021010035>

Markert, E. (2015): *Habitat mapping of the seabed in the German Bight based on the study of small- and large-scale variability of macrofauna communities and their hydroacoustic signals*, Universität Oldenburg, 117 pp.

Mielck, F. (2013): *Seafloor Habitat Mapping and Monitoring Approaches for the German Bight*, University of Hamburg, 118 pp.

Schmidt, A. (seit 01.01.2010) Arbeitstitel: *Markierte Punktprozesse für die automatische Extraktion von Netzwerken in digitalen Geländemodellen am Beispiel von Prielen*, Universität Hannover

Tomowski, D. (2011): *Kombiniert integrierte Veränderungsanalyse zur Schadenskartierung in urbanen Gebieten auf Basis sehr hoch auflösender multispektraler Bilddaten*, Universität Osnabrück, 199 pp. [https://www.researchgate.net/publication/281453575\\_thesis\\_tomowski](https://www.researchgate.net/publication/281453575_thesis_tomowski)

### **Masterarbeiten**

Anhuth, C. (2015): *Analyse morphologischer Änderungen im Wattenmeer mit luftgestützten Laserscannerdaten*, Universität Hannover [www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit\\_Christoph\\_Anhuth.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit_Christoph_Anhuth.pdf)

Beermann, K. (2012): *Auswertung von Laserscannerdaten im Wattenmeer*, Universität Hannover [www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit\\_Beermann.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit_Beermann.pdf)

Klein, B. (2014): *Extraktion von wasserführenden Kanälen im Wattgebieten*, Universität Osnabrück

Kruse, C. (2015): *Untersuchungen zur automatischen Detektion von Flüssen mittels markierter Punktprozesse*, Universität Hannover [www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit\\_Christian\\_Kruse.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Abschlussarbeiten/Masterarbeit_Christian_Kruse.pdf)

Schwab, A. (2012): *Morphology of Tidal Flats – a new detection approach with hydroacoustic and optical remote sensing techniques*, Universität Bremen

Spruch, L. (2014): *Modelling Phytoplankton and Nutrient Dynamics in the Wadden Sea*, Universität Oldenburg

Winter, L. (2012): *Reconstructing long-term trends in the biomass and trophic relations of jellyfish in a coastal sea*, Christian-Albrechts-Universität Kiel

### **Studentische Arbeiten**

Deeken, E. (2012): *Bewuchstest an einem Transmissometergehäuse, Untersuchung der wärmeabhängigen Strahländerung verschiedener Dioden und Trübungsmessung mit verschiedenen Suspensionen*. Praktikumsbericht, Studiengang Biologie, Universität Oldenburg, 30 pp.

Espenhahn, B. (2014): *Bestimmung des Schwebstoffgehalts von Wasserproben mit Hilfe eines multispektralen Transmissometers*. Bachelorarbeit, Studiengang Physik, Universität Oldenburg, 39 pp.

Koslowa, N. (2016): *Multitemporale RapidEye-Daten zur Veränderungsanalyse von Landbedeckungen im Deutschen Wattenmeer*, Bachelorarbeit, Universität Osnabrück

Kraus, R. (2015): *Sedimentdynamik im Flachwassergebiet westlich der Hörnum-Odde (Deutsche Bucht, Nordsee)*. Bachelorarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 55 pp.

Mehta, P. (2012): *Entwicklung eines Transmissometers zur Bestimmung von Schwebstoffen im Meerwasser*. Bachelorarbeit, Studiengang Engineering Physics, Universität Oldenburg, 52 pp.

## 9.4. Veröffentlichungen aus WIMO

### Fachzeitschriften und Fachliteratur

- Bartholomä, A., Capperucci, R.M., (2014): *Fernerkundung zur Klassifizierung und Bewertung von Seeböden und Habitaten*. Marschenrat zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee, 51, 58-63. ISSN 0931-5373
- Bartholomä, A., Holler, P., Capperucci, R. (2012): *Monitoring von sublitoralen Habitaten – Kartierung mit hydroakustischen Methoden*. – Forum der Geoökologie, 23 (3), 14 – 21. ISSN: 0939-6632
- Bartholomä, A., Holler, P., Schrottke, K. and Kubicki, A. (2011): *Acoustic habitat mapping in the German Wadden Sea – Comparison of hydro-acoustic devices*. J. Coast. Res., Spec. Iss. 64, ICS 2011 Proc., 1-5. ISSN: 0749-0208
- Bürk, D., Hass, H.C., Mielck, F., Bartholomä, A., Holler, P., Reimers, H.C., Kröncke, I., Markert, E. (2011): *Seafloor classification of a gully system offshore the island of Sylt (NW Germany)*. – Bulletin of the Geological Society of Finland, 83, Spec. Iss. 1, 20.
- Callies, U., Plüß, A., Kappenberg, J. and Kapitza, H. (2011): *Particle tracking in the vicinity of Helgoland, North Sea: a model comparison*. Ocean Dynamics 61, 2121-2139. doi:10.1007/s10236-011-0474-8.
- Callies, U., Scharfe, M. (2014): *Mean spring conditions at Helgoland Roads, North Sea: Graphical modeling of the influence of hydro-climatic forcing and Elbe River discharge*, J. Sea Res.101, 1-11. doi:10.1016/j.seares.2014.06.008
- Capperucci, R.M., (2013): *Marine habitat mapping: stretching the blue marble on a map*. In: Recent impulses to Marine Sciences and Engineering. From coast to deep sea: multiscale approaches to marine sciences, ed. by Einsporn, M., Wiedling, J., Schöttener, S., DGM and ICBM, 178-189. ISBN 978-3-00-043157-9
- Donadi, S., Eriksson, B. K., Lettmann, K. A., Hodapp, D., Wolff J., Hillebrand, H. (2015): *The body-size structure of macrobenthos changes predictably along gradients of hydrodynamic stress and organic enrichment*. Marine Biology 162:675–685. doi:10.1007/s00227-015-2614-z
- Emeis, K.-C., van Beusekom, J., Callies, U., Ebinghaus, R., Kannen, A., Kraus, G., Kröncke, I., Lenhart, H., Lorkowski, I., Matthias, V., Möllmann, C., Pätsch, J., Scharfe, M., Thomas, H., Weisse, R., Zorita, E. (2015): *The North Sea – A ShelfSea in the Anthropocene*. Journal of Marine Systems. 141, 18-33. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.03.012.
- Gutperlet, R., Capperucci, R. M., Bartholomä, A., Kröncke, I. (2014): *Benthic biodiversity changes in response to dredging activities during the construction of a deep-water port construction*. Mar Biodiv.45, 819-839. doi 10.1007/s12526-014-0298-0
- Herrling, G., Winter, C. (2014): *Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions*. Earth Surface Dynamics, 2, 363-382. doi:10.5194/esurf-2-363-2014
- Herrling, G., Winter, C. (2015): *Tidally- and wind-driven residual circulation at the multiple-inlet system East Frisian Wadden Sea*. Continental Shelf Research, 106, 45–59. doi:10.1016/j.csr.2015.06.001
- Hofmeister, R., Lemmen, C., Kerimoglu, O., Wirtz, K., Nasermoaddeli, M. H. (2014): *The Predominant Processes Controlling Vertical Nutrient and Suspended Matter Fluxes across Domains - Using the New MOSSCO System from Coastal Sea Sediments up to the Atmosphere*. ICHE 2014, Hamburg - Lehfeldt & Kopmann (eds) - © 2014 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-32-8
- Hodapp, D., Kraft, D., Hillebrand, H. (2014): *Can monitoring data contribute to the biodiversity-ecosystem function debate? Evaluating data from a highly dynamic ecosystem*. Biodiversity and Conservation 23(2), 405-419. doi:10.1007/s10531-013-0609-y
- Hodapp, D., Meier, S., Muijsers, F., Badewien, T., Hillebrand, H. A. (2015): *Structural equation modeling approach to the diversity-productivity relationship of Wadden Sea phytoplankton*. Marine Ecology Progress Series, 523, 31-40. doi:10.3354/meps11153

- Holler, P., Markert, E., Hass, H.C., Bartholomä, A., Kröncke, I., Mielck, F. (subm. GMLE): *The influence of the brittle star *Amphiura filiformis* and benthic macrofauna communities on hydroacoustic backscatter*. *GeoMarine Lett.*(subm.)
- Jung, R., Adolph, W., Ehlers, M., Farke, H. (2015): *A multi-sensor approach for detecting the different land covers of tidal flats in the German wadden sea – a case study at Norderney*. *Remote Sensing of Environment*, 170, 188 – 202. doi:10.1016/j.rse.2015.09.018
- Kowalski, N., Dellwig, O., Beck, M., Gräwe, U., Neubert, N., Nögler, T. F. Badewien, T. H., Brumsack, H.-J., van Beusekom, J. E. E., Böttcher, M. E. (2013): *Pelagic molybdenum concentration anomalies and the impact of sediment resuspension on the molybdenum budget in two tidal systems of the North Sea*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 119, 198-211. doi:10.1016/j.gca.2013.05.046
- Kösters, F. and Winter, C. (2014): *Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress*. *Geo-Marine Letters*, 34(1), 21-36. doi:10.1007/s00367-013-0346-y
- Kourafalou, V. H., De Mey, P., Le Hénaff, M., Charria, G., Edwards, C. A., He, R., Herzfeld, M., Pasqual, A., Stanev, E., Tintoré, J., Usui, N., Van Der Westhuysen, A., Wilkin, J., Zhu, X. (2015): *Coastal Ocean Forecasting: system integration and validation*. *Journal of Operational Oceanography*, 7 (3), 129-148. doi:10.1080/1755876X.2015.1022336
- Lehner, S., Pleskachevsky, A. and Bruck, M. (2012): *High resolution satellite measurements of coastal wind field and sea state*, *International Journal of Remote Sensing*, 33 (23), 7337-7360. doi:10.1080/01431161.2012.685975
- März, J., R. Hofmeister, E. M. van der Lee, U. Gräwe, R. Riethmüller, K. W. Wirtz (2016): *Evidence for a maximum of sinking velocities of suspended particulate matter in a coastal transition zone*, *Biogeosciences Discuss.*, doi:10.5194/bg-2015-667
- Markert, E., Holler, P., Kröncke, I., Bartholomä, A. (2013): *Benthic habitat mapping of sorted bedforms using hydroacoustic and ground-Truthing methods in coastal waters of the German Bight*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 129, 94-104. doi: 10.1016/j.ecss.2013.05.027
- Markert, E., Kröncke, I., Kubicki, A. (2015): *Small scale morphodynamics of shoreface-connected ridges and their impact on benthic macrofauna*. *J. Sea Res.* 99: 47-55 doi:10.1016/j.seares.2015.02.001
- Marquard, E., Dauber, J., Doeringhaus, A., Dröschmeister, R., Frommer, J., Frommolt, K.-H., Gemeinholzer, B., Henle, K., Hillebrand, H., Kleinschmit, B., Klotz, S., Kraft, D., Premke-Kraus, M., Römbke, J., Vohland, K., Wägele, W. (2013): *Biodiversitäts-monitoring in Deutschland: Herausforderungen für Politik, Forschung und Umsetzung*, *Natur und Landschaft*, 88 (8), 337-341. ISSN: 0028-0615
- Mielck, F. Hass, H. C., Betzler, C. (2014): *High-resolution hydroacoustic seafloor classification of sandy environments in the German Wadden Sea*. *Journal of Coastal Research*, 30 (6), 1107-1117. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00165.1>
- Mielck, F., Bartsch, I., Hass, H. C., Wölfl, A. C., Bürk, D. and Betzler, C. (2014): *Predicting spatial kelp abundance in shallow coastal waters using the acoustic ground discrimination system RoxAnn*, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 143, 1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.016>
- Mielck, F., Holler, P., Bürk, D., Hass, H.C. (2015): *Interannual variability of sorted bedforms in the coastal German Bight (SE North Sea)*. *Continental Shelf Research* 111, 31-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.016>
- Müller, S., Stanev, E.V., Schulz-Stellenfleth, J., Staneva, J. and W. Koch (2013): *Atmospheric boundary layer rolls: Quantification of their effect on the hydrodynamics in the German Bight*, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 5036–5053, doi:10.1002/jgrc.20388.
- Pein, J. U., Stanev, E. V., Zhang, Y. J. (2014): *The tidal asymmetries and residual flows in Ems Estuary*. *Ocean Dynamics*, 65 (1), 77-92. doi:10.1007/s10236-014-0772-z
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2013): *Water-Land-Classification in Coastal Areas with Full Waveform Lidar Data*, *PFG 2* (2013), 71-81. doi: 10.1127/1432-8364/2013/0159
- Schmidt, A., Niemyer, J., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2014): *Contextual Classification of Full Waveform Lidar Data in the Wadden Sea*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (9), 1614-1618. doi:10.1109/LGRS.2014.2302317

- Stanev, E. S., Al-Nadhairi, R., Staneva, J., Schulz-Stellenfleth, J. and A. Valle-Levinson (2014): *Tidal wave transformations in the German Bight*. Ocean Dynamics 64, 951–968. doi: 10.1007/s10236-014-0733-6
- Stanev, E.V., Schulz-Stellenfleth, J., Staneva, J., Grayek, S., Seemann, J., Petersen, W. (2011): *Coastal observing and forecasting system for the German Bight – estimates of hydrophysical states.*, Ocean Sci. 7, 569-583. doi:10.5194/os-7-569-2011
- Stanev E.V., Al-Nadhairi R. and Valle-Levinson A. (2014): *The role of density gradients on tidal asymmetries in the German Bight*. Ocean Dynamics. doi:10.1007/s10236-014-0784-8.
- Stanev, E., Schulz-Stellenfleth, J. (2014): *Methods of Data Assimilation*. Die Küste, 81, 133-152.
- Staneva, J., Behrens, A., Groll, N. (2014): *Recent Advances in Wave Modelling for the North Sea and German Bight*. Die Küste, 81, 233-254.
- Teeling, H., Fuchs, B.M., Becher, D., Klockow, C., Gardebrecht, A., Bennke, C.M., Kassabgy, M., Huang, S., Mann, A.J., Waldmann, J., Weber, M., Klindworth, A., Otto, A., Lange, J., Bernhardt, J. Reinsch, C., Hecker, M., Peplies, J., Bockelmann, F.D., Callies, U., Gerdts, G., Wichels, A., Wiltshire, K. H., Glöckner, F. O., Schweder, T., Amann, R. (2012): *Substrate-controlled succession of distinct marine bacterioplankton populations induced by phytoplankton bloom*. Science 336 (6081), 608-611. doi: 10.1126/science.1218344
- van Bernem, K.H. (2010): *Die Verschmutzung der Meereslebensräume durch Öl*. In: World Ocean Review, Mit den Meeren leben. Herausgegeben von maribus in Kooperation mit Ozean der Zukunft, Kieler Meereswissenschaften, 92-99. ISBN: 978-3-86648-000-1  
[http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor1/WOR1\\_gesamt.pdf](http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor1/WOR1_gesamt.pdf)
- van Beusekom, J.E.E., Buschbaum, C., Reise, K. (2012): *Wadden Sea Tidal Basins and the Mediating Role of the North Sea in Ecological Processes: Scaling up of Management?*, Ocean & Coastal Management 68, 69-78. doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.05.002
- van Beusekom, J.E.E., de Jonge, V.N. (2012): *Dissolved organic phosphorus: An indicator of organic matter turnover?*, Est. Coast. And Shelf Sci 108, 29-36. doi:10.1016/j.ecss.2011.12.004
- Waldmann, C, Spiesecke, U., Reuter, R., Klinger, M. and Schulz, M. (2012): *A sensor network for long-term monitoring of sediment transport in the coastal region*. Proceedings of Oceans 2012 (Hampton Roads, VA, USA); Preprint, endgültige Publikation in IEEE Xplore. ISBN: 978-1-4673-0829-8; doi: 10.1109/OCEANS.2012.6405068.
- Winter, C., Herrling, G., Bartholomä, A., Capperucci, R., Callies, U., Heipke, C., Schmidt, A., Hillebrand, H., Reimers, C., Bremer, P., Weiler, R. (2014): *Wissenschaftliche Konzepte für ein Monitoring des ökologischen Zustands des deutschen Küstenmeeres*. Wasser und Abfall 07-08/2014; 21-26, DOI: 10.1365/s35152-014-0685-7
- Wirtz K.W. (2013): *How fast can plankton feed? Maximum ingestion rate of planktonic feeders scales with digestive surface area*. Journal of Plankton Research 35, 33 – 48. doi: 10.1093/plankt/fbs075
- Wirtz, K.W, Sommer, U. (2013): *Mechanistic origins of variability in phytoplankton dynamics. Part II: analysis of mesocosm blooms under climate change scenarios*, Marine Biology, 160, 2503–2516. doi:10.1007/s00227-013-2271-z
- Wirtz, K.W. (2013): *Mechanistic origins of variability in phytoplankton dynamics: Part I: niche formation revealed by a size-based model*, Marine Biology, 160, 2319–2335. doi:10.1007/s00227-012-2163-7

### Beiträge in Tagungsbänden

- Bartholomä, A., Holler, P. (2012): *Distribution analysis of subtidal habitats in German Wadden Sea on the base of hydro-acoustic remote sensing data*. Abstract Volume, Tidalites 2012, 8th International Conference on Tidal Environments, Caen, France, July 31 – August 2, 2-9.
- Capperucci, R. M., Holler, P., Kubicki, A., Bartholomä, A. (2013): *Developing new concepts for environmental monitoring: the WIMO Project (Germany)*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, Rome, Italy, May.

- Capperucci, R.M., Adolph, W., Hodapp, D., Jung, R., Schmidt, A., Holler, P., Bartholomä, A., Ehlers, M., Sörgel, U., Hillebrand, H., Farke, H. (2013): *From 630 km to the ground: a new multiscale approach to scientific habitat monitoring of intertidal and subtidal areas*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, Rome, Italy, May.
- Capperucci, R. M., Bartholomä, A. (2012): *Sediment vs Topographic Roughness: Anthropogenic Effects on Acoustic Seabed Classification*. In: Hydro12 - Taking care of the sea, Rotterdam, Netherlands, 13 - 15 November. (Gewinner des Golden Compass Awards)
- Ehlers, M., Klonus, S., Tomowski, D., Michel, U., Reinartz, P. (2010): *Automated Methods for Change Detection*, 30th EARSeL Symposium, Paris, France (CD Publication), 9.
- Ehlers, M., Klonus, S., Tomowski, D., Michel, U., Reinartz, P. (2010): *Automated Change Detection from High-Resolution Remote Sensing Images*, Geospatial Data and Geovisualization, Environment, Security, and Society, ISPRS Comm. IV, Orlando, Florida, USA, (CD Publication) 8.
- Ehlers, M., Tomowski D., Klonus, S. (2011): *Comparison of Automated Change Detection Methods for Disaster Areas*, 31st EARSeL Symposium 2011, Prag, Hungary (CD publication) 8.
- Gutperlet, R., Capperucci, R. M., Reiss, H., Bartholomä, A., Kröncke, I. (2013): *Macrofauna and sediment changes in a construction area*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, Rome, Italy, May.
- Jung, R., Ehlers, M., Klonus, S. (2013): *High Resolution Classification and Change Detection of the German Coastal Tidal Zone using Multisensoral Remote Sensing Data*, Proceedings, 35th ISRSE, Peking, China.
- Klonus, S., Ehlers, M., Schmidt, A., Soergel, U., Adolph, W., Farke, H. (2012): *Change Detection in Wadden Sea Areas Using RapidEye Data*, Proceedings, 32st EARSeL Symposium, Mykonos, Greece.
- Klonus, S., Ehlers, M., Schoof, M., Wohlfart, R., Jarmer, T. (2012): *Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5*, Vorträge, 32. Wissenschaftliche Tagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Publikationen der DGPF, 21, 44-53.
- Klonus, S., Tomowski, D., Ehlers, M., Wohlfahrt, R. (2011): *Potential of Rapideye image data for Wadden Sea monitoring*, Proceedings of 31st EARSeL Symposium 2011, Prague, Hungary.
- Markert, E., Holler, P., Kröncke, I., Bartholomä, A. (2013): *The influence of benthic macrofauna on hydroacoustic methods*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, Rome, Italy, May.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2011): *Untersuchung zur Erkennung von Wasserflächen in Full-Waveform-Laserscanner-Daten*. In: DGPF Tagungsband 20/2011, 391-398, Mainz, April.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2011): *Detection of Water Surfaces in Full-Waveform Laser Scanning Data*. In: IntArchPhRS vol. XXXVIII-4/W19, 6, Hannover, Germany
- Schmidt, A., Adolph, W., Klonus, S., Ehlers, M., Farke, H., Soergel, U. (2012): *Potential of Airborne Laser Scanning Data for Classification of Wadden Sea Areas*, 32st EARSeL Symposium, 8, Mykonos, Greece
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2012): *Classification of Airborne Laser Scanning Data in Wadden Sea Areas Using Conditional Random Fields*. 22th Congress of ISPRS, 6, Melbourne, Australia.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2013): *Monitoring concepts for coastal areas using lidar data*, In: IntArchPhRS vol. XL-1/W1, 6, Hannover, Germany.
- Schmidt, A., Soergel, U. (2013): *Lidar data for classification and scientific monitoring in coastal areas*, In: Proceedings of Coastal Dynamics 2013, 1473-1482, June 25-28, Arcachon, France.
- Schmidt, A., Soergel, U. (2013): *Monitoring and change detection of Wadden Sea areas using Lidar data*. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W2, 2013, ISPRS2013-SSG, 11-17 November, Antalya, Turkey
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Sörgel, U., Heipke, C. (2014): *Extraction of fluvial networks in lidar data using marked point processes*. In: IntArchPhRS Vol. XL-3, 297-304, ISPRS Technical commission III Symposium, Zurich, Switzerland, September,

- Schmidt, A.; Rottensteiner, F.; Soergel, U.; Heipke, C. (2015): *A Graph Based Model for the Detection of Tidal Channels using Marked Point Processes*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 115-121.
- Tomowski, D., Klonus, S., Ehlers, M., Michel, U., Reinartz, P. (2010): *Change Visualization through a Texture-Based Analysis Approach*, in: Wagner W., B. Székely (eds.): ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7A, 263-268, Wien, Austria

## Berichte

- Behre, T., Giebel, N., Gräuler, S., Hütten, L., Lüttmann, S., Mescheder, A., Sandmann, M., Schiller, I., Schoof, M., Ströer, D., Thielscher, M., Wohlfahrt, R. (2012): *Umsetzungsmöglichkeiten von Change-Detection-Verfahren mit vorverarbeiteten RapidEye-Daten im Rahmen der WIMO-Projekte*, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, 128 S.
- Callies, U. (2012): *Langzeitmodellierung zur Abschätzung von Trends und Risiken von Ölverschmutzungen*. In: Öl im Meer, Risiken, Vorsorge und Bekämpfung, Berichte des BSH 48, S. 96-101. [http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte\\_/Bericht48/Bericht48.pdf](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht48/Bericht48.pdf)
- Jung, R. (2013): *4. Zwischenbericht zum Projekt: "Hochgenaue Klassifizierung und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten"*, DLR-Resabericht, Universität Osnabrück.
- Klonus, S. (2010): *1. Zwischenbericht zum Projekt: "Hochgenaue Klassifizierung und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten"*, DLR-Resa-Bericht, Universität Osnabrück.
- Klonus, S. (2011): *2. Zwischenbericht zum Projekt: "Hochgenaue Klassifizierung und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten"*, DLR-Resa-Bericht, Universität Osnabrück.
- Klonus, S. (2012): *3. Zwischenbericht zum Projekt: "Hochgenaue Klassifizierung und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten"*, DLR-Resabericht, Universität Osnabrück.
- Klonus, S., Ehlers, M. (2012): *Potential von RapidEye Bilddaten für das Wattenmeer-monitoring*, In: E. Borg, H. Daedelow & R. Johnson (Ed.): In RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt, GITO.
- Klonus, S., Tomowski, D., Ehlers, M. (2010): *Hochgenaue Klassifizierung und Feststellung von Veränderungen im Wattenmeer durch Fusion und integrierte Auswertung multisensoraler Fernerkundungsdaten*. DLR-Resa-Bericht, Universität Osnabrück.
- Klonus, S., Tomowski, D., Ehlers, M., Michel, U., Reinartz, P. (2011): *Change Detection mittels Fourieranalysen, segment- sowie texturbasierten Methoden*, gi-reports@igf, Band 14, 77 S.
- van Bernem, K.H. (2012): *Sensitivitäten von Meeresküsten*. In: Öl im Meer, Risiken, Vorsorge und Bekämpfung, Berichte des BSH 48, 50-57. [http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte\\_/Bericht48/Bericht48.pdf](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht48/Bericht48.pdf)

## WIMO Vorträge und Poster

- Ein *Übersichtsposter* erklärt das Projekt WIMO und wurde bei verschiedenen Tagungen gezeigt (z.B. KüNO Jahrestagung (Warnemünde, Jun 2014) Estuarine Systems Workshop, COSYNA Workshop, Nov, Hamburg, Germany).
- Adolph, W. (2011): *Benthos monitoring and remote sensing in the Nationalpark Wadden Sea Lower-Saxony*, 3rd Korea-Waddensea Joint Monitoring Workshop, Sep 26-30, University of Mokpo, Korea
- Adolph, W. (2011): *Monitoring tidal flats for management - can satellite data replace aerial photography?*, GMES Thementage Nov 24-25, Munich, Germany
- Adolph, W. (2011): *Satellitenfernerkundung im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer*, EOC Symposium 2011, Oct 10-12, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany

- Adolph, W., Farke, H. (2015): *Distribution and dynamics of intertidal geo-morphological structures and habitats – TerraSAR-X data for environmental monitoring of the Wadden Sea (WIMO)*. ISRSE 2015, The 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, May 11-15, Berlin, Germany
- Bartholomä, A. (2013): *WIMO: developing new scientific concepts for marine habitat mapping in the Wadden Sea. An Overview*. International seminar “Assessing progress in marine spatial planning”, Sep 9-10, Delmenhorst, Germany
- Bartholomä, A., Capperucci, R.M., Holler, P. (2013): *Habitat assessment with remote sensing in the eulitoral and sublitoral zone*. 32. Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten, Apr 3-6, Wilhelmshaven, Germany
- Bartholomä, A. and Holler, P. (2012): *Distribution analysis of subtidal habitats in German Wadden Sea on the basis of hydro-acoustic remote sensing data*. Abstract Volume, Tidalites 2012, 8<sup>th</sup> International Conference on Tidal Environments, Jul 31- Aug 2, Caen, France
- Bartholomä, A., Holler, P., Schrottke, K., Kubicki, A. (2011): *Acoustic habitat mapping in the German Wadden Sea – Comparison of hydro-acoustic devices*. International Coastal Symposium, May 9-14, Stettin, Polen.
- Binder, K., & Reimers, H.-C. (2014): *EU Directives and WIMO*. WaLTER - WIMO workshop, Jan 22-23, Delmenhorst, Germany
- Bockelmann, F., Callies, U., van Bernem, K.-H. (2013): *Assessment modeling of dispersant operation using Lagrangian particle tracking within a GIS-framework*. ASLO Aquatic Sciences Meeting, Feb 17-22, New Orleans, USA
- Bockelmann, F., Schwichtenberg, F., Callies, U. (2013): *Modelling of transport across tidal basins*. Workshop: Relevance of Wadden Sea Tidal Basins for policy and management, Nov 21, Delmenhorst, Germany
- Bürk, D., Heinecke, M., Vorberg, R., Hass, H. C. and Riethmüller, R. (2010): *Seafloor sediment classification in a tidal inlet channel: The influence of shell debris and seafloor rugosity*. – GEOHAB 2010, Wellington, New Zealand.
- Bürk, D., Hass, H.C., Mielck, F., Bartholomä, A., Holler, P., Reimers, H.C., Kröncke, I. and Markert, E. (2011): *Seafloor classification of a gully system offshore the island of Sylt (NW Germany)*, Poster Presentation, GEOHAB 2011, May 3 - 6, Helsinki, Finland
- Bürk, D., Heinecke, M., Peters, B. (2011): *Meeresboden Substrat-Klassifizierung mit Fächerecholoten*. Vortrag, Kongsberg Flachwasser-Symposium, Sep 13-15, Lingen/Ems, Germany
- Bürk, D., Hass, H. C., Mielck, F., Bartholomä, A., Holler, P., Reimers, H.-C. (2012): *Classification of multibeam data for seafloor management*. GV-Sediment, Sep, Hamburg, Germany
- Callies, U. (2010): *Langzeitmodellierung zur Abschätzung von Trends und Risiken von Ölverschmutzungen*. Symposium „Öl im Meer“, Nov 17-19, 2010, Hamburg, Germany
- Callies, U. (2013): *Analysis of interaction structures in multivariate observations and corresponding model simulations*. Workshop North Sea and Wadden Sea modelling. NIOZ Texel, Jan 9, Texel, Netherlands
- Callies, U. (2014): *On the use of graphical models for merging statistical analyses and causal concepts for management purposes*. ICES-ECOKNOWS-Symposium, Jun 2-4, Porvoo, Finland
- Callies, U. (2014): *Oil spill forecasts and other applications of coastDat*. Workshop on Biogeochemistry of coastal zone, Oct 15-18, Yantai, China
- Callies, U. (2014): *Fingerprinting Helgoland Roads data – Parameter interactions driven by hydro-climatic forcing*. Kolloquium BAH-Helgoand, Jul 17, 2014
- Capperucci, R. M., Holler, P., Kubicki, A., Bartholomä, A. (2013): *Developing new concepts for environmental monitoring: the WIMO Project (Germany)*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, May, Rome, Italy



- Capperucci, R.M., Adolph, W., Hodapp, D., Jung, R., Schmidt, A., Holler, P., Bartholomä, A., Ehlers, M., Sörgel, U., Hillebrand, H., Farke, H. (2013): *From 630 km to the ground: a new multiscale approach to scientific habitat monitoring of intertidal and subtidal areas*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, May, Rome, Italy
- Chang Soo, S. (2013): *Evolution of barrier island systems*. HWK fellow lectures series, Dec 4, 2013, Delmenhorst, Germany
- Dammrich, T. (2011): *Effects of Nutrient Deficiency, Bacterial Communities and Ocean acidification on SPM Dynamics*. - An Introduction to my PhD Project, Aug 2011, Stony Brook University, New York, USA
- Dammrich, T., van Beusekom, J., Engel, A. (2012): *Aggregate formation and settling velocity of natural phytoplankton assemblages during spring bloom: Preliminary results from Sylt-Rømø-Basin*, IWOMA
- Dammrich, T., van Beusekom, J.E.E., Engel, A. (2013): *Aggregate formation of natural phytoplankton assemblages during spring bloom in a temperate shallow tidal basin*. ASLO, Feb, New Orleans, USA
- Dammrich, T. (2013): *Aggregate formation and sinking velocities of natural phytoplankton assemblages during spring bloom in a temperate shallow tidal basin*. ASLO Meeting, Feb, New Orleans, USA
- Dammrich, T., van Beusekom, J.E.E., Engel, A. (2013): *Aggregate formation of natural phytoplankton assemblages during spring bloom in a temperate shallow tidal basin*. Danish Technical University Summerschool' From bloom to gloom – Primary production, food web and vertical flux in changing ocean', Aug, Iceland
- Dammrich, T., van Beusekom, J.E.E., Engel, A. (2014): *Characteristics of marine aggregates during the phytoplankton spring bloom in a temperate tidal*, Ocean Science Meeting, Honolulu, Hawaii, USA
- Dammrich, T., van Beusekom, J., Engel, A. (2014): *Aggregate formation of natural phytoplankton assemblages during spring bloom 2012 in the Sylt-Rømø-Bight*, C-Seminar, AWI Bremerhaven, Germany
- Ehlers, M. (2010): *Automated Change Detection from High-Resolution Remote Sensing Images, Geospatial Data and Geovisualization*, Environment, Security, and Society, ISPRS Comm. IV, Orlando, Florida, USA
- Ehlers, M. (2010): *Automated Methods for Change Detection*, EARSeL Symposium 2010, Paris, France
- Ehlers, M. (2010): *Späher im All oder Lösungen auf der Suche nach Problemen: Zur Rolle der Fernerkundung im Küstenbereich*, Symposium Geoinformation für die Küstenzone, Oct 6, Hamburg, Germany
- Ehlers, M. (2010): *Unsere Augen im All – Möglichkeiten und Grenzen moderner Fernerkundung*, Keynote Vortrag, Arbeitskreis Fernerkundung der Deutschen Gesellschaft für Geographie, Pädagogische Hochschule Heidelberg, Germany
- Ehlers, M. (2010): *Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht (WIMO)*, Eingeladener Vortrag, Geoinformatik 2010 'Die Welt im Netz', Mar 18, Kiel, Germany
- Ehlers, M. (2011): *Neue Möglichkeiten durch neue Sensoren und Methoden*, GiN-Forum Neue Sensoren für die Landschaftserfassung und -planung, Osnabrück, Germany
- Ehlers, M. (2012): *Comparison of Automated Change Detection Methods from Very High Resolution Remote Sensing Images*, 1. Workshop Special Interest Group of Temporal Analysis, May 24, Mykonos, Greece
- Ehlers, M., Tomowski, D., Klonus, S. (2011): *Comparison of Automated Change Detection Methods for Disaster Areas*, 31st EARSeL Symposium, Prague, Czech Republic
- Ehlers, M. (2011): *VHR Remote Sensing: Automation in Image Fusion and Change Detection*, Keynote Address, International Conference on Sensors and Models in Photogrammetry and Remote Sensing (SMPR), Teheran, Iran

- Farke, H., Adolph, W. (2014): *Application of satellite remote sensing techniques for monitoring large scale surface structures and habitats in the World Heritage Site "The Wadden Sea"*, Huangshan Dialogue on Space Technologies for World Heritage Sites, Biosphere Reserves and Geoparks, May 28, Huangshan, China
- Geimecke, C. (2013): *Hydro- and Sediment Dynamics to Wave, Tidal and Atmospheric Forcing*, YOUMARES, Sep, Oldenburg, Germany
- Geimecke, C. (2013): *Regional differences in the German Bight and East Frisian Wadden Sea due to Wave and Tidal Forcing*, KSD Seminar, Mar, Celle, Germany
- Geimecke, C. (2014): *The impact of wind forcing on the circulation of the German Bight*.KSD-Seminar, Feb, Stade, Germany
- Geimecke, C. (2014): *Der Einfluss des Windes auf die Zirkulation in der Deutschen Bucht*, WIMO-Projekttreffen HWK, May, Delmenhorst, Germany
- Gutperlet, R., Capperucci, R. M., Reiss, H., Bartholomä, A., Kröncke, I. (2013): *Macrofauna and sediment dynamics in a construction area*. GEOHAB 2013, International Conference on Marine Geological and Biological Habitat Mapping, May, Rome, Italy
- Hass, H.C., Lindhorst, S., Kuhn, G., Mielck, F., Wittenberg, N., Wölfl, A. and Betzler, C. (2010): *Dynamics of the Sylt-Rømø basin and the adjacent North Sea, and a view to the Polar areas*, ECSA Conference 46, May 6, List, Germany
- Hass, C. (2012): *Seafloor classification using RoxAnn ground-discrimination system and a new tool for visualization and classification*. GV-Sediment, Sep, Hamburg, Germany
- Hass, H.C., Bartholomä, A., Bürk, D., Holler, P., Mielck, F. and Reimers, H.C. (2012): *Hydroacoustic seafloor classification in the SE North Sea*.- Poster Presentation, EGU 2012, Apr 22 - 27, Vienna, Austria
- Hass, H.C., Bartholomä, A., Bürk, D., Holler, P., Mielck, F. and Reimers, H.C. (2012): *Hydroacoustic seafloor classification in the SE North Sea*. Geophysical Research Abstracts 14, EGU2012-13612
- Hass, H.C., Bartholomä, A., Bürk, D., Holler, P., Mielck, F. and Reimers, H.C. (2013): *Scientific concepts for hydroacoustic seafloor mapping in the coastal zone and beyond*. Geophysical Research Abstracts, EGU2013
- Hass, H.C., Bartholomä, A., Bürk, D., Holler, P., Mielck, F. and Reimers, H.C. (2013): *Scientific concepts for hydroacoustic seafloor mapping in the coastal zone and beyond*. - Geophysical Research Abstracts, EGU 2013
- Hass, H. C., Bartholomä, A., Bürk, D., Holler, P., Mielck, F. and Reimers, H. C. (2013): *Scientific concepts for hydroacoustic seafloor mapping in the coastal zone and beyond*, EGU General Assembly 2013, Apr 7-12, Vienna, Austria
- Heinrich, C., Mielck, F., Feldens, P., and Schwarzer, K. (2012): *Identification of Lanica conchilega reefs by side scan sonar mapping and RoxAnn echo sounder data offshore Sylt Island, North Sea*. GV-Sediment, Sept, Hamburg, Germany
- Heinrich, C., Reimers, H.-C., Schwarzer, K. (2013): *Seafloor classification in context of the Marine Strategy Framework Directive*. – Poster auf der GEOHAB 2013, May, Rome, Italy
- Herrling, G., Winter C. (2012): *The effect of high-energy events on ebb-tidal delta sedimentology and morphology - A process-based model study*. 8th International Conference on Tidal Environments (TIDALITES), Jul 31 - Aug 2, Caen, France
- Herrling, G., Winter C. (2012): *Morphological Response of Shoreface-Connected Ridges to High-Energy Hydrodynamic Conditions*.The Physics of Estuaries and Coastal Seas Symposium (PECS), Aug 12-16, New York City, USA
- Herrling, G., Winter C. (2013): *Barrier island inlet dynamics and ebb-tidal delta sediment bypassing under high-energy storm and fair-weather conditions*. 8th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Jun 09-13, Santander, Spain

- Hillebrand, H. (2012): *Der Nutzen von Monitoringdaten zur Analyse struktureller und funktioneller Veränderungen in aquatischen Ökosystemen*. Workshop Biodiversitätsmonitoring 2020, Ne-Fo, Berlin, Germany
- Hillebrand, H. (2013): *Assessment of marine systems*. Vorbereitungstreffen zur 2. Vollversammlung, Intergovernmental Science Platform on Biodiversity & Ecosystem Services (IPBES), Bonn, Germany
- Hillebrand, H. (2012): *Linking biodiversity change to ecosystem functions – from general concepts to applied issues*. International Wadden Sea Symposium, Leeuwarden, Netherlands
- Hillebrand, H. (2014): *Biodiversity and Ecosystem Function*, Informationstreffen IOW und ICBM, Jan 15-16, Oldenburg, Germany
- Hillebrand, H. (2014): *Biodiversitätsforschung auf Spiekeroog – Motivation, Relevanz und Perspektive*, Aug, Spiekeroog, Germany
- Hillebrand, H. (2014): *40 Jahre Umweltschutz – Artenvielfalt und ihr Schutz in marinen Ökosystemen*, Sep, Wittmund, Germany
- Hillebrand, H. (2014): *Von Artenvielfalt und Stabilität in der Ökologie und im Naturschutz*. Schlaues Haus, Nov, Oldenburg, Germany
- Hillebrand, H. (2014): *Das Wattenmeer- ein einzigartiger Lebensraum*, Mar, Oldenburg, Germany
- Hodapp, D. (2011): *Biodiversity and Ecosystem Functioning – A case study from the German Wadden Sea*. EEF (European Ecological Federation) Congress 2011, Avila, Spain
- Hodapp, D. (2011): *Biodiversity and Ecosystem Functioning – A case study from the German Wadden Sea*. International Symposium on the Ecology of the Wadden Sea, Texel, Netherlands
- Hodapp, D. (2011): *Biodiversity and Ecosystem Functioning*; YouMares, Bremerhaven, Germany
- Hodapp, D. et al. (2013): *Can monitoring data contribute to the BEF discussion? Linking biodiversity-ecosystem function theory to reality using structural equation models*, International Congress of Ecology (IntECOL), London, UK
- Hofmeister, R. (2012): *Ökosystemmodellierung am HZG*. 12.11.2012 Treffen des HZG mit LLUR Schleswig-Holstein, Germany
- Hofmeister, R. (2012): *Schwebstoff und Eutrophierung*. Treffen am HZG mit dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Jun 12
- Hofmeister, R., Schartau, M., Flöser, G., Riethmüller, R., Wirtz, K. (2012): *Towards a consistent description for dynamics of plankton, suspended matter and nutrients*. Tag der Küste, May 8, Geesthacht, Germany
- Hofmeister et al. (2014): *Einfluss von Wassertiefe und benthischer Fauna auf simulierte vertikale Stoffflüsse*, Küno Jahrestagung, Jun 19, Warnemünde, Germany
- Holler, P. (2010): *Präsentation des WIMO Projektes* beim Tag der Deutschen Einheit 2010 in Bremen auf FK "Senckenberg" sowie bei der Nacht der Museen in Frankfurt, Germany
- Holler, P., Bartholomä, A. (2010): *Shallow water habitat mapping of the Lower Saxony Wadden Sea using acoustic classification methods*: Hydro\_2010, Nov 3-5, Rostock, Germany
- Holler, P., Markert, E. (2011): *Scientific Monitoring Concepts for the German Bight (WIMO): Mapping of subtidal habitats using hydroacoustic methods*. SaM – Kolloquium, Nov 15, Wilhelmshaven, Germany
- Holler, P., Markert, E., Bartholomä, A. (2012): *Habitat Mapping in the German Bight using hydroacoustic methods: Influence of benthic Macrofauna*. GV-Sediment Meeting, Sep, Hamburg, Germany
- Jung, R., Ehlers, M., Klonus, S. (2013): *High Resolution Classification and Change Detection of the German Coastal Tidal Zone using Multisensoral Remote Sensing Data*, In: Proc. ISRSE 35, Apr 21-26, Beijing, China
- Jung, R., Ehlers, M., Klonus, S. (2013): *High Resolution Remote Sensing Images for Tidal Lands Change*, In: YOUMARES4, Aug 11-13, Oldenburg, Germany

- Jung, R., Ehlers, M. (2014): *Multisensorale Fernerkundung zur Klassifikation und Veränderungsanalyse im Deutschen Wattenmeer*, Poster, RESA Workshop, Mar 5-6, Bonn, Germany
- Jung, R., Ehlers, M. (2014): *A multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach to quantify change in the German tidal flats*, IntensC Workshop, May 27-28, DLR Oberpfaffenhofen, Germany
- Jung, R., Ehlers, M. (2014): *A hierarchical classification of the German tidal flats using a multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach*, In: Proc. EaRSEL Symposium 34<sup>th</sup>, Jun 16-20, Warsaw, Poland
- Klonus, S. (2010): *Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5*, 32. Wissenschaftliche Tagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Potsdam, Germany
- Klinger, M., Spiesecke, U., Waldmann, C., Schulz, M., Reuter, R. (2013): *A Sensor Network for Monitoring the Dynamics of Sediment Transport*. 6th EARSEL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Jun 5-7, University of Basilicata, Matera, Italy
- Klonus, S. (2010): *Vorstellung des Projektes Nordseemonitoring, 2. Nutzerworkshop RESA – Daten für die Wissenschaft – Erste Erfahrungen*, Mar 25, Neu-Strelitz, Germany
- Klonus, S. (2011): *Potential of Rapideye image data for Wadden Sea monitoring*, 31st EARSEL Symposium, Jun 3, Prague, Czech Republic
- Klonus, S. (2012): *Change Detection in Wadden Sea areas using RapidEye data*, 32nd EARSEL Symposium, May 22, Mykonos, Greece
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2010): *Pleistocene relicts and highly mobile bedforms in the coastal North Sea west off Sylt, Amrum, and Rømø (Germany, Denmark)*, Sediment 2010, Jun 25 - 27, Potsdam, Germany
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2010): *Dynamic Bedforms in the Coastal North Sea West off Sylt, Amrum, and Rømø (Germany, Denmark)*, ECSA Conference 46, The Wadden Sea: Changes and Challenges in a World Heritage Site, May 3 - 6, List/Sylt, Germany
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2010): *Pleistocene relicts and highly mobile bedforms in the coastal North Sea west off Sylt, Amrum, and Rømø (Germany, Denmark)*, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 72. (Abstract)
- Mielck, F. (2011): *Surface sediment distribution and stable channel systems west off Sylt (North Sea, Germany)*. – AWI PhD days 2011, Helgoland, Germany
- Mielck, F. und Hass, H.C. (2011): *Detection of sediment distribution and dynamic bedforms using hydroacoustic means in the Sylt-Rømø Basin (Germany, Denmark)*. Sediment 2011, Jun 23-26, Leipzig, Germany
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2011): *Detection of sediment distribution and dynamic bedforms using Hydroacoustic means in the Sylt-Rømø Basin (North Sea; Germany, Denmark)*, Sediment 2011, Jun 23, Leipzig, Germany (Abstract)
- Mielck, F., Bartsch, I., Bürk, D. and Hass, H.C. (2012): *Detection of Kelp Vegetation off Helgoland (SE North Sea) Using the Acoustic Ground-Discrimination System RoxAnn*, GV & Sediment Meeting, Sep 23–28, Hamburg, Germany (Abstract)
- Mielck, F. (2012): *Case study: Sediment dynamics in the Sylt-Rømø basin and the adjacent North Sea: detected with acoustic methods*, Summer School - Challenges in Changing Coastal Seas, Jul 5-19, List/Sylt, Germany (Abstract)
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2012): *Seafloor classification using hydroacoustic methods in the shallow coastal North Sea*, AGU Fall Meeting, 3 Dec 2012 - 7 Dec 2012. (Abstract)
- Mielck, F. (2012): *Seabed habitats and subaqueous dunes in the Sylt-Rømø Basin (German Wadden Sea) – Detection and mapping using hydroacoustics means*. – AWI PhD days 2012, Sylt, Germany
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2012): *Mapping Seabed Habitats and Dynamic Bedforms using Hydroacoustic Discrimination (Sidescan Sonar and RoxAnn) in the Sylt-Rømø Basin (Germany, Denmark)*, EGU 2012, Apr 22 - 27, Vienna, Austria.

- Mielck, F., Bartsch, I., Bürk, D. and Hass, H.C. (2012): *Detection of Kelp Vegetation off Helgoland (SE North Sea) using the Acoustic Ground-Discrimination System RoxAnn*. GV-Sediment Meeting, Sep, Hamburg, Germany
- Mielck, F. Hass, H. C. (2012): *Seafloor classification using hydroacoustic methods in the shallow coastal North Sea*. American Geophysical Union Fall Meeting, Dec, San Francisco, USA
- Mielck, F. (2012): *Case study: Sediment dynamics in the Sylt-Rømø basin and the adjacent North Sea detected with acoustic methods*, Summer School - Challenges in Changing Coastal Seas, List/Sylt, 5 Jul 2012 - 19 Jul 2012
- Mielck, F. und Hass, H.C. (2012): *Mapping seabed habitats and dynamic bedforms using hydroacoustic discrimination (sidescan sonar and RoxAnn) in the Sylt-Rømø Basin (Germany, Denmark)*.-Geophysical Research Abstracts 14, EGU2012-9535
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2013): *Area-wide seafloor mapping in the SE North Sea using hydroacoustics*. EGU General Assembly 2013, Apr 7-12, Vienna, Austria
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2014): *Hydroacoustic monitoring of sorted bedforms west of Sylt (SE North Sea) – Interannual variabilities during five years*. Geophysical Research Abstracts, EGU2014
- Mielck, F. and Hass, H.C. (2014): *Hydroacoustic monitoring of sorted bedforms west of Sylt (SE North Sea) – Interannual variabilities during five years*. EGU General Assembly 2014, Apr 27 – May 02
- Mielck, F., Hass, C. and Papenmeier, S. (2014): *Mapping and monitoring of dynamic seafloor features with hydroacoustic devices in sandy coastal areas*, AGU Fall Meeting, Dec 15 – 19, San Francisco, USA
- Phillipart, K., Farke, H. et al. (2013): *Remote sensing based monitoring of the Wadden Sea*; Netherlands Space Office, Jan 17, Den Haag, Netherlands
- Reimers, H.-C. (2012): *Vorstellung des WIMO-Kataloges zu Monitoringkonzepten: Beiträge zu den EU-Richtlinien MSRL, WRRL und FFH*. FuE-Workshop über MSRL-relevante Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, Nov 26-27, Delmenhorst, Germany
- Reimers, H.-C. (2014): *Meeresbodenklassifizierung im Kontext der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie*. 28. Hydrographentag, Jun 2-4, Lübeck, Germany
- Reuter, R.(2012): *Fernerkundung der Ozeane mit aktiven und passiven Verfahren*. Kolloquium des Instituts für Angewandte Physik, Feb 7, TU Darmstadt, Germany
- Reuter, R. (2010): *Hydrographie der Deutschen Bucht. Von kurzfristigen Prozessen zu langfristigen Trends*. Geodätisches Kolloquium der FH Oldenburg, Jun 10, Germany
- Reuter, R. (2012): *The role of the oceans in climate change*. Beitrag zur AWI Sommerschule, Challenges in Coastal Seas', Jul 5-19, Wattenmeerstation List/Sylt, Germany
- Ryabov, A. (2014): *Biodiversity effects on ecosystem productivity - a competition model, "Networks on networks" workshop*, Sep, Göttingen, Germany
- Ryabov, A. (2014): *Biodiversity effects on ecosystem productivity - a competition model*, Kellogg Biological Station seminar, Michigan State University (Nov 2014)
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U.(2011): *Untersuchung zur Erkennung von Wasserflächen in Full-Waveform-Laserscanner-Daten*. DGPF-Jahrestagung, Apr 15, Mainz, Germany
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2011): *Detection of Water Surfaces in Full-Waveform Laser Scanning Data*. ISPRS Hannover Workshop, Jun 14-17, Hannover, Germany
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2012): *Classification of Airborne Laser Scanning Data in Wadden Sea Areas Using Conditional Random Fields*. 22th Congress of ISPRS, Aug 25 - Sep 1, Melbourne, Australia
- Schmidt, A., Adolph, W., Klonus, S., Ehlers, M., Farke, H., Soergel, U. (2012): *Potential of Airborne Laser Scanning Data for Classification of Wadden Sea Areas*, 32st EARSeL Symposium, May 22, Mykonos, Greece
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2013): *Monitoring concepts for coastal areas using lidar data*, ISPRS Hannover Workshop, May 22, Hannover, Germany

- Schmidt, A., Soergel, U. (2013): *Lidar data for classification and scientific monitoring in coastal areas*, Coastal Dynamics 2013, Jun 25-28, Arcachon, France
- Schmidt, A., Soergel, U. (2013): *Monitoring and change detection of Wadden Sea areas using Lidar data*. ISPRS2013-SSG, Nov 15, Antalya, Turkey
- Schmidt, A., Heipke, C., Soergel, U.(2014): *Änderungsanalysen im deutschen Wattenmeer mittels luftgestützter Laserscandaten*. DGPF-Jahrestagung 2014, Mar 28, Hamburg, Germany
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., Sörgel, U., Heipke, C. (2014): *Extraction of fluvial networks in lidar data using marked point processes*. In: IntArchPhRS Vol. XL-3, 297-304, ISPRS Technical commission III Symposium, Sep, Zurich, Switzerland,
- Schmidt, A.; Rottensteiner, F.; Soergel, U.; Heipke, C. (2015): *A Graph Based Model for the Detection of Tidal Channels using Marked Point Processes*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 115-121.
- Schulz-Stellenfleth, J., Stanev, E. and J. Staneva (2013): *New approaches for the assimilation of HF radar data in the German Bight*. The Future of Operational Oceanography 2013, Congress Centre Hamburg (CCH), Oct 8 – 10, Germany
- Schwichtenberg, F., Callies, U. (2014): *Risk analysis of assumed nearshore oil spills: Drift simulations using model based long-term reconstructions of meteo-marine conditions*, ICES-ECOKNOWS-Symposium, Jun 2– 4, Porvoo, Finland,
- Stanev, E. (2012): *Recent developments in the European coastal observing and forecasting systems: FIELD-AC and future trends*, COSS-TT International Coordination workshop - 2 (ICW-2), Feb 4-7, Lecce, Italy
- Stanev, E., Joseph Zhang, Y., Grashorn, S., Koch, W., Pein, J., Jacob, B. (2014): *Downscaling to Study Straits, Inlets and Tidal-Bays Dynamics: Unstructured Grid Model Simulations in the North and Baltic Seas*. COSS-TT Puerto Rico
- Staneva J. (2011): *A Nested Grid Circulation Model for the German Bight*, IUGG Melbourne, Jul, Australia
- Staneva, J. (2011): *Assimilation of HF radar data into a 3D primitive equation model to improve forecasts of the circulation in the German Bight*, EGU Wien, Apr, Austria,
- Staneva, J. (2012): *Coastal Ocean State Estimates and Forecasts based on HF Radar Data*, EGU Wien, Apr, Austria
- Staneva, J. (2012): *Prediction of Ocean State Estimate by assimilation of temperature and salinity data. A case study for the southern North Sea*, JONSMOD Workshop Brest, May, France
- Staneva, J. (2013): *Response of the German Bight Hydro and Sediment Dynamics to Wave, Tidal and Atmospheric Forcing*, WIMO Modelling Workshop, Oct, Bremen, Germany
- Staneva, J. (2013): *Wave-, Hydro- and Sediment- Dynamics in the German and Wadden Seas: A Focus on Observations and Numerical Modelling*, ICBM Seminar, Mar, Oldenburg, Germany
- Staneva, J., Wahle, K. (2014): *Response of the German Bight Hydro and Sediment Dynamics to Wave, Tidal and Atmospheric Forcing*, GODAE Ocean View Coastal & Shelf Seas Task Team, 3rd International Coordination Workshop COSTT-TT, Jan
- Staneva, J. et al. (2014): *Wave-, Hydro- and sediment- dynamics in the German Bight and Waden Seas. A focus on observations and numerical modelling*, Ocean Science Meeting, Feb
- Staneva, J., Wahle, K. (2014): *Coupling of wave and circulation models in coastal-ocean predicting systems: A case study for the German Bight Ocean-Wave interaction Meeting*, May, Reading, UK
- Staneva, J. et al. (2014): *Coupling of wave and circulation models in coastal-ocean predicting systems: A case study for the German Bight*. WISE 2014, Jun 8-12
- Staneva, J. et al. (2014): *Coupling of wave and circulation models in coastal-ocean predicting systems: A case study for the German Bight*. MOSD, Sep, Toulouse, France
- Staneva, J. et al (2014): *Recent Advances in the Modelling of Wave Climate Projections and Scenario for the North Sea*. CowCLIP Workshop, Oct, Paris, France

- Tomowski, D. (2010): *Change Visualization through a Texture-Based Analysis*, ISPRS Comm. VII Symposium, Wien.
- Tomowski, D. (2010): *Posterpräsentation am Institut für Geoinformatik und Fernerkundung*, May 8, Osnabrück, Germany
- van Bernem, K.-H. (2010): *Sensitivität von Küstenformen*. Symposium "Öl im Meer", Hamburg, Germany
- van Beusekom, J. und WIMO-Partner (2012): *SPM and Eutrophication: integrating observations and models*. BSH, May 10, Hamburg, Germany
- van Beusekom, J.E.E., de Jonge, V.N. (2013): *Similar patterns of summer chlorophyll dynamics in the European Wadden Sea: decreasing averages but constant relative variability*. ECSA 53, Oct 13-17, Shanghai, China
- van Beusekom, J.E.E., Geimecke, C., Staneva, J., Hofmeister, R., Wirtz, K. (2013): *Regional differences in nutrient dynamics: can import of SPM explain this?* PACE Project Meeting, Apr, Geesthacht, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Geimecke, C., Staneva, J., Hofmeister, R., Wirtz, K. (2013): *Eutrophierung im Wattenmeer*, LTER-D Jahrestagung, Apr, Eisenach, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Dammrich, T., Geimecke, C., Hofmeister, R., Staneva, J., Wirtz, K. (2013): *Die Rolle der Schwebstoffe für die Eutrophierung des Wattenmeers: Ergebnisse des WIMO-Projektes*. 23. Umweltsymposium, Jun 12-13, Hamburg, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Geimecke, C., Staneva, J., Hofmeister, R., Wirtz, K. (2013): *Regional differences in nutrient dynamics: can import of SPM explain this?* Treffen mit dem NLWKN an dem HZG, Nov
- van Beusekom, J.E.E., Geimecke, C., Staneva, J., Hofmeister, R., Wirtz, K. (2013): *Tidal Basins and Eutrophication: What explains regional differences?* HWK Tidal Basin Worskhop, Nov 21, Delmenhorst, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Wirtz, K., Staneva, J., Hofmeister, R., Geimecke, C. (2014): *Regional differences and long-term trends in the Eutrophication of the European Wadden Sea: the pivotal role of Wadden Sea – North Sea interaction*. HZG-CAS-Meeting, Oct, Yantai, China
- van Beusekom, J.E.E., Geimecke, C., Dammrich, T., Wirtz, K., Hofmeister, R. (2014): *Import of Organic Matter by Density-Driven Circulation explains Regional Differences in Tidal Basin Eutrophication*, ASLO, Feb, Hawaii, USA
- van Beusekom, J.E.E., Dolch, T., Geimecke, C., Staneva, J., Wirtz, K., Hofmeister, R. (2014): *Eutrophierung der Nordsee und des Wattenmeeres: Folgen, Maßnahmen, erste Erfolge und weitere Ziele*, Jahrestagung Gebietskooperation Untere Ems, Feb, Gandersum, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Folmer, E., Geimecke, C., Staneva, J., Hofmeister, J., Wirtz, K. (2014): *Regional Differences in Wadden Sea nutrient dynamics and ecology: can import of SPM explain this?*, Seminarvortrag Geologisches Institut, Jan, Universität Hamburg, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Dolch, T., Geimecke, C., Staneva, J., Wirtz, K., Hofmeister, R. (2014): *Eutrophierung der Nordsee und des Wattenmeeres: Folgen, Maßnahmen, erste Erfolge und weitere Ziele*, Fachvortrag NLWKN, Sep, Oldenburg, Germany
- van Beusekom, J.E.E., Hofmeister, R., Geimecke, C., Dammrich, T., Staneva, J. (2014): *Import of organic matter by density-driven circulation explains regional differences in tidal basin*, Ocean Science Meeting, Honolulu, Hawaii, USA
- Waldmann, C., Spiesecke, U., Klinger, M., Reuter, R. & Schulz, M. (2012): *A sensor network for long-term monitoring of sediment transport in the coastal region*. Oceans 2012, Hampton Roads, Oct 14-19, VA, USA
- Winter, C. (2012): *WIMO: Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht*. FuE-Workshop über MSRL-relevante Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, Nov 26-27, Delmenhorst, Germany
- Wirtz, K.W. (2014): *Biophysics and trait-based plankton ecology*. GEOMAR, Jan, Kiel, Germany



- Wirtz, K.W. (2014): *Plankton food-webs replayed by mechanistic, modular, and trait-based models*. IMCOnet, Jun, Gent, Switzerland
- Wirtz, K.W. (2014): *What is this rhythm? The multiscale nature of ecological dynamics and its roots in adaptation and ontogeny*. KBS Seminar, Sep, U Michigan, USA
- Wirtz, K.W. (2014): *Plankton food-webs re-played by a mechanistic and trait-based model*. CREST conference, Oct, Tokyo, Japan
- Wirtz, K.W. (2014): *When do algae bloom? A mechanistic and integrated view on ecosystem dynamics in the North Sea and Bohai Sea YIC*. HZG Workshop, Oct 17, Yantai, China
- Wirtz, K.W. (2014): *Mesoscale patterns in phytoplankton blooms and their mechanistic roots in trait optimization*. JAMSTEC Seminar, Oct 30
- Wirtz, K. W., Hofmeister, R., Kerimoglu, O., Burchard, H., Klingbeil, K., Gräwe, U., Kösters, F., Nasermoaddeli, M. H., Lemmen, C. (2014): *Modular Coupling in Marine Science: The MOSSCO Framework*. AMEMR Plymouth, UK



## 9.5. Abkürzungen und Glossar

|                        |                                                                                                                                                                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Abb.</b>            | Abbildung                                                                                                                                                                             |
| <b>Abundanz</b>        | bezeichnet in der Ökologie die Anzahl der Individuen einer Art, bezogen auf ihr Habitat.                                                                                              |
| <b>ADCP</b>            | Acoustic Doppler Current Profiler , Messung von Strömungsrichtung und Geschwindigkeit über die gesamte Wassersäule mit Hilfe des Doppler-Effekts                                      |
| <b>AG</b>              | Arbeitsgruppe                                                                                                                                                                         |
| <b>AP</b>              | Arbeitspaket                                                                                                                                                                          |
| <b>ASLO</b>            | Association for the Sciences of Limnology and Oceanography                                                                                                                            |
| <b>AWI</b>             | Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung                                                                                                                                |
| <b>AWZ</b>             | ausschließliche Wirtschaftszone                                                                                                                                                       |
| <b>Baroklin</b>        | Unter Baroklinität versteht man, dass Flächen jeweils gleichen Druckes und jeweils gleicher Temperatur nicht parallel zueinander liegen, sondern dass sie sich schneiden.             |
| <b>Bathymetrie</b>     | Tiefenmessung von Meeres und Gewässerböden                                                                                                                                            |
| <b>Benthos</b>         | die Gesamtheit aller in der Bodenzone eines Gewässers vorkommenden Lebewesen                                                                                                          |
| <b>BfN</b>             | Bundesamt für Naturschutz                                                                                                                                                             |
| <b>Bivariat</b>        | zwei Variablen betreffend, z.B. bivariate Statistik                                                                                                                                   |
| <b>BLANO</b>           | Bund-Länderausschuss Nord- und Ostsee                                                                                                                                                 |
| <b>BLMP</b>            | Bund/Länder-Messprogramm                                                                                                                                                              |
| <b>BMBF</b>            | Bundesministerium für Bildung und Forschung                                                                                                                                           |
| <b>BSH</b>             | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie                                                                                                                                         |
| <b>CAN-Bus</b>         | Controller Area Network, ein international standardisiertes System zur Datenübertragung zwischen mehreren Teilnehmern über einen gemeinsamen Übertragungsweg                          |
| <b>CE</b>              | complementary effect                                                                                                                                                                  |
| <b>coastDat</b>        | Datensatzzusammenstellung Küsten bezogener Analysen und Szenarien des HZG                                                                                                             |
| <b>CODM</b>            | COSYNA Data Web Portal                                                                                                                                                                |
| <b>COSYNA</b>          | Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas, Projekt zur Langzeit Beobachtung des deutschen Teils der Nordsee des GKSS in Kooperation mit dem BSH                         |
| <b>CTD</b>             | Messgerät für u.a. Tiefe, Leitfähigkeit (Salzgehalt) und Temperatur                                                                                                                   |
| <b>CUSUM</b>           | kumulative Summe, sequentielle Analyseverfahren zur Entdeckung von Änderungen in einer sequentiellen Datenreihe, z.B. Wendepunkt                                                      |
| <b>DeMARINE</b>        | Projekt zur Förderung der operationellen Nutzung mariner GMES-Dienste in Deutschlands Umweltüberwachung im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus von EU und ESA |
| <b>Denitrifikation</b> | Umwandlung des im Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) gebundenen Stickstoffs zu molekularem Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und Stickoxiden                                                        |
| <b>DGM</b>             | Digitales Geländemodell                                                                                                                                                               |
| <b>DGPF</b>            | Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung                                                                                                                           |
| <b>Dispergator</b>     | Stoffgemisch zur Dispergierung von Ölverschmutzungen in Wasser                                                                                                                        |
| <b>DLR</b>             | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen                                                                                                                           |
| <b>DOI</b>             | Digital Object Identifier                                                                                                                                                             |
| <b>DOM</b>             | Digitales Oberflächenmodell                                                                                                                                                           |
| <b>DWD</b>             | Deutscher Wetterdienst                                                                                                                                                                |
| <b>EARSeL</b>          | European Association of Remote Sensing Laboratories                                                                                                                                   |
| <b>EEF</b>             | European Ecological Federation                                                                                                                                                        |

|                      |                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EMSA</b>          | European Maritime Safety Agency                                                                                                                                                                          |
| <b>EOC</b>           | Earth Observation Center, DLR                                                                                                                                                                            |
| <b>ERDAS</b>         | Earth Resource Data Analysis System                                                                                                                                                                      |
| <b>ESS</b>           | Ecosystem Services                                                                                                                                                                                       |
| <b>Eulitoral</b>     | Bereich zwischen Hochwasser- und Niedrigwasserlinie                                                                                                                                                      |
| <b>FEBNT</b>         | Ferry Box-NeTzwerk                                                                                                                                                                                       |
| <b>FFH</b>           | Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie                                                                                                                                                                           |
| <b>FK</b>            | Forschungskutter                                                                                                                                                                                         |
| <b>FONA</b>          | Forschung für nachhaltige Entwicklung, Plattform des Bundesministeriums für Bildung und Forschung                                                                                                        |
| <b>galvanisch</b>    | Unter galvanische Entkopplung versteht man das Vermeiden der elektrischen Leitung zwischen zwei Stromkreisen, zwischen denen Leistung oder Signale ausgetauscht werden sollen                            |
| <b>GETM</b>          | General Estuarine Transport Model                                                                                                                                                                        |
| <b>GEOHAB</b>        | Marine Geological and Biological Habitat Mapping                                                                                                                                                         |
| <b>GIS</b>           | Geoinformationssystem                                                                                                                                                                                    |
| <b>GMES</b>          | Global Monitoring for Environment and Security                                                                                                                                                           |
| <b>GPS</b>           | Global Positioning System, globales Navigationssystem zur Positionsbestimmung                                                                                                                            |
| <b>GSM</b>           | Global System for Mobile Communications                                                                                                                                                                  |
| <b>Ground Truth</b>  | Beprobung von Habitaten zur Validierung von Daten aus indirekten Messverfahren                                                                                                                           |
| <b>H-ADCP</b>        | Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler                                                                                                                                                             |
| <b>HELCOM</b>        | Baltic Marine Environment Protection Commission – Helsinki Commission                                                                                                                                    |
| <b>Heterotroph</b>   | den Prozess betreffend, bei dem Lebewesen Körperbestandteile durch Lebewesen aus bereits vorhandenen organischen Verbindungen aufbauen und nicht ausschließlich aus anorganischen Stoffen bilden können. |
| <b>HWK</b>           | Hanse-Wissenschaftskolleg, <i>Institute for Advanced Study</i>                                                                                                                                           |
| <b>HZG</b>           | Helmholtz-Zentrum Geesthacht (ehemals GKSS)                                                                                                                                                              |
| <b>ICBM</b>          | Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg                                                                                                                                       |
| <b>ICES</b>          | International Council for the Exploration of the Sea                                                                                                                                                     |
| <b>IfP</b>           | Institut für Physik, Universität Oldenburg                                                                                                                                                               |
| <b>IGF</b>           | Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück                                                                                                                                      |
| <b>In-situ</b>       | Lateinisch für ‚am Ort‘                                                                                                                                                                                  |
| <b>Interpolation</b> | Verfahren zur näherungsweisen Ermittlung eines unbekanntes Funktionswertes mithilfe von bekannten Funktionswerten an benachbarten Stellen.                                                               |
| <b>IPBES</b>         | Intergovernmental Science Platform on Biodiversity & Ecosystem Services                                                                                                                                  |
| <b>IPI</b>           | Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover                                                                                                                                    |
| <b>ISPRS</b>         | International Society for Photogrammetry and Remote Sensing                                                                                                                                              |
| <b>KüNO</b>          | Küstenforschung Nordsee-Ostsee                                                                                                                                                                           |
| <b>LiDAR</b>         | Light detection and ranging, Höhenmodell                                                                                                                                                                 |
| <b>Limnisch</b>      | im Süßwasserbereich, im Gegensatz dazu „marin“                                                                                                                                                           |
| <b>lithogen</b>      | aus Gesteinen entstanden                                                                                                                                                                                 |
| <b>LLUR</b>          | Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein                                                                                                                   |
| <b>LRK</b>           | Long Range Kinematik, kinematische Vermessungsmethode                                                                                                                                                    |
| <b>Lutokline</b>     | Abrupter Anstieg der Konzentration suspendierter Sedimente in der Wassersäule                                                                                                                            |
| <b>M</b>             | Meilenstein                                                                                                                                                                                              |

|                  |                                                                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>M-AMBI</b>    | Indizierungsverfahren für den ökologischen Zustand basierend auf benthischen Invertebraten (Wirbellose Tiere) |
| <b>mab</b>       | meter above bed                                                                                               |
| <b>MAECS</b>     | Model for Adaptive Ecosystems in Coastal Seas, HZG-Ökosystemmodell                                            |
| <b>MaNIDA</b>    | Marine Network for Integrated Data Access                                                                     |
| <b>MarBIT</b>    | (Marine Biotic Index Tool) ist ein Bewertungssystem für das Makrozoobenthos                                   |
| <b>MARNET</b>    | Marines Umweltmessnetz in Nord- und Ostsee des BSH                                                            |
| <b>MARUM</b>     | MARUM-Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen                                             |
| <b>MDI-DE</b>    | Marine Daten Infrastruktur Deutschland, nationales Meeres- und Küsteninformationssystem                       |
| <b>MOSSCO</b>    | Modulares System für Schelfmeere und Küsten                                                                   |
| <b>MSRL</b>      | EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie                                                                           |
| <b>MU</b>        | Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz                                             |
| <b>MWK</b>       | Ministerium für Wissenschaft und Kultur, Niedersachsen                                                        |
| <b>N</b>         | Nord (Richtung/Lage)                                                                                          |
| <b>N</b>         | Nitrat                                                                                                        |
| <b>NEBA</b>      | Net Environmental Benefit Analysis                                                                            |
| <b>NetCDF</b>    | Network Common Data Format                                                                                    |
| <b>ncWMS</b>     | NetCDF Web Map Service                                                                                        |
| <b>NDE</b>       | Nettodiversitätseffekt                                                                                        |
| <b>NDS</b>       | Niedersachsen                                                                                                 |
| <b>NLPV</b>      | Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Wilhelmshaven                                            |
| <b>NLWKN</b>     | Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserbau, Küsten- und Naturschutz                                        |
| <b>nMDS</b>      | non-metric dimensional scaling                                                                                |
| <b>NO</b>        | Nord-Ost (Richtung/Lage)                                                                                      |
| <b>NOAH</b>      | North Sea - Observation and Assessment of Habitats, Forschungsprojekt                                         |
| <b>NW</b>        | Nord-West(Richtung/Lage)                                                                                      |
| <b>OBS</b>       | Optical Backscatter point sensor, mißt die Rückstreuung eines ausgesandten Lasers                             |
| <b>OMEXDIA</b>   | OMEX Diagenesis model, wobei OMEX (Ocean Margin Exchange) ein Projekt unter dem MAST Programm der EU war.     |
| <b>OSE</b>       | Observation System Evaluation                                                                                 |
| <b>OSM</b>       | Open Street Map                                                                                               |
| <b>OSSE</b>      | Observations System Simulation Experiment; Beobachtungssystem-Simulations-Experiment                          |
| <b>OSTIA</b>     | Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis, Datensatz                                           |
| <b>Pelagisch</b> | der uferferne Freiwasserbereich oberhalb der Bodenzone bei Seen und dem Meer                                  |
| <b>POM</b>       | Partikuläres organisches Material                                                                             |
| <b>QSR</b>       | Quality Status Report des Common Wadden Sea Secretariat                                                       |
| <b>REF</b>       | Deutsche Satellitenkonstellation RapidEye                                                                     |
| <b>RESA</b>      | RapidEye Science Archive                                                                                      |
| <b>RTK</b>       | Real Time Kinematic, Echtzeit-Vermessung von geographischen Positionen                                        |
| <b>SaM</b>       | Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven, gehört zur SGN (Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung)              |
| <b>SAR</b>       | Synthetic Aperture Radar, Abbildender Radar zur 2-dimensionalen Darstellung eines Geländeabschnittes          |
| <b>ScanFish</b>  | eine im Wasser geschleppte Messplattform, die sich selbst in der Höhe über dem Boden positionieren kann.      |



|                   |                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>SCI</b>        | Sights of Community Importance                               |
| <b>SE</b>         | Selektionseffekt                                             |
| <b>SEM</b>        | Structural Equation Model                                    |
| <b>SI</b>         | Silicium                                                     |
| <b>SO</b>         | Süd-Ost (Richtung/Lage)                                      |
| <b>SW</b>         | Süd-West (Richtung-Lage)                                     |
| <b>SPA</b>        | Special Protection Area                                      |
| <b>SPM</b>        | Suspended Particulate Matter (Schwebstoffteilchen)           |
| <b>SSC</b>        | Konzentration suspendierter Sedimente                        |
| <b>SSS</b>        | Seitensichtsonar                                             |
| <b>SST</b>        | Sea Surface Temperature                                      |
| <b>SVP</b>        | (Sound velocity profiler) Schallgeschwindigkeitssonde        |
| <b>TerraSAR-X</b> | Deutscher Erdbeobachtungssatellit mit SAR Sensorik im X-Band |
| <b>TKE</b>        | Turbulente Kinetische Energie                                |
| <b>TMAP</b>       | Trilateral Monitoring and Assessment Program                 |
| <b>TP</b>         | Teilprojekt                                                  |
| <b>UMTS</b>       | Universal Mobile Telecommunications System                   |
| <b>UW</b>         | Unterwasser                                                  |
| <b>WaLTER</b>     | Wadden Sea Long-Term Ecosystem Research                      |
| <b>WebGIS</b>     | Geoinformationssystem (Karten)                               |
| <b>WFS</b>        | WebFeatureServices                                           |
| <b>WIMO</b>       | Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht  |
| <b>WMS</b>        | WebMapService                                                |
| <b>WRRL</b>       | EU-Wasserrahmen-Richtlinie                                   |
| <b>ZP</b>         | Zentrales Projekt                                            |

## 9.6. Projektpartner und wissenschaftlicher Beirat

**Tabelle 7: Projektpartner**

| <b>Steuerungsgruppe</b>                                                                                                                                               | Christian Winter (Sprecher), Alexander Bartholomä, Ulrich Callies, Christian Heipke, Doris Meyerdieks, Justus v. Beusekom                                                                                                                                                                                  |                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Institution</b>                                                                                                                                                    | <b>Projektleiter/in, gefördertes Personal</b>                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>Teilprojekt (TP)</b>                            |
| Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, List/Sylt (AWI)                                                                                               | Christian Hass (PL), Finn Mielck<br>Justus van Beusekom (PL – Gastforscher), Verena Hanke, Thea Dammrich, Kathrin Petz, Andreas Neumann                                                                                                                                                                    | TP 1.1<br>TP 2.2                                   |
| Hanse-Wissenschaftskolleg, <i>Institute for Advanced Study</i> , Delmenhorst (HWK)                                                                                    | Reto Weiler (Sprecher)<br>Dietmar Kraft, Doris Meyerdieks, Franziska Ahnert, Peter Bremer, Verena Backer                                                                                                                                                                                                   | Zentrales Projekt                                  |
| Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg (ICBM)                                                                                             | Emil Stanev (PL), Sebastian Grayek, Xi Lu, Benjamin Jacob, Helmut Hillebrand (PL), Dorothee Hodapp, Friso Muijsers                                                                                                                                                                                         | TP 3.1<br>TP 3.2                                   |
| Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück (IGF)                                                                                             | Manfred Ehlers (PL), Sascha Klonus, Daniel Tomowski, Richard Jung,                                                                                                                                                                                                                                         | TP 1.3                                             |
| Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG)                                                                                                      | Rolf Riethmüller (PL), Dietmar Bürk, Ulrike Kleeberg<br>Joanna Staneva (PL), Christina Geimecke<br>Kai Wirtz (PL), Richard Hofmeister, Jöran März, Annika Eisele<br>Ulrich Callies (PL), Carlo von Bernem, Frank Bockelmann, Fabian Schwichtenberg<br>Hajo Krasemann (PL), Giesbert Breitbach, Daniel Behr | TP 1.1<br>TP 2.2<br>TP 2.2<br>TP 3.3<br><br>TP 3.4 |
| Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover (IPI)                                                                                           | Christian Heipke (PL), Uwe Sörgel (PL), Anne Grotte, Alena Schmidt                                                                                                                                                                                                                                         | TP 1.2                                             |
| Institut für Physik, Universität Oldenburg                                                                                                                            | Rainer Reuter (PL), Melanie Klinger                                                                                                                                                                                                                                                                        | TP 2.1                                             |
| Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek (LLUR)                                                               | Christian Reimers (PL), Kirsten Binder<br>Die Mitarbeit erfolgte in Eigenleistung des LLUR                                                                                                                                                                                                                 | TP 1.1                                             |
| MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen (MARUM)                                                                                           | Michael Schulz (PL), Christoph Waldmann, Ulli Spiesecke<br>Christian Winter (PL), Dierk Hebbeln (PL), Marcus Schulz, Marius Becker, Gerald Herrling, Eva Kwoell                                                                                                                                            | TP 2.1<br>TP 3.1                                   |
| Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Wilhelmshaven (NLPV)<br>in Kooperation mit:<br>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen (DLR) | Gerald Millat (PL), Hubert Farke (PL), Winny Adolph,<br><br>Susanne Lehner (PL)                                                                                                                                                                                                                            | TP 1.4<br><br>TP 1.4                               |
| Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven (SAM)                                                                                                                              | Alexander Bartholomä (PL), Peter Holler, Ruggero Capperucci<br>Ingrid Kröncke (PL), Edith Markert, Hermann Neumann                                                                                                                                                                                         | TP 1.1                                             |

**Tabelle 8: Mitglieder im Expertenbeirat**

| <b>Institution/Behörde</b>                                           | <b>Name</b>                                       |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| The Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven (CWSS)              | Dr. Folkert de Jong                               |
| Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften, Hamburg (ZMAW) | Dr. Martin Gade                                   |
| Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Hamburg (KFKI)     | Dr.-Ing. Rainer Lehfeld                           |
| Hochschule Osnabrück, Osnabrück                                      | Prof. Dr.-Ing. Rainer Roosmann ( <i>Vorsitz</i> ) |
| Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth, Standort Oldenburg | Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee                  |
| Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich (WSD NW)          | Dipl.-Ing. Klaus Wulff                            |







Teilnehmer des WIMO Abschluss-Symposiums am 08.07.2015 am Hanse-Wissenschaftkolleg, Delmenhorst