Schlussbericht

Teile I und II

zum Verbundvorhaben *CoastalFutures*

der DAM sustainMare-Mission

Scenarios to Promote Sustainable Futures of Contested Marine Areas

Partner: Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (J)

Autoren: Dr. Vera Sidorenko, Dr. Cédric Meunier, Dr. Sabine Horn, Prof Dr. Maarten Boersma, Prof. Dr. Karen Wiltshire, Gaziza Konyssova, Sheng Wang

Förderkennzeichen: 03F0911J

Laufzeit: 01.12.2021 - 30. 11. 2024 (Phase 1)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0911J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert von Bundesministerium für Bildung und Forschung

Schlussbericht

Teil I: Kurzbericht

zum Verbundvorhaben CoastalFutures

der DAM sustainMare-Mission

Scenarios to Promote Sustainable Futures of Contested Marine Areas

Partner: Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (J)

Autoren: Dr. Vera Sidorenko, Dr. Cédric Meunier, Dr. Sabine Horn, Prof Dr. Maarten Boersma, Prof. Dr. Karen Wiltshire, Gaziza Konyssova, Sheng Wang

Förderkennzeichen: 03F0911J

Laufzeit: 01.12.2021 - 30. 11. 2024 (Phase 1)

Gefördert von Bundesministerium für Bildung und Forschung

Das Projekt **CoastalFutures** entwickelte ein innovatives, skalenübergreifendes End-to-End-Modellsystem für die Nord- und Ostsee sowie angrenzende Küstengebiete. Dieses System fungierte und fungiert als virtuelle Umgebung zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels und anthropogener Nutzungen auf marine Ökosysteme. Darüber hinaus dient es der Erprobung verschiedener Managementmaßnahmen. Das Projekt stellt somit ein zentrales Entscheidungsunterstützungsinstrument für ein integratives, zukunftsfähiges Management mariner Systeme dar und trägt maßgeblich zum Verständnis der Anpassung an sich wandelnde Umweltbedingungen bei. Es konzentrierte sich auf vier zentrale Managementsektoren: Offshore-Energieerzeugung, Fischerei, Küstenschutz und Sandmanagement sowie Nährstoff- und Schadstoffeinträge.

Die Forschungsarbeiten des **Alfred-Wegener-Institut (AWI)** tragen direkt vor allem zu den Arbeitspaketen AP 2 “Framework für integrierte Küstenmodellierung”, AP 3 “Offshore Windenergie-Ausbau” des Verbundvorhabens CoastalFutures bei. In allen Arbeitspaketen wurde eng mit den Verbundpartnern zusammengearbeitet, insbesondere mit Hereon in den Arbeitspaketen 2, und mit der Universität Hannover in AP3. Konkret hat das AWI sich auf drei Bereiche konzentriert: direkt Abschätzungen von Effekten von Unterwasserlärm, welches mit dem Ausbau von Windfarmen assoziiert ist auf Meeresorganismen, Modellierung von Schwebstoffen in der Nordsee und die Analyse und Integration von biologischen Zeitreihen.

Im Rahmen von CoastalFutures untersuchte das AWI unter anderem die Auswirkungen niederfrequenten Lärms (LFN), der während der gesamten Betriebsdauer von Offshore-Windparks erzeugt wird. Kontrollierte Laborstudien belegen, dass Schlüsselarten wie Krebstiere und Polychaeten in Verhalten und Physiologie durch LFN beeinflusst werden, während andere Arten – etwa die Miesmuschel (*Mytilus spp.*) – kaum Reaktionen zeigen. Diese Erkenntnisse liefern eine wertvolle Grundlage für die Ausweisung und Planung von Meeresschutz- und Mehrnutzungsgebieten.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des AWI lag auf der Rolle biotischer Faktoren bei der Dynamik der Schwebstoffkonzentration (SPM) im Wattenmeer der Sylt-Rømø-Bucht. Mithilfe langfristiger Messdaten und maschineller Lernverfahren konnte aufgezeigt werden, dass biotische Bedingungen – insbesondere in den Frühjahrs-, Sommer- und Herbstmonaten – maßgeblich zur SPM-Dynamik beitragen. Diese Ergebnisse ermöglichen die Entwicklung verbesserter Parametrisierungen zur realitätsnäheren Abbildung von SPM-Bedingungen in küstennahen numerischen Ozeanmodellen.

Zudem führte das AWI hochauflösende Simulationen mit dem Küstenozeanmodell **FESOM-C** durch, um potenzielle Auswirkungen des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs auf die Sylt-Rømø-Bucht zu analysieren. Prognosen zufolge könnten zwischen 4,6 % und 7,4 % der heutigen Wattflächen bis zum Zeitraum 2050–2100 überflutet werden. Dies hätte erhebliche Folgen für die ökologische Konnektivität sowie den Material- und Stofftransport in der Region.

Darüber hinaus wurde die räumliche Repräsentativität der Messstationen der **LTER-Standorte Sylt und Helgoland Roads** hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Erfassung der spatio-temporalen Variabilität des Ökosystems mittels maschineller Lernverfahren analysiert. Die Ergebnisse weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den nördlichen und südlichen Teilgebieten hin – ein Aspekt, der bei künftigen Monitoring- und Managementstrategien dringend berücksichtigt werden sollte.

Insgesamt liefert das AWI im Rahmen von CoastalFutures substanzielle wissenschaftliche Beiträge zur Weiterentwicklung maritimer Schutz- und Managementmaßnahmen. Diese Erkenntnisse fließen in partizipative Prozesse mit Entscheidungsträgern und weiteren relevanten Stakeholdern ein und unterstützen die Umsetzung nachhaltiger, evidenzbasierter Strategien für das marine Umweltmanagement.

Teil II: Eingehende Darstellung zum Verbundvorhaben *CoastalFutures* der DAM sustainMare-Mission

Scenarios to Promote Sustainable Futures of Contested Marine Areas

Partner: Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (J)

Autoren: Dr. Vera Sidorenko, Dr. Cédric Meunier, Dr. Sabine Horn, Prof Dr. Maarten Boersma, Prof. Dr. Karen Wiltshire, Gaziza Konyssova, Sheng Wang

Förderkennzeichen: 03F0911J
Laufzeit: 01.12.2021 - 30. 11. 2024 (Phase 1)

Gefördert von Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2

1. Ergebnisse im Einzelnen - Wissenschaftliche Ergebnisse nach Arbeitspaketen (AP) 3

1.1. AP2 - Framework für integrierte E2E Küstenmodellierung 3

1.2. AP3 Ökosystemauswirkungen durch Offshore-Windenergieausbau 10

1.3. AP8 Management von *CoastalFutures* und Transfer 12

2. Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 12

3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 14

4. Veröffentlichungen der Ergebnisse 15

4.1. Publikationen (erfolgte, inkl. In-kind funded) 15

4.2. Publikationen (geplante, inkl. In-kind funded) 16

4.3. Andere Beiträge 16

1. Ergebnisse im Einzelnen - Wissenschaftliche Ergebnisse nach Arbeitspaketen (AP)

Im Rahmen des *CoastalFutures*-Projekts war das Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (Teilvorhaben J) vor allem in den Arbeitspaketen (APs 2 und 3) aktiv eingebunden. Die wissenschaftlichen Beiträge des AWI-Teams bezogen sich vor allem auf die Analyse der Zeitreihen, Modellierung der Deutschen Bucht und die Analyse von Effekten von Lärm auf Meeresorgansimen.

1.1. AP2 - Framework für integrierte E2E Küstenmodellierung

AP2 galt der Entwicklung eines skalenübergreifenden End-to-End (E2E) Frameworks, das den Einfluss multipler Stressoren auf physikalische, biogeochemische und biologische Prozesse unterschiedlichster Skalen und Systeme konsistent modelliert, Fernwirkungen und Konnektivität von Habitaten berücksichtigt und szenarienfähig ist. In diesem Framework werden unterschiedliche Modellentwicklungen nationaler Meeresforschungsinstitutionen miteinander gekoppelt und Module zur Verfügung gestellt.

AP 2.4 Entwicklung eines End-to-End Küstenökosystemmodells

Das Ziel des Projekts war es, numerische Werkzeuge zu entwickeln, die hydrodynamische, ökologische und biogeochemische Prozesse integrieren, um die Vorhersagefähigkeiten für die Reaktionen von Küstensystemen auf den Klimawandel zu verbessern. Im Rahmen dieses Projekts wurde am Fallbeispiel der Sylt-Rømø-Bucht (Abb. 1) Forschung betrieben, um Küstenmodellierungsansätze zu verbessern und das Zusammenspiel zwischen biotischen und abiotischen Prozessen im Küstenökosystem besser zu verstehen, um eine robuste Bewertung der Resilienz des Ökosystems gegenüber stressbedingten Auswirkungen des Klimawandels zu ermöglichen.

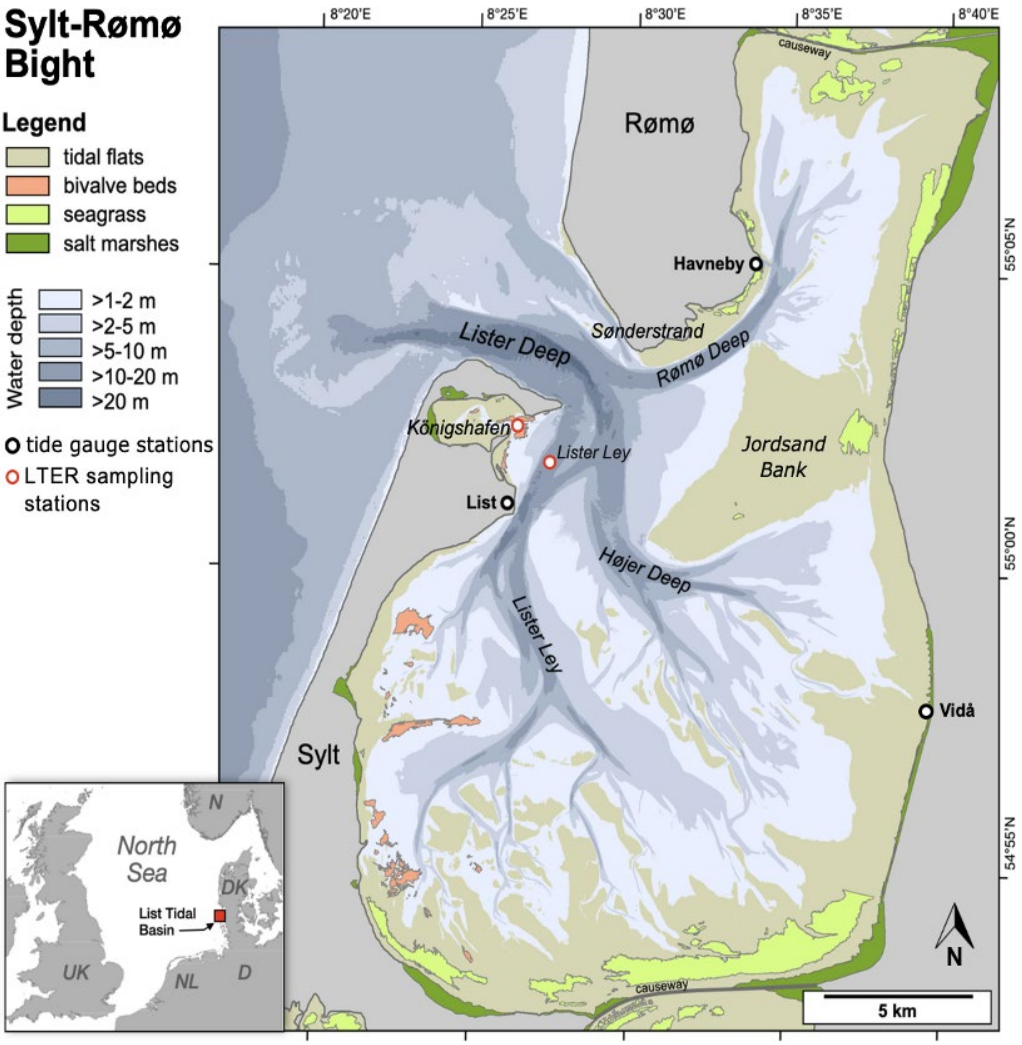

Abbildung 1. Übersichtskarte der Sylt-Rømø-Bucht mit der Bathymetrie der flachen subtidalen Bereiche und tieferer Tidal-Kanäle. Die Karte zeigt auch die Verteilung wichtiger Lebensräume wie Wattflächen (oder intertidale Bereiche), Muschelbänke, Seegraswiesen und Salzwiesen. Die Probenahmestationen in der flachen Bucht Königshafen und dem tieferen Tidal-Kanal Lister Ley sind mit roten Kreisen markiert, und die Pegelmessstationen List, Havneby und Vidå sind mit schwarzen Kreisen markiert.

Eine Reihe hochauflösender Simulationen mit dem FESOM-C (Finite volumE Sea-ice Ocean Model – Coastal) wurden durchgeführt, um die aktuellen Bedingungen mit zukünftigen SLR-Szenarien basierend auf IPCC-Projektionen zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigten, dass 4,6 % bis 7,4 % der intertidalen Flächen bis 2050 und 2100 überflutet sein könnten. Gleichzeitig zeigte die hydrodynamische Analyse eine Umverteilung der Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 2). Während die Strömungen in den tidal Einlass mit steigendem Meeresspiegel intensiver werden, schwächen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in den tieferen Tidal-Kanälen innerhalb des Beckens ab und nehmen in den flacheren Bereichen zu, was zu einem gleichmäßigeren hydrodynamischen Regime im gesamten System führt.

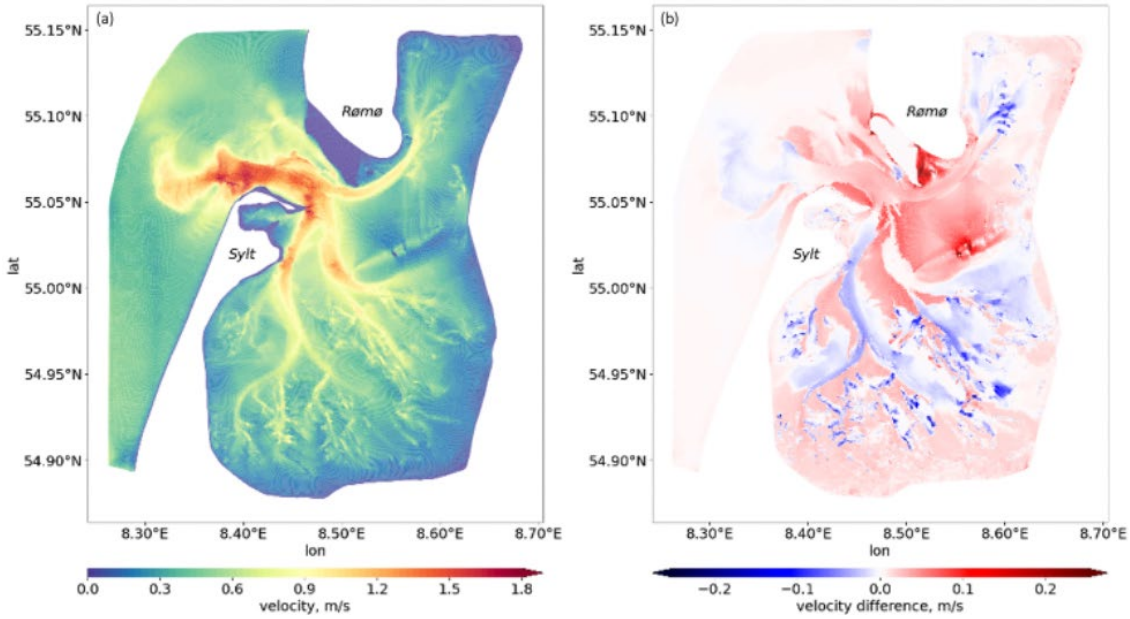

Abbildung. 2. Verteilung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im REF-Szenario und der Geschwindigkeitsänderungen zwischen den REF- und SLR-Szenarien bis 2050. (a) Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im REF-Szenario (in m/s), (b) Unterschiede in den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der SLR-REF-Szenarien bis 2050, wobei Rot einen Anstieg und Blau eine Abnahme der Geschwindigkeit (in m/s) anzeigt. Die Differenz zeigt einen Anstieg in den meisten Regionen, einschließlich des tidal Einlasses, jedoch ein sinkendes Muster in den Kanälen im inneren Bereich des Gebiets.

Eines der wichtigsten Ergebnisse der Studie war eine Reduktion der Tidenasymmetrie (Abb. 3), die den Netto-Materialtransport in Küstenumgebungen antreibt. Unter zukünftigen SLR-Bedingungen wird prognostiziert, dass diese Reduktion der Tidenasymmetrie den Netto-Transport begrenzen und den Austausch von passiven Markern im Becken verringern wird, was auf eine Verschiebung hin zu einem mehr lagunenartigen System hindeutet. Eine solche Umstellung wird erwartet, den Netto-Sedimenttransport um bis zu 10 % zu reduzieren und die ökologische Konnektivität zu verändern, was potenzielle Folgen für den Nährstoffkreislauf, den Materialtransport und die Stabilität der Lebensräume haben könnte.

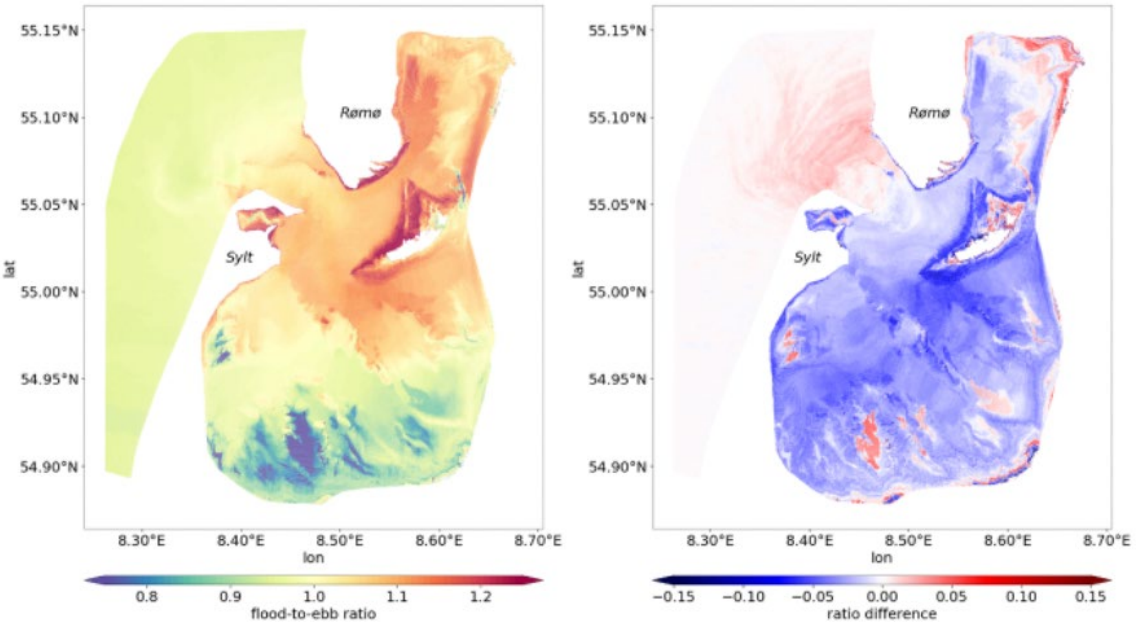

Abbildung 3. Karte der Tidenasymmetrie der mittleren Dauer im REF-Szenario und der Unterschiede zwischen SLR- und REF-Szenarien bis 2050. (a) Verhältnis von Flut-zu-Ebbe der mittleren Tiden-Dauern im REF-Szenario, wobei Werte größer als 1 eine längere Flutdauer im Vergleich zur Ebbephase anzeigen. (b) Unterschiede im Flut-zu-Ebbe-Verhältnis zwischen SLR und REF, wobei Blau eine Abnahme und Rot eine Zunahme des Verhältnisses anzeigt. Zur Interpretation des rechten Panels ist es notwendig, das linke Panel zu berücksichtigen, da die Richtung der Veränderungen im Verhältnis von der anfänglichen Flut-zu-Ebbe-Asymmetrie im REF-Szenario abhängt.

Obwohl die Modellversuche die Sedimentdynamik nicht direkt simulierten, deuten die beobachteten hydrodynamischen Veränderungen auf erhebliche Auswirkungen auf die langfristige morphologische Stabilität hin, was die Notwendigkeit für weitere interdisziplinäre Forschung zur Integration von Sedimenttransport- und Ökosystemmodellen unterstreicht.

Die Studie bewertet weiter die Repräsentativität der Sylt Roads LTER-Messstationen, um die räumlich-zeitliche Variabilität von Ökosystemparametern in der Sylt-Rømø-Bucht zu erfassen. Die Forschung kombinierte langfristige Beobachtungsdatensätze (Schwebstoffkonzentration (SPM), Chlorophyll-a, Nährstoffe, Windverhältnisse und Lichtverfügbarkeit) mit hydrodynamischen Modellierungen und maschinellen Lerntechniken, um die Konnektivität zwischen den Probenahme-Stationen und verschiedenen Teilbereichen des Beckens zu bewerten.

AP 2.5 Quantifizierung von Unsicherheiten durch Maschinelles Lernen

Basierend auf einem maschinellen Lernansatz und der Nutzung langfristiger Messdaten aus der Sylt-Rømø-Bucht haben wir die Rolle biotischer Bedingungen bei der Formung der gemessenen Schwebstoffkonzentration (SPM) identifiziert. Diese Studie zeigt die enorme Bedeutung biotischer Faktoren für die SPM-Dynamik im Frühling, Sommer und frühen Herbst im Wattenmeer (Konyssova et al., in Vorbereitung). Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Entwicklung neuer Parametrisierungen zur numerischen Reproduktion der SPM-Bedingungen in küstennahen Ozeanmodellen. Als Grundlage verwendeten wir ein

Feedforward-Neuronales Netzwerk (NN) mit drei versteckten Schichten (z. B. Jain et al., 1996), bestehend aus 80, 40 und 20 Neuronen. Alle versteckten Schichten nutzten eine hyperbolische Tangens-Sigmoid-Transferfunktion, während die Ausgabeschicht eine lineare Aktivierungsfunktion verwendete. Als Lernalgorithmus wurde das Levenberg-Marquardt-Verfahren eingesetzt. Für das Training wurden 60 % der zufällig ausgewählten SPM-Messwerte verwendet, während die verbleibenden Daten für Validierung und Tests aufgeteilt wurden.

Statistische Analysen zeigten, dass zwar interannuelle und saisonale Trends der Umweltparameter weitgehend gut von den Messstationen erfasst wurden, jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Stationen in flachen und tieferen Gebieten auf kürzeren Zeiträumen bestehen. Saisonale Schwankungen stehen im Zusammenhang mit stärkeren Windereignissen im Winter und höherer biologischer Aktivität im Frühling und Sommer, wenn Phytoplankton-getriebene Flokulationsprozesse stattfinden. Gleichzeitig wurden die kurzfristigen SPM-Schwankungen hauptsächlich durch episodische Windereignisse beeinflusst, wobei flache Gebiete unmittelbar auf windgetriebenes Wiederaufschlämmung reagierten, während tiefere Gebiete eine verzögerte Reaktion (~5 Tage, Abb. 4) zeigten, was mit dem Einfluss der Tidepropagation zusätzlich zur anhaltenden windgetriebenen Mischbewegung übereinstimmt.

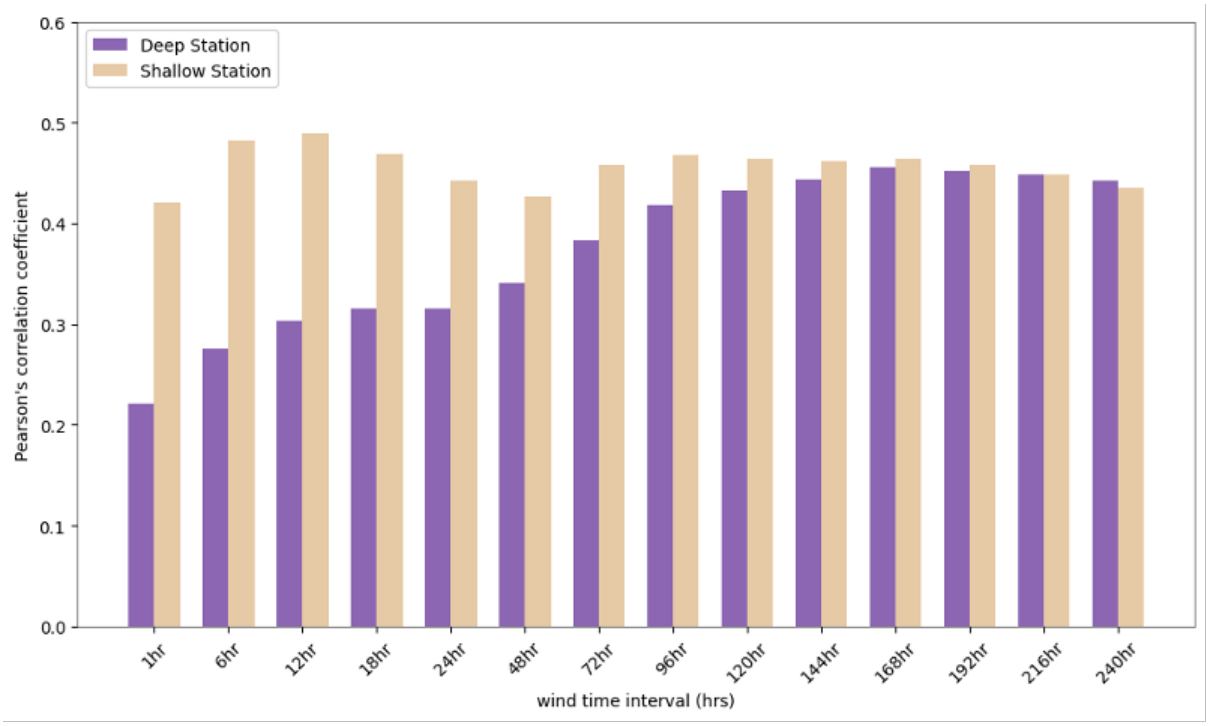

Abbildung 4. Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen SPM und Windgeschwindigkeit, gemittelt über verschiedene Zeitintervalle von 1 Stunde bis 240 Stunden. Die beiden Stationen sind separat dargestellt, um zu zeigen, wie die Windgedächtnis-Effekte die SPM-Variabilität in verschiedenen Wassertiefen beeinflussen.

Hydrodynamische Modellierungen unter Verwendung von Lagrange-Partikel-Tracking (C-Drift-Modul in FESOM-C) veranschaulichen die Teilgebiete, die mit den Messstationen kommunizieren, sowie die Transitzeit der passiven Marker, um die Stationen von den Freisetzungsstandorten zu erreichen (Abb. 5). Die Ergebnisse zeigen eine signifikante räumliche Heterogenität, insbesondere zwischen den nördlichen und südlichen Teilgebieten, und deuten darauf hin, dass lokale Beobachtungen möglicherweise nicht die systemweite Variabilität vollständig abbilden.

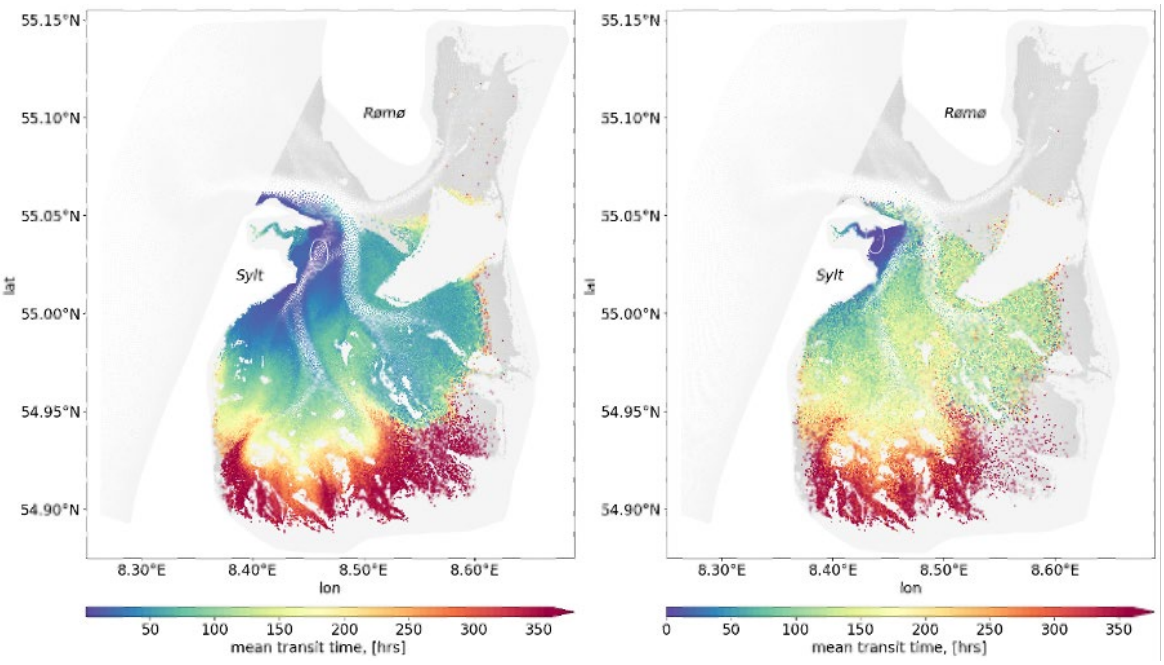

Abbildung 5. Die durchschnittliche Transitzeit von passiven Markern, um die Probenahmestelle zu erreichen. Das linke Panel entspricht der tiefen Station, während das rechte Panel die flache Station darstellt. Gitterelemente, die während jeder Flutphase konstant überflutet werden, aus denen die passiven Marker freigesetzt werden, sind grau dargestellt. Elemente, die erfolgreich eine der beiden Probenahmestellen erreichen, sind farblich kodiert nach ihrer durchschnittlichen Transitzeit (in Stunden), die widerspiegelt, wie lange es dauert, bis die passiven Marker von einem gegebenen Standort zu jeder Station gelangen.

Ein aktuelles zentrales Thema in der Klimaforschung ist, wie Temperaturveränderungen und -verschiebungen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen Organismen in Bezug auf Trends, Variabilität und die Häufigkeit extremer Ereignisse beeinflussen können. In dieser Studie analysierten wir marine Temperaturdaten auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen. Wir setzten die Daten zur Meeresoberflächentemperatur der Helgoland Roads Time Series – eine der wichtigsten und detailliertesten langfristigen in-situ-Zeitreihen im Bereich der marinen Ökologie – in Beziehung zu Temperaturdaten von Sylt Roads, der Nordsee, Deutschland, Europa, dem Nordatlantik und der Nordhalbkugel. Alle Zeitreihen zeigten in den späten 1980er- und frühen 1990er-Jahren einen deutlichen Temperaturanstieg, mit insgesamt positiven Trends im Zeitraum von 1962 bis 2019. Diese lagen bei einer Zunahme von 1 bis 2 °C über 57 Jahre. Wir quantifizierten Veränderungen in der Temperaturvariabilität, indem wir die Jahre vor und nach 1990 sowohl auf langfristiger als

auch auf saisonaler Skala verglichen. An den Standorten Helgoland und Sylt zeigten sich seit 1990 neue Merkmale im Temperaturverlauf: eine Zunahme wärmerer Tage im Sommer sowie ein Rückgang extrem kalter Tage im Winter. Höhere Temperaturen als erwartet treten nun auch früher im Jahr auf. Für diese Standorte wurden die höchsten langfristigen Trends beobachtet – etwa 0,3 °C pro Dekade.
Die beobachtete bimodale Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen – charakterisiert durch Winter- und Sommermodi – wurde heterogener: Die Spitze des Kältemodus verschob sich zu höheren Werten, und der Anstieg zur Spitze wurde steiler, was auf einen Rückgang extrem kalter Wintertage zurückzuführen ist. Großskalige Phänomene wie die North Atlantic Oscillation (NAO) und die Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) zeigten keine signifikanten Korrelationen bzw. im Fall der NAO nur saisonal begrenzt auf den Winter regionale oder lokale Zusammenhänge. Die Temperaturen des nächstgelegenen Festlands (Deutschland) zeigten eine hohe Korrelation mit den Messstellen in der Nordsee. Insgesamt legen unsere Ergebnisse nahe, dass marine pelagische Ökosysteme und ihre Arten Temperaturschwankungen unterliegen, die über verschiedene Skalen hinweg ähnliche Muster, aber unterschiedliche Ausprägungen zeigen. Temperatur ist einer der Hauptfaktoren für Artenvielfalt und Verbreitung und wirkt sich – abhängig von Populationswachstum, Lebensphasen, Zyklen und Lebensräumen – auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen aus. Dementsprechend stellen wir hier die Temperaturveränderungen auf den jeweils angemessenen raumzeitlichen Skalen dar und liefern damit eine geeignete und nützliche Grundlage für Untersuchungen zu den Auswirkungen der Erwärmung auf die Funktionsweise mariner Ökosysteme und deren Biodiversität.

Die pelagische Chlorophyll-a-Konzentration ist ein zentraler Indikator zur Bewertung des Umweltzustands und der Produktivität mariner Systeme. Die entsprechenden Daten können durch in-situ-Messungen, Fernerkundung oder Modellierung gewonnen werden. Die Modellierung von Chlorophyll-a ist jedoch anspruchsvoll, da dessen Dynamik nichtlinear und komplex ist. In dieser Studie wurden Chlorophyll-a-Konzentrationen der Helgoland Roads Zeitreihe mithilfe verschiedener gemessener Wasser- und Umweltparameter modelliert. Dafür wurden drei in der Fachliteratur gängige Machine-Learning-Algorithmen ausgewählt: der Support Vector Machine (SVM) Regressor, das Multilayer-Perceptron-Neuronale Netz (MLP) sowie der Random Forest Regressor. Die Ergebnisse zeigten, dass der SVM Regressor die anderen Modelle leicht übertraf. Die Modellbewertung mit einem Testdatensatz sowie die Validierung mit einem unabhängigen Datensatz zeigten eine gute Generalisierungsfähigkeit, gemessen an Root Mean Squared Errors (RMSE) von unter 1 $\mu g\, L^{-1}$. Feature Selection und Feature Engineering erwiesen sich als entscheidend und verbesserten die Modellleistung signifikant. Dies zeigte sich in einer Steigerung des adjustierten R^2 um mindestens 48 %. Zum Vergleich wurde auch das SARIMA-Modell getestet. Es stellte sich heraus, dass die univariate Natur von SARIMA keine besseren Ergebnisse als die Machine-Learning-Modelle ermöglicht. Zudem war der Rechenaufwand für SARIMA deutlich höher und in der Praxis kaum vertretbar. Mittlerweile habe die KI Tools sich so verbessert, dass die Modellierung von Chlorophyll auf dieser Weise noch viel einfacher geworden ist.

1.2. AP3 Ökosystemauswirkungen durch Offshore-Windenergieausbau

Im Rahmen der ehrgeizigen Pläne der EU und der Anreinerstaaten, Klimaneutralität zu erreichen, ist bis 2050 eine signifikante Erhöhung der Offshore-Windenergiekapazität auf insgesamt 450 GW vorgesehen (The European Green Deal., 2019). Etwa 47 % (212 GW) davon werden in der Nordsee installiert, mit einer jährlichen Genehmigungsrate von 8,8 GW pro Jahr in den 2020er Jahren. Hinzu kommen geplante Installation der Nicht-EU Anreinerstaaten, so dass die politische Zielvorgabe für die installierte Kapazität in der Nordsee mindestens 300 GW beträgt. Dies impliziert, dass die Nordsee zu einem der weltweiten Hotspots für die Entwicklung von OWFs wird. Diese Windparks werden normalerweise um Übertragungsleitungen herum gruppiert, um die Einsatz- und Betriebskosten zu minimieren, was zu Windfarm-Clustern führt.

AP 3.3 Auswirkung von Offshore-Windenergie auf Habitate, Habitat-Nutzung und Rekrutierung

Eins der zurzeit sehr stark unterforschen Einflüsse der Windparks ist Lärm. In allen Phasen des Lebenszyklus der Anlagen wird Unterwasser-Lärm erzeugt, mit bisher weitestgehend unbekannten Effekten auf marine Organismen. Das AWI konzentrierte sich in AP3 auf die Einflüsse auf Invertebraten. Windparks erzeugen niederfrequenten Lärm (LFN) während ihrer gesamten Lebensdauer, von der Bauphase über den Betrieb bis hin zur Stilllegung. Um erste Ursache-Wirkungs-Beziehungen darüber zu etablieren, wie LFN Schlüsselarten vor Ort und folglich die lokalen Ökosysteme beeinflussen könnte, wurden mehrere kontrollierte Laborexperimente entwickelt, die sich um einen kosteneffizienten, reproduzierbaren LFN-Generator namens „Noise Egg“ drehten. Es ist wichtig zu beachten, dass der erzeugte Lärm nicht direkt Windparks oder andere anthropogene Quellen wie Schiffe simuliert; vielmehr liegen die erzeugten Frequenzen im Bereich des Lärms von Windparks und Schiffen.

In einer Studie setzten wir den Sandröhrenwurm *Lanice conchilega* in großen Mesokosmos-Experimenten an der Universität Gent in Belgien niederfrequentem Lärm aus. *Lanice conchilega* ist ein häufiger Polychaet auf den Küsten des Nordatlantiks und spielt eine wichtige Rolle im Ökosystem, da ihre Sedimentumwälzaktivitäten (z. B. Graben, Belüften, Defäkieren) biogeochemische Zyklen fördern und die Struktur des Ökosystems mitbestimmen. Ihr Röhrenbauverhalten hilft auch, das Sediment zu stabilisieren. Die Belüftungspumpraten wurden signifikant reduziert und die Pumpmuster waren sichtbar gestört, als die Würmer dem LFN ausgesetzt wurden (Abb. 6). Dies wurde durch die Messung der Sauerstoffkonzentration im angrenzenden Sediment mithilfe von Mikrosensoren erfasst. Dies deutet auf mögliche Auswirkungen auf die Funktionsweise des Ökosystems und die benthisch-pelagische Kopplung hin, falls *L. conchilega* nicht in der Lage ist, sich an solche Störungen anzupassen.

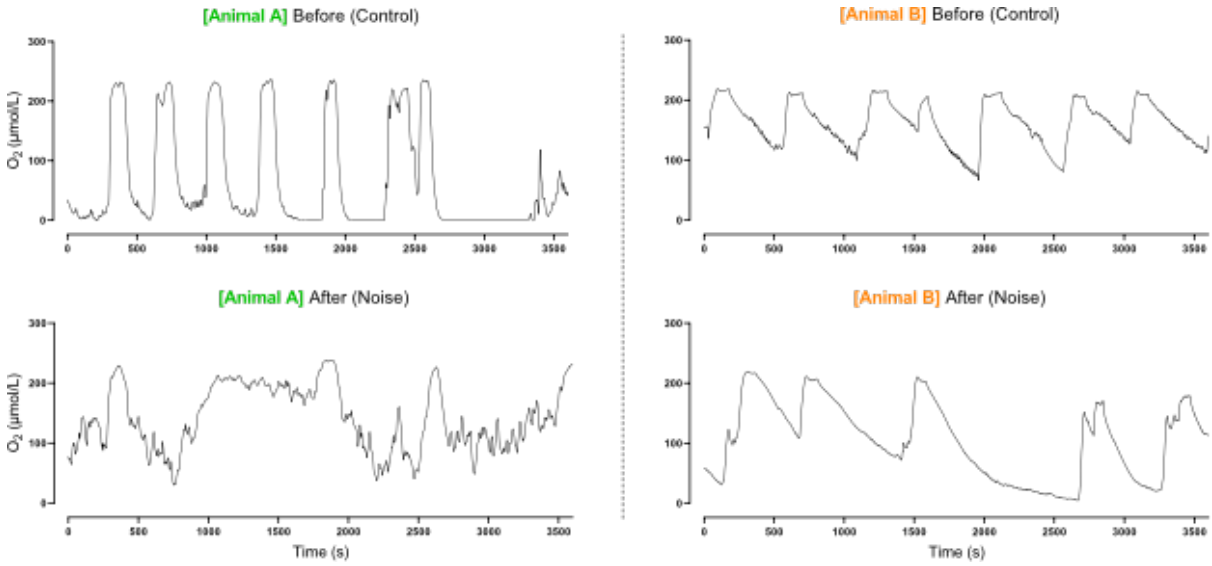

Abbildung 6. Beispielhafte Vergleiche des Pumpmusters vor und nach der Pumpe für zwei Replikate. Die oberen Grafiken zeigen das Pumpen unter Kontrollbedingungen (vorher), während die unteren Grafiken dasselbe unter Lärm-Bedingungen (nachher) zeigen. Abbildung aus Wang et al., 2023 adaptiert .

In der nächsten Studie untersuchten wir die Auswirkungen von niederfrequentem Lärm (LFN) in Verbindung mit der Anwesenheit von Raubtieren auf die Byssusfadenproduktion der wirtschaftlich wichtigen Muschel *Mytilus* spp. Während andere Studien ähnliche Parameter unter Verwendung von impulsivem LFN (oder transienten, oft hochenergetischen Vibrationen mit schneller Entstehung und Abklingung) untersucht haben, testeten wir die Auswirkungen von kontinuierlichem LFN (stetige und anhaltende Vibrationen), der Art von Lärm, die Windparks während des Betriebs erzeugen. Während die Anwesenheit von Raubtieren, wie erwartet, die Byssusfadenproduktion signifikant erhöhte, schien LFN weder in Gegenwart noch in Abwesenheit von Raubtieren einen Einfluss auf die Fadenproduktion zu haben. Dies könnte den Erfolg von *Mytilus* spp. als Biofouler an Turbinen erklären, sodass erwartet werden kann, dass *Mytilus* in diesen anthropogen gestörten Habitaten weiterhin bestehen bleiben.

Abbildung 7. Ein Beispielreplikat mit einem Mytilus spp.-Individuum, das mittels Byssusfäden an der Wand haften bleibt.

Die Auswirkungen von niederfrequentem Lärm (LFN) auf die Verhaltens- und Physiologieparameter mehrerer wichtiger Mesograzer-Arten wurden in zwei Studien untersucht. Mesograzer sind kleine pflanzenfressende Wirbellose, die das Wachstum von Makrophyten (z. B. Seegras, Algen) durch ihre Nahrungsaufnahme kontrollieren und gleichzeitig wichtige Nahrungsquellen für höhere trophische Ebenen darstellen. Die erste Studie war ein Vorläufer der zweiten Studie und setzte die Isopode *Idotea balthica* und das Amphipoden *Gammarus locusta* kontrolliertem LFN aus, wobei eine Laboraufstellung verwendet wurde. Die Sauerstoffverbrauchsraten wurden mit Hilfe der Respirometrie gemessen, und die Aktivitäten von vier Enzymen, die für die Zellatmung in den Mitochondrien zentral sind, wurden mittels Photometrie gemessen. Der Isopode schien robust gegenüber LFN zu sein, während das Amphipod signifikant niedrigere Sauerstoffverbrauchsraten aufwies. In der zweiten Studie setzten wir das Amphipod *Marinogammarus marinus* LFN aus und untersuchten die Auswirkungen nicht nur auf mitochondriale Enzyme, sondern auch auf die Fressleistung und die Habitatwahl. Eine reduzierte Fressleistung und veränderte Aktivitäten metabolischer Enzyme wurden beobachtet, was auf eine möglicherweise beeinträchtigte Fähigkeit hinweist, die Homöostase aufrechtzuerhalten, sowie auf die „Rolle“ dieser Arten als Mesograzer im Ökosystem. Wenn solche Reaktionen anhalten, könnte dies potenziell Konsequenzen für algen-dominierte Tiergemeinschaften in Küstengebieten haben

1.3. AP8 Management von *CoastalFutures* und Transfer

AP8 bildet das organisatorische Fundament von *CoastalFutures* (AP8). Es dient als zentrales Bindeglied zwischen dem Projektverbund und dem Verbund der Mission und dem Projektträger Jülich (PTJ) und leistete einen wesentlichen Beitrag zur effektiven Zusammenarbeit sowie zur strukturierten Darstellung der Ergebnisse gegenüber Öffentlichkeit, Fachwelt und Förderinstitutionen.

2. Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Coastal Futures-Projekts durchgeführte Forschung trägt maßgeblich zum Schließen zentraler Wissenslücken in den Bereichen Küstenhydrodynamik, tidaler Transport sowie Ökosystemüberwachung unter den Bedingungen des Klimawandels bei. Besonders anfällig gegenüber dem Anstieg des Meeresspiegels (Sea Level Rise, SLR) sind Küstensysteme wie die Sylt-Rømø-Bucht, da die natürlichen morphodynamischen Prozesse des Wattenmeeres – die in der Vergangenheit eine landwärtige Verlagerung der Wattflächen ermöglichten – heute durch Deichbauten und technische Küstenschutzinfrastrukturen stark eingeschränkt sind.

Diese Eingriffe führen zu einer verlängerten Überflutungsdauer der Wattgebiete, wodurch Arten gefährdet werden, die an das periodische Trockenfallen angepasst sind, und die funktionale Integrität des Ökosystems beeinträchtigt wird. Vor dem Hintergrund, dass lokal begrenzte hydrodynamische Veränderungen und deren ökologische Folgen in großskaligen

Prognosen oftmals unberücksichtigt bleiben, betont die vorliegende Forschung die Relevanz hochauflösender Untersuchungen zur Ergänzung makroskaliger Küstenmodelle.

Ein zentrales Element der Studie war die Bewertung der Repräsentativität von Langzeit-Messstationen in der Sylt-Rømø-Bucht, um die Aussagekraft ökologischer Langzeitbeobachtungen hinsichtlich räumlicher Variabilität zu validieren. Küstenökosysteme zeichnen sich durch eine hohe räumliche und zeitliche Heterogenität relevanter Umweltparameter aus. Die Studie verdeutlicht den Mehrwert numerischer Modellierungen für die Weiterentwicklung langfristiger Monitoringprogramme. Durch die Integration von Beobachtungsdaten, hydrodynamischer Modellierung und maschinellem Lernen konnte aufgezeigt werden, dass bestehende Überwachungsstrategien angepasst werden müssen, um eine systemweite und ganzheitliche Erfassung der Umweltbedingungen sicherzustellen.

Zudem wurde untersucht, inwieweit anthropogener Unterwasserlärm – verursacht insbesondere durch Schiffsverkehr und Offshore-Windkraftanlagen – die natürlichen akustischen Lebensräume mariner Ökosysteme beeinträchtigt. Da viele marine Organismen Schall zur intra- und interspezifischen Kommunikation sowie zur Orientierung nutzen, ist es von entscheidender Bedeutung, die Auswirkungen solcher akustischer Störungen auf ökologische Prozesse zu analysieren. Die durchgeführten Laborstudien lieferten erste belastbare Hinweise auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen menschengemachtem Lärm und biologischen Parametern. Darüber hinaus bildeten sie eine wissenschaftliche Grundlage für weiterführende Felduntersuchungen, um die ökologischen Konsequenzen von Unterwasserlärm differenziert zu bewerten.

Die Ergebnisse dieses Projekts besitzen einen hohen praktischen Wert sowohl für die wissenschaftliche Grundlagenforschung als auch für die anwendungsorientierte Entwicklung im Küstenmanagement. Die durchgeführten hochauflösenden Modellsimulationen liefern eine belastbare quantitative Grundlage für die Szenarienentwicklung und ermöglichen es sowohl der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch relevanten Interessensgruppen, potenzielle hydrodynamische Veränderungen im Zuge des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs fundierter zu analysieren und zu bewerten. Darüber hinaus schafft die vorliegende Studie eine Basis für künftige interdisziplinäre Kooperationen, insbesondere mit den Disziplinen Sedimentologie und Ökologie, um die Auswirkungen sich verändernder hydrodynamischer Bedingungen auf die morphologische Entwicklung sowie die ökologische Konnektivität von Küstensystemen vertieft zu untersuchen.

Die Untersuchung zum langfristigen ökologischen Monitoring beinhaltet zudem konkrete Empfehlungen zur Weiterentwicklung von Beobachtungsstrategien in dynamischen Küstenzonen. Die identifizierten räumlichen Limitierungen bestehender Messstationen verdeutlichen die Notwendigkeit, klassische In-situ-Messungen durch numerische Modellierungsansätze sowie Verfahren des maschinellen Lernens zu ergänzen, um die Repräsentativität und Aussagekraft der erfassten Umweltdaten substantiell zu verbessern. Die im Projekt entwickelten Methoden und Resultate bieten darüber hinaus einen übertragbaren methodischen Rahmen zur Evaluierung von Monitoringstrategien in anderen flachen, tidebeeinflussten Küstensystemen.

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Erkenntnisse bilden nicht nur die Grundlage für weiterführende feldbasierte Untersuchungen, sondern liefern auch erste belastbare Hinweise darauf, welche Organismengruppen und ökologischen Prozesse besonders sensitiv auf anthropogene Schallbelastungen reagieren – und in welcher Form. Diese Ergebnisse können bereits in die Planung mariner Schutzgebiete oder Mehrnutzungskonzepte einfließen, etwa bei der Kombination von Offshore-Windenergieanlagen mit der Aquakultur gezielt ausgewählter, ökonomisch nutzbarer Arten, die eine geringe Sensitivität gegenüber Unterwasserlärm aufweisen.

3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der Projektverlauf war durch einen volatilen politischen und planerischen Rahmen in der Meerespolitik gekennzeichnet. Da es sich bei den in *CoastalFutures* bearbeiteten Themen um sehr aktuelle Themen handelt, werden diese aus verschiedenen wissenschaftlichen und praktischen Perspektiven an verschiedenen Stellen bearbeitet. Durch den engen Austausch mit den Projektpartnern, die Mitwirkung der Mitarbeiter des AWI in zahlreichen weiteren (nationalen wie internationalen) Forschungsprojekten, die ähnliche bzw. ergänzende Forschungsfragen adressieren wie auch den Austausch mit vielen Praxisakteuren sowie in wissenschaftlichen Netzwerken fließen Erkenntnisse aus anderen Projekten regelmäßig bzw. durchgehend in die Arbeiten von *CoastalFutures* ein. Konkret sind auch einige Veröffentlichungen während der Projektzeit entstanden die die Themen weitergebracht haben. Im Verlauf des Projekts sind mehrere Studien entstanden, die das Verständnis der tidalen und sedimentdynamischen Prozesse unter steigendem Meeresspiegel (SLR) im Wattenmeer vertiefen und die Ziele des Projekts ergänzen:

Lepper, R., Jänicke, L., Hache, I., Jordan, C., & Kösters, F. (2024). Exploring the tidal response to bathymetry evolution and present-day sea level rise in a channel–shoal environment. Ocean Science, 20(3), 711–723. https://doi.org/10.5194/os-20-711-2024

Wünsche, A., Becker, M., Fritzsch, R., Kelln, J., Winter, C., 2024. The sensitivity of tidal asymmetry descriptors in the Ems estuary. Ocean Dynamics 74, 613–627. https://doi.org/10.1007/s10236-024-01622-x

Zwei projektbezogene Übersichtsarbeiten zu den Auswirkungen von Unterwasserlärm auf marine Wirbellose wurden im Rahmen des Projekts veröffentlicht:

Solé, M., Kaifu, K., Mooney, T.A., Nedelec, S.L., Olivier, F., Radford, A.N., Vazzana, M., Wale, M.A., Semmens, J.M., Simpson, S.D., Buscaino, G., Hawkins, A., Aguilar de Soto, N., Akamatsu, T., Chauvaud, L., Day, R.D., Fitzgibbon, Q., McCauley, R.D., André, M., 2023. Marine invertebrates and noise. Frontiers in Marine Science 10.

El-Dairi, R., Outinen, O., Kankaanpää, H., 2024. Anthropogenic underwater noise: A review on physiological and molecular responses of marine biota. Marine Pollution Bulletin 199, 115978.

Keine der Übersichtsarbeiten enthält Erkenntnisse, die die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Studien überflüssig machen würden

4. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Verlauf des Projekts *CoastalFutures* war das AWI mit einer Vielzahl an Beiträgen auf nationalen und internationalen Fachveranstaltungen vertreten. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden über Konferenzvorträge, Posterpräsentationen sowie moderierte Panels aktiv in die Fachöffentlichkeit eingebracht.

4.1. Publikationen (erfolgte, inkl. In-kind funded)

Buschbaum, C., Shama, L.N.S., Amorim, F.L.L. *et al.* Climate change impacts on a sedimentary coast—a regional synthesis from genes to ecosystems. *Mar. Biodivers.* 54, 64 (2024). https://doi.org/10.1007/s12526-024-01453-5

Deschamps M., Giménez L., Astley C., Boersma M.& Torres G. (2025). Heatwave duration, intensity and timing as drivers of performance in larvae of a marine invertebrate. Scientific Reports 15(1):15949. DOI: 10.1038/s41598-025-98259-7.

Deschamps M.M., Boersma M.& Giménez L. (2024). Responses of the mesozooplankton community to marine heatwaves: Challenges and solutions based on a long-term time series. J Anim Ecol 93:1524-40. DOI: 10.1111/1365-2656.14165.

Giménez L., Boersma M.& Wiltshire K.H. (2024). A multiple baseline approach for marine heatwaves. Limnol Oceanogr 69: 638-651. DOI: 10.1002/lno.12521.

Ortega, M., Rubinetti, S., Konyssova, G., Mayer, B., Sánchez, E., Gutiérrez, C., Wiltshire, K.H. and Sidorenko, V. (2025), Future Wind Conditions in the German Bight Under RCP8.5 Emissions Scenario (2006–2099) From Regional Coupled Ocean–Atmosphere Model System MPIOM-REMO. Int J Climatol e8814. https://doi.org/10.1002/joc.8814

Rubinetti, S., Fofonova*, V., Arnone, E., & Wiltshire, K. H. (2023). A complete 60-year catalog of wind events in the German Bight (North Sea) derived from ERA5 reanalysis data. *Earth and Space Science, 10*(10), e2023EA003020. https://doi.org/10.1029/2023EA003020

Sidorenko, V., Rubinetti, S., Akimova, A., Pogoda, B., Androsov, A., Beng, K. C., Sell, A. F., Pineda-Metz, S. E. A., Wegner, K. M., Brand, S. C., Shama, L. N. S., Wollschläger, J., Klemm, K., Rahdarian, A., Winter, C., Badewien, T., Kuznetsov, I., Herrling, G., Laakmann, S., & Wiltshire, K. H. (2025). Connectivity and larval drift across marine protected areas in the German Bight, North Sea: Necessity of stepping stones. *Journal of Sea Research, 204*, 102563. https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102563

Terschek, A., Tremblay, N., Wang, S.V., Beermann, J. (2025). *Anthropogenic low-frequency sound effects on resting metabolism and energy pathways in two marine benthic crustaceans.* Accepted in Marine Biology, in publication.

Tremblay N., Juma G.A., Herstoff E.M., Meunier C.L.& Boersma M. (2024). Low-frequency noise affects development and movement patterns of a calanoid copepod. Limnol Oceanogr 70:100-112.

Wang, S.V., Ellrich, J.A., Beerman, J., Pogoda, B., Boersma, M. (2024). *Musseling through: Mytilus byssal thread production is unaffected by continuous noise.* Marine Environmental Research 200, 106661.

Wang, S.V., Van Colen, C., Beermann, J. (2023). *Noisy Waters Hamper the Pumping Behavior of the Polychaete Lanice conchilega.* The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations. Springer, pp. 1-8.

4.2. Publikationen (geplante, inkl. In-kind funded)

Konyssova, G., Sidorenko, V., Androsov, A., Sander, L., Danilov, S., Rubinetti, S., Burchard, H., Winter, C., Wiltshire, K.H. (under review). Changes in tidal dynamics in response to sea level rise in the Sylt-Rømø Bight (Wadden Sea).

Konyssova, G., Sidorenko, V., Androsov, A., Sander, L., Danilov, S., Rubinetti, S., Burchard, H., Winter, C., Wiltshire, K.H. (in prep). Wind and phytoplankton dynamics determine the seasonal and interannual variability of suspended matter in a sandy tidal basin inlet.

Wang, S.V., Terschek, A., Tremblay, N., Boersma, M., Beermann, J. (2025). *Noisy waters affect feeding and metabolic enzyme activities of amphipod mesograzers.* Submitted, in review

4.3. Andere Beiträge

Konyssova G. et al., POSTER: *Insights on changes of tidal dynamics in response to sea level rise in intertidal environments: a study of Sylt-Rømø, Wadden Sea*. REKLIM 2024 Workshop, March 2024. Bad Salzschlirf, Germany (best poster awarded).

Konyssova G. et al., TALK: *Changes in tidal dynamics in response to sea level rise in intertidal environments*. Wadden Sea Station Seminar, March 2024. List auf Sylt, Germany.

Konyssova G. et al., POSTER: *Tide of change: understanding hydrodynamic responses to sea level rise in intertidal environments. Case Study of the Sylt-Rømø Bight, the Wadden Sea*. EGU24, April 2024. Vienna, Austria.

Konyssova G. et al., TALK: *Exploring changes in tidal dynamics in intertidal environments under sea level rise scenarios in the Wadden Sea (SE North Sea)*. ASLO meeting, June 2024. Madison Wisconsin, USA.

Wang, S.V., et al., INVITED GUEST TALK: *Anthropogenic noise pollution effects on the North Sea benthos.* Engineering meets Ecosystem: Developing a Roadmap for Future International Collaboration between Marine Renewable Energy and Marine Ecosystem Researchers, September 2024. Büsum, Germany.

Wang, S.V., et al., TALK: *Exploring noise pollution effects on marine invertebrates using experimental ecology.* IBAC 2023: The XXVIII International Bioacoustics Congress, October 2023. Sapporo, Hokkaido, Japan

Wang, S.V., et al., TALK: *Effects of low-frequency noise pollution on marine benthic invertebrates.* 3rd KüNO Coastal Symposium: Küste im Wandel - Coast in Transition 2022, November 2022. Hamburg, Germany.

Wang, S.V., et al., TALK+POSTER: *Effects of low-frequency noise pollution on marine benthic invertebrates*. The Effects of Noise on Aquatic Life in 2022, July 2022. Berlin, Germany.