

Blue-Carbon-Potenziale der deutschen Nord- und Ostsee

Blue Carbon potential of the German North and Baltic Seas

Corina Peter, Julian Koplín, Bernadette Pogoda, Claudia Morys und Jochen Krause

Zusammenfassung

Blue Carbon bezeichnet den in Meeres- und Küstenökosystemen gespeicherten organischen Kohlenstoff. In der aktuellen Klima- und Biodiversitätskrise gewinnt die Fähigkeit mariner Ökosysteme bzw. Biotope Kohlenstoff langfristig zu speichern an Bedeutung und wird aktuell intensiv qualitativ und quantitativ erforscht. Eine Studie des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) fasst den aktuellen Kenntnisstand über die Blue-Carbon-Potenziale für die deutsche Nord- und Ostsee zusammen. Seegraswiesen und Salzmarschen sind bereits als Blue-Carbon-Ökosysteme definiert und deren Beitrag zur Abmilderung der Klima- und Biodiversitätskrise ist anerkannt. Die Rolle von Makroalgen, marinen Sedimenten und biogenen Riffen ist derzeit noch nicht geklärt. National existieren bisher nur wenige publizierte, verwertbare und räumlich ausreichend gut aufgelöste Daten, die das Blue-Carbon-Potenzial aufzeigen. Im Kampf gegen den Klimawandel bedarf es eines ganzheitlichen Schutzes von Blue Carbon, wobei es jedoch noch offene Fragestellungen zu bearbeiten gilt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der BfN-Studie werden Strategien diskutiert, die gezielt zur Förderung und zum Schutz der Blue-Carbon-Potenziale beitragen.

Kohlenstoffspeicherung – Küstenökosysteme – marine Sedimente – Kohlenstoffdioxidentfernung – Klimawandelminderung

Abstract

Blue Carbon refers to the organic carbon content stored in the sediment of marine and coastal ecosystems. Against the backdrop of the current climate and biodiversity crisis, the Blue Carbon potential of marine ecosystems and habitats is gaining importance and is being intensively researched and discussed. A study by the German Federal Agency for Nature Conservation (BfN) summarises the current state of knowledge on the Blue Carbon potential of the German North and Baltic Seas. Seagrass beds and salt marshes are already defined as Blue Carbon ecosystems and their contribution to mitigating the climate and biodiversity crisis is well recognised. The role of macroalgae, marine sediments and biogenic reefs is not yet clarified. Nationally, there are so far only few published, usable and spatially sufficiently well resolved data defining the Blue Carbon potential. As a part of efforts to combat climate change, there is a need to preserve Blue Carbon comprehensively, but there are still unanswered questions to be addressed. Based on this BfN literature study, strategies are discussed that specifically contribute to the promotion and preservation of Blue Carbon potential.

Carbon storage – Coastal vegetated ecosystems – Marine sediments – Carbon dioxide removal – Climate change mitigation

Manuskripteinreichung: 30.3.2023, Annahme: 15.1.2024

DOI: 10.19217/NuL2024-04-03

1 Einleitung

Küstenökosysteme wie Salzmarschen und Seegraswiesen schützen Menschen durch ihre Ökosystemleistungen vor Extremereignissen (z. B. Hochwasser, Stürme) und deren langfristigen Folgen (z. B. Erosion) (Barbier 2013; Jacob et al. 2023). Durch das Einlagern und langfristige Speichern von Kohlenstoff in ihrer Biomasse und ihren Sedimenten mindern Küstenökosysteme in die Atmosphäre emittierte Treibhausgasemissionen und folglich auch Prozesse des Klimawandels (Nellemann et al. 2009; IPCC 2022). Der langfristig von marinen Ökosystemen und Biotopen gespeicherte organische Kohlenstoff wird als Blue Carbon bezeichnet (siehe Kasten 1). Der Begriff ist angelehnt an Green Carbon, den in Wäldern und deren Böden gespeicherten Kohlenstoff. Beide stellen Gegenstücke zu Black Carbon oder auch Brown Carbon dar – der Kohlenstoff, der in fossilen Brennstoffen gespeichert ist und bei dessen Verbrennung Kohlenstoffdioxid (CO₂) frei wird. CO₂ beeinflusst als anthropogenes Treibhausgas maßgeblich den Wärmehaushalt der Erde und steht demnach im Fokus von Reduktionsmaßnahmen (IPCC 2019). Die Definition von Blue-Carbon-Ökosystemen unterliegt bestimmten Kriterien, die u. a. die Komplexität des Blue-Carbon-Konzepts aufzeigen (Lovelock, Duarte 2019). Für eine Gesamteinschätzung

der Rolle von Blue-Carbon-Ökosystemen bei der Minderung des Klimawandels müssen – v. a. bei Carbon-Accounting-Konzepten (Konzepten zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen) – auch alle Treibhausgase (z. B. Methan, Lachgas) und deren Stoffkreisläufe betrachtet werden (Rosentreter et al. 2023).

Die globale Fläche bewachsener Küstenökosysteme ist deutlich kleiner als z. B. die Fläche terrestrischer Wälder (McLeod et al. 2011). Dennoch ist ihr Beitrag zur Minderung des Klimawandels bedeutsam. In Meeressedimenten von Blue-Carbon-Ökosystemen bzw. -Biotopen (Begriffsdefinition siehe Kasten 1) kann Kohlenstoff langfristig über Zeitskalen von Jahrtausenden hinaus gespeichert werden, da sich die Sedimente kontinuierlich mit steigendem Meeresspiegel vertikal anreichern (Chmura et al. 2003; McLeod et al. 2011; Hendriks et al. 2020). In Küstenfeuchtgebieten wird Kohlenstoff in drei Speichern abgelagert: in der (lebenden) oberirdischen Biomasse, in der unterirdischen Biomasse und im Sediment. Letzteres gilt als langfristiger Speicher für Kohlenstoff. Salzmarschen und Seegraswiesen sind als klassische Blue-Carbon-Biotope (im Englischen als „ecosystems“) in Nordeuropa definiert (Duarte et al. 2005; Nellemann et al. 2009). Das Blue-Carbon-Potenzial anderer mariner Systeme wie unbewachsener Sedimente, von Makroalgen (z. B. Kelpwälder), biogener Riffe (z. B. Muschel- und Austernriffe)

oder von Meeresorganismen (z. B. Fische oder Wale) wird derzeit untersucht (Krause-Jensen et al. 2018; Filgueira et al. 2019; Lovelock, Duarte 2019; Macreadie et al. 2019). Auch die Rolle küstennaher Moore in Wechselwirkung mit den Küstenzonen der Ostsee wird aktuell diskutiert (Macreadie et al. 2019; HELCOM 2021a). Das Potenzial der langfristigen Kohlenstoffspeicherung hängt in allen Ökosystemen bzw. Biotopen vom Festsetzen und Freiwerden langfristig gespeicherten (sequestrierten) organischen Kohlenstoffs (C_{org}) ab – v. a. auch in Zusammenhang mit dem anorganischen Kohlenstoffkreislauf. Diesen Zusammenhang beeinflussen diverse Faktoren wie u. a. benthische Alkalinitätsflüsse (Macreadie et al. 2017; Van Dam et al. 2022; Turrell et al. 2023).

Ziel von Blue-Carbon-Strategien ist es, durch Schutz, Erhaltung oder Wiederherstellung mariner kohlenstoff- und artenreicher Lebensräume deren Fähigkeit zur langfristigen Speicherung von Treibhausgasen zu erhöhen (Nellemann et al. 2009). Während des Workshops der Helsinki-Kommission (Baltic Marine Environment Protection Commission – HELCOM) zum Blue-Carbon-Potenzial im Ostseeraum (HELCOM 2021a) wurde festgehalten, dass Blue-Carbon-Maßnahmen synergistische Effekte für den Klima- und den Biodiversitätsschutz ausschöpfen sollten. Im jüngsten Bewertungsbericht des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) wird zudem die Notwendigkeit der aktiven Kohlenstoffdioxidentfernung (carbon dioxide removal – CDR) zum Ausgleich von Restemissionen betont, wenn das international angestrebte Netto-Null-Szenario in Zukunft erreicht werden soll. Alle berücksichtigten Pfade zum 1,5 °C-Ziel schließen die Verwendung von CDR-Maßnahmen ein (Rogelj et al. 2018; IPCC 2022). Neben einer Reihe technischer CDR-Verfahren zur Verringerung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, beinhalten Blue-Carbon-Konzepte als naturbasierte Maßnahmen den Schutz, die Wiederherstellung oder Erhöhung der natürlichen Speicherung von Kohlenstoff in marinen und küstennahen Ökosystemen (Borchers et al. 2022; Mengis et al. 2022).

Kasten 1: Begriffsdefinitionen.

Box 1: Definition of terms.

Ökosystem: Nach Definition des Millennium Ecosystem Assessment (2005) ist ein Ökosystem ein dynamischer Komplex aus Gemeinschaften lebender Organismen (Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen) sowie ihrer nicht-lebenden Umgebung, die miteinander agieren und funktionelle Einheiten bilden. Im Kontext von Blue Carbon wird in aller Regel von Blue-Carbon-Ökosystemen gesprochen, da die Interaktionen der einzelnen Gemeinschaften zu Ökosystemfunktionen und -leistungen beitragen. Eine bestimmte räumliche Ausdehnung der Ökosysteme wird hierbei nicht festgelegt.

Biotop: Nach der Definition des European Union Nature Information System (EUNIS) ist das englische „habitat“ der Lebensraum von Pflanzen oder Tieren. „Habitats“ werden durch ihre physikalischen Eigenschaften (Topographie, Sedimentcharakteristika, Wasserqualität etc.) und durch die dort lebenden Organismen charakterisiert. Im Deutschen wird der Begriff „habitat“ im naturschutzfachlichen Kontext als „Biotop“ übersetzt. Ein Biotop oder eine Gruppe mehrerer Biotope formen zusammen mit den hier vorkommenden Biozönosen (Lebensgemeinschaften) unter Einbeziehung aller biotischen und abiotischen Interaktionen ein Ökosystem.

Blue Carbon: Blue Carbon beschreibt den langfristig von marinen Ökosystemen und Biotopen festgesetzten und gespeicherten organischen Kohlenstoff. Bei erweiterter Betrachtung umfasst Blue Carbon den organischen und anorganischen Kohlenstoff, der in Küsten-, Brackwasser-, Meeresökosystemen bzw. -biotopen sowie im Meeresboden gebunden und gespeichert wird. Der hierbei langfristig im Sediment gespeicherte Anteil an Kohlenstoff wird als sequestrierter Kohlenstoff bezeichnet.

Aufgrund einer möglichen Relevanz für den Klimaschutz sowie der Dringlichkeit, nationale CO_2 -Emissionen zu verringern und vorhandene Kohlenstoffspeicher zu erhalten, rückt die Erforschung mariner Kohlenstoffsequestrierung und -speicherung immer mehr in den wissenschaftlichen und politischen Fokus (Macreadie et al. 2021; Merk et al. 2022). Im Vergleich zu etablierten Forschungsthemen ist die Blue-Carbon-Forschung – v. a. in Deutschland – noch jung und die gesellschaftliche und politische Bedeutung erfordert integrierte, interdisziplinäre und biotopübergreifende Forschungsansätze. Einige übergreifende Aspekte sind auch auf globaler Ebene noch nicht ausreichend erforscht: u. a. der Einfluss (gelösten) anorganischen Kohlenstoffs, die Rolle von Blue Carbon unter systemischer Betrachtung vielfältiger Prozesse in Ökosystemen (Ökosystemansatz), die Betrachtung und Definition relevanter Zeitskalen für den Aufbau von Blue-Carbon-Speichern, die Herkunft des gespeicherten Kohlenstoffs sowie präzise Modellierungen zur räumlichen und quantitativen Ausdehnung regionaler Kohlenstoffspeicher (Lovelock, Duarte 2019; Mueller et al. 2019a; Van Dam et al. 2021; Graves et al. 2022; Van Dam et al. 2022).

Um das Blue-Carbon-Potenzial der deutschen Meere abzuschätzen, müssen verfügbare Daten und Erkenntnisse mit Bezug zu regionalen Ökosystemen bzw. Biotopen erfasst werden. Eine Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMUV; Röschel et al. 2021) gibt einen Überblick über den globalen Stand des Wissens im Bereich Blue Carbon und erste Handlungsempfehlungen für Deutschland. Darauf aufbauend wurde im Zeitraum 2021 – 2022 im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) eine Studie (Projekt: Development of integrated measures for nature conservation and ecosystems – DEFINE I) durchgeführt, die das Blue-Carbon-Potenzial relevanter Ökosysteme bzw. Biotope in der deutschen Nord- und Ostsee evaluiert, dieses mit internationalen Daten vergleicht und einen Ausblick auf die Veränderungen regionaler Potenziale durch den Klimawandel gibt (Koplin et al. 2022, 2024). Die relevanten Ergebnisse dieser Studie werden im Folgenden zusammengefasst.

2 Die Blue-Carbon-Potenzialstudie für Deutschland

Die Blue-Carbon-Potenzialstudie basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche zu publizierten Daten des Kohlenstoffspeicherpotenzials natürlicher mariner Ökosysteme bzw. Biotope der Nord- und Ostsee. Ziel der Studie war die Erfassung und Bewertung des Wissensstands zu Vorkommen und Potenzial von Blue-Carbon-Ökosystemen und -Biotopen in Deutschland vor dem Hintergrund zukünftiger Klima- und Biodiversitätsschutzmaßnahmen. Die Studie identifiziert außerdem offene wissenschaftliche Fragestellungen und präsentiert einen Überblick über laufende nationale Projekte zur quantitativen und qualitativen Bestimmung mariner Kohlenstoffspeicher in Nord- und Ostsee. Außerdem werden mögliche Maßnahmen zum Schutz, zur Wiederherstellung und zur Steigerung der natürlichen marinen Kohlenstoffspeicherfähigkeit benannt.

2.1 Relevante Lebensräume mit Blue-Carbon-Potenzial

Für Deutschland wurden drei relevante Biotope als potenzielle Kohlenstoffspeicher identifiziert: Salzmarschen, Seegraswiesen und unbewachsene marine Sedimente. Neben Salzmarschen sind Küstenmoore sowie von Schilfrohr dominierte Gebiete weitere für die Blue-Carbon-Thematik potenziell relevante Küstenfeuchtgebiete entlang der Ostseeküste (Buczko et al. 2022). Auch das Kohlenstoffspeicherpotenzial von Makroalgenwäldern (z. B. *Laminaria* spp.) und biogenen Riffen (z. B. Muschel- und Austernriffe) wird weiter wissenschaftlich untersucht. Durch Prozesse der Kalzifizierung (Karbonatbildung durch Schalenwachstum) und Respiration wird einerseits CO_2 freigesetzt (CO_2 -Quelle). Andererseits wird bei der

	Seegraswiesen	Salzmarschen	Sedimente	Makroalgen	Gelöste Kohlenstoffspeicher	Technische Verfahren
Ostsee	 	 	 			
Nordsee	 	 	 			

Abb. 1: Übersicht der kürzlich durchgeführten und der derzeit noch laufenden Projekte zu Blue-Carbon-Ökosystemen bzw. -Biotopen sowie zu möglichen technischen Verfahren zur Kohlenstoffreduktion (carbon dioxide removal – CDR) in Deutschland. NordSalt: Laufzeit 2021 – 2024, gefördert im EU-Programm BiodivERSA, <https://www.sdu.dk/en/forskning/nordsalt/about>; GREENTRIALS: Laufzeit 2020 – 2023, gefördert durch die Bauer-Hollmann Stiftung, <https://bit.ly/Greentrials>. Informationen zu allen anderen Projekten in Tab. 1, S. 184.

Fig. 1: Overview of recently completed or still ongoing projects on Blue Carbon ecosystems and habitats as well as possible technical carbon dioxide removal (CDR) processes in Germany. NordSalt: 2021 – 2024, funded within the EU programme BiodivERSA, <https://www.sdu.dk/en/forskning/nordsalt/about>; GREENTRIALS: 2020 – 2023, funded by the Bauer-Hollmann Stiftung, <https://bit.ly/Greentrials>. Information on all other projects in Table 1, p. 184.

bei Austern und vielen Muschelarten üblichen Nahrungsaufnahme durch Filtration organischer Kohlenstoff in Form von Biomasse, Faeces (Kot) und Pseudofaeces (durch tierischen Schleim gebundenen organischen und anorganischen Partikeln) festgelegt und damit gespeichert (CO₂-Senke) (Lee et al. 2020; Sea et al. 2022).

2.2 Kohlenstoffsequestrierung: Messung und regionale Variabilität

Das Potenzial bezieht sich in allen Ökosystemen bzw. Biotopen erstens auf die Menge des C_{org} und zweitens auf die C_{org}-Sequestrierungsrate, also die Menge des langfristig gespeicherten C_{org} pro Zeiteinheit (siehe Blue-Carbon-Definition in Kasten 1, S. 181). Kurzfristig gespeicherter organischer Kohlenstoff (z. B. in der Biomasse der Vegetation) wird als fixierter C_{org} bezeichnet. Die Menge an sequestriertem Kohlenstoff pro Fläche (angegeben z. B. in g · C_{org} · m⁻²) hängt stark von der untersuchten Tiefe der Böden bzw. Sedimente ab. Generell geht man von einer Abnahme in tieferen Sedimentschichten aufgrund von Remineralisierungsprozessen aus (Johannessen, Macdonald 2016; Green et al. 2018; Van de Broek et al. 2018; Mueller et al. 2019b). Die Kohlenstoffspeicher im Sediment werden hier über teilweise bereits standardisierte Methoden vor Ort durch Sedimentkerne bestimmt (IPCC 2014; vgl. z. B. Röhr et al. 2018). Im Vergleich dazu ist die lokale Messung der C_{org}-Festlegungsraten schwierig, die aber zur Bestimmung des Potenzials jeweils essenziell ist. Soweit möglich werden Extrapolationen aus Sedimentakkumulationsdaten herangezogen (z. B. Röhr et al. 2018) oder langfristige C_{org}-Akkumulationsraten durch radiometrische Datierung des Sedimentkerns errechnet (z. B. Postlethwaite et al. 2018).

Internationale Studien zeigen, dass die jährliche Kohlenstoffspeicherrate und die bestehenden Kohlenstoffspeicher mariner Ökosysteme bzw. Biotope regional variieren. Diese Variation hängt von verschiedenen Faktoren ab: Sedimenttyp (insbesondere Schlickgehalt des Sediments), Salzgehalt, Wassertiefe, Vegetation, Artengemeinschaft, Ökosysteminteraktionen und Störungen sowie – in Küstengebieten – auch die Überflutungshäufigkeit (Röhr et al. 2018; Ford et al. 2019). Globale Kohlenstoffsequestrierungsraten für die jeweiligen Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope sowie quantitative Einschätzungen ihrer bestehenden Kohlenstoffspeicher sind folglich nicht direkt auf Deutschlands Meeres- und Küstenbiotope übertragbar. Um verlässliche Aussagen zu treffen, sind regional gemessene Daten zwingend notwendig. In diesem Kontext wurden in Deutschland in den letzten Jahren u. a. die in Abb. 1 und Tab. 1, S. 184, zusammengefassten Forschungsprojekte gestartet.

2.3 Veränderungen der Blue-Carbon-Potenziale durch den Klimawandel

Die Auswirkungen des Klimawandels beeinflussen die verschiedenen Ökosysteme bzw. Biotope auf unterschiedliche Weise. Faktoren wie der Temperaturanstieg, der beschleunigte relative Meeresspiegelanstieg, aber auch die Eutrophierung der Küstengewässer haben stark negative Auswirkungen auf die langfristige Festsetzung organischer Einträge in Küstenfeuchtgebieten (z. B. Salzmarschen, Seegraswiesen) und verursachen eine vermehrte Umsetzung (oder auch Freisetzung) von Kohlenstoff (Mueller et al. 2018). So sind Salzmarschen besonders von Veränderungen der Überschwemmungsdauer sowie einer zunehmenden Küstenerosion betroffen (Esselink et al. 2017; Marijnissen et al. 2020). Seegraswiesen hingegen reagieren

sensibel auf Eutrophierung, Hitzewellen sowie veränderte hydrodynamische Bedingungen (verstärkte Strömungen, höhere Wellenenergie) (Krause-Jensen et al. 2008; Bergmann et al. 2010; Dolch, Reise 2010; Reynolds et al. 2016; Dolch et al. 2020). Der Kohlenstoffspeicher unbewachsener mariner Sedimente ist v.a. von der Menge des absinkenden organischen Materials abhängig. Mit zunehmender Wassertemperatur nimmt dieser Eintrag ab – z. B. durch verringerte Primärproduktion aufgrund einer verstärkten Schichtung von Oberflächen- und Tiefenwasser. Auch mikrobielle Remineralisierungsprozesse werden gefördert, wodurch potenziell weniger organischer Kohlenstoff im Sediment gespeichert werden kann (Keil 2017; Legge et al. 2020). Weitere anthropogene Einflüsse, wie z. B. Baumaßnahmen, wirken als zusätzliche Stressoren auf das Blue-Carbon-Potenzial natürlicher Ökosysteme bzw. Biotope, z. B. durch Lebensraumverlust oder indem bereits gespeicherter Kohlenstoff wieder freigesetzt wird (Butzeck et al. 2016; Schuerch et al. 2018; De los Santos et al. 2019; Epstein et al. 2022).

2.4 Maßnahmen zur Erhöhung des Blue-Carbon-Potenzials

Gezielte Managementmaßnahmen können die Blue-Carbon-Speicher der natürlichen Ökosysteme bzw. Biotope vor den Auswirkungen des Klimawandels schützen und so möglicherweise die Menge an gespeichertem Kohlenstoff erhöhen (Griffiths et al. 2020; Krause-Jensen et al. 2021; Martens et al. 2021; Graves et al. 2022). Ausgewählte Maßnahmen lassen sich übergreifend für verschiedene Ökosysteme bzw. Biotope umsetzen: ganzheitliches Ökosystemmanagement unter Einbeziehung verschiedener Prozesse (u.a. Filgueira et al. 2015), Renaturierung von Lebensräumen (Duarte et al. 2020), Aquakultur (z. B. potenziell mit Hilfe von Makroalgen nach Klärung noch offener Fragestellungen; Duarte et al. 2017), Ausgleich von Sedimentdefiziten sowie Sedimentstabilisierung (Hofstede et al. 2019). Einige Maßnahmen sind dagegen nur für bestimmte Biotope relevant: Wiederherstellung der natürlichen (Überschwemmungs) dynamiken sowie Beweidungsmanagement in Salzmarschen (Schulze et al. 2021; Graversen et al. 2022; Van den Hoven et al. 2022), Verringerung des Nährstoffeintrags in Seegraswiesen (u.a. Bobsien et al. 2021) oder ausgewiesene Schutzzonen in subtidalen kohlenstoffreichen marinen Sedimenten (Graves et al. 2022).

Zusätzlich zur Erhöhung des natürlichen CO₂-Speicherpotenzials mariner Lebensräume als naturbasierte Maßnahmen werden derzeit auch technische Lösungen erforscht (siehe hierzu Tab. 1, S. 184). Diese zielen in verschiedenen Ansätzen auf die aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (marine CDR-Techniken; Borchers et al. 2022). Für die deutschen Küsten- und Meeresgebiete stehen die Erhöhung der Alkalinität im Ozean, künstlicher Auftrieb (forcierter Transport von nährstoffreichem Tiefenwasser in die Oberflächenschicht zur Erhöhung der Primärproduktion) sowie CO₂-Abscheidung und -Speicherung im Fokus der Forschung. Es wird untersucht, ob und inwieweit die deutschen Meere eine wesentliche Rolle bei der Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre spielen können (Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung – DAM: CDRmare). Bisher ist nicht ausreichend bekannt, welche Auswirkungen die einzelnen Methoden bei klein- oder großskaliger Anwendung auf die Meeresumwelt haben. Die Klärung dieser noch offenen Fragen ist allerdings ausschlaggebend für die Bewertung der Umweltverträglichkeit und den Einsatz mariner CDR-Methoden.

2.5 Fazit und Empfehlungen der Studie

Die Blue-Carbon-Potenzialstudie zeigt, dass es bisher für die deutsche Nord- und Ostsee nur wenige räumlich gut aufgelöste Daten zum Blue-Carbon-Potenzial der relevanten Ökosysteme bzw. Biotope gibt. Verfügbare Daten beschreiben das Ausmaß der vorhandenen

C_{org}-Speicher in Seegraswiesen entlang der deutschen Ostseeküste (Stevenson et al. 2023) sowie C_{org}-Speicher und -Herkunft in Salzmarschen des deutschen Wattenmeers (Mueller et al. 2019a, b). Weiter empfiehlt die Studie, auch das Blue-Carbon-Potenzial von Makroalgen und biogenen Riffen sowie die langfristigen Kohlenstoffspeicher mariner Sedimente in den deutschen Meeren zu untersuchen und zu berücksichtigen. Mit Blick auf aktuelle Forschungsergebnisse lag der Fokus in den deutschen Meeren neben den international anerkannten Küstenökosystemen bzw. -biotopen auf weiteren Blue-Carbon-Aspekten. So wurden aufgrund ihrer großen globalen Ausdehnung und somit (möglichen) Relevanz zur Eindämmung des Klimawandels die Meeresböden eingeschlossen. Auch Rolle und Einfluss anorganischen Kohlenstoffs sollten zukünftig bei der Betrachtung von Blue Carbon mitgedacht werden (vgl. Kasten 1, S. 181; HELCOM 2021a). Die Kernaussagen der Studie lauten:

- Für die deutschen Meere und Küsten spielen v.a. Salzmarschen, Seegraswiesen sowie potenziell unbewachsene marine Sedimente eine Rolle als marine Kohlenstoffspeicher.
- Bereits existierende marine Kohlenstoffspeicher (v.a. in den Sedimenten der Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope) müssen vor Störungen geschützt werden, um den dort langfristig gespeicherten Kohlenstoff nicht wieder der Remineralisierung auszusetzen und damit zusätzliche Treibhausgase (wie CO₂, Methan) freizusetzen.
- Durch die Renaturierung degradierter oder zerstörter Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope könnten Kohlenstoffspeicher erweitert und zusätzlich geschützt werden.
- Regionale marine Kohlenstoffspeicher und Blue-Carbon-Potenziale müssen weiter erforscht und gemessen werden, um regionale Zusammenhänge, Blue-Carbon-Potenziale und Kohlenstoffkreisläufe zu quantifizieren und zu verstehen.
- Der anhaltende Klimawandel wird negative Auswirkungen auf Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope und deren Blue-Carbon-Potenzial haben.

Für alle Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope in Deutschland ergeben sich relevante offene wissenschaftliche Fragestellungen (für eine Auswahl siehe Tab. 1, S. 184). Einige werden bereits in laufenden Forschungsprojekten adressiert (siehe Abschnitt 3), andere müssen für ein ganzheitliches Bild künftig erforscht werden (z. B. im Rahmen des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz – ANK; BMUV 2022).

3 Laufende Blue-Carbon-Forschung in Deutschland

Bereits seit einigen Jahren laufen umfangreiche Projekte, in denen Forschungsverbünde jeweils unterschiedliche potenzielle Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope untersuchen. Ziel ist die Evaluierung und Quantifizierung der natürlichen Kohlenstoffspeicher und -potenziale, der ökosystemaren Kohlenstoffflüsse sowie möglicher naturbasierter (und technischer) Lösungen zur Erweiterung dieser Speichermöglichkeiten.

Aufbauend auf der Blue-Carbon-Potenzialstudie für Deutschland wurde das Folgeprojekt DEFINE II (gefördert durch das BfN mit Mitteln des BMUV, 12/2022 – 11/2025) gestartet. Dessen erster Schwerpunkt umfasst die Erforschung und Evaluation des natürlichen Kohlenstoffspeicherpotenzials biogener Riffe (Muschel- und Austernriffe) in der deutschen Nordsee. Um deren Funktion als Kohlenstoffspeicher bzw. -quellen für deutsche Vorkommen (Wattenmeer: Pazifische Auster – *Crassostrea gigas*, Miesmuschel – *Mytilus edulis*; Subtidal: Wiederansiedlungsprojekte der Europäischen Auster – *Ostrea edulis*) zu quantifizieren, werden Labor-, Mesokosmen- und Feldversuche konzipiert. Ziel ist es, organische und anorganische Kohlenstoffflüsse rund um Muschel- und Austernriffe zu bestimmen, um fundierte Aussagen zum Kohlenstoffspeicher biogener Riffe und zum künftigen Einfluss des Klimawandels auf die

Tab. 1: Auswahl der im Rahmen der Blue-Carbon-Potenzialstudie (Koplin et al. 2022, 2024) identifizierten offenen Fragestellungen/ Forschungsthemen im Bereich der Blue-Carbon-Forschung in Deutschland sowie – wo möglich – Verweis auf die damit befassten nationalen Projekte.

Table 1: Selection of open questions and research issues in the field of Blue Carbon research in Germany identified in the Blue Carbon potential study (Koplin et al. 2022, 2024) and, where possible, reference to the national projects addressing them.

Ökosystem/Biotop	Offene Fragestellungen/Forschungsthemen (Nummern in Klammern beziehen sich auf die Projekte in der folgenden Spalte)	Laufende nationale Projekte zu den Themen
Salzmarschen	<ul style="list-style-type: none"> Wie groß sind regionale Kohlenstoffspeicher, das Sequestrierungspotenzial sowie die Langlebigkeit der Speicher des langfristig gespeicherten (sequestrierten) organischen Kohlenstoffs (C_{org}) in Salzmarschen in Deutschland? (1) Wird durch die Vernässung von Salzmarschböden der Abbau organischer Substanz reduziert, weil die festgelegten organischen Substanzen vor aerober Atmung geschützt werden? Umgang mit und individuelle Beurteilung der Nutztierhaltung auf Salzmarschen zur Förderung des Kohlenstoffspeicherpotenzials vs. Einfluss des Meeresspiegelanstiegs Können die Salzmarschen einem möglichen beschleunigten Meeresspiegelanstieg standhalten? Wie kann der Konflikt zwischen Küstenschutz, Meeresspiegelanstieg und der Erhaltung von Salzmarschen künftig gelöst werden? Wie und wo sind Renaturierungsmaßnahmen möglich? (1) Wie hoch ist die Klima-Vulnerabilität von Salzmarschen entlang der deutschen Küsten? 	<p>(1) CDRmare: Sea4Society Laufzeit: 8/2021 – 7/2024 Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF (Mission 1 der Deutschen Allianz Meeresforschung – DAM) https://sea4society.cdrmare.de</p> <p>(2) CDRmare: RETAKE, ASMASYS, GEOSTOR, AIMS3, Test-ArtUp Laufzeit: 8/2021 – 7/2024 Gefördert durch das BMBF (DAM-Mission 1) https://retake.cdrmare.de https://asmasy.cdrmare.de/ https://geostor.cdrmare.de https://aims3.cdrmare.de https://test-artup.cdrmare.de</p>
Seegraswiesen	<ul style="list-style-type: none"> Wie groß sind regionale Kohlenstoffspeicher, das Speicherpotenzial sowie die Langlebigkeit der C_{org}-Speicher von Seegraswiesen in Deutschland? (1), (4) Welchen Einfluss kann die Renaturierung von Seegraswiesen auf deren Blue-Carbon-Potenzial in Deutschland haben und wie können Renaturierungsprojekte auf große Gebiete hochskaliert werden? (1), (3) Wie groß ist die Klima-Vulnerabilität von Seegraswiesen entlang der deutschen Küsten? (3) (Ostsee) 	<p>(3) SeaStore Laufzeit: 11/2020 – 10/2023 Gefördert durch das BMBF https://www.seegraswiesen.de</p>
Unbewachsene marine Sedimente	<ul style="list-style-type: none"> Wie groß ist der regionale Kohlenstoffspeicher und das Speicherpotenzial mariner Sedimente in Deutschland? (5), (6) Wodurch wird der Kohlenstoffspeicher mariner Sedimente in Deutschland beeinflusst? (5) Können marine Sedimente innerhalb der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) mehr Kohlenstoff speichern, wenn sie vor bestimmten Störungen – z. B. Resuspension durch bodenberührende Fischerei – geschützt werden? (7) Welche Messungen und Daten sind notwendig, um mögliche „Kohlenstoff-Hotspots“ zu identifizieren, deren Schutz – bspw. durch Naturschutzzonen – sich besonders positiv auf den Klimaschutz auswirken könnte? Welche Kohlenstoffverbindungen sind hierbei relevant (z. B. Einfluss von Methanfreisetzung)? 	<p>(4) Helmholtz-Klima-Initiative (HI-CAM) Projekt 4: Speicherlösungen der Natur Laufzeit: 2019 – 2021 Gefördert im Rahmen der Netto-Null-2050-Initiative https://www.netto-null.org/projects/nature-based_storage_systems/index.php.de</p> <p>(5) APOC Laufzeit: 4/2021 – 3/2024 Gefördert durch das Fachprogramm MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit des BMBF https://www.apoc-project.de</p>
Makroalgen	<ul style="list-style-type: none"> Können Kelpwälder, z. B. vor Helgoland, als Kohlenstoffsinken angesehen werden? (1) Wie viel des von Makroalgen fixierten Kohlenstoffs wird in andere Blue-Carbon-Ökosysteme exportiert und dort langfristig gespeichert? Welchen Einfluss haben die von Braunalgen gebildeten gelösten organischen Verbindungen (Fucoidan) auf die langfristige C_{org}-Speicherung z. B. in Sedimenten? 	<p>(6) CARBOSTORE Laufzeit: 4/2021 – 3/2024 Gefördert durch das Fachprogramm MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit des BMBF https://www.carbostore.de</p>
Biogene Riffe	<ul style="list-style-type: none"> Agieren Muschelriffe der Pazifischen Auster (<i>Crassostrea gigas</i>), der Gemeinen Miesmuschel (<i>Mytilus edulis</i>) oder der Europäischen Auster (<i>Ostrea edulis</i>) in den deutschen Meeren als Kohlenstoffsinken oder -quellen? (8) Wie beeinflussen biogene Riffe den Kohlenstoffkreislauf im umliegenden Ökosystem? (8) 	<p>(7) MGF Nordsee und MGF Ostsee Laufzeit: 3/2020 – 2/2023 Gefördert durch das BMBF (DAM-Mission 2) https://www.mgf-nordsee.de/ https://www.io-warnemuende.de/dam-mgf-ostsee-start.html</p>
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> Welche ökologischen Auswirkungen haben einzelne Optionen der Kohlenstoffdioxidentfernung (carbon dioxide removal – CDR) auf marine Ökosysteme und Organismen? (2), (8) Ursprung des Kohlenstoffs (allochthon vs. autochthon) und Einführung sowie Relevanz von Carbon Crediting für Blue Carbon in Deutschland Interaktion zwischen anorganischen und organischen Kohlenstoffkreisläufen und Prozessen, die dem Kohlenstoffspeicherpotenzial entgegenwirken könnten (z. B. Kalzifizierung in Ökosystemen) Relevanz von Nicht-CO₂-Treibhausgasemissionen, z. B. Methan, im C-Budget der Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope Einfluss des Klimawandels (steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen, steigende Temperaturen, beschleunigter Meeresspiegelanstieg etc.) auf Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope und mögliche Managementstrategien 	<p>(8) DEFINE II Laufzeit: 11/2022 – 11/2025 Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) und das Bundesumweltministerium (BMUV)</p>

langfristige Kohlenstoffspeicherkapazität der deutschen Nordsee zu ermöglichen.

Der zweite Schwerpunkt umfasst die Erforschung und Evaluation von Auswirkungen eines bestimmten CO₂-Entnahme-Verfahrens (Ocean Alkalinity Enhancement – OAE) auf benthische filtrierende Organismen. In diesem technischen Ansatz wird durch das Ausbringen von Mineralsand (z. B. Olivinbasalt) die Alkalinität im Seewasser erhöht und somit die Kapazität der CO₂-Aufnahme gesteigert. Allerdings fallen bei der Auflösung des Minerals auch Schwermetalle wie Nickel aus. Diese haben teilweise stark negative Einflüsse auf marine Organismen (Hunt et al. 2002; Millward et al. 2012; Bach et al. 2019). Die physiologischen Auswirkungen dieser freigesetzten Elemente auf filtrierende Benthosorganismen werden an den Modellorganismen Miesmuschel und Europäische Auster

untersucht. Außerdem beinhaltet das Projekt eine kontinuierliche und ergebnisorientierte Literaturrecherche zu Blue-Carbon-Ökosystemen bzw. -Biotopen und zu marinen CDR-Verfahren in Deutschland. Ziel ist es, aktuelle Entwicklungen und relevante Forschungsergebnisse im Kontext des Meeresnaturschutzes zu berücksichtigen.

4 Ausblick

Alle bisher identifizierten (potenziellen) Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope zeichnen sich neben ihrer Bedeutung für eine langfristige Kohlenstoffspeicherung auch durch weitere wichtige Ökosystemfunktionen und -leistungen aus, vor allem im Zu-

sammenhang mit der Erhaltung oder Wiederherstellung der natürlichen Biodiversität. Einige regulierende und unterstützende Leistungen beinhalten u. a. die pH-Regulation oder die Resilienz-erhaltung in Ökosystemen bzw. Biotopen und sind teilweise direkt in sozio-ökonomische Vorteile übertragbar (z. B. Lebensmittelversorgung oder Verfügbarkeit biomedizinischer Produkte, Heckwolf et al. 2021). Vor dem Hintergrund der gleichzeitigen Klima- und Biodiversitätskrise können Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope und deren Schutz daher eine wichtige Rolle in integrierten Minderungsstrategien spielen. Es ist dafür erforderlich, die Kombination aller Ökosystemleistungen zu betrachten und Ökosysteme nicht allein anhand ihrer Kohlenstoffspeicherpotenziale zu bewerten (Merk et al. 2022). Durch ein integriertes Ökosystemmanagement sollten anhaltende Belastungen und Zerstörungen dieser Lebensräume durch zahlreiche negative Auswirkungen (z. B. Klimawandeleffekte, Fischereidruck und Baumaßnahmen) vermindert werden. Gleichzeitig sollte die marine Biodiversität erhalten und CO₂ und ggfs. weitere Treibhausgase sollten langfristig gespeichert werden.

Global wurde das Potenzial von mit Makrophyten bewachsenen Küstenökosystemen zur Speicherung von CO₂ bereits vor etwa zwei Jahrzehnten erkannt (Duarte et al. 2005). Auch in Europa werden (potenzielle) Blue-Carbon-Ökosysteme bzw. -Biotope seit einigen Jahren vermehrt untersucht, deren Kohlenstoffspeicherpotenzial wird erforscht und erste Quantifizierungen liegen vor (z. B. Burrows et al. 2017; Scheffold, Hense 2020; Frigstad et al. 2021; Malak et al. 2021; Parker et al. 2021). Internationale Aktionsprogramme zur Verbesserung der Umweltbedingungen wie der Baltic Sea Action Plan (HELCOM 2021b) wurden angepasst, um die Rückgewinnung größerer Flächen bewachsener Küstenökosysteme zu unterstützen (z. B. Seegraswiesen; Bobsien et al. 2021).

In Deutschland sind Teile der v. a. in den Küstenbereichen durch die Blue-Carbon-Potenzialstudie identifizierten relevanten Biotope auch als besonders schützenswerte Lebensraumtypen der Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Richtlinie klassifiziert. Der Beitrag dieser marinen Biotope zum natürlichen Klimaschutz Deutschlands wurde erkannt und deren Bedeutung wird künftig auch im Rahmen des nationalen ANK weiter im Fokus stehen (BMUV 2022). Im Rahmen des ANK soll eine Vielzahl an Maßnahmen (degradierte) Ökosysteme bzw. Biotope stärken und auf diese Weise Klimaschutz mit Naturschutz verbinden. Allerdings sollten die sog. negativen Emissionen, die ggfs. durch die Bindung von Treibhausgasen in Blue-Carbon-Ökosystemen bzw. -Biotopen entstehen, keinesfalls dazu dienen, dringend nötige Schritte zur Einsparung nationaler CO₂-Emissionen aufzuschieben (Röschel et al. 2021; Borchers et al. 2022; Mengis et al. 2022).

5 Literatur

- Bach L.T., Gill S.J. et al. (2019): CO₂ removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: Potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems. *Frontiers in Climate* 1: 1–21. DOI: 10.3389/fclim.2019.00007
- Barbier E.B. (2013): Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: Progress and challenges. *Resources* 2(3): 213–230. DOI: 10.3390/resources2030213
- Bergmann N., Winters G. et al. (2010): Population-specificity of heat stress gene induction in northern and southern eelgrass *Zostera marina* populations under simulated global warming. *Molecular Ecology* 19(14): 2.870–2.883. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2010.04731.x
- BMUV/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2022): Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz. Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023. BMUV, Berlin: 86 S.
- Bobsien I.C., Hukriede W. et al. (2021): Modeling eelgrass spatial response to nutrient abatement measures in a changing climate. *Ambio* 50(2): 400–412. DOI: 10.1007/s13280-020-01364-2
- Borchers M., Thrän D. et al. (2022): Scoping carbon dioxide removal options for Germany – What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? *Frontiers in Climate* 4: 25. DOI: 10.3389/fclim.2022.810343
- Buczko U., Jurasiński G. et al. (2022): Blue Carbon in coastal *Phragmites* wetlands along the Southern Baltic Sea. *Estuaries and Coasts* 45: 2.274–2.282. DOI: 10.1007/s12237-022-01085-7
- Burrows M., Hughes D. et al. (2017): Assessment of blue carbon resources in Scotland's inshore Marine Protected Area Network. Commissioned Report No. 957. Scottish Natural Heritage. Inverness: 271 S.
- Butzeck C., Schröder U. et al. (2016): Vegetation succession of low estuarine marshes is affected by distance to navigation channel and changes in water level. *Journal of Coastal Conservation* 20(3): 221–236. DOI: 10.1007/s11852-016-0432-1
- Chmura G.L., Anisfeld S.C. et al. (2003): Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4): 1–12. DOI: 10.1029/2002GB001917
- De los Santos C.B., Krause-Jensen D. et al. (2019): Recent trend reversal for declining European seagrass meadows. *Nature Communications* 10(1): 1–8. DOI: 10.1038/s41467-019-11340-4
- Dolch T., Buschbaum C., Reise K. (2020): Seegrass-Monitoring im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer 2017–2019. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Flintbek: 127 S.
- Dolch T., Reise K. (2010): Long-term displacement of intertidal seagrass and mussel beds by expanding large sandy bedforms in the northern Wadden Sea. *Journal of Sea Research* 63(2): 93–101. DOI: 10.1016/j.seares.2009.10.004
- Duarte C.M., Agusti S. et al. (2020): Rebuilding marine life. *Nature* 580(7.801): 39–51. DOI: 10.1038/s41586-020-2146-7
- Duarte C.M., Middelburg J.J., Caraco N. (2005): Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences* 2(1): 1–8. DOI: 10.5194/bg-2-1-2005
- Duarte C.M., Wu J. et al. (2017): Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science* 4(100): 1–8. DOI: 10.3389/fmars.2017.00100
- Epstein G., Middelburg J.J. et al. (2022): The impact of mobile demersal fishing on carbon storage in seabed sediments. *Global Change Biology* 28(9): 2.875–2.894. DOI: 10.1111/gcb.16105
- Esselink P., van Duin W. et al. (2017): Salt marshes. In: Klöpffer S., Baptist M.J. et al. (Hrsg.): Wadden Sea quality status report 2017. Common Wadden Sea Secretariat. Wilhelmshaven: 40 S.
- Filgueira R., Byron C.J. et al. (2015): An integrated ecosystem approach for assessing the potential role of cultivated bivalve shells as part of the carbon trading system. *Marine Ecology Progress Series* 518: 281–287. DOI: 10.3354/meps11048
- Filgueira R., Strohmeier T., Strand Ø. (2019): Regulating services of bivalve molluscs in the context of the carbon cycle and implications for ecosystem valuation. In: Smaal A., Ferreira J. et al. (Hrsg.): Goods and services of marine bivalves. Springer, Cham: 231–251.
- Ford H., Garbutt A. et al. (2019): Large-scale predictions of salt-marsh carbon stock based on simple observations of plant community and soil type. *Biogeosciences* 16(2): 425–436. DOI: 10.5194/bg-16-425-2019
- Frigstad H., Gundersen H. et al. (2021): Blue carbon – climate adaptation, CO₂ uptake and sequestration of carbon in Nordic blue forests: Results from the Nordic Blue Carbon Project. Nordic Council of Ministers. Copenhagen: 139 S.
- Graversen A.E., Banta G.T. et al. (2022): Carbon sequestration is not inhibited by livestock grazing in Danish salt marshes. *Limnology and Oceanography* 67(S2): S19–S35. DOI: 10.1002/lno.12011
- Graves C.A., Benson L. et al. (2022): Sedimentary carbon on the continental shelf: Emerging capabilities and research priorities for Blue Carbon. *Frontiers in Marine Science* 9: 22. DOI: 10.3389/fmars.2022.926215

- Green A., Chadwick M.A., Jones P.J. (2018): Variability of UK seagrass sediment carbon: Implications for blue carbon estimates and marine conservation management. *PLOS ONE* 13(9): e0204431. DOI: 10.1371/journal.pone.0204431
- Griffiths L.L., Connolly R.M., Brown C.J. (2020): Critical gaps in seagrass protection reveal the need to address multiple pressures and cumulative impacts. *Ocean & Coastal Management* 183: e104946. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.104946
- Heckwolf M.J., Peterson A. et al. (2021): From ecosystems to socio-economic benefits: A systematic review of coastal ecosystem services in the Baltic Sea. *Science of the Total Environment* 755: e142565. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142565
- HELCOM/Helsinki Commission (2021a): Report of the HELCOM workshop on Blue Carbon potential in the Baltic Sea region. In: HELCOM (Hrsg.): Workshop on Blue Carbon potential in the Baltic Sea region. Online meeting, 17.–18. November 2021. HELCOM: 12 S.
- HELCOM/Helsinki Commission (Hrsg.) (2021b): Baltic Sea Action Plan. 2021 update. HELCOM, Helsinki: 31 S.
- Hendriks K., Gubbay S. et al. (2020): Carbon storage in European ecosystems: A quick scan for terrestrial and marine EUNIS habitat types. Wageningen Environmental Research. Wageningen: 66 S.
- Hofstede J., Matelski B., Stock M. (2019): Schleswig-Holsteins Klima-Anpassungsstrategie für das Wattenmeer 2100. Die Küste (87): 19–38. DOI: 10.18171/1.087102
- Hunt J.W., Anderson B.S. et al. (2002): Acute and chronic toxicity of nickel to marine organisms: Implications for water quality criteria. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21(11): 2.423–2.430. DOI: 10.1002/etc.5620211122
- IPCC/Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. Methodological guidance on lands with wet and drained soils, and constructed wetlands for wastewater treatment. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, Technical Support Unit. Hayama, Japan: 354 S.
- IPCC/Intergovernmental Panel on Climate Change (2019): IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Cambridge University Press. Cambridge: 755 S.
- IPCC/Intergovernmental Panel on Climate Change (2022): Climate change 2022. Mitigation of climate change. Cambridge University Press. Cambridge: 2.029 S.
- Jacob B., Dolch T. et al. (2023): Evaluation of seagrass as a nature-based solution for coastal protection in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics* 73(11): 699–727. DOI: 10.1007/s10236-023-01577-5
- Johannessen S.C., Macdonald R.W. (2016): Geoengineering with seagrasses: Is credit due where credit is given? *Environmental Research Letters* 11(11): e113001. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/113001
- Keil R. (2017): Anthropogenic forcing of carbonate and organic carbon preservation in marine sediments. *Annual Review of Marine Science* 9: 151–172. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060724
- Koplin J., Peter C., Pogoda B. (2022): Blue Carbon Potenziale der deutschen Nord- und Ostsee – Status und Trends vor dem Hintergrund des Klimaschutzes (Literaturstudie). Unveröff. Abschlussbericht. Bundesamt für Naturschutz. Bonn: 121 S.
- Koplin J., Peter C., Pogoda B. (2024): Blue Carbon Potenziale der deutschen Nord- und Ostsee – Status und Trends vor dem Hintergrund des Klimaschutzes. BfN-Schriften: in Vorbereitung.
- Krause-Jensen D., Duarte C.M. et al. (2021): Century-long records reveal shifting challenges to seagrass recovery. *Global Change Biology* 27(3): 563–575. DOI: 10.1111/gcb.15440
- Krause-Jensen D., Lavery P. et al. (2018): Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the Blue Carbon room. *Biology Letters* 14(6): e20180236. DOI: 10.1098/rsbl.2018.0236
- Krause-Jensen D., Sagert S. et al. (2008): Empirical relationships linking distribution and abundance of marine vegetation to eutrophication. *Ecological Indicators* 8(5): 515–529. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.004
- Lee H.Z., Davies I.M. et al. (2020): Missing the full story: First estimates of carbon deposition rates for the European flat oyster, *Ostrea edulis*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 30(11): 2.076–2.086. DOI: 10.1002/aqc.3402
- Legge O., Johnson M. et al. (2020): Carbon on the northwest European shelf: Contemporary budget and future influences. *Frontiers in Marine Science* 7: 143. DOI: 10.3389/fmars.2020.00143
- Loveck C.E., Duarte C.M. (2019): Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters* 15(3): 20180781. DOI: 10.1098/rsbl.2018.0781
- Macreadie P.I., Anton A. et al. (2019): The future of Blue Carbon science. *Nature Communications* 10(1): 3.998. DOI: 10.1038/s41467-019-11693-w
- Macreadie P.I., Costa M.D. et al. (2021): Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment* 2(12): 826–839. DOI: 10.1038/s43017-021-00224-1
- Macreadie P.I., Serrano O. et al. (2017): Addressing calcium carbonate cycling in blue carbon accounting. *Limnology and Oceanography Letters* 2: 195–201. DOI: 10.1002/lol2.10052
- Malak D.A., Marín A.I. et al. (2021): Carbon pools and sequestration potential of wetlands in the European Union. ETC/ULS Report 10/2021. European Topic Centre on Urban, Land and Soil Systems (ETC/ULS). Wien: 61 S.
- Marijnissen R., Esselink P. et al. (2020): How natural processes contribute to flood protection – A sustainable adaptation scheme for a wide green dike. *Science of the Total Environment* 739: e139698. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139698
- Martens M., Müller P. et al. (2021): Blue Carbon im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Grundlagen für eine Prüfung und Bewertung möglicher Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstofffixierung in Salzwiesen. Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer. Wilhelmshaven: 51 S.
- McLeod E., Chmura G.L. et al. (2011): A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(10): 552–560. DOI: 10.1890/110004
- Mengis N., Kalhori A. et al. (2022): Net-zero CO₂ Germany – A retrospect from the year 2050. *Earth's Future* 10(2): e2021EF002324. DOI: 10.1029/2021EF002324
- Merk C., Grunau J. et al. (2022): The need for local governance of global commons: The example of blue carbon ecosystems. *Ecological Economics* 201: e107581. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107581
- Millenium Ecosystem Assessment (2005): Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press. Washington, DC: 137 S.
- Millward G.E., Kadam S., Jha A.N. (2012): Tissue-specific assimilation, depuration and toxicity of nickel in *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution* 162: 406–412. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.11.034
- Mueller P., Do H.T. et al. (2019a): Origin of organic carbon in the topsoil of Wadden Sea salt marshes. *Marine Ecology Progress Series* 624: 39–50. DOI: 10.3354/meps13009
- Mueller P., Ladiges N. et al. (2019b): Assessing the long-term carbon-sequestration potential of the semi-natural salt marshes in the European Wadden Sea. *Ecosphere* 10(1): e02556. DOI: 10.1002/ecs2.2556
- Mueller P., Schile-Beers L.M. et al. (2018): Global-change effects on early-stage decomposition processes in tidal wetlands – Implications from a global survey using standardized litter. *Biogeosciences* 15(10): 3.189–3.202. DOI: 10.5194/bg-15-3189-2018
- Nellemann C., Corcoran E. et al. (2009): Blue carbon. The role of healthy oceans in binding carbon. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme. Nairobi: 78 S.
- Parker R., Benson L. et al. (2021): Blue Carbon stocks and accumulation analysis for Secretary of State (SoS) region. Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science. Lowestoft, UK: 42 S.

- Postlethwaite V.R., McGowan A.E. et al. (2018): Low blue carbon storage in eelgrass (*Zostera marina*) meadows on the Pacific coast of Canada. PLOS ONE 13(6): e0198348. DOI: 10.1371/journal.pone.0198348
- Reynolds L.K., DuBois K. et al. (2016): Response of a habitat-forming marine plant to a simulated warming event is delayed, genotype specific, and varies with phenology. PLOS ONE 11(6): e0154532. DOI: 10.1371/journal.pone.0154532
- Rogelj J., Shindell D. et al. (2018): Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development. In: Masson-Delmotte V., Zhai P. et al. (Hrsg.): Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf: 93 – 174.
- Röhr M.E., Holmer M. et al. (2018): Blue carbon storage capacity of temperate eelgrass (*Zostera marina*) meadows. Global Biogeochemical Cycles 32(10): 1.457 – 1.475. DOI: 10.1029/2018GB005941
- Röschel L., Unger S. et al. (2021): Klimaschutz durch Meeresnatur. Potentiale und Handlungsoptionen. Institute for Advanced Sustainability Studies e. V. Potsdam: 6 S.
- Rosentreter J.A., Laruelle G.G. et al. (2023): Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink. Nature Climate Change 13(6): 579 – 587. DOI: 10.1038/s41558-023-01682-9
- Scheffold M.I., Hense I. (2020): Quantifying contemporary organic carbon stocks of the Baltic Sea ecosystem. Frontiers in Marine Science 7: 1.052. DOI: 10.3389/fmars.2020.571956
- Schuerch M., Spencer T. et al. (2018): Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. Nature 561(7.722): 231 – 234. DOI: 10.1038/s41586-018-0476-5
- Schulze D., Jensen K., Nolte S. (2021): Livestock grazing reduces sediment deposition and accretion rates on a highly anthropogenically altered marsh island in the Wadden Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science 251: e107191. DOI: 10.1016/j.ecss.2021.107191
- Sea M.A., Hillman J.R., Thrush S.F. (2022): The influence of mussel restoration on coastal carbon cycling. Global Change Biology 28(17): 5.269 – 5.282. DOI: 10.1111/gcb.16287
- Stevenson A., Ó Corcora T.C. et al. (2023): Substantial seagrass blue carbon pools in the southwestern Baltic Sea include relics of terrestrial peatlands. Frontiers in Marine Science 10: e1266663. DOI: 10.3389/fmars.2023.1266663
- Turrell W.R., Austin W.E. et al. (2023): Clarifying the role of inorganic carbon in blue carbon policy and practice. Marine Policy 157: e105873. DOI: 10.1016/j.marpol.2023.105873
- Van Dam B., Lehmann N. et al. (2022): Benthic alkalinity fluxes from coastal sediments of the Baltic and North Seas: Comparing approaches and identifying knowledge gaps. Biogeosciences 19(16): 3.775 – 3.789. DOI: 10.5194/bg-19-3775-2022
- Van Dam B., Zeller M.A. et al. (2021): Calcification-driven CO₂ emissions exceed “Blue Carbon” sequestration in a carbonate seagrass meadow. Science Advances 7(51): eabj1372. DOI: 10.1126/sciadv.abj1372
- Van de Broek M., Vandendriessche C. et al. (2018): Long-term organic carbon sequestration in tidal marsh sediments is dominated by old-aged allochthonous inputs in a macrotidal estuary. Global Change Biology 24(6): 2.498 – 2.512. DOI: 10.1111/gcb.14089
- Van den Hoven K., Kroeze C., van Loon-Steensma J.M. (2022): Characteristics of realigned dikes in coastal Europe: Overview and opportunities for nature-based flood protection. Ocean & Coastal Management 222(4): e106116. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106116

Förderung

Das Projekt DEFINE I (Literaturstudie, 2021 – 2022, FKZ: 3521 83 1000) wurde, das Projekt DEFINE II (2022 – 2025, FKZ: 3522 83 0300) wird vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesumweltministeriums (BMUV) gefördert.

Corina Peter, M. Sc.

Korrespondierende Autorin

Alfred-Wegener-Institut

Ökologie der Schelfmeere, Ökologie der Küsten

Am Handelshafen 12

27570 Bremerhaven

E-Mail: corina.peter@awi.de



Die Autorin studierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Universität Bremen Biologie und Meeresbiologie mit dem Schwerpunkt marine Ökologie. Seit 2018 arbeitet sie in den vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) geförderten Projekten zur Wiederansiedlung der Europäischen Auster in der deutschen Nordsee, die am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) durchgeführt werden. Im Projekt DEFINE I hat sie die Literaturstudie zu Blue-Carbon-Potenzialen in der deutschen Nord- und Ostsee bearbeitet und koordiniert. Ihr Schwerpunkt liegt auf dem Wissenstransfer zu Meeresnaturschutzmaßnahmen zur Steigerung von Biodiversität und Ökosystemleistungen.

Julian Koplín, M. Sc.

Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Berliner Straße 130

14467 Potsdam

E-Mail: julian.koplin@rifs-potsdam.de

Dr. Bernadette Pogoda

Alfred-Wegener-Institut

Ökologie der Schelfmeere, Ökologie der Küsten

Am Handelshafen 12

27570 Bremerhaven

E-Mail: bernadette.pogoda@awi.de

Dr. Claudia Morys

Bundesamt für Naturschutz

Fachgebiet II 3.2 „Meeresschutzgebiete der AWZ“

Konstantinstraße 110

53179 Bonn

E-Mail: claudia.morys@bfn.de

Dr. Jochen Krause

Bundesamt für Naturschutz

Fachgebiet II 3.2 „Meeresschutzgebiete der AWZ“

Konstantinstraße 110

53179 Bonn

E-Mail: jochen.krause@bfn.de

Anzeige

www.dnl-online.de

Die Literaturdatenbank
des Bundesamtes für
Naturschutz

