



## Abschlussbericht des Gesamtvorhabens

# Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO)

im Rahmen der Küstenforschung Nord-Ostsee (KÜNO)  
BMBF Forschung für Nachhaltige Entwicklungen (FONA)

September 30, 2016

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) Leibniz Institut für Ostseeforschung (IOW) Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)	Förderkennzeichen: 03F0667A 03F0667B 03FO668A
Laufzeit des Vorhabens	April 2013–März 2016
Berichtszeitraum	April 2013–März 2016

### Projektkoordination

Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Prof. Dr. Kai W. Wirtz  
  
Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht  
+49 4152 87-1513  
kai.wirtz@hzg.de

### Verbundpartner

Institut für Ostseeforschung Warnemünde  
Prof. Dr. Hans Burchard  
PD Dr. Gerald Schernewski  
  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Dr. Frank Kösters

# Inhalt

I. Kurzdarstellung	4
1. Aufgabenstellung	5
2. Voraussetzungen	5
3. Planung und Ablauf	6
4. Wissenschaftlich-technischer Stand	7
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
II. Eingehende Darstellung	9
1. Erzielte Ergebnisse im Einzelnen	10
1.1. Entwicklung eines modularen Systems (WP 1-4, HZG, IOW, BAW)	10
1.1.1. Kopplungskonzepte	11
1.1.2. Kopplungsaufbereitung (“Kapselung”) biogeochemischer Modelle	12
1.1.3. Kapselung physikalischer Modelle	13
1.1.4. Neuentwicklungen von Komponenten zur benthischer Ökologie	15
1.1.5. Modulare Modellintegration	16
1.1.6. Softwaretechnik	16
1.2. Integrative und flexible Modellanwendungen (WP 2-4, HZG, IOW, BAW)	17
1.2.1. Modularer Modellvergleich (1D, Gotlandbecken)	19
1.2.2. Studien entlang den Sediment-Wasser-Atmosphären-Kontinuums (1D Helgoland und NOAH-C)	20
1.2.3. Integrative Prozessstudie (Idealisierter 2D Transekt)	21
1.2.4. Übergreifende Datensätze und Simulationen Nord-Ostsee (NSBS)	22
1.2.5. Amrum	24
1.2.6. Stofftransport und Ökosystemleistungen in der westlichen Ostsee (WBS)	24
1.2.7. Sediment- und Ökosystemdynamik in der südlichen Nordsee (SNS)	27
1.3. Kommunikation (alle WP, HZG, IOW, BAW)	28
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	31
2.1. HZG	31
2.2. IOW	31
2.3. BAW	31
2.4. Zusätzlich eingeworbene Mittel	32

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	32
4. Voraussichtlicher Nutzen	33
4.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen . . . . .	33
4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten . . . . .	33
4.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende . .	33
4.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit . . . . .	34
4.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen . . . . .	34
4.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen . . . . .	35
4.6.1. Freie und Offene Software . . . . .	35
4.6.2. Begutachtete/zu begutachtende Fachartikel . . . . .	35
4.6.3. Nicht-begutachtete Fachpublikationen . . . . .	37
4.6.4. Konferenzbeiträge . . . . .	37
4.6.5. Zitierte Fremdpublikationen . . . . .	40
Glossar	42
Abkürzungsverzeichnis	43

Wir danken den Projektmitarbeitern

- Dr. Rene Friedland
- Dr. Richard Hofmeister
- Dr. Knut Klingbeil
- Dr. Carsten Lemmen
- Dr. M. Hassan Nasermoaddeli

Wir danken zudem denjenigen, die unsere Arbeit innerhalb der Institute unterstützt haben, darunter Annika Eisele, Markus Kreuz, Dr. Ulf Gräwe, Dr. Hartmut Kapitza, Dr. Onur Kerimoglu, Kaela Slavik und Dr. Wenyan Zhang; für die Bereitstellung von Daten und Austausch von Expertise danken wir Dr. Jana Friedrich, Dr. Frank Bockelmann, Prof. Karen Wiltshire, Annika Grage, und Dr. Christian Winter, aber auch allen, die hier nicht mit Namen genannt sind und zum Projekterfolg beigetragen haben.

Part I.

Kurzdarstellung

# 1. Aufgabenstellung

Zentrale Herausforderungen in Küstenforschung und -management wie etwa zum Wandel von Ökosystemfunktionen oder des Sedimenthaushalts erfordern eine synoptische und fachübergreifende Herangehensweise. Diese kann bislang fast ausschließlich mithilfe integrativer Küsten- und Schelfmodelle geleistet werden. Zwar steigt die Anzahl von Modellsystemen, doch zeigen diese eine begrenzte Flexibilität und Interaktion zwischen deren Betreibern. Vor diesem Hintergrund hat sich das Projekt Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO) zum Ziel gesetzt, eine neue wissenschaftliche Software zu entwickeln und anzuwenden, mit der Modelle und Datensätze modular miteinander gekoppelt werden. Die technische Herausforderung der Schaffung eines *Kopplungsrahmens*<sup>1</sup> war mit dem wissenschaftlichen Ziel verbunden, die Schnittstellen im Küstenmeer, vor allem zwischen Meeresgrund und Wasserkörper, abzubilden, zu analysieren und ihre Rolle für das Systemverständnis der Nord- und Ostsee zu quantifizieren. Auf der Basis einer bislang kaum erreichten Modellgüte konnten Behörden bei der Umsetzung Europäischer Direktiven unterstützt werden, indem neues Wissen zu Veränderungen von Ökosystemzuständen bereitgestellt wurde. Erste integrative Studien haben zudem wichtige Schlüsselprozesse der Ökosystemdynamik oder des Sedimenthaushalts identifiziert.

Mit MOSSCO ist es gelungen, ein numerisch effizientes Modellsystem zu schaffen, in das ohne Mehraufwand neue Daten und (aufbereitete) Prozessmodelle integriert, oder in dem *Module* ausgetauscht und verglichen werden können. Dieses Werkzeug kann hinsichtlich der Qualität der Simulationsergebnisse nicht nur mit den hochau aufgelösten gekoppelten Modellsystemen aktuell führender Meeresforschungsinstitute konkurrieren, sondern besitzt aufgrund der wesentlich größeren Flexibilität ein besonderes Entwicklungspotential für sich neu bildende Forschungsfragen oder Forschungskonsortien.

# 2. Voraussetzungen

An Küsten bündeln sich sowohl viele Übergangsbereiche wie z.B. Ozean–Flachwasser–Ästuar oder Meeresboden–Wassersäule–Atmosphäre als auch zahlreiche Nutzungskonflikte wie z.B. zwischen Naturschutz und Energiegewinnung. Küstenökosysteme werden durch eine Vielzahl von Prozessen und Faktoren gesteuert, die physikalischer, chemischer, biologischer, oder aber auch gesellschaftlicher Natur sein können. Wesentliche Problemstellungen der Küstenforschung und des nachhaltigen Küstenmanagements erfordern daher eine integrative Herangehensweise. Die gegenwärtig üblicherweise eingesetzten Werkzeuge (vor allem monolithische Modellsysteme) lassen sich meist nur mit großem Aufwand (wenn überhaupt) an die Komplexität

---

<sup>1</sup>Fachausdrücke in *kursiv* finden sich in einem Glossar am Ende erklärt

der Prozesse, die sich unter Anderem aus den fachübergreifenden Fragestellungen ergeben, anpassen oder für diese erweitern. Ein modulares System mit standardisierten Kommunikationsschnittstellen hingegen bietet Wissenschaftlern/innen mit unterschiedlichen Forschungsinteressen, Modellrepertoires und aus verschiedenen Institutionen die Möglichkeit—unter bestimmten Voraussetzungen—beliebige Modelle oder Teile von Modellen zu integrieren.

Das Projekt MOSSCO wurde als direkte Antwort auf die Herausforderungen entwickelt, die als zentral für die aktuelle Küstenforschung in der ersten Küstenforschung Nord–Ostsee (KüNO) Ausschreibung des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschung für Nachhaltige Entwicklungen (FONA) ausgewiesen wurden. In der ersten Projektphase hat MOSSCO eine Infrastruktur geschaffen, mit der die Prozesse zwischen und innerhalb von Erdsystemkompartimenten (Boden, Ozean und Atmosphäre) austauschbar beschrieben und gekoppelt werden können. Innerhalb eines jeden Erdsystemkompartiments können zusätzlich *Module* etwa zur Meeresphysik, Biogeochemie, Ökologie und Geologie flexibel und problemangepasst integriert werden. Der neuartige modulare Rahmen für Daten- und Modellsysteme ermöglicht synoptische Untersuchungen von Küstenmeeren, bei denen ohne großen zusätzlichen Aufwand Forscher/innen aus unterschiedlichen Disziplinen und Instituten ihre Expertise und Modelle zusammenbringen können. Der Mehrwert dieses kooperativen Ansatzes wurde in gemeinsam von allen Partnern durchgeführten Anwendungsbeispielen demonstriert.

### 3. Planung und Ablauf

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt. Mit der Auswahl der verbundenen Institutionen wurde die geforderte Modularität so auch auf der Partnerebene deutlich durch die Beteiligung eines universitär angebotenen Leibniz-Instituts, einer Bundesbehörde und einer Großforschungseinrichtung. Die Projektpartner brachten unterschiedliche Modelle, Disziplinen und Forschungsschwerpunkte in das Verbundprojekt ein, sodass der modulare Ansatz des entwickelten Systems im Projekt selbst notwendig und messbar wurde. Alle Projektergebnisse wurden in einer engen Kooperation der drei Modellierungsgruppen realisiert, was auch eine stetige Koordination durch HZG als Leiterin des Verbundes erforderte.

Die Arbeit im Projekt wurde in fünf Arbeitspakete—work packages (WPs)—unterteilt. Die Konzeption und Entwicklung des *Kopplungsrahmens* wurde hauptsächlich in WP1 geleistet. In WP2 wurden das hydrodynamische Modell und fragestellungsrelevante räumliche Modellimplementierungen, die sogenannten *Setups* konstruiert. WP3 und WP4 untersuchten dann Prozesse an der Schnittstelle Wassersäule und Boden, beschäftigten sich also mit der Weiterentwicklung, Kopplung und dem Anwenden von ökologischen, biogeochemischen und geökologischen Modellen; WP5 behandelte daraus resultierende Managementfragen. Alle WPs hingen jeweils von Produkten aus den anderen WPs ab, wodurch eine enge Zusammenarbeit innerhalb des Verbunds gefördert wurde; auch über das Projekt hinaus bestanden

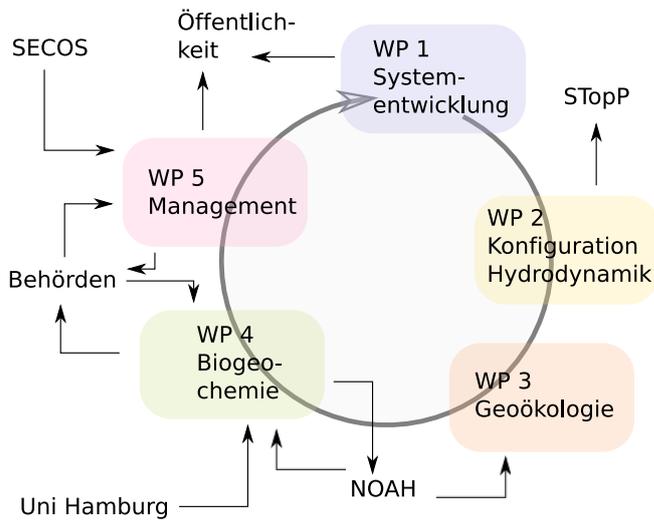


Abbildung 1.: Schematischer Vernetzungs- und Strukturplan des Gesamtvorhabens MOSSCO. Die Vernetzung der Partner in den WPs (BAW: WP3, IOW: WP2, 5; HZG: WP1, 4) wurde über den Austausch von Mess- und Modelldaten, von “Komponenten” (Module und standardisierte Datensätze) und vollständiger Modellsysteme/-konfigurationen realisiert und iteriert. Wesentliche Informationsflüsse zu und von behördlichen und wissenschaftlichen Anwendern, insbesondere zu und von den anderen FONA Verbundvorhaben sind ebenfalls dargestellt.

Informations- und Datenflüsse zwischen den KüNO Schwesterprojekten und mit behördlichen und wissenschaftlichen Stakeholdern (Abb. 1).

Vorab unterschätzt wurde der Zeitaufwand zur generischen Aufbereitung von Modellen, deren Funktionalität sich mit der des *Kopplungsrahmens* überschneidet (z.B. Datenverwaltung im Treiber für das hydrodynamische Modell General Estuarine Transport Model (GETM)). Ebenfalls zu wenig Projektzeit wurde zur kontinuierlichen Prüfung und Herstellung der technischen Funktionsfähigkeit des komplexen Systemrahmens und aller Systemteile eingeplant. Dadurch verschob sich insgesamt die Phase der Modellanwendungen und vor allem deren wissenschaftlichen Kommunikation (16 Veröffentlichungen aus der dieser ersten Projektphase). Die inzwischen gewachsene Konsolidierung der MOSSCO Software erlaubte aber eine Intensivierung der publikationsrelevanten Arbeiten zu Beginn der Synthesephase.

## 4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Das Projekt hat in relativ kurzer Entwicklungszeit eine innovative Softwarestruktur sowie eine Reihe von wichtigen Modellerweiterungen für zentrale KüNO Fragestellungen geschaffen. Es konnten fast alle für den Küstenozean relevanten Prozessbereiche und Erdsystemdomänen integriert werden—mit wenigen Ausnahmen wie etwa Meereis, das aber für die Nordsee und westliche Ostsee und damit auch für die KüNO Forschungsaktivitäten keine große Rolle spielt. Im Vergleich zu aktuellen Modellsystemen wurde ein deutlicher Mehrwert über die Modularität aller *Komponenten* und über die Flexibilität integraler Modellbeschreibungen generiert. Die ersten Anwendungen verfolgten zu Beginn eine Reihe von Zielen, vor allem das Testen der technischen Funktionalität und das Sicherstellen der wissenschaftlichen Validität der modular (neu) gekoppelten Modell-*Konfigurationen*. Diese Anwendungen konnten erfolgreich abgeschlossen werden—zum Teil nach iterativen Verbesserungen in der MOSSCO Software oder der verbesserten *Parametrisierung* eingebundener Modelle. Viele beobachtete raumzeitliche Trends wichtiger Schlüsselgrößen, insbesondere physikalische und biogeochemische Zustände,

sind quantitativ rekonstruiert worden. Gegen Ende der Phase 1 konnte das Projekt sich dann mehr auf synoptische Studien und Fragestellungen konzentrieren, z.B. die Untersuchung der benthisch–pelagischen Stoffflüsse der beiden deutschen Küstenmeere und der Sedimentdynamik in der südlichen Nordsee.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des KüNO-Verbunds hat MOSSCO mit den Schwesterprojekten North Sea Observation and Assessment of Habitats (NOAH), Service of Sediments in German Coastal Seas (SECOS) und From Sediment to Top Predator (STopP) einen signifikanten Datenaustausch sowie Kooperationen realisiert.

1. Für STopP wurde eine hochaufgelöste hydrodynamische Simulation des Nordfriesischen Wattenmeers zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 1.2.5)
2. In Zusammenarbeit mit SECOS wurden die Arbeiten zur Ableitung von Wasserqualitätszielwerten für die Wasserkörper der deutschen Ostsee durchgeführt. Dazu gab es einen regelmäßigen Austausch mit den involvierten Behördenvertretern und regelmäßige Treffen. Zudem wurden für SECOS wichtige Modelle in das MOSSCO System integriert, darunter die Framework for Aquatic Biogeochemical Modeling (FABM) *Komponente* Erste Generation des IOW-Modells des Ökosystems der Ostsee (ERGOM). Aus einem Vergleich von in MOSSCO und SECOS genutzten Ökosystemmodellen konnten Modellformulierungen und *Parametrisierungen* optimiert werden.
3. Für NOAH wurden eine Modell-*Konfiguration* für benthische Biogeochemie (BGC) und eine *Konfiguration* zur Wasserphysik der dort definierten Station C (nahe Helgoland) erstellt (Abschnitt 1.2.2); es wurden Wissenschaftler bei NOAH in der Anwendung von MOSSCO geschult. MOSSCO Simulationsprodukte (z.B. zu pelagischen Einträgen von organischem Material) wurden von NOAH genutzt. Der gemeinsam durchgeführte Vergleich von modellbasierten und beobachteten benthischen Respirationsraten im Bereich der Deutschen Bucht (siehe Abb. 16 lieferte sowohl wichtige Parameterwerte für die Modellierung wie auch neue Hypothesen zur Interpretation der Daten.

Ergebnisse aus MOSSCO wurden dem Mecklenburgischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG), dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) in Schleswig-Holstein, dem Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie dem Umweltbundesamt (UBA) bereitgestellt. Eine darauf aufbauende Kooperation mit dem NLWKN und dem UBA, in der Szenarien zur Eutrophierung der Nordsee zur europäischen Wasserrahmenrichtlinie ausgewertet werden, wird aktuell über Auftragsarbeiten intensiviert.

Ebenfalls aktuell wird MOSSCO für chinesischen Küstenmeere angepasst, um in Kooperation mit Prof. X. Liu und F. Zhou am Yantai Institute of Coastal Research (China) Managementfragen zur Garnelenfischerei zu beantworten.

Part II.

Eingehende Darstellung

# 1. Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

## 1.1. Entwicklung eines modularen Systems (WP 1-4, HZG, IOW, BAW)

Die Softwareentwicklung eines neuen *Kopplungsrahmens* bildete die zentrale technologische Grundlage für das Gesamtvorhaben MOSSCO. Mit der Bewältigung dieser konzeptuellen und softwaretechnische Herausforderung hat das Projekt eine Infrastruktur geschaffen, für die auch international bisher kein direkt vergleichbares System existiert (siehe Abschnitt 4.5). Alleinstellungsmerkmale im Funktionsumfang sind unter Anderem die generische Austauschbarkeit von (Modell-)Datensätzen und Prozessmodellen sowie die hohe Anzahl der simultan realisierten Kopplungen. Typischerweise werden *Konfigurationen* mit vier bis sechs Modellen, zwei bis sechs modular angebotenen Datensätzen, und zwei bis vier verschiedenen Kopplern numerisch effizient simuliert.

Im WP1 (verantwortlich geleitet von HZG) umfassten relevante Arbeiten dazu die Konzepterstellung zur generellen Kopplungsfähigkeit, die Anpassung bestehender Modelle zur prinzipiellen Kopplungsfähigkeit, die Erstellung von Kommunikationsschnittstellen zum *Kopplungsrahmen* Earth System Modeling Framework (ESMF) und das Zusammenfügen von *Konfigurationen* mit *Setups* zum Testen der Gesamtinfrastruktur.

WPs 2–4 (jeweils geleitet von IOW, BAW und HZG) passten bestehende oder neue Modelle an diese Infrastruktur an. Vor allem über die Integration von Datensätzen und über die Anpassung von Modellparametern entstanden sogenannte *Setups*, in denen die Gesamtheit der für eine Simulation notwendigen Antriebsdaten sowie geeignete *Parametrisierungen* zusammengefasst werden. MOSSCO schaffte mit diesen Arbeiten den Übergang von einem anfangs rein softwaretechnischem Projekt hin zu Anwendungen, die für Wissenschaft und Umweltmanagement relevant sind (siehe Abschnitt 1.2).

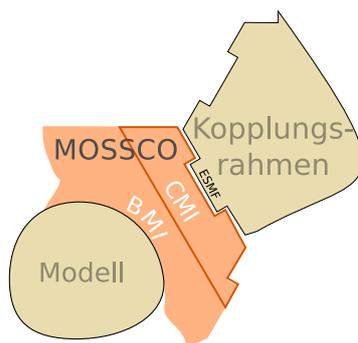


Abbildung 2.: Das Kopplungskonzept in MOSSCO sieht zwei Schichten mit jeweils eigenen Softwarestrukturen vor: das sog. “Basismodellinterface” (BMI), das spezifisch für jedes Modell ist, aber unabhängig vom *Kopplungsrahmen*, und das “Kopplungsinterface” (CMI), welches spezifisch für den *Kopplungsrahmen* die Informationen zwischen den zentralen Prozessen und dem Modell bzw. BMI organisiert.

### 1.1.1. Kopplungskonzepte

Der Idee von Peckham (2014) folgend wurde die Verbindung eines modularen Modells mit einem *Kopplungsrahmen* in zwei unterschiedliche Schichten geteilt, dem Basismodellinterface (BMI) und dem Kopplungsrahmen-Interface (CMI). In diesem Konzept stellt das BMI die Kopplungsfähigkeit eines Modells sicher, in dem es z.B. die internen Felder der Zustandsvariablen sichtbar macht oder eine Übernahme von Kontrollbefehlen ("start", "stopp") erlaubt. Im CMI wird dann diese generische Kopplungsfähigkeit des BMI für einen bestimmten *Kopplungsrahmen* spezifiziert, bei MOSSCO also die vom jeweiligen BMI eines Modells bereitgestellten Informationen für den hier benutzten *Kopplungsrahmen* ESMF angepasst (Abb. 2).

Das zweischichtige Kopplungskonzept zielt darauf, Modifikationen in der Struktur und insgesamt im Quelltext der anzubindenden Modells zu minimieren. Dennoch mussten bei der Anbindung von gitterbasierten numerischen Modellen an den *Kopplungsrahmen* zwei besondere Herausforderungen bewältigt werden:

1. Die oben genannte Übernahme von Kontrollbefehlen durch das CMI erfordert die Abgabe dieser Kontrollfunktion seitens des eigentlichen Modells.
2. Die interne Prozessaufteilung des Rechengebiets muss vor Programmstart kommuniziert werden, was in bestehenden Modellen meist nicht vorgesehen ist; für das Modell GETM wurde diese Kommunikationsmöglichkeit aus Anlass der MOSSCO-Entwicklung in die dortige Entwicklung aufgenommen (<http://www.getm.eu>).

Auf Seiten des *Kopplungsrahmens* korrespondiert hierzu die Entwicklung von zwei zentralen Funktionalitäten:

1. Für einen numerisch effizienten simultanen Betrieb vieler unterschiedlicher Modellkomponenten musste eine verallgemeinerte Steuerung der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen *Komponenten* und dem Zeitmanagement geschaffen werden. Durch spezifisch entwickelte Softwareroutinen und Benutzung des vollständigen Umfangs von ESMF (den bisher kein anderes Projekt so umsetzt) ist es gelungen, sowohl benutzergerecht als auch hochperformant diese verallgemeinerte Kopplung umzusetzen (Lemmen 2016a,b et al. in prep.). Eine dieser Lösungen basiert auf einer mehrphasigen Initialisierung der *Komponenten* und ermöglicht das automatische Erkennen und Vermeiden von redundanten Datenfeldern, wie es z.B. auch in National Unified Operational Prediction Capability (NUOPC), einer Anwenderschnittstelle für die Kopplung von Domänenmodellen, eingesetzt wird (Syvitsky et al. 2016). Für existierende anzukoppelnde Modelle ist das Zulassen der Kontrolle durch einen *Kopplungsrahmen* eine oft anzutreffende Hürde (Lemmen et al. 2016a, in prep.).
2. Modellgitter sind nicht universell, sondern besitzen in der Praxis häufig Eigenheiten, die eine generalisierte Prozessierung erschweren. MOSSCO musste etwa um die Fähigkeit erweitert werden, unvollständige oder unregelmäßige Gitter-Aufteilungen zu verarbeiten. Insbesondere küstenfolgende Modelle besitzen Gitterpunkte, an denen keine Daten vorliegen (z.B. Halbinseln). In aktuell an Bedeutung zunehmenden sogenannten unstrukturierten hydrodynamischen Modellen liegen die Rechenpunkte nicht in einer regelmäßigen Matrix vor, sondern unregelmäßig in Dreiecken, die der Küstenlinie folgen. Ebenso wurde MOSSCO vorbereitet für den Umgang mit regelmäßigen nicht-rechtwinkligen (kurvilinearen) Gittern, die z.B. eine bessere Auflösung an der Küste erlauben.

Im Kontext der kohärenten Organisation von räumlich komplex-strukturierten, höherdimensionalen Daten wurde zudem die Möglichkeit geschaffen, dass die einzelnen Modelle das Einlesen von Datenfeldern und deren Ausgabe an den *Kopplungsrahmen* auslagern können. Mit dieser neuen generische Einlese- und Ausgabekomponente wurde die Bereitstellung von Flusseinträgen und Randwertdaten realisiert, aber auch eine Standardisierung der Ausgabedaten erreicht, die deren weiteren Nutzung (Visualisierung und Analyse) deutlich vereinfacht.

Zusätzlich muss eine generische Kopplung gerade von Prozessmodellen an der Schnittstelle zweier Erdsystemdomänen eine konsistente Semantik und Identifikation von Variablen unterstützen. Wenn zum Beispiel zwei biogeochemische Modelle gekoppelt werden, eins für den Wasserkörper, das andere für den Meeresboden, dann wird typischerweise ein Nährstoff wie etwa Stickstoff in unterschiedlichen Einheiten (“g” oder “mol”), Bezeichnungen (“Nitrat” oder “NO<sub>3</sub>”) oder Aggregierungsform (“NO<sub>3</sub>” oder “Gelöster Inorganischer Stickstoff”, auch Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN)) behandelt. In MOSSCO übernimmt eine neu entwickelte Vermittlungskomponente die notwendigen Umrechnungen, Umbenennungen und Interpolationen und kann zudem für eine standardisierte Liste chemischer Spezies diese verteilen oder aggregieren (“NO<sub>3</sub>” und “NH<sub>4</sub>” zu “DIN”, und umgekehrt).

Zur Realisierung hoch-integrativer und dennoch flexibler Kopplungen mussten schliesslich zentrale *Komponenten*, wie Eingabe/Ausgabe (I/O) von Daten um eine Reihe von Funktionalitäten erweitert werden (z.B. Berücksichtigung lokaler Quellen, einfache Neuinitialisierung, oder Behandlung von Gruppenvariablen wie unterschiedliche Größenklassen von suspendiertem Sediment). Dabei wurde insgesamt deutlich, dass eine generische und modulare Kopplung sehr heterogener Modelle und Datensätze machbar ist, allerdings mit signifikantem Arbeitseinsatz und damit verbunden stetig wachsendem Know-How (siehe Abb. 4).

### 1.1.2. Kopplungsaufbereitung (“Kapselung”) biogeochemischer Modelle

Die Entwicklung des MOSSCO-Systems profitierte stark von FABM (Bruggeman/Bolding 2014), einer Standarddefinition für ökologische Modelle. FABM umfasst über 30 weltweit eingesetzte Modelle, die über die Schaffung einer entsprechenden MOSSCO-*Komponente* nun auch der MOSSCO-Modellbibliothek angehören. Diese Anbindung erforderte im Besonderen eine Verlinkung der FABM-internen Felder und Metadaten mit dem entsprechenden CMI. Allerdings sind die Anforderungen der FABM Modelle unterschiedlich, so dass eine Metadaten-Infrastruktur angelegt werden musste, um zwischen notwendigen und optionalen Eingabedaten, zwischen zwei- und dreidimensionalen Eingabedaten, und zwischen prognostischen und diagnostischen Variablen unterscheiden zu können. Die Aufbereitung eines BMI (s.o.), auch “Kapselung” genannt, bedeutete für FABM vor allem das Anlegen einer zeitlichen Steuerung und Möglichkeit der Kontrolle von außerhalb.

Die FABM Bibliothek umfasste bislang ökologische und biogeochemische Prozessbeschreibungen ausschliesslich für den Wasserkörper. FABM wurde daher durch das Projekt um die Fähigkeit erweitert, auch in einer Bodenmatrix Modelle anzu steuern zu können. Diese Entwicklung ist in den Entwicklungszweig von FABM (<http://sf.net/p/fabm>) eingeflossen. Die Erweiterung auf den Boden erlaubte insbesondere die Integration des Frühdiagenesemodell Ocean Margin Exchange Diagenese (OMEXDIA) (Soetaert et al. 1996) über FABM. OMEXDIA wurde zudem um wichtige Prozessbeschreibungen wie den Phosphorzyklus und benthische Primärproduktion durch Diatomeen (Hofmeister et al., in prep) erweitert und über spezielle

Modellumformulierungen durch (schnelle) Standardnumerik lösbar gemacht. Das Möglichkeit, relativ rechenzeitgünstig benthische Prozesse räumlich aufgelöst abbilden zu können, hat sich als essenziell für die laufenden gekoppelten MOSSCO-Rechnungen erwiesen.

Mithilfe des am IOW entwickelten Code Generation Tool (CGT) (Radtke et al., 2012) konnten weitere *Module* über FABM eingebunden werden: (a) das Ökosystemmodell ERGOM sowie (b) ein angeschlossenes *Modul* zum Markieren von Stoffeinträgen einzelner Flüsse. Dies machte die Nachverfolgung von Flussfrachten im Küstenmeer (für spezielle Eutrophierungsstudien) mit dem MOSSCO-System möglich.

Ebenfalls über die Modellbibliothek von FABM wurde das adaptive Ökosystemmodell Model for Adaptive Ecosystems (MAECS) (Wirtz & Kerimoglu 2016) in MOSSCO integriert. MAECS wurde zur Ermöglichung von Modellvergleichen an tiefen Ostsee-Stationen (mit anoxischen Bedingungen im Wasserkörper) um Sauerstoffdynamik und Denitrifizierung erweitert. Die erweiterten Versionen von FABM, MAECS, ERGOM und OMEXDIA stehen im FABM Repository <https://sf.net/p/fabm/code> der Öffentlichkeit und anderen Ökosystemmodellierern zur Verfügung.

### 1.1.3. Kapselung physikalischer Modelle

FABM-Modelle liegen nur als Boxmodell nulldimensional (0D) vor; diese beinhalten keine Transportprozesse. Zu realitätsnahen Simulationen ist daher die Kopplung an mehrdimensionale Transportmodelle notwendig. Eine Reihe der neuen *Komponenten* für zumeist existierende Modelle in der Wassersäule eindimensional (1D) oder im Küstenozean dreidimensional (3D), die in das BMI/CMI-Schema von MOSSCO gekapselt wurden, können als physikalischer Transport-“Treiber” für (FABM) Boxmodelle dienen.

1. 1D Hydrodynamik: General Ocean Turbulence Model (GOTM)
2. 3D Hydrodynamik: General Estuarine Transport Model (GETM)
3. 3D Hydrodynamik: Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM)
4. 3D Partikeldrift: Hamburger Tracermodell (TRACER)
5. 3D Erosion/Deposition: Deltares Delft3D Modell (EROSED)
6. 2D Wellenfelder: Statistisches Modell (“SimpleWave”)

Die Kapselung von FABM konnte vom Prinzip her auf diese mehrdimensionalen Modelle übertragen werden. So entstand für General Ocean Turbulence Model (GOTM) das entsprechende *Komponenteninterface* CMI durch Anlegen der ESMF-spezifischen Metadaten und die Verlinkung der GOTM-internen Daten an austauschbare ESMF-Felder.

Ursprünglich wurden GOTM und FABM zusammen entwickelt. Im Zuge der Trennung der Modellbibliothek FABM von GOTM, wurde innerhalb von MOSSCO eine eigene Bibliothek für numerische Integrationsverfahren erstellt, die konsistent allen Modellen in MOSSCO zur Verfügung stehen. Insbesondere wurde durch die Verallgemeinerung der Kopplung zwischen GOTM und FABM die vormals notwendige Unterscheidung der Dimensionalität des hydrodynamischen Modells bei der Einbindung von FABM aufgehoben. Dies stellt einen wesentlichen Fortschritt dar, der es erlaubt, dieselben (FABM-gekoppelten) biogeochemischen

oder ökologischen Modelle unverändert sowohl in Boxstudien (0D), Säulenstudien (1D), oder dreidimensionalen Studien zu verwenden (siehe Anwendung Abschnitt 1.2.7).

Auch für das hydrodynamische Modell GETM wurde die *Komponente* so entworfen, dass die ursprünglich in der Hydrodynamik fest verankerte FABM-Schnittstelle modular aufgebrochen werden konnte. Dazu muss die GETM-*Komponente* unter anderem eine zeitlich variable Liste der zu transportierenden Felder erhalten und diese Felder in den jeweiligen Routinen für Advektion und Diffusion behandeln. Zur Erstellung des BMI für GETM mussten interne Kontrollfunktionen (etwa die Zeitsteuerung des Datenaustausches) vom *Kopplungsrahmen* übernommen werden. Diese Übernahme stellte für GETM die einzig notwendige, aber auch nicht einfach umzusetzende Änderung am ursprünglichen Modell-Quellcode dar. Die dabei gewonnene Expertise zur Modularisierung von parallelisierten Modellen wie GETM wird bei der Einbindung weiterer großer Modelle wertvoll sein (z.B. bei Atmosphäre-Modellen).

Die aktuell im Zentrum vieler Modellentwicklungen der Küstenozeanografie stehende Kopplung zwischen Hydrodynamik und Wellen musste über softwaretechnische Aspekte hinaus auch inhaltlich vorbereitet werden. Für GETM wurden daher die neuesten physikalischen Gleichungen zur Wechselwirkung zwischen Wellengang und Strömungsphysik (“Wellenschließung” nach Mellor 2013) abgeleitet, optimiert und implementiert.

Ursprünglich geplant war eine Kapselung des weitverbreiteten Simulating Waves Nearshore (SWAN), da dieses zusätzlich zu den lokalen auch noch die regionale Welleninformation berücksichtigen kann. Diese Entwicklung wurde zunächst hintenangestellt, da die Erstellung einer ESMF-*Komponente* für SWAN in einem US-Militärprojekt geplant war, zu der bis heute jedoch keinen Zugriff möglich war. Eine erste eigene Testimplementierung ist nur partiell operationell einsetzbar. Alternativ können Wellenfelder im MOSSCO-System nun durch eine neu entwickelte Wellen-*Komponente* berechnet werden (“SimpleWave”), welche basierend auf Mess- und Simulationsdaten, Wellenhöhe, -periode und -länge in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Wassertiefe prognostiziert. Damit war eine deutlich exaktere Simulation von Strömung und Erosion möglich.

Zur Berechnung des abiotischen Sediment austausches zwischen benthischen und pelagischen *Komponenten* wurde auf das weit verbreitete Bodenmodell Delft3D Erosion-Sedimentation Model (EROSED) aus dem Softwarepaket Delft3D von Deltares zurückgegriffen, u.a. wegen der Vorerfahrungen und enge Kooperationen über das NWO-BMBF Projekt PACE, in dem eine vereinfachte Variante des Erosions-/Depositionsmodul verwendet wurde. Für MOSSCO wurde EROSED allerdings im Original aus dem Deltares Repository (<http://oss.deltares.nl>) integriert und gekapselt, d.h. mit jeweils einem BMI und CMI ausgestattet. Hiermit wurde gezeigt, wie die kontinuierliche Entwicklung bei Deltares und in MOSSCO an offener Software erfolgreich verlaufen kann: Verbesserungen an EROSED fließen automatisch in die von MOSSCO benutzte *Komponente* ein.

Das 3D hydrodynamische Modell Hamburg Schelfozean-Modell (HAMSOM) und das Lagrange’sche Driftmodell Hamburg Tracermodell (TRACER) wurden entsprechend den Anforderungen einer modularen Kopplung überarbeitet und in MOSSCO durch BMI/CMI integriert. Die Kopplung von HAMSOM und TRACER belegte die Funktionalität der geschaffenen Kopplung durch plausible Trajektorien von passiven Partikeln im Bereich der Nordsee; aktuell wird die TRACER *Komponente* bei einer Anwendung auf die Verdriftung von (ausgesetzten) Garnelen in den chinesischen Küstenmeeren eingesetzt (Kooperation mit Prof. X. Liu und F. Zhou, Yantai Institute of Coastal Research).

#### 1.1.4. Neuentwicklungen von Komponenten zur benthischer Ökologie

Die Beschreibung von Austauschprozessen an der Sediment–Wasser Grenzschicht bildet ein zentrale Aufgabe der Modellierung innerhalb des Projekts. Für diese Austauschprozesse ist die benthische Ökologie von extrem hoher Bedeutung: Benthische Organismen beeinflussen die Bodeneigenschaften, z.B. durch die Auflockerung der Sedimentoberfläche in Folge der Nahrungssuche oder durch die Verdichtung des Bodens beim Schutzsuchen. Die Aktivität der Organismen kann sich somit destabilisierend oder stabilisierend auf das Sediment auswirken. Biogene Strukturen, wie die Körper selbst (z.B. Seegras) oder biogene Strukturen (z.B. Röhren des Bäumchenröhrenwurms) beeinflussen den Sedimenttransport indirekt über die Veränderung der bodennahen Geschwindigkeit und damit der Sohlschubspannung die Veränderung der Rauheit.

Solche Prozesse sind trotz ihrer Relevanz bislang kaum in Modellen abgebildet, so dass im Projekt einige *Komponenten* neu entworfen und implementiert werden mussten. Auf Basis eines konzeptionellen Modells zur Geoökologie (Bioturbation und biogen veränderte Resuspensionseigenschaften und Bodenrauheit) entstand ein neues Benthos-*Modul*, welches eine generische Schnittstelle zur Berücksichtigung unterschiedlicher Makrofauna-Arten umfasst (Nasermoaddeli et al., in prep). Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden dazu die in Nord- und Ostsee dominanten Makrofaunagemeinschaften identifiziert und deren räumliche Aufteilung abgeschätzt. Mit einem Auftrag an das Institut für Angewandte Ökologie (IfAÖ) wurden die den Sedimenttransport prägenden Makrofaunaarten für den Bereich der Deutschen Bucht zu identifiziert und klassifiziert. Anhand einer Datenbankanalyse wurden insgesamt 20 Makrozoobenthos-Arten der Infauna und Epifauna ausgewählt (ibid.), die aufgrund ihres Bioturbationspotenzials und des Einflusses auf die Bodenrauheit besonders als bedeutsam für die Beeinflussung des Sedimenttransports anzunehmen sind:

1. Infauna: *Echinocardium cordatum*, *Amphiura filiformis*, *Lanice conchilega*, *Nephtys hombergii*, *Tellina fabula*, und *Nucula nitidosa*
2. Epifauna: *Asterias rubens*, *Crangon crangon*, *Crangon allmanni*, *Ophiura albida*, und *Liocarcinus holsatus*.

Die Auswirkungen auf Sedimentaustauschprozesse—etwa über die kritische Sohlschubspannung, Rauheit, Erodierbarkeit, Flokkulation, Biodeposition und -resuspension—wurden funktionalisiert und parametrisiert. Aufgrund der vielfältigen Effekte, die das Makrozoobenthos in seiner Gesamtheit auf die Wasser-Sediment-Grenzschicht ausübt (z.B. Abfrass des sedimentstabilisierenden Mikrophytobenthos) konnten in der Modellierung nur wenige ausgewählte Aspekte der für die betrachteten Arten untersucht. Zur Verallgemeinerung des Ansatzes wurden anhand funktionaler Ähnlichkeitsanalysen die 153 prägenden Makrofauna-Arten in der Deutschen Bucht den ausgewählten Makrofaunaarten mit bekannter *Parametrisierung* zugeordnet. Diese Zuordnung basierte auf sieben verschiedenen Merkmalen (Motilität, Ernährungsweise, Habitatstruktur, Sedimenttransport, Größe, Form und Position im Sediment) und dient als Grundlage für das in MOSSCO implementierte Makrofaunamodell.

Eine weiteres Makrobenthos-*Modul* beschreibt die Interaktion von Filtrierern (z.B. Miesmuscheln, insbesondere an Windturbinen-Pfählen) mit der pelagischen Biologie und Partikeldynamik (3D Filtrationskomponente). Das Filtrieren und die Co-Filtration von partikulärem Material wird hier in Abhängigkeit von Muscheldichte, Nahrungsverfügbarkeit (Phytoplanktonkonzentration und Strömung) und von artspezifischer Filtrationsleistungen berechnet (Slavik

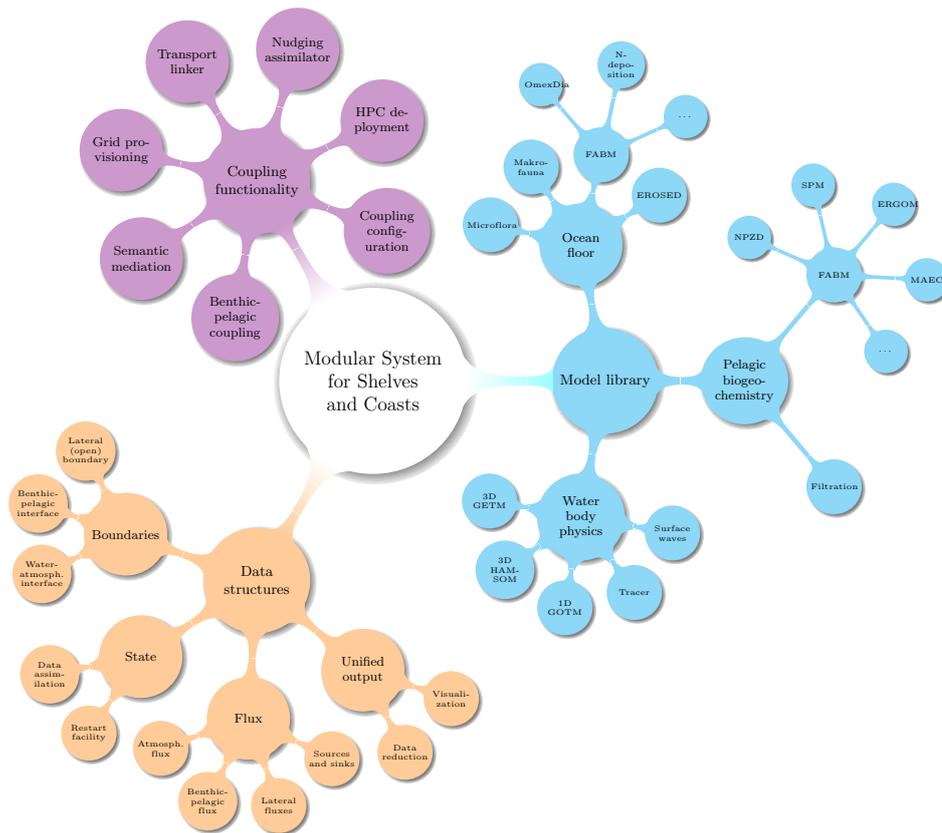


Abbildung 3.: Modulare Funktionalitäten und Modellkomponenten in MOSSCO

2016). Diese Filtrationskomponente wird in der Synthesephase des Projekts evaluiert und eingesetzt werden.

### 1.1.5. Modulare Modellintegration

Insgesamt konnten (bislang) siebzehn wissenschaftliche Modelle aufbereitet werden ("modular koppelbar" gemacht), so dass diese interaktiv und hochperformant zusammenwirken; Abb. 1.1.5 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Funktionalitäten, die oft einer *Komponente* oder einem *Modul* innerhalb von MOSSCO zugeordnet werden können.

### 1.1.6. Softwaretechnik

Die Entwicklung der Kopplungs-Software einschliesslich der *Komponenten* erfolgte seit April 2013 kontinuierlich. Insgesamt umfasst der Kern des Systems zur Zeit 816 Dateien mit 124.523 Quellcodezeilen, erstellt durch neun Entwickler. In 4341 Entwicklungsschritten ist der Fortschritt und jede Veränderung des Systems durch ein Versionskontrollsystem (git) festgehalten. Die Entwicklung des Quellcodes ist vollständig transparent, da dieser nicht nur als freie und offene Software unter der Gnu Public License (GPL) bereitsteht,

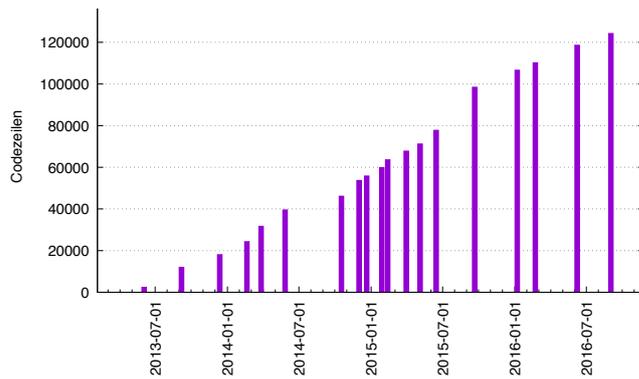


Abbildung 4.: Der Anstieg der Quellcodezeilen belegt die kontinuierliche Weiterentwicklung der Codebasis von MOSSCO.

sondern sogar die Entwicklungsschritte und Fehlerberichte jederzeit öffentlich einsehbar sind (<https://sf.net/p/mosso>).

Die von MOSSCO eingesetzte Programmiersprache ist Fortran im modernen Standard Fortran 2003, der Objektorientierung und Datenkapselung unterstützt und zudem von ESMF sowie einem Großteil der zu koppelnden Modelle genutzt wird. Dieser aktuelle Standard hat sich erst während der Laufzeit von MOSSCO in den von den Compilerherstellern bereitgestellten Versionen stabilisiert, so dass ständige Anpassungen erforderlich waren.

MOSSCO ist portabel auf verschiedensten UNIX-basierten Betriebssystemen einsetzbar; sämtliche Softwareabhängigkeiten können durch frei verfügbare Programme erfüllt werden. MOSSCO ist somit weltweit für alle Nutzer vollständig kostenlos installier- und ausführbar. Kleinere MOSSCO-Anwendungen für beschränkte geografische Regionen und mit grober Auflösung, sowie Entwicklung und Testen des Systems erfolgt auf Privatcomputern, Laptops oder kleineren Workstations mit Linux/macOS-Betriebssystem, sowohl bei den Verbundpartnern als auch an den Universitäten Kiel und Hamburg.

Zur Vorbereitung von aufwändigen Simulationen, die typischerweise Hochleistungsrechner benötigen, wurde MOSSCO mehrprozessorfähig gemacht ("parallelisiert"); Es ist möglich, ein parallel *Setup* auf einem lokalen Rechner zu testen und ohne Änderungen auf Höchstleistungsrechnern auszuführen. Diese für die Neuentwicklungen extrem hilfreiche Flexibilität und Plattformunabhängigkeit wird bislang von nur sehr wenigen Systemen angeboten. Für parallele Ausführungen benötigt MOSSCO Softwarepakete, die das sogenannte Message Passing Interface (MPI) bereitstellen; insbesondere die Konfiguration der jeweils an den Partnerinstituten oder angeschlossenen Rechnerinfrastrukturen vorhandenen Implementierung verschiedener MPI erforderte die Unterstützung der Rechenzentren und Anpassungen seitens MOSSCO. Momentan wird das System operationell auf den folgenden Rechnersystemen eingesetzt:

## 1.2. Integrative und flexible Modellanwendungen (WP 2-4, HZG, IOW, BAW)

Die Anwendungen des MOSSCO-Systems verfolgten eine Reihe von typischen Modellierungszielen, deren Priorität sich mit Projektverlauf verlagerte. Diese Ziele umfassten neben der Verifikation der neuartigen technischen Funktionsweise im wesentlichen die

1. Validierung einzelner *Komponenten* und gekoppelter *Konfigurationen* einschliesslich Erfassung von Modellunsicherheiten,

Type	Spitzname	Betriebssystem	Ort	CPU/Kerne
HPC	"Juropa"	SUSE Linux	Forschungszentrum Jülich	17664
HPC	"Jureca"	CentOS Linux	Forschungszentrum Jülich	45216
HPC	"Blizzard"	Linux	Deutsches Klimarechenzentrum	8448
HPC	"Mistral"	Linux	Deutsches Klimarechenzentrum	72000
HPC	"Ocean"	Linux	Helmholtz-Zentrum Geesthacht	308
HPC	"Tantalos"	Linux	Bundesanstalt für Wasserbau	1728
Workstation		Ubuntu Linux	Helmholtz-Zentrum Geesthacht	32
Workstation		Ubuntu Linux	Helmholtz-Zentrum Geesthacht	12
Workstation		SUSE Linux	Institut für Ostseeforschung	128
HPC	"Gottfried"	SUSE Linux	Norddt. Vb. Höchstleistungsrechnen	12288

Tabelle 1.: Auflistung der aktuell für MOSSCO genutzten Rechnerplattformen.

2. Bereitstellung von Datenprodukten für KüNO Schwesterprojekte,
3. Unterstützung von behördlichen Entscheidungsprozessen,
4. und die Generierung von Systemverständnis zur Dynamik der Küstenmeere.

Die Arbeiten zum ersten Ziel (Validierung) bildeten die Grundlage für alle folgenden Modell-anwendungen und fokussierten sich auf die realitätsnahe Beschreibung der Wasserphysik als wesentlichem Prozesstreiber. Zunehmend wurden im weiteren Projektverlauf auch beobachtete biogeochemische Zustände zur Validierung der entsprechenden Modellkomponenten genutzt. Die modulare Struktur von MOSSCO erlaubte schließlich die Quantifizierung von Modellunsicherheit vor allem für biogeochemische Vorhersagen durch technisch nun stark vereinfachte Modellvergleiche.

Über spezifische Simulationsdaten wurden sowohl KüNO Schwesterprojekte als auch behördliche Entscheidungsprozesse unterstützt, allerdings in unterschiedlicher Herangehensweise. Bei letzteren lag der Großteil des Aufwandes in der kontinuierlichen Kommunikation mit Behördenvertretern und anderen Stakeholdern. Nach der erfolgreichen Entwicklung der MOSSCO Software bestand die größte wissenschaftliche Herausforderung des Projektes in der integrativen Systemanalyse. Für die vom KüNO Forschungsprogramm hervorgehobenen Prozessbereiche wie Ökosystemfunktionen und Stoffbilanzierung einschließlich Sedimentdynamik wurden erste Einsichten zu Schlüsselprozessen und variablen Sensitivitäten gewonnen.

Die Arbeit an den oben genannten Zielen wurde über modulare und problemspezifisch gekoppelte *Konfigurationen* (Abschnitt 1.1 organisiert, die innerhalb ebenfalls neu erstellter *Setups* angewandt wurden. Die Definition dieser *Setups* in Abb. 5 reflektiert sowohl die Verfügbarkeit von Messdaten als auch die von den beteiligten Instituten oder im KüNO-Verbund bevorzugten Untersuchungsgebiete. 1D *Setups* für prominente Stationen standen angesichts der Kopplungsentwicklung am Anfang im Zentrum und wurden später durch 3D *Setups* ergänzt. Die Arbeit an jedem *Setup* verfolgte jeweils bestimmte Ziele:

Gotlandtief: Für das tiefste Becken der Ostsee wurden Modellunsicherheiten quantifiziert (Ziel 1).

Helgoland und Referenzstation "C" des NOAH-Projekts: An diesen beieinanderliegenden Hochseestationen wurden vor allem Validierungsstudien (Ziel 1) und erste Sensitivitätstests (Ziel 4) durchgeführt.

Transekt: Ein idealisierter Küstentranspekt diene einem einfachen Zugang zum Verständnis von Flachwassersystemen (Ziel 4).

Nord–Ostsee (NSBS): Mit der Anlegung eines Gesamt-*Setups* der beiden Regionalmeere wurde ein integrales Werkzeug für übergeordnete Fragestellungen des gesamten KüNO Verbundes geschaffen. Dieser *Setup* lieferte auch die Antriebsdaten für die weiteren 3D *Setups*.

Amrum: Bereitstellung von Daten zur Wasserphysik für STopP (Ziel 2)

Western Baltic Sea (WBS): Für den WBS wurden, z.T. gemeinsam mit SECOS, Validierungsstudien, Anwendungen auf umweltökonomische und behördliche Fragestellungen und wichtige Modellvergleiche bzw. Sensitivitätsstudien durchgeführt (Ziele 1, 3, 4)

Southern North Sea (SNS): Wie der WBS ein für MOSSCO sehr zentraler Setup mit ähnlichen Aufgaben, zusätzlich noch der Datengenerierung für NOAA (Ziele 1–4)

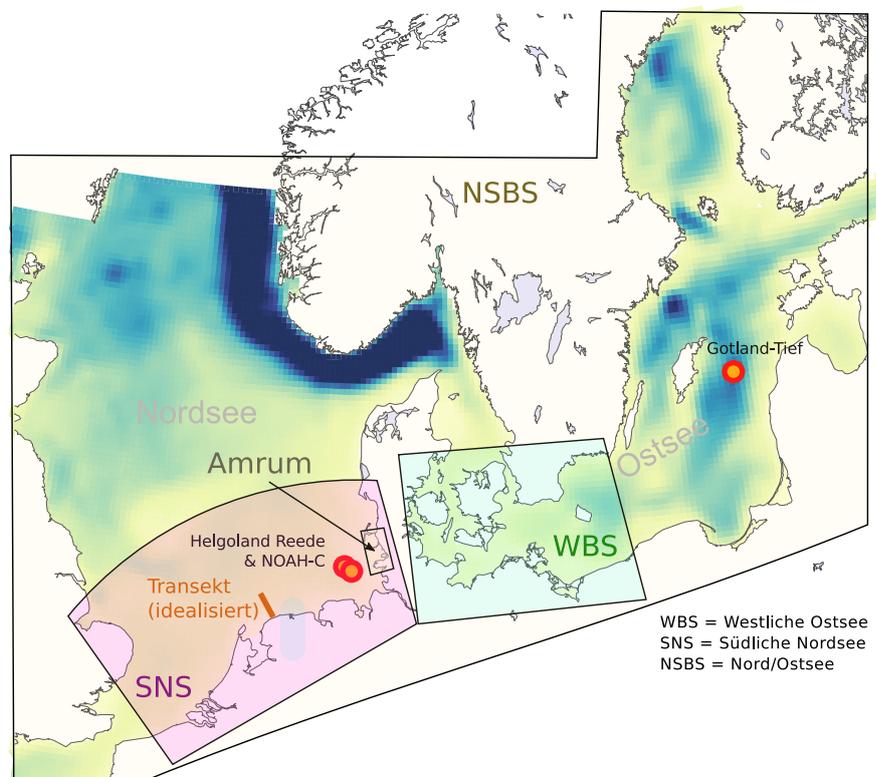


Abbildung 5.: Karte der *Setups* und Stationen. Das NSBS umfasst das gesamte gezeigte Gebiet (und geht in der Ostsee noch darüber hinaus), SNS, Amrum und WBS sind im NSBS verortet. Der idealisierte Transekt gibt einen typischen Küstengradienten wieder und ist hier zur Visualisierung im Ostfriesischen Watt verortet.

### 1.2.1. Modularer Modellvergleich (1D, Gotlandbecken)

Das Gotlandbecken ist das tiefste zentrale Becken der Ostsee, dort ist der 240 m tiefe Wasserkörper permanent geschichtet und in der Regel sauerstoffarm. Im Rahmen des Baltic Marine

Environment Protection Commission — Helsinki Commission (HELCOM) Monitoring liegen Langzeitdaten zur Physik und Geochemie vor. Das in GOTM vorhandene *Setup* "Gotland" wurde in MOSSCO übernommen und um eine ökologische *Parametrisierung* erweitert. Über die FABM-Kopplung in MOSSCO konnten die beiden Ökosystemmodelle MAECS und ERGOM im Hinblick auf Sauerstoffdynamik im Gotlandtief verglichen werden, bei identischer Simulation der Wasserphysik (GOTM). Beide Modelle zeigen nach 40 Simulationsjahren eine ähnliche biogeochemische Zonierung der Ostsee, allerdings mit verschiedenen Profilformen, aus denen sich Rückschlüsse zur Über- und Unterschätzung entsprechender Prozessparameter in MAECS und ERGOM ergaben (Abb. 6). Die Variationsbreite der beiden Profile ist auch ein erstes Maß für die Modellunsicherheit bei biogeochemischen Stoffumsätzen in geschichteten Schelfmeeren.

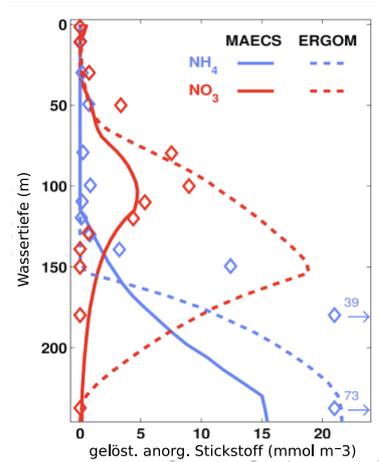


Abbildung 6.: Modularer Ökosystemvergleich an der Referenzstation "Gotland-Tief". Vertikalprofile für Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) und Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) für Juli 1987 wurden simuliert durch MAECS und ERGOM. Beide Modelle wurden ohne Parameterkalibrierung unter identischen Randbedingungen modular an die gleiche Wasserphysik (GOTM) gekoppelt, und beschreiben eine suboxische Zone mit  $\text{NO}_3$ -Maximum und die Akkumulation von  $\text{NH}_4$  im anoxischen Tiefbereich. Daten: Brettar & Rheinheimer (1992).

### 1.2.2. Studien entlang den Sediment-Wasser-Atmosphären-Kontinuums (1D Helgoland und NOAH-C)

Die Stationen Helgoland und NOAH-C sind Stationen mittlerer Wassertiefe nahe der Insel Helgoland. An diesen Stationen spielen Gezeiten eine große Rolle, der Schwebstoffgehalt ist gering, der Salzgehalt ist hoch. Langzeitdaten liegen durch unsere Kooperation mit dem Alfred-Wegener Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Helgoland für die Station Helgoland vor, sowohl für Nährstoffe als auch für Sichttiefen und das Artenspektrum. Für die NOAH-Station C wurde ein Referenzdatensatz für Suspendedes partikuläres Material (SPM) aufbereitet. Die Daten dazu wurden vom Senckenberg-Institut und dem Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) aus dem Projekt NOAH zur Verfügung gestellt. Für beide Stationen wurden flexibel 1D-Konfigurationen für GOTM und daran gekoppelte Modelle neu erstellt, mit Schwerpunkt entweder auf der SPM-Dynamik oder der Biogeochemie (Abb. 1.2.2). Diese Konfigurationen konnten später durch den Austausch des hydrodynamischen Modells GOTM durch GETM einfach auch für 3D Simulationen eingesetzt werden.

Mit der Konfiguration für das System Atmosphäre-Welle-Wassersäule-Boden wurde erfolgreich die Wasserphysik (Abb. 8) und Schwebstoffkonzentrationen an beiden Stationen getestet. Auch der mit EROSED gerechnete benthisch-pelagische Sediment austausch wurde anhand einer korrekten Massenbilanz validiert. Bei der Validierung der Schwebstoffdynamik wurde auf einen stationären Kanalströmungstest ("Rouse Profil") zurückgegriffen. Die analytische

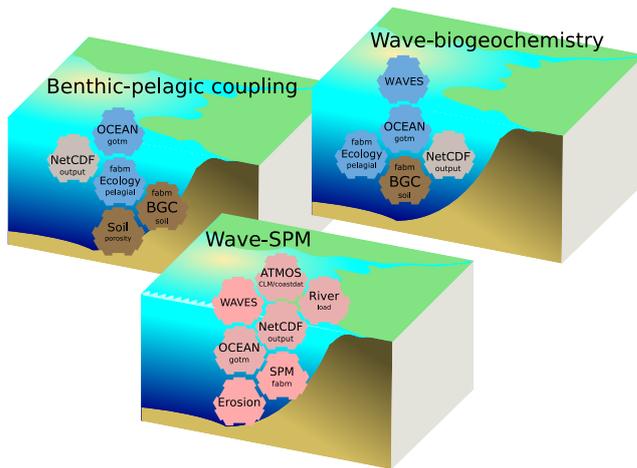


Abbildung 7.: Referenzkonfigurationen zum Testen der MOSSCO-Kopplung und zum Vergleich mit Daten von Projektpartnern im Küno-Verbund (z.B. NOAA) und AWI.

Lösung der vertikalen Sedimentkonzentrationsverteilung für nicht-kohäsive Sedimente konnte nahezu identisch abgebildet werden. Die Plausibilität des biologischen Modells wurde anhand einer Sensitivitätsstudie qualitativ überprüft, indem konsistente Änderungen der kritischen Sohlschubspannung sowie Erodierbarkeit bei variiert Biomasse von Mikrophytobenthos und Makrofauna (*Tellina fabula*) gefunden wurden (Nasermoaddeli, et.al, 2014a). Ähnliche Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung von Mikrophytobenthos und einer anderen Makrofauna-Art (*Abra alba*) erzielt (Nasermoaddeli, et.al, 2014b).

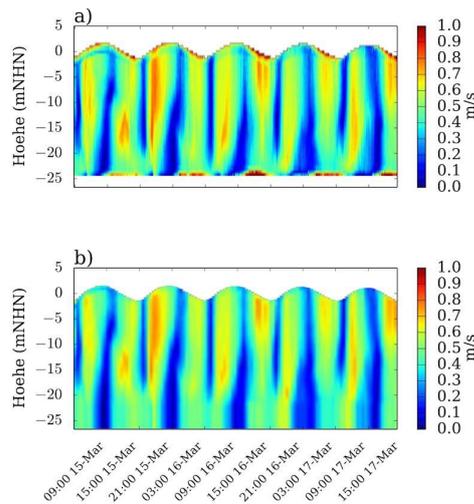


Abbildung 8.: Gemessene Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeit mit ADCP an der Station NOAA-C (C. Winter, MARUM). b) Durch MOSSCO simulierte Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeit.

Benthisch-Pelagische Stickstoff- und Phosphorflüsse wurden in multi-annualen Simulationen für die Station Helgoland berechnet, die Validierung der Flüsse erfolgte mit den Nährstoffdaten vom AWI Helgoland. Sedimentflüsse wurden der Referenzstation NOAA-C (nahe Helgoland) berechnet und zeigten ebenfalls eine hinreichende Übereinstimmung mit Daten des AWI Helgoland (Hofmeister et a. 2014).

### 1.2.3. Integrative Prozessstudie (Idealisierter 2D Transekt)

Der Nährstoffkreislauf im Küstengradienten wurde in einem idealisierten *Setup* beschrieben. Dieser *Setup* bildet einen für ein tidebeeinflusstes Schelfmeer typischen Küstengradienten

der Länge 60 km in 5 bis 20 m Wassertiefe ab. In diesem *Setup* wurde eine reduzierte Version des 3D hydrodynamischen Modells GETM modular an pelagische Ökosystem- und Schwebstoffdynamik, sowie an benthische Biogeochemie gekoppelt. Simulationen mit dieser *Konfiguration* erzeugten einen realistischen horizontalen Gradienten und Vertikalverteilung der Nähr- und Schwebstoffe entlang des Transekts.

Die Nährstoffgradienten werden durch den residualen Transport organischen Materials in der ästuarinen Zirkulation aufrechterhalten. Diese sorgt dafür, dass abgesunkenes Material in benthischen Prozessen wieder bioverfügbar gemacht wird und in den unteren Wasserschichten in Richtung der Küste transportiert wird. Dort kann so auch nach dem Aufzehren der Nährstoffe in der Frühjahrsblüte Phytoplankton in der gesamten Wachstumsaison existieren (Abb. 9).

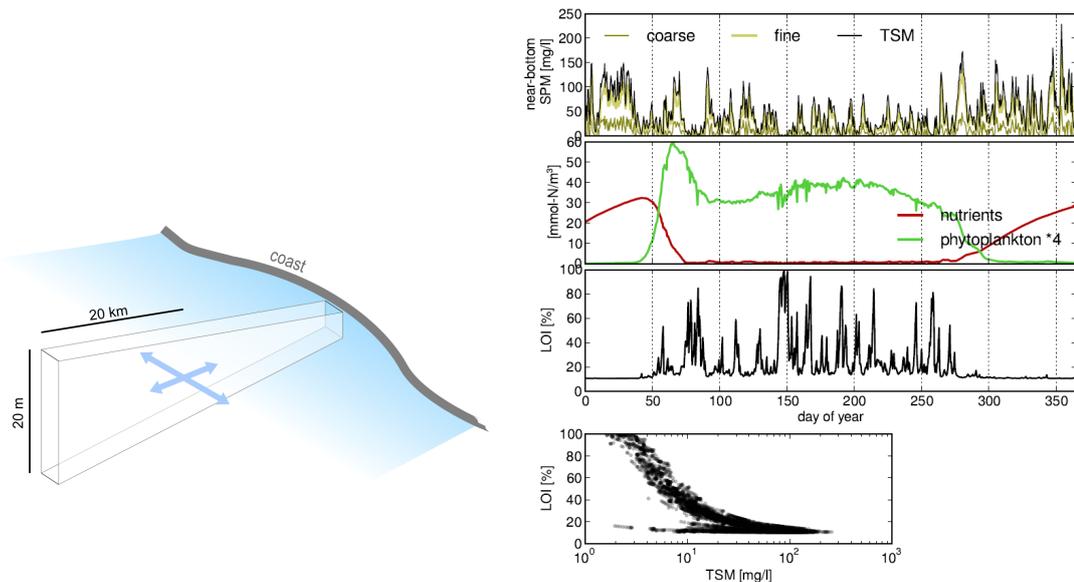


Abbildung 9.: Aufbau des idealisierten 2D Transekts (links) und Zeitserien von Gesamtschwebstoff (TSM) und seinen feinen und groben Fraktionen, Nährstoffen und Phytoplankton, sowie Qualität des biogenen Materials (LOI, Loss on Ignition, Hofmeister et al. 2016).

#### 1.2.4. Übergreifende Datensätze und Simulationen Nord–Ostsee (NSBS)

Der realistische hochaufgelöste Nordsee–Ostsee-*Setup*, mit mittlerer Gitterbreite von einer nautischen Seemeile) stellt die Grundlage sowohl für wissenschaftliche Studien (Gräwe et al., 2015) als auch zur Bereitstellung von Antriebsdaten für andere in MOSSCO verwendete *Setups* dar. Anhand von NSBS Simulationen wurden zum ersten Mal wesentliche Funktionalitäten des 3D MOSSCO Systems und verschiedenste Kopplungs-*Konfigurationen* getestet. Das hydrodynamische Modell GETM als wichtigem Treiber der pelagischen Modelle im North Sea Baltic Sea (NSBS) *Setup* konnte mit den bei HZG erhobenen Daten des Scanfish, einer vertikal oszillierenden vom Schiff gezogenen Messplattform, validiert werden. Die Simulationen bilden die vom Scanfish beobachtete laterale, vertikale, und zeitliche Variabilität der Temperatur, insbesondere auch die Schichtung des Wasserkörpers, realistisch ab (Abb. 10)

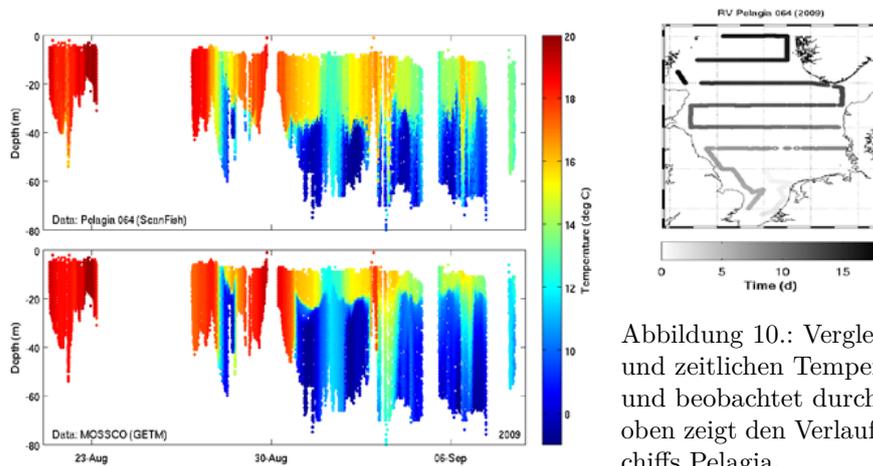


Abbildung 10.: Vergleich der lateralen, vertikalen und zeitlichen Temperatur simuliert mit GETM und beobachtet durch Scanfish. Das kleine Bild oben zeigt den Verlauf der Fahrt des Forschungsschiffs Pelagia.

Die anschliessenden Simulationen dienten vor allem der Demonstration einer einheitlichen Modellierung der Stoffdynamik der deutschen Küstengewässer. Dazu notwendige Daten für Flusseinträge von allen Anrainerstaaten wurden in einer neuen, allgemein zugänglichen Datenbank zusammengefasst sowie umfangreich dokumentiert (<http://www.hzg.de/ecomod/river>). Hierbei wurden Daten der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe, des Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS), der Universität Hamburg, der Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (ARGE), der Bundesamt für Gewässerkunde (BAfG), dem NLWKN, dem Rijkswaterstaat, der Universität Liège, und dem LLUR sowie des Baltic Nest Instituts (BNIs) aufbereitet. Zeitliche Lücken oder lokal nicht gemessene Nährstoffe wurden entweder mithilfe statistischer Verfahren extrapoliert (Eisele et al. 2015), oder unter Nutzung berechneter Flussfrachten (MONERIS) ergänzt. Hierzu wurde ein Script zur automatisierten Konvertierung von MONERIS-Daten in das von MOSSCO-Komponenten direkt nutzbare Datenformat entwickelt. Dabei zeigten sich aber auch Limitierungen des MONERIS-Datensatzes, so dass im Folgenden vermehrt mit Messdaten vom BNI, oder des Modells Hydrological Predictions for the Environment (HYPE) vom Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) gearbeitet wurden.

Die Integration der Atmosphärenphysik in MOSSCO erfolgte ohne Schwierigkeiten—voll automatisiert—über die generische I/O-Komponente. Für das vom Deutschen Wetterdienst (DWD) betriebene Atmosphärenmodell Climate Limited Area Model (CLM), dessen Physik am HZG für Klimarechnungen angepasst worden ist, liegen Resultate als Teil der CoastDat-Datenbank ab 1948 stetig aktualisiert vor.

Die Arbeit an generelleren Fragen belegte den Mehrwert von übergreifenden *Setups* für die gesamte Nord- und Ostsee innerhalb des KüNO-Verbundes. Deutlich wurde dies z.B. durch den synthetisierenden Charakter der Generierung von Denitrifizierungskarten (Abb. 11), die für beide Schelfmeergebiete nach einem einheitlichen Modellansatz erfolgte, und dabei auf mögliche Faktoren für die Unterschiedlichkeit in Bezug auf absolute Raten und räumliche Variabilität hinwies. Doch auch bereits *vor* der eigentlichen Modellrechnung musste eine Syntheseleistung stattfinden: Die beiden grossen Projekte NOAH und SECOS haben Porositätskarten jeweils für Nordsee oder Ostsee generiert, unter Einsatz unterschiedliche Verfahren—allerdings auf der Basis identischer geologischer Grundparameter wie etwa der mittleren Korngröße. Für die geplanten Simulationen ist aber ein einheitliches Datenfeld notwendig. Unter der Koordinierung von MOSSCO wurden die beiden Ansätze erfolgreich zu einer homogenisierten Porositätskarte für Nord- und Ostsee zusammengeführt (Abb. 11).

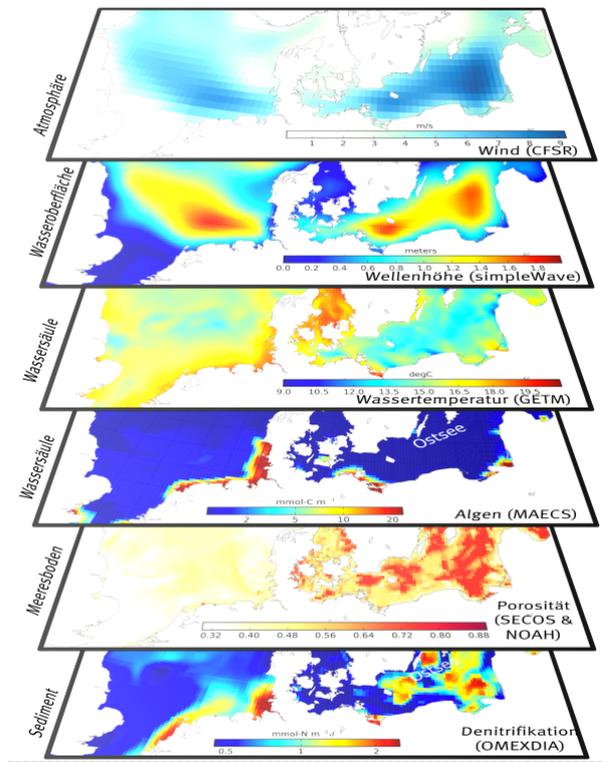


Abbildung 11.: Eingangsdaten und Ergebnisse einer 3D Simulation im NSBS Setup mit einer Wind–Wellen–Ökologie Konfiguration einschließlich des benthisch–pelagischen Austausches.

Damit entstand ein erstes projektübergreifendes Resultat, als Vorbereitung der End- und Bilanzierungsphase der KüNO-Verbünde.

### 1.2.5. Amrum

Für das Schwesterprojekt STopP wurde basierend auf Antriebsdaten von NSBS Simulationen ein hochaufgelöster (50 m) Strömungsatlas des gesamten Nordfriesischen Wattenmeeres erstellt, welcher u.a. Überflutungszeiten und Sohlschubspannungen beinhaltet. Der Atlas konnte mehrfach bei Datenanalysen im Schwesterprojekt STopP genutzt werden (z.B. Schwemmer et al., 2016).

### 1.2.6. Stofftransport und Ökosystemleistungen in der westlichen Ostsee (WBS)

Grundlage für Simulationen des Stoffhaushaltes in der Ostsee bilden valide hydrodynamische Modellrechnungen, hier mit dem Modell GETM. Zur Quantifizierung des numerischen Modellfehlers (für GETM und vergleichbare Modelle) wurde eine neue Analyseverfahren entwickelt, die die künstliche modell-induzierte Mischung von im Modell transportierten Variablen lokal in jeder Gitterzelle quantifiziert. Diese Metrik ermöglicht einen direkten, quantitativen Vergleich mit realer, physik-induzierter Mischung (Klingbeil et al., 2014) und somit die Evaluierung von numerischen Verfahren (Anwendungen in Mohammadi-Aragh et al., 2015; Gräwe et al., 2015) sowie die Identifizierung von kritischen Gebieten im Modellgebiet. Für die praktische Anwendung dieser Analyseverfahren wurde ein realistisches Western Baltic Sea (WBS) Setup (Auflösung 600 m) entwickelt und validiert, sowie ein Modell des Oderhaffs (Geldschlaeger 2016).

Für das Oderhaff wurde der Mehrwert des modularen Ansatzes in zwei Studien evaluiert, in denen der Effekt veränderter Antriebe gerechnet wurde: Zum einen wurden wind-induzierte Wellen und deren Effekt in einer gekoppelten Wellen-Ökosystem-Bodenkonfiguration untersucht. Die Sensitivitätsstudie zeigte, dass der Bodensauerstoffgehalt in weiten Teilen des Haffs deutlich geringer ist, wenn die wind-induzierten Wellen abgeschaltet werden (Abb. 12).

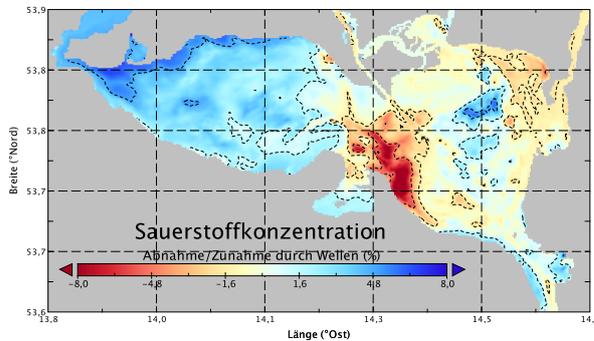


Abbildung 12.: Einfluss auf die Sauerstoffkonzentration im Oderhaff durch das zusätzliche Ankoppeln eines Modells für windinduzierte Wellen. Die Berücksichtigung von Wellen erhöht die Sauerstoffkonzentration in weiten Teilen des Haffs, führt aber im Zentrum auch zu einer deutlichen Erniedrigung

Zum anderen wurde der Einfluss des externen atmosphärischen Antriebs auf die Simulationsergebnisse zu untersucht. Eine Simulationen wurde dabei mit den Wettermodell vom National Centers for Environmental Prediction (NCEP) NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) und die zweite mit dem Wettermodell vom DWD angetrieben. Beide externen Antriebe unterscheiden sich in ihrer raumzeitlichen Auflösung—z.B. glättet das etwas größere DWD-Modell Extremereignisse.

Trotzdem verbessert der DWD-Antrieb die Simulationsergebnisse in Bezug auf physikalische Größen, wie z.B. den Bodensalzgehalt bei einer Messstation Kleinen Haff, aber auch die simulierten Chlorophyll-, Nährstoff- und Sauerstoffkonzentrationen stimmen besser mit Messwerten überein. Diese Aussagen sind allerdings noch vorläufig, da weitere Studien auf noch vorhandene Unsicherheiten bei der Modellierung des Stoffhaushaltes in der Ostsee hinwiesen (vgl. Kap.1.2.1): so wurde das modulare Konzept auch im WBS dazu genutzt, Modell-Komponenten (z.B. die BGC Module) auszutauschen und deren Ergebnisse zu vergleichen. Dieser Vergleich im WBS Setup belegte eine qualitative Übereinstimmung der beiden biogeochemischen Modelle (hier: ERGOM und MAECS), veranschaulichte aber auch das Ausmass der Modellunsicherheiten. Wie bei den 1D Studien in Abschnitt 1.2.1 stammen die Unterschiede aus den jeweiligen Modellformulierungen und Parametrisierungen, da die Physik und alle anderen gekoppelten Komponenten identisch blieben. Die Ergebnisse halfen, beide Modelle weiter zu verbessern.

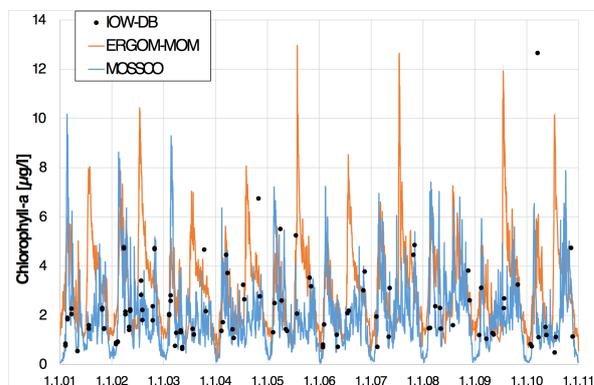


Abbildung 13.: Vergleich der vom gemessenen Chlorophyll-Konzentration (IOW-Datenbank) mit der simulierten unter Verwendung des ERGOM-MOM-Setups (vgl. Schernewski et al., 2015) und des WBS-Setups von MOSSCO in der Mecklenburger Bucht (Station TF12).

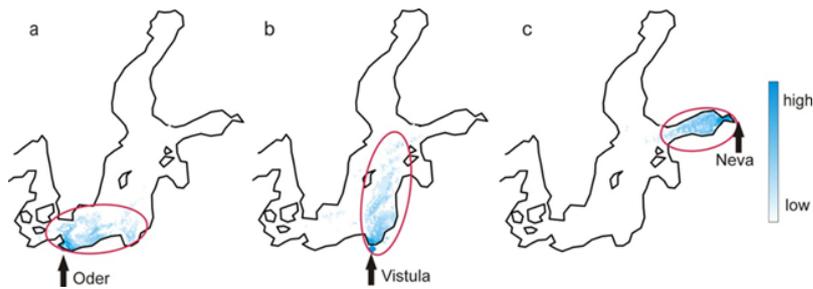


Abbildung 14.: Vergleich der Denitrifikation der Stickstoffeinträge aus Oder, Weichsel (Vistula) und Neva (Allin et al., subm.)

Das Ergebnis der fortlaufenden Modellkalibrierung von ERGOM ist bei der Simulation der Chlorophyll-a Schwankungen in der Mecklenburger Bucht sichtbar, wobei ERGOM-MOSSCO mit dem bei früheren Anwendungen (z. B. bei Schernewski et al., 2015) genutzten ERGOM-Modular Ocean Model (MOM) verglichen wurde Abb. 13. Die MOSSCO-Simulation verringerte vor allem die Überschätzung der Konzentrationen im Sommer aus der ursprünglichen Simulation. Weitere Vergleiche finden sich bei Friedland et al. (subm.).

Die steigende Güte der physikalischen und biogeochemischen Modellierung für die Ostsee erlaubte auch die Abschätzung der räumlichen Verteilung sowie Veränderung von Ökosystemleistungen. Hierzu wurden zwei Szenarien berechnet, eine für den gegenwärtigen Zustand und ein moderates Klimawandelszenario, und die jeweilige Veränderung der Denitrifikation der Stickstoffeinträge aus den Flüssen Neva, Weichsel und Oder analysiert (Allin et al., subm.; Abb. 14). Es zeigte sich, dass sich die Stickstoffeinträge von Oder und Weichsel durch den Klimawandel verringern und bei der Neva zunehmen. Der Anstieg der Wassertemperatur und der Stickstofffrachten (Neva) führt zu einem Anstieg der Denitrifikation der Stickstoffeinträge von Oder und Neva (9 bzw. 10%). Dieser Anstieg der Denitrifikation der Stickstoffeinträge aus Neva und Oder führt zu einer faktischen Reduktion der Einträge um mehr als 3 kt N pro Jahr. Die Kosten für die Reduktion der Stickstofffracht um 1 kg N für jedes Einzugsgebiet mussten aufgrund unterschiedlicher natürlicher Bedingungen und potentieller Management-Maßnahme separat berechnet werden. So sind die Kosten im Neva-Einzugsgebiet etwa achtmal höher als bei der Weichsel. In der Kombination der veränderten Frachten und Denitrifikationsraten wurde eine monetäre Veränderung von 11 Mill.EUR für die Oder, 2 Mill. für die Weichsel und 92 Mio. für die Neva bestimmt.

Mit ERGOM wurden dann räumlich differenzierte Denitrifikationskarten für die verschiedenen Szenarien generiert, die an ein neu entwickeltes ökonomisches monetäres Bewertungsmodell gekoppelt wurden. Räumlich differenzierte Aussagen über die ökonomischen Implikationen veränderter Denitrifikationsleistungen in der Ostsee sind allerdings problematisch. Beispielsweise gehen ökonomische Kostenfunktionen immer vom aktuellen Zustand aus und vergleichen die Kosten alternativer Zustände, decken also nur artifiziell konstruierte "Wirklichkeiten" ab. Zudem zeigt sich, dass die Wahl des ökonomischen Ansatzes das monetäre Ergebnis um den Faktor 10 verändern kann.

Eine isolierte Betrachtung einzelner Ökosystemleistungen (z.B Denitrifikation) macht schließlich nur begrenzt Sinn, da Wechselwirkungen zu andern Leistungen bestehen. Daher wurde im Projekt auf einfachere, nicht-monetäre, klassifizierende Ökosystemleistungs-Bewertungssysteme gewechselt, die aber die Gesamtheit der Ökosystemleistungen berücksichtigen. Die Arbeiten zum Ökosystemleistungsansatz werden in verschiedenen anderen Projekten (insbesondere SECOS-Synthese und BONUS-BaltCoast) fortgesetzt, mit dem Ziel ein maßgeschneidertes Bewertungstool zu entwickeln.

### 1.2.7. Sediment- und Ökosystemdynamik in der südlichen Nordsee (SNS)

Die bereits guten physikalische Modellergebnisse für GETM im relativ grob aufgelösten NSBS *Setup* (vgl. Abschnitt 1.2.4) erlaubten für den Südliche Nordsee (SNS) *Setup* einen schnellen Übergang zu Validierungsstudien der sedimentologischen und biogeochemischen Modelle.

Notwendige Vorarbeiten zu sedimentologischen Simulationen und Validierungen umfassten u.a. eine Sedimentinventarisierung der Deutschen Bucht (basierend auf Produkten des Projekts AufMod), die Beschreibung der großräumigen Verteilung suspendierter Sedimente über Satellitendaten, sowie Verteilungskarten der zuvor als prägend identifizierten Muschel *Tellina fabula* unter Mithilfe der Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Die in den 1D-Systemstudien (vgl. Abschnitt 1.2.2) gefundenen signifikanten biogenen Effekte auf die SPM-Konzentration konnten für die südliche Nordsee reproduziert werden: die Integration der Verteilungskarte von *Tellina fabula* induzierte deutliche Änderungen in der kritischen Sohlschubspannung und Erodierbarkeit des Schwebstoffs, mit folglich stark veränderten SPM-Konzentrationen nicht nur im bodennahen Bereich sondern auch in der gesamten Wassersäule. Die Modellergebnisse zeigen insbesondere, dass die Erhöhung der Schwebstoffkonzentration über die Besiedlungsgebiete des Makrobenthos hinausgeht (Abb. 15), was die bislang oft unterschätzte Relevanz bodennaher horizontaler Transportprozesse unterstreicht (Nasermoaddeli et al, 2016, 2017). Diese Erkenntnisse motivieren eine weitere Analyse der lateralen Auswirkung von Makrofaunabesiedlung auf den Schwebstoffhaushalt in der MOSSCO Synthesephase.

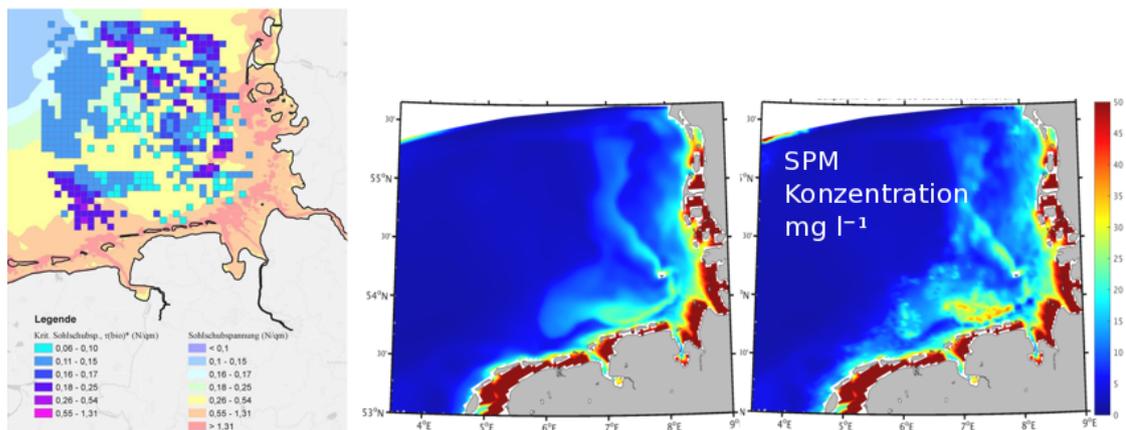


Abbildung 15.: Kritische Sohlschubspannung in der Deutschen Bucht bei Besiedlung mit der Muschel *Tellina fabula* (links) und bodennahe SPM-Konzentration ohne (mitte) und mit (rechts) Besiedlung durch *Tellina fabula*. Rechts: Im Vergleich zu mittleren Sohlschubspannung (90%-Häufigkeit Schubspannungskarte aus AufMod Projekt) verringert *T. fabula* vielerorts die kritische Sohlschubspannung und erhöht die Erodierbarkeit von leichtem Material.

In der aktuellen Synthesephase erfolgt dann auch die volle Kopplung zwischen Sediment- und Ökosystemdynamik. Letztere wurde in Phase 1 noch wie allgemein üblich unabhängig von raum-zeitlich sehr variablen Schwebstoffbedingungen gerechnet. Als empirisch belastbare Zwischenlösung wurden aus den Scanfish Messungen der Wassertrübung in der Deutschen Bucht aufbereitet (März et al 2016); diese Analyse lieferte sowohl ein vereinfachtes, saison- und tiefen-abhängiges Abschattungsmodell, als auch eine wichtige Hypothese zur wechselseitigen Beeinflussung von Sediment- und Ökosystemdynamik über die Veränderung der Sinkgeschwindigkeit der Partikel im Küstenvorfeld, und damit eine wichtige Motivation der

laufenden Arbeiten. Für die Ökosystemrechnungen der südliche Nordsee (SNS) wurden zudem Nährstoff-Randdaten aus einer dekadischen Simulation mit ECOHAM (Ecosystem Model Hamburg) herangezogen, sowie die unter Abschnitt 1.2.4 beschriebenen MOSSCO-Flussdatenbank integriert. Biogeochemische Kreisläufe wurden in der Wassersäule durch das neue Ökosystemmodell MAECS (Wirtz & Kerimoglu 2016) und im Meeresboden durch OMEXDIA (Soetaert et al 1996) beschrieben. Beobachtete laterale Variabilität in der Oberflächen-Konzentration des Chlorophyll-a konnte bzgl. typischer horizontaler Korrelationslängen gut getroffen werden (Abb. 16 links). Auch wenn die feinskaligen Strukturen nicht immer zeit- und ortsgetreu reproduziert werden, so demonstriert hier das modular gekoppelte System eine neue Qualität in der Ökosystem-Simulation eines Randmeeres (vereinfacht repräsentiert durch die Pigmentkonzentration in Abb. 16). Anhand der Simulationen konnten auch neue Hypothesen generiert werden, wie etwa zur Steuerung lateraler Muster im Chlorophyll-a durch das variable vertikale Absinkverhalten des Phytoplanktons (Wirtz et al, in prep, erste 3D Ergebnisse in Baschek et al., 2016). Interessanterweise werden trotz der geringen Wassertiefe im SNS (meist unter 50m) die lateralen Muster von organischem Material im Wasserkörper nur partiell an den Meeresboden weitergegeben. Stattdessen sorgt Resuspension sowie starker bodennaher Transport (s.o. zur SPM-Verteilung) zu einer von der pelagischen Produktion entkoppelten Gradientenbildung im Eintrag von organischem Material ins Sediment (Abb. 16 mitte). Als Folge zeigen die von OMEXDIA berechneten benthischen Respirationsraten eine starke laterale Variabilität, die teilweise quantitativ mit den Messdaten an den NOAA Stationen übereinstimmt (Abb. 16 rechts). Vor allem in den Sommermonaten können Sauerstoffflüsse an der benthisch-pelagischen Grenzschicht um fast eine Größenordnung variieren, je nach Lage im mittleren Strömungsmuster. Die Ergebnisse deuten zudem auf eine schon weit fortgeschrittene Kalibrierung von OMEXDIA hin, was durch Vergleich mit Denitrifizierungsraten im Bereich der Elbemündung (Deek et al 2013) bestätigt werden konnte. Angesichts der guten Resultate für die pelagische Primärproduktion und den benthischen Umsatz ist es nicht verwunderlich, dass auch die pelagische Dynamik in der Stickstoff-Konzentration selbst an einem als schwer zu modellierend geltendem Standort wie Helgoland zufriedenstellend reproduziert werden konnte (Abb. 17).

Basierend auf der Feinskaligkeit und hohen Qualität der biogeochemischer SNS Simulationen wurden im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie eine Reihe von Eutrophierungsszenarien im engem Austausch mit den zuständigen Umweltbehörden (NLWKN, UBA) gerechnet (Abb. 18). Die Ergebnisse zeigen große Konzentrationsgradienten in relativ kleinen Bereichen (zB Eider-N3 vs N4), und dass die Zielkonzentrationen nicht durch die in naher Zukunft geplanten Fracht-Reduzierungen erreicht werden können, insbesondere im polyhalinen Wattenmeer (N4). Bei den aktuellen EU-weiten Verhandlung künftiger Bewirtschaftungspläne bzw. Grenzwerte ("Interkalibrierung") sind diese Ergebnisse für die Umweltbehörden von sehr grossem Nutzen. Daher ist auch eine Erweiterung der Analyse auf die nicht-deutschen Küstengewässer innerhalb des SNS anvisiert.

### 1.3. Kommunikation (alle WP, HZG, IOW, BAW)

An einem zu Projektbeginn durchgeführten Expertenworkshop (16.-18. Sep. 2013) in der Akademie Schnakenbek beteiligten sich 40 Wissenschaftler/innen, darunter internationale Teilnehmer/innen aus zehn europäischen Ländern, sowie Repräsentanten/innen nationaler Stakeholder, wie der Bundesanstalt für Gewässerkunde, der Bundesanstalt für Seeschifffahrt

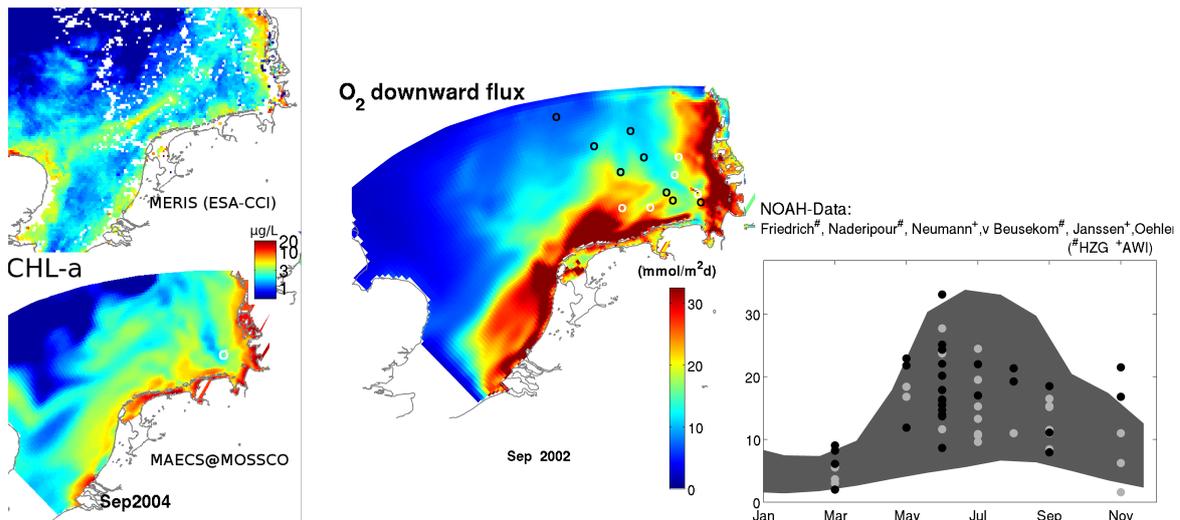


Abbildung 16.: Links: Oberflächen-Konzentration des Chlorophyll-a, für den 23. Sep 2004 beobachtet von drei Satelliten (ESA Produkt CCI, oben) und simuliert durch MAECS im 3D MOSSCO-System (unten). Mitte: Benthische Respiration in der südlichen Nordsee (SNS), simuliert vom benthischen BGC Modell OMEXDIA innerhalb des MOSSCO-Systems (für Sep 2002). Rechts: Jahresgang der NOAH Messdaten des O<sub>2</sub> Nettoflusses an 13 Stationen der Jahre 2013 und 2014 gezeigt (Kreise), die graue Fläche zeigt die Einhüllende der Simulationenwerte für alle NOAH Stationen. Dunkle Kreise: Stationen mit hoher Porosität des Meeresbodens, hell: niedrige Porosität. (Wirtz et al, in prep)

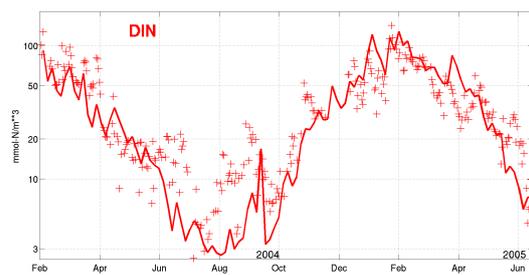


Abbildung 17.: Zeitlicher Verlauf des gelösten inorganischen Stickstoffs (DIN) bei Helgoland, sowohl gemessen (Datenquelle: AWI) also auch simuliert von MAECS eingebunden in den 3D SNS setup des MOSSCO-Systems.

und Hydrographie, der Bundesanstalt für Wasserbau und der umliegenden Universitäten. Die Design-Ideen des MOSSCO Projekts wurden vor dem Hintergrund der Erfahrungen der Experten diskutiert und ein Netzwerk von beteiligten Modellierungsgruppen etabliert (<http://www.mosso.de/workshop>).

Durch Teilnahme an internationalen Konferenzen, durch die Organisation regelmäßiger nationaler Treffen und durch die Mitorganisation von Experten-Sessions und weiterer Workshops wurde das Netzwerk gepflegt und die Sichtbarkeit von MOSSCO erhöht. Hervorzuheben sind hier international die Tagungen der Europäischen Geophysikalischen Union (EGU), der American Society for Limnology and Oceanography (ASLO), der Internationale Coupling Workshop (ICW) in Manchester, und die Internationale Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE). Vor allem durch die fortlaufenden ICW und Community Surface Dynamics Modeling System (CSDMS) Tagungen in Boulder hat sich MOSSCO strategisch in die relevanten internationalen Kopplungsdiskussionen etabliert.

Auf nationaler Ebene organisierte das Projekt Experten-Workshops bei den KüNO-Symposien

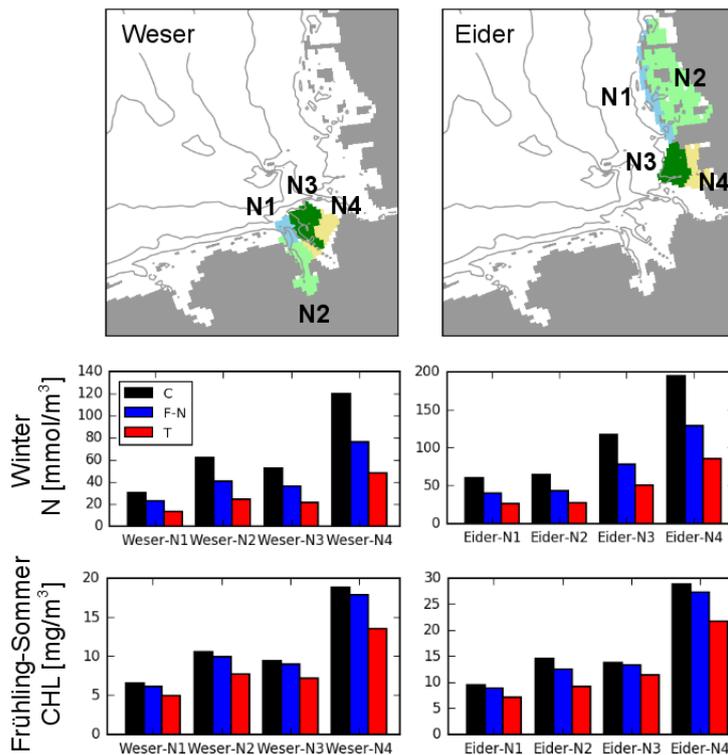


Abbildung 18.: Eutrophierungsszenarien für die Ästuar- und Einflussbereiche der Eider- und Weser N1–N4 (Wasserkörpereinteilung, oben). Vergleich der Konzentrationen von DIN (Wintermittelwert, Mitte) und Chlorophyll-a (Frühjahr-Sommer, unten) in den vier Wasserkörpertypen der Weser (links) und Eider (rechts) für drei Szenarien: Kontrolllauf (C); für die in naher Zukunft geplanten Stickstoff Reduzierungen in großen Flüssen (FN); bisheriges Managementziel (T), mit Stickstoff und Phosphor-Flussfrachten basierend auf den historischen (1880) Belastungen geschätzt von MONERIS (Gadegast und Venohr, 2015).

und Jahrestagungen und der internationalen Küstentagung in Berlin (2015), sowie Treffen am Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften (ZMAW). Insbesondere gemeinsam mit dem Schwesterprojekt SECOS gab es zahlreiche Stakeholder-Workshops, unter anderem:

- Erster Workshop Nährstoff-Referenz- und Orientierungswerte Nordsee, 8.7.2014
- Zweiter Workshop Nährstoff-Referenz- und Orientierungswerte Nordsee, 26.2.2015
- Workshop Nährstoff-Referenz- und Orientierungswerte Ostsee, LUNG Güstrow, 28.10.2013
- Workshop Nährstoff-Referenz- und Orientierungswerte Ostsee, LUNG Güstrow, 13.02.2014
- Workshop Nährstoff-Referenz- und Orientierungswerte Ostsee, BSH Hamburg, 15.09.2014
- Behördenvertreter-Workshop am 3.7.2015

Die Publikation in Fachzeitschriften ist noch nicht abgeschlossen, es sind jedoch 16 Publikationen bereits publiziert, akzeptiert, oder in Vorbereitung. Eine vollständige Übersicht der Publikations- und Konferenzbeiträge liegt in Abschnitt 4.6 vor.

Die MOSSCO Internetseite <http://www.mossco.de> enthält unter anderem die System-Dokumentation und geht insbesondere in der Form von "Rezepten" auf Nutzerfragen ein. Ein 1D-Modell für die Sedimentbiogeochemie wurde für das NOAH-C Schwesterprojekt erstellt und dortige Nutzer (F. Bockelmann) geschult. Benutzerfreundliche Schnittstellen und Auswerteroutinen wurden neu entwickelt. Der Quellcode steht öffentlich unter <http://www.mossco.de/code> zur Verfügung; ein Fehlerberichtssystem wurde unter <http://www.mossco.de/bugs> eingerichtet.

Zur internen Kommunikation wurde ein wiki (<http://www.mossco.de/wiki>) eingerichtet, sowie zur externen Kommunikation ein Weblog (<http://www.mossco.de/blog>). Ein Twitterstream @mosscodev stellt grafisches Material zur Verfügung.

Ausgesuchte Modellergebnisse wurden in die existierenden *WebGIS*-System Coastal Observatory for Northern and Arctic Seas (COSYNA) und Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht (WIMO) eingespeist (<http://www.mossco.de/webgis>). Vorarbeiten zur systematischen Bereitstellung der Daten über einen Datenserver sind erfolgt, der eigene Betrieb und die öffentliche Bereitstellung wurde aber zugunsten der Arbeiten am 3D-Referenzlauf zunächst zurückgestellt. Aktuell wird an eine Integration des mit WIMO entwickelten *WebGIS* in das Web-Interface des Partnerprojektes NOAH gearbeitet.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### 2.1. HZG

1. Personalmittel C. Lemmen (36 Personenmonat(e) (PM))
2. Personalmittel R. Hofmeister (36 PM)
3. Werkauftrag Datenbank
4. Werkauftrag HAMSOM/ TRACER
5. Reisen, u.a. 3rd International Coupling Workshop, Manchester, UK (Lemmen), Coupling Workshop, Triest, Italien (Hofmeister)

### 2.2. IOW

1. Personalmittel K. Klingbeil (29 PM)
2. Personalmittel R. Friedland (12 PM)
3. Peter Holtermann/Merten Siegfried (11,25 PM)
4. Reisen, u.a. Ocean Sciences Meeting, New Orleans, USA (Burchard), Gordon Conference, Biddeford, USA (Friedland)

## 2.3. BAW

1. Personalmittel M. H. Nasermoaddeli (24 PM)
2. Reisen, u.a. Hydoinformatic Conference 2014, New York, USA (Nasermoaddeli); International Conference on Hydrosience and Engineering 2014, Hamburg (Nasermoaddeli)

## 2.4. Zusätzlich eingeworbene Mittel

Vom NLWKN wurde ein Auftrag zu Modellrechnungen zur "Interkalibrierung" (13.000 EUR) erteilt. Zur Unterstützung der Modellsimulationen wurde u.a. Rechenzeit in Höhe von 95.000 Norddeutsche Parallelrechner-Leistungseinheit (NPL) auf dem Norddeutsche Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) eingeworben, die einen Wert von 24.700 Euro repräsentieren. Ebenfalls wurde am Forschungszentrum Jülich zusätzliche Rechenzeit im Umfang von 300000 Central Processing Unit (CPU)-h eingeworben.

# 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in WP1 erstellte Software ist die erste Kopplungsstrategie und deren Umsetzung für Küstensysteme und wurde schon in der Ausschreibung als notwendig identifiziert. Mit dieser Software wird zum ersten Mal der deutschen Küstenforschung eine offene technische Plattform für Zusammenarbeit bereitgestellt, die unterschiedliche Disziplinen, Domänen, und Organisationen zusammenbringt und sowohl existierende als auch neu zu entwickelnde Modelle transparent integriert. Der Personalaufwand war angesichts der Größenordnung der entwickelten Software leicht unterschätzt worden, konnte aber durch zusätzlich vom HZG erbrachte Eigenleistungen sichergestellt werden. Eigenleistungen der HZG waren zudem bei der Erstellung der *Setups* und deren wissenschaftlichen Verwendung notwendig.

Die in WP2 und WP4 durchgeführten Simulationen waren notwendig, um insbesondere die Funktionsfähigkeit des entwickelten modularen Modellsystems zu testen, zu validieren, anzuwenden und weiterzuentwickeln. Darüber hinaus wurde das WBS-*Setup* genutzt, um zentrale Parameter des Ökosystemmodells ERGOM anzupassen, um die Messwerte in der westlichen Ostsee besser als zuvor reproduzieren zu können. Die laufende Weiterentwicklung des adaptiven Ökosystemmodells MAECS profitiert sehr deutlich von der Möglichkeit, denselben Modell-Quelltext reibungsfrei in einer Serie von *Setups* anzuwenden, von 0D, 1D bis zum 3D SNS-*Setup*. Ein operatives, flexibel gekoppeltes und in wichtigen Teilen validiertes Modellsystem ist ein deutlicher Fortschritt gegenüber der Situation vor MOSSCO und wird die Grundlage für neue Anwendungen, Projekte und Publikationen darstellen.

Schwebstofftransport spielt eine zentrale Rolle in der prozessorientierten Küstenforschung wie im Umweltmanagement. Angesichts bislang weitgehender Vernachlässigung biogener Effekte

auf den Sedimenttransport waren die Entwicklungsarbeiten in WP3 notwendig. Dort wurde zum ersten Mal (nach unserem Kenntnisstand) ein 3D-Modell geschaffen, das wesentliche physikalische, ökologische sowie geoökologische Prozessen berücksichtigt. Dessen Ergebnisse unterstützen insbesondere die BAW bei ihrer strategischen Planung von Modellverbesserungen, um Schwebstofftransport in den deutschen Küstengewässern genauer simulieren zu können.

Die geleisteten Arbeiten in WP5 waren notwendig, da für die westliche Ostsee bislang kein vergleichbarer Ansatz zur Bewertung einer zentralen Ökosystemleistung wie der Denitrifikation vorlag. Auch wenn sich zeigte, dass die monetäre Bewertung der Denitrifikation nicht sinnvoll ist, so wurden in MOSSCO die Grundlagen zur Weiterentwicklung des Ökosystemleistungsansatzes gelegt—insbesondere in den Küstengewässern, die von den bisherigen Ansätzen ausgespart wurden.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen

### 4.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Die von HZG, IOW und BAW entwickelten Programmcodes werden unter der GPL Version 3 der Öffentlichkeit frei, das heißt sie werden als quelloffene und nicht-kommerzielle Software zur Verfügung gestellt. Die Dokumentation unterliegt der Creative Commons Attribution Share-Alike (CC-by-SA) Lizenz und ist damit ebenfalls frei zugänglich und weiterverbreitbar. Sowohl die Lizenz für den Quellcode als auch für die Dokumentation sind kompatibel mit der neuesten Version der European Public License (EURL).

### 4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Nach Projektende wird wie geplant kein unmittelbar wirtschaftlicher Nutzen für die Verbundpartner eintreten. Durch die gewählte Lizenzierung ist es aber möglich, dass Dritte die MOSSCO Software kommerziell oder nichtkommerziell nutzen.

### 4.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Der Bedarf nach einem gekoppelten System für die Küstenforschung ist sowohl auf nationaler Ebene als auch international bereits jetzt gegeben. MOSSCO ermöglicht mehr interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Modellierungsgruppen, es integriert bereits jetzt Modelle verschiedener europäischer Forschungsinstitutionen und Kleine und Mittlere Unternehmens (KMUs). Sowohl die wissenschaftliche Stellung der Partnerinstitute HZG, IOW, und BAW als auch die Möglichkeit, in Verbundanträgen erfolgreich Drittmittel einzuwerben, wird durch MOSSCO gefördert. Wesentlich für den längerfristigen Erfolg werden (1) die Verdeutlichung

des wissenschaftlichen und praxisbezogenen Mehrwertes eines modularen Systems, (2) die Demonstration der Austauschbarkeit von Daten und Modellen, und (3) der Support für Nutzer des Systems sein.

#### 4.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die jetzige Entwicklung des Systems ist eine Voraussetzung für die beginnende oder spätere Nutzung in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten (z. B. MOSSCO Synthese, BIOACID), der programmatischen Forschung der Helmholtz-Gemeinschaft (MOSSCO wird gemeinsam mit AWI im Bereich "Küstenökologie" des Programmes PACES genutzt), sowie durch Ämter und ggf. Unternehmen. Das gesammelte Wissen über Ökosystemleistungen, sowie eine Analyse der Wissenslücken bildete den Grundstein für neue Projekte, in denen die Lücken systematisch geschlossen werden sollen, insbesondere SECOS Synthese und die BONUS Projekte BaltCoast und OptiMus.

Durch die generische Integration von GOTM und GETM in das MOSSCO-System, können MOSSCO-Nutzer direkt von Verbesserungen und Erweiterungen in GOTM und GETM profitieren und diese für ihre MOSSCO-Anwendungen nutzen. Nach dem letzten stabilen Release von GOTM Version 4.0 im Jahr 2007 ist für Ende des Jahres 2016 das Release von GOTM Version 5.0 geplant. Dieses Release beinhaltet viele neue Features, die insbesondere für die 1D Anwendungen von MOSSCO interessant sind. Ähnliche Verbesserungen in GETM, z.B. erweiterte Turbulenzroutinen oder Trockenfallalgorithmen (u.a. Gräwe et al., 2016), stehen dann auch für 3D Simulationen mit MOSSCO zur Verfügung. Hiervon werden insbesondere die geplanten Wattenmeer-Anwendungen in MOSSCO Synthese profitieren können. Im Rahmen der Entwicklung von energiekonsistenten Modellen werden im Sonderforschungsbereich (SFB)/Transregio 181 (2016–2020) die Adaptation der vertikalen Schichten und die Advektionsverfahren weiter optimiert. In den vergangenen Jahren wurden durch Kooperationen GOTM und GETM verstärkt für die Seenmodellierung erweitert und eingesetzt. Eine zukünftige Nutzung von MOSSCO in der Limnologie ist somit ebenfalls möglich.

#### 4.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der gekoppelte Systeme haben sich während der Laufzeit folgende Entwicklungen ergeben.

1. Das Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System (COAWST) System wurde mehrfach erfolgreich auf die Simulation von Wellen, Sediment und Hydrodynamik in Sturmsystemen angewandt (Warner et al 2015). Diese Entwicklung positioniert das COAWST eher weg von der Küste, sodass der Bedarf für ein gekoppeltes Küstenmodell wie MOSSCO steigt.
2. Das Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg (MPI Hamburg) hat ein eigenes gekoppeltes System mit eigenem Koppler erfolgreich in erste Anwendungen gebracht, die allerdings noch nicht über die Domänen Atmosphäre und Ozean hinausgehen, und auch weder das Trockenfallen des Küstenmeeres noch biogeochemische Prozesse enthalten. Zukünftig könnte dieses MPI Hamburg-System in Konkurrenz zu MOSSCO treten.

Doch die geschlossene Softwareentwicklung seitens MPI Hamburg steht dem offenen Entwicklungsmodell von MOSSCO entgegen.

3. Aufbauend auf ESMF wurde NUOPC entwickelt, welches ähnlich zu MOSSCO versucht, die Erstellung und Kopplung von ESMF-*Komponenten* zu vereinfachen. Bisher beschränkt sich der Einsatz von NUOPC jedoch auf die klassische Kopplung von Ozean-Eis-Atmosphärenmodellen.

Der stabilisierende Effekt von Biofilm auf die kritische Sohlschubspannung wurde unter kontrollierten Bedingungen im Labor untersucht und eine mechanistische Formulierung vorgestellt (Fang et al., 2014). Da diese Untersuchung den periodischen Trockenfall von Biofilm in intertidalen Bereich nicht berücksichtigt, wurde die in MOSSCO bestehende Formulierung beibehalten. Neue Felduntersuchungen von Harris et al (2015) deuten darauf hin, dass die bioturbierende Makrofauna eine wichtige Rolle bei der Erhöhung der Erosionsrate in intertidalen Bereichen haben könnte, zusätzlich zu deren Effekt auf das Mikrophytobenthos (Harris et al, 2016). Diese Studien bestätigen die Fortführung der Kopplung von Makrofauna- und Sediment-Modellen in MOSSCO Synthesphase.

Während der Laufzeit von MOSSCO beantragten das IOW zusammen mit der MONERIS-Arbeitsgruppe und weiteren Projektpartnern das Projekt Ableitung und Umsetzung zeitlich und räumlich harmonisierter Qualitätsziele im Einzugsgebiet und den Gewässern der südwestlichen Ostsee (ReVision) innerhalb der BMBF-Fördermaßnahme Regionales Wasserressourcen-Management (ReWaM). Leider wurde der Antrag nicht gefördert. In Folge dessen beschloss die MONERIS-Arbeitsgruppe, sich vorerst auf die Modellierung anderer Einzugsgebiete zu konzentrieren, so dass in näherer Zukunft keine aktualisierten Modellergebnisse für das deutsche Ostsee-Einzugsgebiet von dieser Gruppe zu erwarten waren. Da gleichzeitig die Ergebnisse des Einzugsgebietes HYPE vom SMHI über ein *WebGIS* veröffentlicht und regelmäßig aktualisiert werden, erscheint auf Dauer eine Kopplung von MOSSCO aus HYPE vielversprechender als an MONERIS.

## 4.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen

### 4.6.1. Freie und Offene Software

Die Software, die erstellten *Setups* und die technische Dokumentation für das "Modular System for Shelves and Coasts" sind über die MOSSCO Webseite und die Internetplattform Sourceforge zugänglich:

- <https://sf.net/p/mossco/code>, oder <http://www.mossco.de/code>.
- <https://sf.net/p/mossco/setups>, oder <http://www.mossco.de/setups>.
- <https://sf.net/p/mossco/doc>, oder <http://www.mossco.de/doc>.

#### 4.6.2. Begutachtete/zu begutachtende Fachartikel

Allin, A., Schernewski, G., Friedland, R., Neumann, T., Radtke, H., Climate change effects on ecosystem services and costs in the Baltic Sea: Denitrification. *J. Coast. Conserv. Plan. Manag.* submitted.

Baschek, B., Schroeder, F., Brix, H., Riethmüller, R., Badewien, T. H., Breitbach, G., Brügge, B., Colijn, F., Doerffer, R., Eschenbach, C., Friedrich, J., Fischer, P., Garthe, S., Horstmann, J., Krasemann, H., Metfies, K., Ohle, N., Petersen, W., Pröfrock, D., Röttgers, R., Schlüter, M., Schulz, J., Schulz-Stellenfleth, J., Stanev, E., Winter, C., Wirtz, K., Wollschläger, J., Zielinski, O., and Ziemer, F.: The Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas (COSYNA), *Ocean Sci. Discuss.*, doi:10.5194/os-2016-31.

Friedland, R., Pastuszak, M., Gadegast, M., Gräwe, U., Klingbeil, K., Mahnkopf, J., Palazzo, D., Radtke, H., Stalnacke, P., Venohr, M., von Weber, M., Wozniczka, A., Schernewski, G..Water Quality of the Szczecin Lagoon (past, present, future) - Integrated modelling and observations. *Biogeosciences.* submitted.

Gräwe, U., Holtermann, P., Klingbeil, K., Burchard, H., 2015. Advantages of vertically adaptive coordinates in numerical models of stratified shelf seas. *Ocean Model.* 92, 56-68. doi:10.1016/j.ocemod.2015.05.008

Hofmeister, R., Flöser, G., Schartau, M., 2016. Estuary-type circulation as a factor sustaining horizontal nutrient gradients in freshwater-influenced coastal systems. *Geo-Marine Lett.* accepted. doi:10.1007/s00367-016-0469-z

Janssen, A.B.G., Arhonditsis, G.B., Beusen, A., Bolding, K., Bruce, L., Bruggeman, J., Couture, R.-M., Downing, A.S., Elliott, J.A., Frassl, M.A., Gal, G., Gerla, D.J., Hipsey, M.R., Hu, F., Ives, S.C., Janse, J.H., Jeppesen, E., Jöhnk, K.D., Kneis, D., Kong, X., Kuiper, J.J., Lehmann, M.K., Lemmen, C., Özkundakci, D., Petzoldt, T., Rinke, K., Robson, B.J., Sachse, R., Schep, S.A., Schmid, M., Scholten, H., Teurlincx, S., Trolle, D., Troost, T.A., Dam, A.A. Van, Gerven, L.P.A. Van, Weijerman, M., Wells, S.A., Mooij, W.M., 2015. Exploring, exploiting and evolving diversity of aquatic ecosystem models : a community perspective. *Aquatic Ecology* 49.4 (2015): 513-548.

Klingbeil, K., Burchard, H., 2013. Implementation of a direct nonhydrostatic pressure gradient discretisation into a layered ocean model. *Ocean Model.* 65, 64–77. doi:10.1016/j.ocemod.2013.02.002

Klingbeil, K., Mohammadi-Aragh, M., Gräwe, U., Burchard, H., 2014. Quantification of spurious dissipation and mixing? Discrete variance decay in a Finite-Volume framework. *Ocean Model.* 81, 49–64. doi:10.1016/j.ocemod.2014.06.001

Lemmen, C., Burchard, H., Hofmeister, R., Jöckel, P., Klingbeil, K., Kösters, F., Naser-moaddeh, M.H., Valcke, S., Wyrwa, J., Modular Coupling Workshop, P., Wirtz, K.W., 2016. Modular Coupling in Coastal and Shelf Science. *J. Mar. Syst.* in prep.

Lemmen, C., Burchard, H., Hofmeister, R., Kerimoglu, O., Klingbeil, K., Kösters, F., Naser-moaddeh, M.H., Wirtz, K.W., 2016. Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO). *Geosci. Model Dev.* in prep.

Maerz, J., Hofmeister, R., van der Lee, E.M., Gräwe, U., Riethmüller, R., Wirtz, K.W., 2016. Maximum sinking velocities of suspended particulate matter in a coastal transition zone. *Biogeosciences* 13, 4863–4876. doi:10.5194/bg-13-4863-2016

Mohammadi-Aragh, M., Klingbeil, K., Brüggemann, N., Eden, C., Burchard, H., 2015. The impact of advection schemes on restratification due to lateral shear and baroclinic instabilities. *Ocean Model.* 94, 112–127. doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.021

Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Lemmen, C., Kerimoglu, O., Hofmeister, R., Klingbeil, K., Burchard, H., Wirtz, K.W., 2016. Large scale effect of macrofauna *Tellina fabula* on suspended sediment transport in the southern Nord See. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* in prep.

Schwemmer, P., Güpner, F., Adler, S., Klingbeil, K., Garthe, S., 2016. Modelling small-scale foraging habitat use in breeding Eurasian oystercatchers (*Haematopus ostralegus*) in relation to prey distribution and environmental predictors. *Ecol. Modell.* 320, 322–333. doi:10.1016/j.ecolmodel.2015.10.023

Wirtz, K.W., Kerimoglu, O., 2016. Optimality and variable co-limitation controls autotrophic stoichiometry. *Front. Mar. Sci.* accepted.

Wirtz, K.W., Friedrichs, J., Kerimoglu, O., Lemmen, C. 2016. Horizontal decoupling between benthic and pelagic production in a shallow shelf sea. *PLOS One*, in prep

#### 4.6.3. Nicht-begutachtete Fachpublikationen

Allin, A. 2014. Ecosystem Services in Baltic Coastal Waters: Denitrification. Master thesis, Universität Lüneburg

Eisele, A., Kerimoglu, O., 2015. MOSSCO River data basis — Riverine Nutrient inputs (Internal Report). Geesthacht, Germany.

Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., 2014. Conceptual Model for Biota Sediment Interactions., BAW Report A39550270155-1. Hamburg, Germany.

Geldschläger, O., 2016. Verfahren zur Parameteranpassung bei gekoppelten Modellen von Ökosystemen. Masterarbeit, Universität Greifswald

Klingbeil, K., M. Mohammadi-Aragh, U. Gräwe, H. Burchard (2015). Quantification of spurious mixing and dissipation and the effect of vertically adaptive meshes. *Oberwolfach Reports.* 10.4171/OWR/2015/41.

Lemmen, C., Hofmeister, R., 2016. MOSSCO User Guide and Reference Manual. Online [www.mossco.de/doc](http://www.mossco.de/doc)

Lemmen, C., Hofmeister, R., Wirtz, K.W., 2013. Das Modulare System für Schelfmeer und Küsten (MOSSCO) - Konzepte und Infrastruktur zum Zusammenwirken verschiedener Modelle für die Küstenforschung. *KFKI Newsl.* 8–10.

#### 4.6.4. Konferenzbeiträge

Friedland, R., Neumann, T., Schernewski, G., 2014. The good ecological state of the Baltic lagoons – defined by using the historical nutrient loads and achieved with the new BSAP, Littoral 2014. Klaipeda.

Friedland, R., Inácio, M., Schernewski, G., 2015. Linking Ecosystem Services: Secchi Depth as water quality indicator in Oder Lagoon, International Workshop on Coastal Ecosystem Services at the Land–Sea Interface. Kiel.

Friedland R, Grahl, Inacio M, Neumann T, Radtke H, Schernewski G, Siegel H, 2015: Using Secchi Depth as water quality indicator of coastal waters. *BSSC* 10, Riga, Lettland.

- Friedland, R., Klingbeil, K., Kerimoglu, O., Hofmeister, R., Lemmen, C., Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Wirtz, K.W., Burchard, H., 2016. Comparing ecosystem models of the South-Western Baltic Sea using a modular system, KüNO 1 Abschlussstagung.
- Hofmeister, R., Lemmen, C., Kerimoglu, O., Wirtz, K.W., 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, in: Lehfeldt, R., Kopmann (Eds.), 11th International Conference on Hydrosience and Engineering. Hamburg.
- Hofmeister, R., Lemmen, C., Klingbeil, K., Nasermoaddeli, M.H., Wirtz, K.W., 2015. Data, models, and views: Towards modular integration of numeric components in aquatic sciences, American Society for Limnology and Oceanography. Granada, Spain.
- Hofmeister, R., Lemmen, C., Nasermoaddeli, M.H., Klingbeil, K., Wirtz, K.W., 2015. Data, models, and views: towards integration of diverse numerical model components and data sets for scientific and public dissemination, Geophysical Research Abstracts. European Geophysical Union, Vienna, Austria, p. EGU2015-7319.
- Inácio M, Schernewski G, Nazemtseva Y, Friedland R: An Ecosystem Service Assessment tool for coastal lagoons and first application. 04.03.2016, Eurolag 7, Murcia, Spanien.
- Hofmeister, R., Nasermoaddeli, M.H., Klingbeil, K., Friedrich, J., Wiltshire, K.H., Burchard, H., Kösters, F., Wirtz, K.W., 2014. Einfluss von Wassertiefe und benthischer Fauna auf simulierte vertikale Stoffflüsse: Modulare Simulation von Nährstoffflüssen, KüNO Jahrestagung 2014.
- Klingbeil, K., 2013. Projektvorstellung: MOSSCO. Workshop Maritime Systeme, Workshop Maritiime Systeme. Universität Rostock, Rostock, Germany.
- Klingbeil K., Gräwe U, Burchard H, Bolding K, Büchmann B., 2015. The coastal ocean model GETM. Marine Systems Institute, Tallinn University of Technology, Estonia.
- Klingbeil K., Gräwe U, Holtermann P, Burchard H., 2015. Latest Developments with GETM. Modelliertreffen BSH und IOW, Warnemünde.
- Klingbeil K., Lemmen C, Nasermoaddeli MH, Hofmeister R, Kerimoglu O, Kösters F, Burchard H, Wirtz K., 2015. MOSSCO - A generic model system for coastal ocean applications. KüNO Jahrestagung.
- Klingbeil K., Lemmen C, Nasermoaddeli MH, Hofmeister R, Kerimoglu O, Kösters F, Burchard H, Wirtz K., 2015. MOSSCO - A generic model system for coastal ocean applications. Future Coast Europe, Berlin, Germany.
- Klingbeil K., Lemmen C, Nasermoaddeli MH, Hofmeister R, Kerimoglu O, Kreuz M, Kösters F, Burchard H, Wirtz K., 2015. MOSSCO - A generic model system for coastal ocean applications. Gordon Research Conferences, Biddeford, USA.
- Klingbeil K., Lemmen C, Nasermoaddeli MH, Hofmeister R, Kerimoglu O, Kreuz M, Kösters F, Burchard H, Wirtz K, 2015. MOSSCO - Eine gemeinsame Infrastruktur für die Nord- und Ostseeforschung. KDM-Symposium "Küste 2015", Hamburg.
- Klingbeil, K., Gräwe, U., Burchard, H., 2013. Neueste Entwicklungen in GETM und deren Relevanz für MOSSCO, KüNO Kickoff Meeting, Schnakenbek
- Klingbeil K., Moghimi S, Gräwe U, Burchard H., 2013. Coupling of the coastal ocean model GETM and the statistical wind wave model SWAN. Coupling workshop Schnakenbek
- Klingbeil K., Mohammadi-Aragh M, Gräwe U, Burchard H., 2016. Local quantification of numerically-induced mixing and dissipation. EGU, Vienna, Austria
- Klingbeil K., Mohammadi-Aragh M, Gräwe U, Burchard H., 2015. Quantification of spurious mixing and dissipation and the effect of vertically adaptive meshes. MFO Workshop on Recent Developments in the Numerics of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws, Oberwolfach, Germany
- Klingbeil K., Mohammadi-Aragh M, Gräwe U, Burchard H., 2015. Quantification of spurious mixing and dissipation and the effect of vertically adaptive meshes. Workshop "Energy transfers in atmosphere and ocean", Hamburg, Germany.

- Klingbeil, K., Mohammadi-Aragh, Gräwe, U., Burchard, H., 2014. Quantification of spurious dissipation and mixing – Discrete Variance Decay in a Finite-Volume framework, HydroSeminar. Bergen, Norway.
- Klingbeil, K., Mohammadi-Aragh, Gräwe, U., Burchard, H., 2014. Quantification of spurious dissipation and mixing – or – Is it worth to develop sophisticated internal wave parameterisations for Baltic Sea models, Workshop International Leibniz Graduate School for Gravity Waves and Turbulence in the Atmosphere and Ocean. Leipzig, Germany.
- Klingbeil, K., Mohammadi-Aragh, Gräwe, U., Burchard, H., 2013. Analysis of spurious dissipation and mixing in mesoscale and submesoscale simulations, Warnemünde Turbulence Days. Warnemünde, Germany.
- Klingbeil K., Schüler L, Bruggeman J, Bolding K., 2016: Turning GOTM into a lake model. Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), Department of Lake Research, Magdeburg.
- Lemmen, C., 2013. The Earth System Modeling Framework, 1st International Workshop on Modular Coupling. Schnakenbek, Germany.
- Lemmen, C., Burchard, H., Hofmeister, R., Kerimoglu, O., Klingbeil, K., Kreuz, M., Nasermoaddeli, M.H., Wirtz, K.W., 2015. Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO), Symposium "Küste 2025". Konsortium Deutsche Meeresforschung, Hamburg, Germany.
- Lemmen, C., Burchard, H., Hofmeister, R., Klingbeil, K., Nasermoaddeli, M.H., Kerimoglu, O., Kösters, F., Wirtz, K.W., 2016. Modelling Biogeochemistry Across Domains with The Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO), ASLO Ocean Sciences Meeting. New Orleans, USA.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Kerimoglu, O., Wirtz, K.W., 2016. Towards a 50-year climate state of ecology and biogeochemistry in the German Seas, John von Neumann Institute for Computing Symposium, Jülich, Germany.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Nasermoaddeli, M.H., Kerimoglu, O., Etal., 2015. Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO) Coupling biological processes to Earth System Models, 3rd Workshop on Coupling Technologies for Earth System Models. Manchester, United Kingdom.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Nasermoaddeli, M.H., Kerimoglu, O., Klingbeil, K., Kösters, F., Burchard, H., Wirtz, K.W., 2016. Coupling biological processes to Earth System Models, Institute of Energy and Climate Research Seminar. Jülich, Germany.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Nasermoaddeli, M.H., Klingbeil, K., Kösters, F., Burchard, H., Wirtz, K.W., 2015. Coupling of benthic and pelagic processes in 1D and 3D: The Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO), 3rd Aquatic Ecosystem Modeling Workshop. Driebergen, The Netherlands.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Nasermoaddeli, M.H., Klingbeil, K., Wirtz, K.W., 2014. Modular coupling of benthic and pelagic processes: The new MOSSCO framework for domain and process coupling, System States and Transitions of Tidal Estuaries. Hamburg-Harburg, Germany.
- Lemmen, C., Hofmeister, R., Wirtz, K.W., Nasermoaddeli, M.H., 2014. The Modular System for Shelves and Coasts Seas (MOSSCO): A novel tool for embedding (ecosystem) models, KüNO Summer School on Marine Benthic Habitats. Lauenburg, Germany.
- Lemmen, C., Kapitza, H., 2013. Coupling Components Using ESMF, KüNO Kickoff Meeting. Hamburg.
- Levin Nickelsen, Nasermoaddeli, M.H., 2016. Berücksichtigung von biogeochemischen und biologischen Effekten auf den Sedimenttransport, BAW Kolloquium. Hamburg, Germany. Moghimi, S., Klingbeil, K., Gräwe, U., Burchard, H., 2013. Coupling of the coastal ocean model GETM and the statistical wind wave model SWAN, International Modular Coupling Workshop. Schnakenbek, Germany.
- Nasermoaddeli, M.H., 2013. Coupling of Deltares bed model with MOSSCO, International Modular Coupling Workshop. Schnakenbek, Germany.
- Nasermoaddeli, M.H., Hofmeister, R., Lemmen, C., Klingbeil, K., Burchard, H., Kösters, F., Wirtz, K.W., 2014. Einfluss von Wassertiefe und benthischer Fauna auf simulierte, vertikale Stoffflüsse, 1. Jahrestagung Küstenforschung Nordsee-Ostsee. Warnemünde.

- Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Lemmen, C., Wirtz, K.W., Klingbeil, K., Hofmeister, R., Burchard, H., 2015. Modelling the effects of benthic organisms on sediment transport and the challenges, Symposium "Küste 2025". Hamburg.
- Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., 2014. First Results of Modelling Benthos Influence on Sediment Entrainment Using a Generic Approach within the MOSSCO Framework, Lehfeld, R. (Ed.), 11th International Conference on Hydrosience and Engineering. Hamburg, pp. 625–631.
- Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Hofmeister, R., Klingbeil, K., Kerimoglu, O., Kösters, F., Burchard, H., Wirtz, K.W., 2016. Does macrofauna affect suspended sediment distribution in large scale?, Estuarine Coastal Sciences Association 56, Hamburg, Germany.
- Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Hofmeister, R., Kösters, F., Klingbeil, K., 2014. The Benthic Geoecology Model within the Modular System for Shelves and Coasts (MOSSCO), 11th International Conference on Hydroinformatics. Hamburg.
- Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Kösters, F., Hofmeister, R., Klingbeil, K., Kerimoglu, O., Burchard, H., Wirtz, K.W., 2016. Does macrofauna affect suspended sediment distribution in large scale?, KüNO 1 Abschlussstagung, Warnemünde.
- Schernewski, G., Friedland, R., Neumann, T., 2013. Einsatz von Modellen in der Praxis: Beispiele und Herausforderungen, KüNO Kickoff Meeting. Hamburg, Germany.
- Schernewski, G., Allin, A., Friedland, R., Neumann, T., Radtke, H., 2015. Climate change effects on ecosystem services and costs in the Baltic Sea: Denitrification, International Workshop on Coastal Ecosystem Services at the Land–Sea Interface. Kiel, Germany.
- Schernewski G, Allin A, Friedland R, Neumann T, Radtke H, 2015. Climate change effects on ecosystem services and costs in the Baltic Sea: Denitrification. KÜNO Jahrestagung, Warnemünde, Germany
- Slavik, K., Lemmen, C., Zhang, W., Kerimoglu, O., Wirtz, K.W., 2016. Offshore windfarm impact on pelagic primary production in the southern North Sea, KüNO 1 Abschlussstagung, Warnemünde, Germany.
- Slavik, K., Lemmen, C., Zhang, W., Kerimoglu, O., Wirtz, K.W., 2016. The large scale impact of offshore windfarm structures on pelagic primary production in the southern North Sea, North Sea Open Science Conference. Oostende, Belgium.
- Wirtz, K.W., 2013. Modularity as a key model system trait. NIOZ Texel Modeling Workshop.
- Wirtz, K.W., 2014. Plankton food-webs re-played by mechanistic, modular, and trait-based models. IMCOnet, Gent.
- Wirtz, K.W., 2014. Plankton food-webs in a mechanistic, modular, and trait-based perspective. CREST conference, Tokyo.
- 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, Yantai, China.
- Wirtz, K.W., 2014. Mesoscale patterns in phytoplankton blooms and their mechanistic roots in trait optimization. JAMSTEC Sem. Yokohama, Japan.
- 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, Advances in Marine Ecosystem Modeling Research. Plymouth, United Kingdom.
- Wirtz, K.W., Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Kösters, F., Hofmeister, R., Klingbeil, K., Kerimoglu, O., Burchard, H., Kreuz, A. Eisele, U. Gräwe, 2015. MOSSCO: Framework for modular integration of coastal models and data. Coastal Ocean Modelling Workshop, Bremen, May 2015
- Wirtz, K.W., Lemmen, C., Burchard, H., 2016. Decoupled variability in coastal seas revealed by model coupling, KüNO 1 Abschlussstagung, Warnemünde, Germany.

#### 4.6.5. Zitierte Fremdpublikationen

Brettar, Ingrid, and Gerhard Rheinheimer, 1992. "Influence of carbon availability on denitrification in the central Baltic Sea." *Limnology and Oceanography* 37.6 : 1146-1163.

Bruggeman, J., Bolding, K., 2014. A general framework for aquatic biogeochemical models. *Environ. Model. Softw.* 61, 249–265. doi:10.1016/j.envsoft.2014.04.002

Dannheim Jennifer, 2014. Bewertungsansätze für Raumordnung und Genehmigungsverfahren im Hinblick auf das benthische System und Habitatstrukturen, Statusbericht und Web-Dienst im GeoSeaPortal des BSH. Forschungsvorhaben im Auftrag des BSH.

Fang, H. et al. (2014): Changes in the critical erosion velocity for sediment colonized by biofilm. In: *Sedimentology*, 61, 3, S. 648?659.

Gadegast, M., Venohr, M., 2015. Modellierung historischer Nährstoffeinträge und -frachten zur Ableitung von Nährstoffreferenz- und Orientierungswerten für mitteleuropäische Flussgebiete. Tech. rep., Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin e.V., Berlin

Harris, R. J. et al. (2015): Biotic interactions influence sediment erodibility on wave-exposed sandflats. In: *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 523, S. 15-30.

Harris, R. J. et al. (2016): The Influence of Benthic Macrofauna on the Erodibility of Intertidal Sediments with Varying mud Content in Three New Zealand Estuaries. In: *Estuaries and Coasts*, 39, 3, S. 815-828.

Mellor, G., 2013. Waves, circulation and vertical dependence. *Ocean Dynamics* (63), 447–457.

Peckham, S.D., 2014. The CSDMS Standard Names: Cross-Domain Naming Conventions for Describing Process Models , Data Sets and Their Associated Variables, in: Daniel P. Ames, Nigel W. T. Quinn, A.E.R. (Ed.), *International Environmental Modelling and Software*. International Environmental Modelling and Software Society, San Diego.

Soetaert, K., J., H.P.M., Middelburg, J.J., 1996. A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1019–1040.

Syvitski, J.P., Hutton, E., Piper, M., Overeem, I., Kettner, A., Peckham, S.D., 2014. Plug and Play Component Modeling—The CSDMS2.0 Approach.

# Glossar

*Komponente* Ein mit einem Kopplungsrahmeninterface (CMI) ausgestattetes Modell oder Koppler innerhalb eines Kopplungsrahmens. 7, 8, 11–16, 18, 23, 25, 35

*Konfiguration* Zeitlicher und logischer Ablauf der benutzen gekoppelten Modelle und der dazwischen auszutauschenden Daten. 7, 8, 10, 18, 20–23

*Kopplungsrahmen* Software, die die Schnittstellen definiert, über die gekoppelte Modelle Daten und Information austauschen. 5–7, 10–12, 14

*Modul* Funktionale Programmeinheit in einem Computermodell. 5, 6, 13, 15, 16, 25

*Parametrisierung* Gesamtheit aller numerischen und wissenschaftlichen Einstellungen, inklusive Koeffizienten in den mathematischen Formulierungen eines Modells. 7, 8, 10, 15, 19, 25

*Setup* Gesamtheit aller für eine Simulation auf einem bestimmten Gitter erforderlichen Daten, inklusive der Rand- und Antriebsdaten und einer passenden Parametrisierung der Numerik.. 6, 10, 17–19, 22, 23, 25, 27, 32, 33, 35

*WebGIS* Per Internet bereitgestelltes Geografisches Informationssystem. 31, 35

# Abkürzungsverzeichnis

- 0D nulldimensional. 13, 14  
1D eindimensional. 13, 14, 18, 20, 27, 31, 34  
3D dreidimensional. 13, 14, 16, 19, 21–23, 31, 33, 34
- ARGE Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe. 23  
AWI Alfred-Wegener Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. 20, 22
- BAfG Bundesamt für Gewässerkunde. 23  
BGC Biogeochemie. 8, 25  
BMI Basismodellinterface. 10, 12–14  
BNI Baltic Nest Institut. 23
- CC-by-SA Creative Commons Attribution Share-Alike. 33  
CEFAS Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science. 23  
CFRS NCEP Climate Forecast System Reanalysis. 25  
CGT Code Generation Tool. 13  
CLM Climate Limited Area Model. 23  
CMI Kopplungsrahmen-Interface. 10–14  
COAWST Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System. 35  
COSYNA Coastal Observatory for Northern and Arctic Seas. 31  
CPU Central Processing Unit. 32  
CSDMS Community Surface Dynamics Modeling System. 30
- DIN Dissolved Inorganic Nitrogen. 12  
DWD Deutscher Wetterdienst. 23, 25
- ERGOM Erste Generation des IOW-Modells des Ökosystems der Ostsee. 8, 13, 19, 25, 26, 33  
EROS3D Delft3D Erosion-Sedimentation Model. 14, 21  
ESMF Earth System Modeling Framework. 10, 11, 13, 14, 17, 35  
EUPL European Public License. 33
- FABM Framework for Aquatic Biogeochemical Modeling. 8, 12–14, 19  
FGG Flussgebietsgemeinschaft. 23
- GETM General Estuarine Transport Model. 7, 11, 14, 21–25, 27, 34  
GOTM General Ocean Turbulence Model. 13, 19–21, 34  
GPL Gnu Public License. 17, 33
- HAMSOM Hamburg Schelfozean-Modell. 14, 31  
HELCOM Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission. 19  
HYPER Hydrological Predictions for the Environment. 23, 35  
HZG Helmholtz-Zentrum Geesthacht. 6, 10, 23, 32–34
- I/O Eingabe/Ausgabe. 12, 23
- KMU Kleine und Mittlere Unternehmen. 34

MAECS Model for Adaptive Ecosystems. 13, 19, 25, 33  
 MOM Modular Ocean Model. 26  
 MOSSCO Modular System for Shelves and Coasts. 5–8, 10–19, 23–27, 30, 31, 33–35  
 MPI Message Passing Interface. 17  
 MPI Hamburg Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg. 35  
  
 NCEP National Centers for Environmental Prediction. 25  
 NOAH North Sea Observation and Assessment of Habitats. 8, 19, 20, 22, 24, 31  
 NPL Norddeutsche Parallelrechner-Leistungseinheit. 32  
 NSBS North Sea Baltic Sea. 23, 24, 27  
 NUOPC National Unified Operational Prediction Capability. 11, 35  
  
 OMEXDIA Ocean Margin Exchange Diagenese. 12, 13  
  
 PM Personenmonat(e). 31, 32  
  
 ReVision Ableitung und Umsetzung zeitlich und räumlich harmonisierter Qualitätsziele im Einzugsgebiet und den Gewässern der südwestlichen Ostsee. 35  
 ReWaM Regionales Wasserressourcen-Management. 35  
  
 SECOS Service of Sediments in German Coastal Seas. 8, 19, 24, 27, 30, 34  
 SFB Sonderforschungsbereich. 34  
 SMHI Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 23, 35  
 STopP From Sediment to Top Predator. 8, 19, 24  
 SWAN Simulating Waves Nearshore. 14  
  
 TRACER Hamburg Tracermodell. 14, 15, 31  
  
 UBA Umweltbundesamt. 8, 28  
  
 WBS Western Baltic Sea. 25, 33  
 WP work package. 6, 10, 32, 33