



# Blue Carbon im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer

Mike Martens, Peter Müller, Clarisse Gösele, Kai Jensen und Bastian Schuchardt



# **Blue Carbon im Nationalpark Nieder- sächsisches Wattenmeer**

**Grundlagen für eine Prüfung und Bewertung möglicher  
Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstofffixierung in  
Salzwiesen**

## Vorwort

Salzwiesen entstehen an flachen, strömungsarmen Küsten unter dem Einfluss regelmäßiger Überflutung und der Ablagerung von Sedimenten. Sie sind charakteristischer Lebensraum des Wattenmeers und eng mit seiner natürlichen Dynamik verknüpft.

Auf Grund ihrer hohen Primärproduktion, langsamen Abbauprozessen in den nassen, sauerstoffarmen, salzigen Böden und dem Eintrag mariner Sedimente können natürliche Salzwiesen der Atmosphäre große Mengen an Kohlendioxid entziehen und langfristig speichern. Aufgabe des Nationalparks „Niedersächsisches Wattenmeer“ ist es, diese natürlichen Ökosystemprozesse und -funktionen von Salzwiesen und damit auch ihr natürliches Potenzial zum Klimaschutz zu schützen und zu fördern.

Insbesondere die Salzwiesen entlang der Festlandsküste des Nationalparks wurden in der Vergangenheit durch Landgewinnungsmaßnahmen, Eindeichung, Entwässerung und landwirtschaftliche Nutzung stark vom Menschen beeinflusst. Noch heute stellen die Spuren dieser Einflüsse, z. B. ein enges Grabennetz, vielerorts eine entscheidende Beeinträchtigung des Lebensraums dar. Dies bietet einen Anlass zur Untersuchung, auf welche Weise das natürliche Potenzial zur Kohlenstofffestlegung in solchen Salzwiesen verbessert werden kann.

Im vorliegenden Bericht werden mögliche Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstofffestlegung von Salzwiesen im Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ auf Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche geprüft und bewertet. Die Umsetzung solcher Maßnahmen setzt jedoch immer die Vereinbarkeit mit den Zielen der Salzwiesenentwicklung im Sinne des Nationalparks voraus, auf die ein besonderes Augenmerk zu richten ist sowie auf mögliche Zielkonflikte und Forschungsbedarf. Zudem werden in dem Bericht Synergien zwischen der Verbesserung des Potenzials von Salzwiesen zur Kohlenstofffestlegung und der Erfüllung übergeordneter Zielvorgaben und Klimaanpassungsstrategien geprüft. Das zwischenzeitlich aufgelegte bundesweite Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) bietet darüber hinaus einen geeigneten Rahmen für die Umsetzung solcher Maßnahmen, die als Natur- und auch als Klimaschutzmaßnahmen einzustufen sind.

Mit dieser Studie wollen wir einen Beitrag leisten und aufzeigen, welches Potenzial die natürlichen Salzwiesen im Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ für die Kohlenstoffspeicherung haben als Grundlage für eine weiter intensivierte Renaturierungsstrategie im Nationalpark.

Peter Südbeck  
Leiter der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer

# Blue Carbon im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer

## Grundlagen für eine Prüfung und Bewertung möglicher Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstofffixierung in Salzwiesen



**Auftraggeber:**  
Nationalparkverwaltung  
Niedersächsisches Wattenmeer  
Wilhelmshaven



EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Landwirtschaftsfonds für  
die Entwicklung des ländlichen Raums - ELER  
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete

**22. März 2021**



# Inhalt

<b>Summary .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Hintergrund und Aufgabe .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Mögliche Maßnahmen zur Förderung von Blue Carbon in Salzwiesen – eine Literaturübersicht.....</b>	<b>9</b>
2.1 Blue Carbon und Salzwiesen – eine Einführung .....	9
2.2 Maßnahmen zur Förderung von Blue Carbon in Salzwiesen.....	10
2.3 Potenziale und Wirksamkeit von Blue Carbon Maßnahmen in Salzwiesen .....	18
2.3.1 Randbedingungen in den Salzwiesenkomplexen des Nds. Wattenmeers .....	18
2.3.2 Maßnahmen zu Hydrologie und Sedimentdynamik.....	20
2.3.3 Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere.....	21
2.3.4 Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzen .....	22
2.3.5 Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen .....	22
2.3.6 Zusammenfassende Empfehlung .....	23
2.4 Anwendbarkeit auf das Emsästuar .....	24
<b>3. Synergien und Konfliktpotenziale zwischen Blue Carbon-Maßnahmen und den Zielen verschiedener rechtlicher Instrumente und Strategien .....</b>	<b>27</b>
3.1 Berücksichtigung von Blue Carbon in der aktuellen Planungskulisse .....	27
3.1.1 EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) .....	28
3.1.2 EG-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) .....	29
3.1.3 Masterplan Ems 2050 .....	30
3.1.4 Integrierter Bewirtschaftungsplan Ems (IBP) .....	31
3.1.5 Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer .....	31
3.1.6 Klimaanpassungsstrategien.....	32
3.2 Mögliche Synergien und Konflikte .....	33
3.2.1 Maßnahmen zu Hydrologie und Sedimentdynamik.....	34
3.2.2 Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere.....	38
3.2.3 Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzen .....	39
3.2.4 Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen .....	40
3.3 Anwendbarkeit auf das Emsästuar .....	40
<b>4. Bewertungsmatrix für zukünftige Blue Carbon-Pilotprojekte .....</b>	<b>43</b>
<b>5. Weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>47</b>
<b>Literatur.....</b>	<b>48</b>

## Abbildungen und Tabellen

Abb. 1:	Konzeptionelle, nicht quantitative Darstellung zur Maximierung der C-Festlegung in Wattenmeer-Salzwiesen.....	24
<b>Tab. 1:</b>	Maßnahmenübersicht zur (De-)Regulierung von <b>Hydrologie- und Sedimentdynamik</b> mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig , 2 = mittel , 3= hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (*).....	11
<b>Tab. 2:</b>	Übersicht von Maßnahmen zur <b>Regulierung der Nutztierhaltung</b> mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch ) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig , 2 = mittel , 3= hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (*).....	13
<b>Tab. 3:</b>	Übersicht von Maßnahmen zur <b>Regulierung invasiver Arten</b> mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch ) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig , 2 = mittel , 3= hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (*).....	14
<b>Tab. 4:</b>	Übersicht von Maßnahmen zur <b>Regulierung von Nährstoffeinträgen</b> mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch ) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig , 2 = mittel , 3= hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (*).....	16
<b>Tab. 5:</b>	Übersicht wesentlicher Parameter zur Bestimmung des Blue Carbon-Potenzials einer Salzwiesen-Fläche. Diese Parameter sollten zu einem regelmäßigen Flächenmonitoring herangezogen werden sowie zur Evaluierung des Blue Carbon-Potenzials einer Management-Maßnahme.....	26
<b>Tab. 6:</b>	Übersicht möglicher Synergien (grün) und Konflikte (rot) zwischen den Maßnahmentypen zur Förderung von Blue Carbon und den relevanten Schutzregimen und –instrumenten. Maßnahmen, welche nur unter Vorbehalt bzw. nach weiterer Forschung empfohlen werden, sind grau markiert (vgl. Kap. 2.3.6). Kein Anspruch auf Vollständigkeit. ....	34
<b>Tab. 7:</b>	Bewertungsmatrix für Blue Carbon Maßnahmen und exemplarische Bewertungsergebnisse für die beiden Maßnahmentypen „Sommerdeichöffnung“ und „flächiger Bodenabtrag“. Bewertung erfolgt dreistufig: trifft zu (+), trifft nicht zu (-), Zusammenhang unklar oder auf Basis vorliegender Informationen nicht bewertbar (?). ....	45

## Zusammenfassung

Küstenökosysteme können der Atmosphäre in großem Umfang Kohlenstoff entziehen und leisten damit einen essentiellen Beitrag zum Klimaschutz. Für ihre besondere Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf hat sich der Begriff „Blue Carbon“ etabliert. Mit dem vorliegenden Bericht sollen die Möglichkeiten zur gezielten Förderung von Blue Carbon in den Salzwiesen des Niedersächsischen Wattenmeers erörtert werden; ein Fokus liegt hierbei auf der Übertragbarkeit auf das Emsästuar.

Im ersten Teil des Berichts werden die naturwissenschaftlichen Wirkzusammenhänge beschrieben und darauf aufbauend Maßnahmentypen herausgearbeitet, die für eine Förderung von Blue Carbon in den Salzwiesen des Wattenmeeres in Frage kommen. Diese zielen primär auf die Stabilisierung der autochthonen (vor Ort durch die Salzwiesen erzeugten) Kohlenstoffeinträge ab, z. B. durch die Aufgabe von Entwässerungsgräben, Bodenabtrag oder die Öffnung von Sommerpoldern.

Anschließend wird geprüft, ob und wie das Thema Blue Carbon in den für die niedersächsischen Salzwiesen relevanten rechtlichen Instrumenten und Strategien schon heute Berücksichtigung findet und welche Synergien oder Konflikte sich bei der Umsetzung der zuvor identifizierten Maßnahmentypen unter planerisch-rechtlichen Gesichtspunkten ergeben können. Maßnahmen zur (Wieder-)Herstellung einer natürlichen Hydrodynamik, darunter Sommerdeichöffnungen, eignen sich demnach sowohl zur Förderung von Blue Carbon als auch zur Erreichung wesentlicher naturschutzfachlicher Ziele. Zielkonflikte sind hingegen beim Umgang mit der Nutztierhaltung auf den Salzwiesen sowie mit invasiven Arten (hier insb. *Spartina anglica*) zu erwarten.

Eine wichtige Voraussetzung für die Förderung von Blue Carbon ist ein besseres Systemverständnis und die engere Verzahnung mit anderen Schutzziele und Nutzerinteressen im Küstenraum. Dazu sollten bereits bestehende Vorhaben (z.B. Kompensationsmaßnahmen) hinsichtlich ihres Blue Carbon Potenzials evaluiert werden, um darauf aufbauend erste Blue Carbon Pilotprojekte zu konzipieren. Im letzten Teil des Berichts wird dafür eine Bewertungsmatrix erarbeitet und exemplarisch auf die Maßnahmentypen „Sommerdeichöffnung“ und „Bodenabtrag“ angewendet. Ferner wird der weitere Forschungsbedarf zum Thema Blue Carbon in Salzwiesen dargelegt.

## Summary

Vegetated coastal ecosystems mitigate climate change by capturing large amounts of carbon dioxide from the atmosphere. Their important role in the global carbon cycle has been recognized under the term blue carbon. The present report explores opportunities to promote blue carbon in the Wadden Sea saltmarshes of Lower Saxony, with a particular focus on the marshes of the Ems estuary.

The first part of the report introduces the scientific principles behind blue carbon management, and it identifies management activities with high relevance and applicability to the Wadden Sea region. The identified activities primarily aim at increasing the accumulation of autochthonous organic carbon (i.e. the carbon derived from CO<sub>2</sub> fixation of the saltmarsh itself as opposed to carbon imports) and include, among others, the abandonment of drainage ditches, surface-soil excavations, and tidal re-introduction to previously embanked areas.

The second part of the report assesses the relationship between a blue carbon-optimized management and the legal instruments and policies that are currently in place to guide saltmarsh management in Lower Saxony. In this context, the report describes the synergies and conflicts that would arise between activities to promote blue carbon and other legal and planning-related aspects. For instance, activities to restore the natural hydrology of a site, such as tidal re-introduction activities, occur suitable to combine blue carbon- and conservation-related efforts. By contrast, conflicts of objectives are likely to arise regarding the management of livestock grazing and invasive species (here particularly *Spartina anglica*).

Key requirements for the promotion of blue carbon in the Wadden Sea are an improved understanding of the processes driving carbon storage in the saltmarshes of the region as well as the establishment of close links to other conservation objectives and land-use interests in the coastal zone. Currently planned or implemented conservation projects (e.g. compensation measures) should therefore be evaluated for their blue carbon potential. For this purpose, the report provides an Evaluation Matrix that exemplarily assesses two management types, the de-embankment of summer polders and the excavation of surface soils. Finally, suggestions for future research on blue carbon in the Wadden Sea are presented.

# 1. Hintergrund und Aufgabe

## Hintergrund

Der neue IPCC-Sonderbericht zu Ozeanen und Kryosphäre (IPCC-SROCC) hat die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zum globalen Meeresspiegelanstieg (MSA) und regionalen Extremwasserständen, den daraus resultierenden Auswirkungen und Risiken sowie über Anpassungsmöglichkeiten und Handlungsoptionen eindrucksvoll zusammengestellt. Der Fortschrittsbericht der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und die Vulnerabilitätsanalyse für Deutschland haben die Folgen von langfristig verstärktem Meeresspiegelanstieg (MSA) und Sturmfluten als sektorübergreifende Schlüsselrisiken des Klimawandels in Deutschland identifiziert.

Den Salzwiesen des Wattenmeeres kommt in diesem Zusammenhang (Klimaschutz und Anpassung) eine dreifache Bedeutung zu:

1. ihre Funktion als Bestandteil des Küstenschutzsystems kann beeinträchtigt werden oder verloren gehen, wenn die Kapazität zum Mitwachsen überfordert wird,
2. ihr Beitrag zur Biodiversität des Wattenmeeres geht bei einem Verlust der Salzwiesen ebenfalls verloren,
3. intakten Salzwiesen kommt, auch im Zusammenhang mit ihrer die Sedimentation fördernden Funktion, eine wesentliche Bedeutung als Kohlenstoffsенке zu

## Aufgabe

Vor diesem Hintergrund sollen in einer Expertise Grundlagen gelegt werden für i) eine mögliche spätere Konzeption von Maßnahmen zur Förderung der Funktion des Niedersächsischen Wattenmeeres als Kohlenstoffsенке und ii) die Darstellung der Relevanz solcher Maßnahmen im Landes- bzw. Bundeskontext. Mit dieser Aufgabe hat die Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer im Juni 2020 eine Arbeitsgemeinschaft aus BioConsult Schuchardt & Scholle GbR und der Universität Hamburg (Prof. Dr. Kai Jensen und Dr. Peter Müller) beauftragt.

In der Expertise sollte eine Literaturstudie zu möglichen Maßnahmen und den relevanten Randbedingungen durchgeführt werden, die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Salzwiesenkomplexe des Wattenmeeres insbesondere im Bereich des Emsästuars dargestellt werden, die Relevanz hinsichtlich möglicher Synergien zur Erreichung der Ziele des Nationalparks, der EG-WRRRL und der EG-MSRL, des Masterplanes Ems und von Klimawandelanpassungsstrategien analysiert werden, die Erkenntnisse vor dem Hintergrund der Wiederherstellung oder Verbesserung natürlicher Tide- und Sedimentdynamik im Emsästuar und des Salzwiesenmanagements im Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ betrachtet werden, Forschungsdefizite und mögliche Ansprechpartner benannt und eine Matrix für die Bewertung möglicher Pilotprojekte konzipiert werden.

## 2. Mögliche Maßnahmen zur Förderung von Blue Carbon in Salzwiesen – eine Literaturübersicht

### 2.1 Blue Carbon und Salzwiesen – eine Einführung

Viele Ökosysteme tragen durch Kohlenstoff (C)-Festlegung substantiell zum Klimaschutz bei, indem CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre assimiliert, in organisches Material umgewandelt und in Biomasse, Böden und Sedimenten gespeichert wird. Gleichzeitig ist die Ökosystemleistung der C-Festlegung ein wichtiges Argument zum Schutz von Ökosystemen. So versucht beispielsweise das REDD+-Programm der Vereinten Nationen über leistungsorientierte Zahlungen den Schutz von Wäldern als C-Speicher finanziell attraktiv zu machen, um somit Entwaldung zu reduzieren und nachhaltiges Management zu fördern. Ähnliche Programme sollen auch für Salzwiesen und verwandte Küstenökosysteme erarbeitet werden, doch hierfür ist nach wie vor ein genaueres Prozessverständnis sowie eine verbesserte Schätzung der C-Festlegung in diesen Ökosystemen notwendig (Herr et al. 2011, Macreadie et al. 2019).

Salzwiesen und verwandte Küstenökosysteme (v. a. Mangroven und Seegraswiesen) gelten als Hotspots der globalen C-Festlegung (Mcleod et al. 2011). Ihre Bedeutung im C-Kreislauf wird unter dem Begriff Blue Carbon hervorgehoben (Nellemann et al. 2009). Die wassergesättigten und dadurch sauerstoffarmen Böden von Salzwiesen führen zu einem verlangsamten mikrobiologischen Abbau organischen Materials und begünstigen dessen Erhaltung potenziell über Jahrtausende (Mcleod et al. 2011). Des Weiteren tragen eine hohe Nettoprimärproduktion, zusätzlicher Eintrag organischen Materials aus den angrenzenden aquatischen Ökosystemen sowie der stetige Höhengewinn (Akkretion) der Ökosysteme mit steigendem Meeresspiegel zu hohen C-Festlegungsraten bei (Bridgham et al. 2006, Duarte et al. 2013). Auf lediglich 0,07–0,22% der Erdoberfläche legen Blue Carbon-Ökosysteme 0,08–0,22 Pg C pro Jahr in ihren Böden fest. Dies entspricht etwa 50% der jährlichen Gesamtfestlegung in marinen Sedimenten oder 10% der terrestrischen Gesamtfestlegung in Böden (Spivak et al. 2019).

Bei dieser Art von Vergleichen ist stets die Unterscheidung von kurz- oder mittelfristiger C-Festlegung in pflanzlicher Biomasse von Langzeitfestlegung in Böden oder Sedimenten zu unterscheiden. Die disproportional große Rolle von Blue Carbon im globalen C-Kreislauf basiert fast ausschließlich auf der Langzeitfestlegung in Böden oder Sedimenten. Im Vergleich zu Mooren, deren wassergesättigte Böden ebenfalls als wichtige C-Senken fungieren, können Salzwiesen pro Fläche eine bis zu zehnfache Menge CO<sub>2</sub> pro Jahr festlegen (Chmura et al. 2003, Bridgham et al. 2006). Zudem wird in Mooren der Effekt der CO<sub>2</sub>-Festlegung durch die Freisetzung von Methan (CH<sub>4</sub>; mit einem >25-fach höheren Treibhauspotenzial als CO<sub>2</sub>) meist relativiert. Dies ist hingegen in den salzhaltigen Böden von Küstenökosystemen aufgrund des hohen Sulfatgehalts selten der Fall (Poffenbarger et al. 2011). Weltweit bestehen große regionale Unterschiede im C-Festlegungspotenzial von Salzwiesen. Daten aus Europa, Süd-Amerika und Asien sind in den globalen Budgets stark unterrepräsentiert (Müller et al. 2019a).

## 2.2 Maßnahmen zur Förderung von Blue Carbon in Salzwiesen

Der Begriff Blue Carbon wird erst seit ca. einem Jahrzehnt genutzt. Entsprechend gering ist der derzeitige Kenntnisstand bezüglich eines gezielten Blue Carbon-Managements. Implikationen zur Förderung der C-Festlegung sind allerdings häufig aus Studien zu Management mit anderer Zielsetzung ableitbar.

Die Langzeit-C-Festlegung in den Böden von Salzwiesen ergibt sich aus dem Produkt der Aufwuchsrate der Geländehöhe (Akkretion) des Ökosystems und der Dichte an organischem C im Boden (kurz: C-Dichte [C-Masse/Bodenvolumen]). Maßnahmen mit Auswirkung auf Höhengewinn oder C-Dichte sind somit auch relevant für die Ökosystemleistung der C-Festlegung.

Grundsätzlich lässt sich Blue Carbon durch das Management von Ökosystemen hinsichtlich der bestehenden Landnutzung, dem Schutz des Ökosystems gegen anthropogene Eingriffe sowie der Konstruktion oder Renaturierung von Ökosystemen fördern. In Bezug auf Salzwiesen-Management mit Relevanz für Blue Carbon lässt die verfügbare wissenschaftliche Literatur die folgende Einteilung konkreter Maßnahmenkategorien zu:

- Maßnahmen zur (De-)Regulierung von Hydrologie und Sedimentdynamik
- Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere
- Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzen
- Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen

Im Folgenden werden die verfügbaren Studien zu den vier Maßnahmenkategorien tabellarisch aufgeführt und ausgewertet (Tab. 1 bis Tab. 4). Für die Ergebnisse werden in den Tabellen zwei Kategorisierungen vorgenommen:

### Relevanz des Blue Carbon Parameters:

Kategorie 1 (niedrig): Studie erfasst C- bzw. Treibhausgasflüsse und -vorräte nicht direkt, sondern Parameter, die einen Einfluss auf C- bzw. Treibhausgasflüsse haben. Kategorie 2 (mittel): Studie erfasst einen oder mehrere C- bzw. Treibhausgasflüsse, lässt aber keine Beurteilungen zur Gesamt-C- oder Treibhausgasbilanz zu. Kategorie 3 (hoch): Studie erfasst einen oder mehrere C- bzw. Treibhausgasflüsse und lässt Beurteilungen zur Gesamt-C- oder Treibhausgasbilanz zu.

### Relevanz der Maßnahme für die Wattenmeer-Region:

Kategorie 1 (niedrig): Studie ist nicht oder kaum relevant für die WMR, da die untersuchte oder ableitbare Maßnahme nicht auf die WMR übertragbar ist. Kategorie 2 (mittel): Studie ist prinzipiell relevant für die WMR, da die untersuchte oder ableitbare Maßnahme übertragbar ist. Jedoch ist der Maßnahmeneffekt auf C- und Treibhausgasflüsse in Salzwiesen der WMR entweder gering oder schlecht abschätzbar. Kategorie 3 (hoch): Studie ist prinzipiell auf die WMR übertragbar und die Effekte der untersuchten bzw. ableitbaren Maßnahme werden als relevant eingeschätzt.

**Tab. 1:** Maßnahmenübersicht zur (De-)Regulierung von **Hydrologie- und Sedimentdynamik** mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (\*)

Skizzierung der Studie oder Maßnahme	Blue Carbon Parameter	Region	Schlussfolgerung der Studie	Ableitbare Maßnahme	Relevanz Parameter (1 3)	Relevanz für WMR (1 3)	Quelle
Modellierung der Auswirkungen hydrologischem Managements basierend auf Literaturwerten	Treibhausgas-Emissionen	Massachusetts, USA	Wiedereinführung von Gezeitenströmung in entwässerten, eingedeichten, und von der Tide abgeschnittenen Flächen spart CH <sub>4</sub> und CO <sub>2</sub> Emissionen ein.	Rückdeichung	3	3	Kroeger et al. 2017
Feldstudie; Wiedereinführung der Gezeitenströmung durch Entfernung tidaler Barrieren (Abwasserinfrastruktur, Straßen)	C-Festlegungsrate	New South Wales, Australien	Renaturierung führt zu einem erhöhten Sedimenteintrag, was die C-Festlegungsrate erhöht.	Entfernung tidaler Barrieren	3	3	Howe et al. 2009
Feldstudie; Vergleich natürlicher und renaturierter Flächen nach Rückdeichung	C-Festlegungsrate	Washington, USA	C-Festlegungsrate der renaturierten Fläche gleicht der natürlichen Fläche	Rückdeichung	3	3	Drexler et al. 2019
Feldstudie; Vergleich natürlicher und eingedeichter Salzwiese	Mikrobielle Aktivität des Bodens, C-Umsatz	Massachusetts, USA	Die Wiedereinführung der Gezeitenströmung mindert aerobe Zersetzung und steigert somit das Potenzial für C-Festlegung	Rückdeichung	2	3	Wang et al. 2019
Laborstudie zur Abschätzung der Treibhausgasbilanz nach Rückdeichung und Wiedervernässung	Treibhausgas-Produktion	Quebec, Kanada	Wiedervernässung und Rückdeichung reduzieren Treibhausgasemissionen	Rückdeichung, Wiedervernässung	1	3	Wollenberg et al. 2018
Feldstudie; Vergleich natürlicher und renaturierter Flächen nach Rückdeichung	C-Festlegungsrate	Essex, Vereinigtes Königreich	Rückdeichung steigert C-Festlegung, jedoch ist die C-Festlegungskapazität 15 Jahre nach Rückdeichung immer noch geringer als im natürlichen Ökosystem	Rückdeichung	3	3	Burden et al. 2013

Feldstudie; Vergleich natürlicher, renaturierter und entwässerter Flächen	C-Festlegungsrate und C-Vorräte des Bodens	Washington, USA	Renaturierung erhöht C-Festlegungsraten und -vorräte. Dieser Effekt wird zudem durch den Meeresspiegelanstieg deutlich amplifiziert	Wiedervernässung	3	3	Rybczyk et al. 2014
Feldstudie; Vergleich entwässerter und natürlicher Flächen	C-Vorräte des Bodens	Queensland, Australien	Starke Reduktion der C-Vorräte durch Entwässerung	Wiedervernässung	2	2	Hicks and Fitzpatrick 1999
Feldstudie; Aufspülen von aufgebaggertem Sediment zur Stabilisierung einer absinkenden Salzwiese	Geländehöhe, Höhenaufwuchs, Stabilisierung des Ökosystems	Lousiana, USA	Aufspülen von Sediment stabilisiert das Ökosystem nachhaltig (über mehrere Jahre)	Aufspülen von Sediment	1	2	Slocum et al. 2005
Feldstudie; Aufspülen von aufgebaggertem Sediment zur Stabilisierung einer absinkenden Salzwiese	Geländehöhe, Höhenaufwuchs, Stabilisierung des Ökosystems	Lousiana, USA	Aufspülen von Sediment stabilisiert das Ökosystem nachhaltig (über mehrere Jahre)	Aufspülen von Sediment	1	2	Ford et al. 1999
Feldstudie; Neuschaffung (Konstruktion) von Salzwiesen auf aufgebaggertem Sediment unterschiedlicher Korngröße	Ökosystemkonstruktion, C-Festlegungsrate	Maryland, USA	Salzwiesenvegetation erfolgreich etabliert; C-Festlegungsrate höher bei Deposition feinen Sediments	Ökosystemkonstruktion	3	2	Staver et al. 2020
Feldstudie; Neuschaffung (Konstruktion) von Salzwiesen durch Küstennahe Deposition von aufgebaggertem Sediment	Ökosystemkonstruktion	Orwell Ästuar, UK	Deposition führt zu Etablierung von Salzwiesenvegetation	Küstennahe Sedimentdeposition	1	2	French and Burningham 2009
Feldstudie; Vergleich konstruierter mit natürlich entstandenen Salzwiesen	C-Festlegungsrate	North Carolina, USA	C-Festlegungsraten in konstruierten und natürlichen Ökosystemen sind ähnlich	Ökosystemkonstruktion	3	2	Craft et al. 2002, 2003

**Tab. 2:** Übersicht von Maßnahmen zur **Regulierung der Nutztierhaltung** mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (\*).

Skizzierung der Studie oder Maßnahme	Blue Carbon Parameter	Region	Schlussfolgerung der Studie	Ableitbare Maßnahme	Relevanz Parameter (1 3)	Relevanz für WMR (1 3)	Quelle
Feldexperiment; beweidete (Rinder) und nicht beweidete Flächen einer Salzwiese	C-Vorräte, C-Festlegung	Schiermonnikoog, Niederlande	Trittbedingte Bodenverdichtung reduziert Sauerstoffverfügbarkeit im Boden und erhöht C-Vorräte und Festlegungsraten im Vergleich zu unbeweideten Flächen.	Beweidung fördern	3	3	Elschot et al. 2015
Feldexperiment; beweidete (Schafe) und nicht beweidete Flächen in 2 Salzwiesen	Mikrobielle Aktivität, C-Umsatz	Schleswig-Holstein, Deutschland	Trittbedingte Bodenverdichtung reduziert Sauerstoffverfügbarkeit im Boden und reduziert C-Umsatz.	Beweidung fördern	1	3	Müller et al. 2017
Feldexperiment; beweidete (Schafe) und nicht beweidete Flächen in 2 Salzwiesen	Herkunft des festgelegten C	Schleswig-Holstein, Deutschland	Beweidete Flächen weisen mehr autochthonen C als nicht beweidete Flächen auf	Beweidung fördern	2	3	Müller et al. 2019a
Feldstudie in 22 Salzwiesen unterschiedlicher Beweidungsintensität (Schafe und/oder Rinder)	C-Vorräte des Bodens	Westküste, Vereinigtes Königreich	Kein Zusammenhang zwischen Beweidungsintensität und Kohlenstoffvorräten im Boden	nicht eindeutig	2	3	Harvey et al. 2019
Feldstudie; Vergleich einer beweideten (Rinder) und einer nicht beweideten Salzwiese	C-Vorräte	Buenos Aires, Argentina	Kein Beweidungseffekt auf C-Vorräte	nicht eindeutig	2	3	Di Bella et al. 2015
Feldexperiment; Vergleich beweidete und nicht beweidete Flächen einer Festlandsalzwiese	Treibhausgasemissionen	Ribble Ästuar, Vereinigtes Königreich	Höhere CO <sub>2</sub> -Emissionen von nicht beweideter Fläche. Gesamt Treibhausgasbilanz (inkl. CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O) nicht unterschiedlich	nicht eindeutig	3	3	Ford et al. 2012
Feldexperiment; Vergleich beweideter (Rinder) und unbeweideter Flächen	Mikrobielle Aktivität, C-Umsatz	Ribble Ästuar, Vereinigtes Königreich	Beweidung beschleunigt C-Umsatzraten im Boden	Beweidung aufgeben	1	3	Olsen et al. 2011

Feldexperimente in beweideten (Schafe, Rinder, Pferde) und nicht beweideten Flächen von vier Salzwiesen entlang der Wattenmeerküste.	Höhenaufwuchs	Schleswig-Holstein & Niederlande	Beweidung hat keinen Einfluss auf Höhenaufwuchs	nicht eindeutig	1	3	Nolte et al. 2013a
Feldexperiment; beweidete (Rinder und Schafe) und nicht beweidete Fläche einer Salzwiese	C-Vorräte des Oberbodens, Modellierung der C-Bilanz	Esbjerg, Dänemark	Beweidung reduziert C-Vorräte des Oberbodens (0-10 cm) sowie modellierte C-Akkumulation	Beweidung aufgeben	2	3	Morris and Jensen 1998
Feldstudie; Vergleich einer beweideten (Pferde) und einer nicht beweideten Salzwiese	C-Vorräte	North Carolina, USA	Beweidung reduziert C-Vorräte	Beweidung aufgeben	2	3	Reader and Craft 1999
Feldstudie; Vergleich beweideter (Schafe) und nicht beweideter Flächen einer Salzwiese	C-Vorräte	Quebec, Kanada	Beweidung erhöht C-Vorräte	Beweidung fördern	2	3	Yu and Chmura 2009

**Tab. 3:** Übersicht von Maßnahmen zur **Regulierung invasiver Arten** mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (\*)

Skizzierung der Studie oder Maßnahme	Blue Carbon Parameter	Region	Schlussfolgerung der Studie	Ableitbare Maßnahme	Relevanz Parameter (1 3)	Relevanz für WMR (1 3)	Quelle
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in Salzwiesen/Mangroven-Komplex	C-Vorräte des Bodens und Treibhausgas-Emissionen	Jiulong, China	C-Vorräte sind höher in Böden invadierter Salzwiesen, Treibhausgasemissionen sind höher aus invadierten Flächen	nicht eindeutig	3	1	Chen et al. 2015
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in Salzwiesen	C-Vorräte des Bodens	Shanghai Jiuduansha, China	C-Vorräte sind höher in Böden invadierter Salzwiesen	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	2	3	Cheng et al. 2008
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in Mangroven	C-Vorräte des Bodens	Fujian, China	C-Vorräte sind geringer in Böden invadierter Mangroven	Invasion verhindern*	2	1	Feng et al. 2017

Feldstudie zur Invasion von <i>Phragmites australis</i> in ästuarinen Feuchtgebieten	CO <sub>2</sub> Austausch und CH <sub>4</sub> Emissionen	Rhode Island & Massachusetts, USA	Invasion erhöht CO <sub>2</sub> -Fixierung aber erhöht CH <sub>4</sub> -Emissionen	nicht eindeutig	3	3	Martin and Moseman-Valtierra 2015
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in Salzwiesen	Nettoprimärproduktion, Mikrobielle Aktivität und C-Umsatz, C-Vorräte des Bodens	Shanghai Jiuduansha, China	Invasion erhöht Nettoprimärproduktion, verringert Zersetzungsraten im Boden und erhöht C-Vorräte des Bodens	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	3	3	Liao et al. 2007
Feldstudie zur Invasion von <i>Phragmites australis</i> in Salzwiesen	Höhenaufwuchs	Maryland, USA	Invasion erhöht Höhenaufwuchs	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	1	3	Rooth and Stevenson 2000
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in einem Watt-Salzwiesen-Ökoton	C-Vorräte des Bodens/Sediments	Jiangsu, China	Invasion erhöht C-Vorräte	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	2	3	Xiang et al. 2015
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in einem Watt-Salzwiesen-Ökoton	Treibhausgasemissionen	Jiangsu Province, China	Invasion erhöht CO <sub>2</sub> -Emissionen aber verringert CH <sub>4</sub> -Emissionen.	nicht eindeutig	3	3	Xu et al. 2014
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in einem Watt-Salzwiesen-Ökoton	Nettoprimärproduktion, C-Vorräte des Bodens	Jiangsu, China	Invasion erhöht Nettoprimärproduktion und C-Vorräte in Böden	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	2	3	Yang et al. 2013, 2015, 2016a, 2016b
Feldstudie zur Invasion von <i>Phragmites australis</i> in ästuarinen Feuchtgebieten	CH <sub>4</sub> -Emissionen	Maryland, USA	Invasion erhöht CH <sub>4</sub> -Emissionen	Invasion verhindern*	3	3	Müller et al. 2016
Feldstudie zur Invasion von <i>Spartina alterniflora</i> in einem Watt-Salzwiesen-Ökoton	Treibhausgasbilanz, C-Festlegungsrate	Yancheng, China	Durch Invasion gesteigerte C-Festlegung übertrifft stimulierte Treibhausgasemissionen	Invasion fördern bzw. nicht verhindern*	3	3	Yuan et al. 2015

**Tab. 4:** Übersicht von Maßnahmen zur **Regulierung von Nährstoffeinträgen** mit Relevanz für Blue Carbon-Management in Salzwiesen, inklusive einer Bewertung der Relevanz des erfassten Blue Carbon-Parameters (1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch) sowie der Maßnahmenrelevanz für die Wattenmeer-Region (WMR; 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch). Die ableitbare Maßnahme wird entweder in der Studie klar formuliert oder ist von den Autoren dieses Reports interpretiert (\*)

Skizzierung der Studie oder Maßnahme	Blue Carbon Parameter	Region	Schlussfolgerung der Studie	Ableitbare Maßnahme	Relevanz Parameter(1 3)	Relevanz für WMR (1 3)	Quelle
Langzeitexperiment zur Untersuchung von Eutrophierungseffekten (N + Phosphat)	C-Vorräte des Bodens und Bodenatmung	South Carolina, USA	Eutrophierung erhöht Bodenrespiration und reduziert die C-Festlegungsrate	Nährstoff-einträge kontrollieren	2	2	Morris and Bradley 1999
Langzeitexperiment zur Untersuchung von Eutrophierungseffekten (Nitrat + Phosphat)	Ökosystemstabilität, C-Umsatz im Boden	Massachusetts, USA	Eutrophierung erhöht den C-Umsatz im Boden und destabilisiert das Ökosystem durch erhöhte Erosion	Nährstoff-einträge kontrollieren	2	2	Deegan et al. 2012
Langzeitexperiment zur Untersuchung von Eutrophierungseffekten (Nitrat)	Stabilisierung von organischen Einträgen (Litter) im Boden	Massachusetts, USA	Eutrophierung führt zu einer dramatischen Reduktion der Stabilisierung von organischen Einträgen	Nährstoff-einträge kontrollieren	2	2	Müller et al. 2018
Untersuchung zur Auswirkung von Eutrophierung (Nitrat)	Abbau von tiefem, langzeitgespeichertem C des Bodens	Massachusetts, USA	Eutrophierung mobilisiert tiefe, langzeitgespeicherte C-Vorräte	Nährstoff-einträge kontrollieren	2	2	Bulseco et al. 2019
Feldmesokosmenstudie; Untersuchungen zu Auswirkungen Eutrophierung (Ammonium)	Nettoprimärproduktion	Maryland, USA	Eutrophierung steigert Nettoprimärproduktion	Nährstoff-einträge fördern*	2	2	Langley et al. 2013
Feldmesokosmenstudie; Untersuchungen zu Auswirkungen Eutrophierung (Ammonium)	CH <sub>4</sub> -Emissionen	Maryland, USA	Eutrophierung hat keinen Effekt auf CH <sub>4</sub> -Emissionen	nicht eindeutig	2	2	Müller et al. 2020
Feldexperiment; Untersuchungen zur Interaktion von Eutrophierung (Ammonium) und erhöhter	Ökosystemstabilität, Wurzelproduktion	Maryland, USA	Eutrophierung negiert positiven CO <sub>2</sub> -Düngeeffekt (durch Wurzelproduktion) auf Ökosystemstabilität	Nährstoff-einträge kontrollieren	2	2	Langley and Megonigal 2010

---

atmosphärischer CO<sub>2</sub>-  
Konzentration

---

Die vorangegangene Literaturrecherche konnte eine Vielzahl an Maßnahmen zur Steigerung der Blue Carbon-Potenzials von Salzwiesen identifizieren. In den folgenden Kapiteln soll deren Anwendbarkeit auf die Salzwiesenkomplexe des Nds. Wattenmeers erläutert werden.

## 2.3 Potenziale und Wirksamkeit von Blue Carbon Maßnahmen in Salzwiesen

### 2.3.1 Randbedingungen in den Salzwiesenkomplexen des Nds. Wattenmeers

Die Gesamtfläche der Wattenmeer-Salzwiesen beträgt (inkl. Sommerpolder) ca. 42.000 ha und expandiert mit einer jährlichen Rate von 200 ha (Esselink et al. 2017). Der Höhengewinn der Salzwiesen ist zumeist deutlich stärker als derzeitige Raten des Meeresspiegelanstiegs (MSA) in der Region (MSA = 2.0 - 3.0 mm / Jahr) und liegt im Mittel bei 9.6 mm/Jahr für die Festland-Salzwiesen (Esselink et al. 2017). Die Aufwuchsraten sind deutlich niedriger für die (Barriere-) Inselsalzwiesen (3.2 mm / Jahr), was nicht automatisch impliziert, dass diese Ökosysteme eine geringe Resilienz gegenüber dem MSA aufweisen, da starke Rückkopplungseffekte zwischen MSA, Sedimentdeposition und Höhengewinn bestehen (Morris et al. 2002, Kirwan et al. 2016, Esselink et al. 2017). Lediglich die teilweise oder komplett vom tidalen Sedimenteintrag abgeschlossenen Hallig-Salzwiesen sowie Sommerpolder weisen positive Höhengewinnraten deutlich unter 3 mm oder zum Teil sogar negative Höhenentwicklungen auf (Esselink et al. 2017).

Aus der relativ hohen Resilienz des größten Teils der Wattenmeer-Salzwiesen sowie der rapiden lateralen (seewärtigen) Expansion ergibt sich ein hohes Blue Carbon-Potenzial. Unter der Annahme des globalen Mittelwerts für C-Festlegung von Salzwiesen (2,18 t C / ha und Jahr, Mcleod et al. 2011) ergibt sich ein potenzielle C-Festlegungsrate von ca. 92.000 t C / Jahr (340.000 t CO<sub>2</sub>/Jahr) für die Gesamtfläche der Wattenmeer-Salzwiesen, mit einer jährlichen Zunahme dieses Potenzials von knapp 450 t C durch laterale Expansion. Doch trotz teils extremer Höhengewinnraten zeigt die erste Studie zur C-Festlegung in den Festland-Salzwiesen der Region eine Rate von lediglich 1,1 – 1,5 t C / ha und Jahr auf (Müller et al. 2019a).

Der Grund für diese im globalen Vergleich niedrigen Festlegungsraten ist eine steil abnehmende C-Dichte mit zunehmender Bodentiefe, welche sich durch die geringe Stabilisierung von Biomasseinträgen unter tiefreichenden aeroben Bedingungen erklären lässt (Müller et al. 2019a). Es wird vermutet, dass diese fast feuchtgebiets-untypische Biogeochemie der Böden durch anthropogene Entwässerung und einen extrem schnellen Höhengewinn der Systeme begünstigt wird (Müller et al. 2019a): Ein Großteil der Wattenmeer-Salzwiesen hat sich in einem dichten Netzwerk aus Entwässerungsgräben entwickelt und weist Höhengewinnraten auf, die weit jenseits der MSA-Rate liegen (Suchrow et al. 2012, Esselink et al. 2017). Der für die C-Stabilisierung wichtige reduktive Bereich des Bodens ist somit deutlich vom Ort der Primärproduktion getrennt, was zu einem großen oxidativen Verlust an eingetragenen C führt (Müller et al. 2017, 2019a, Abb. 1). So zeigen Müller et al. (2019a) die geringste dauerhafte C-Stabilisierung in den Böden der schnellwachsenden Salzwiese des Dieksanderkoog-Vorlandes (Landkreis Dithmarschen) im Vergleich zu zwei langsamer wachsenden Salzwiesen in

Nordfriesland. Geomorphologie, Entwicklung und Biogeochemie der Inselsalzwiesen unterscheiden sich von den Festlandsalzwiesen. Doch auch hier wurden in einer Fallstudie sehr geringe C-Festlegungsraten festgestellt (0,3 - 1,3 t C / ha und Jahr für die Salzwiesen von Schiermonnikoog).

Trotz ebenfalls wenig reduzierender Oberböden sind diese geringen Festlegungsraten laut der Autoren primär durch die niedrigen Höhengewachsraten von nur ca. 3 mm / Jahr begründet (Elschot et al. 2015).

Für die Salzwiesen des Wattenmeers ergibt sich, basierend auf dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand die folgende ableitbare Strategie: *Der Verlust autochthoner C-Einträge muss reduziert werden* (vgl. hierzu den nachfolgenden Exkurs „Kohlenstoff ist nicht gleich Kohlenstoff“).

Dies kann entweder über eine Reduzierung des Sauerstoffeintrags in den Boden (Durchlüftung) oder durch größere Eintragstiefen der Nettoprimärproduktion erzielt werden. Vor diesem Hintergrund sollen die in Kapitel 2.2 identifizierten vier Maßnahmentypen im Folgenden diskutiert werden.

### **Exkurs: Kohlenstoff ist nicht gleich Kohlenstoff**

Einige Blue Carbon-Ökosysteme fungieren scheinbar als besonders effiziente C-Senken, da sie nicht nur C aus eigener Nettoprimärproduktion festlegen (sog. autochthoner C), sondern zusätzlich große Mengen an lateral importierten C aus externen Quellen (sog. allochthoner C) in ihren Böden speichern. Im Kontext des (Treibhausgas-) Emissionshandels ist es allerdings wichtig, C-Einträge aus externen Quellen von C-Einträgen aus Nettoprimärproduktion zu trennen, da das alternative Schicksal des allochthonen C unbekannt ist (Saintilan et al. 2013). So ist es z.B. unklar, ob der allochthone C-Anteil in den Böden der Blue Carbon-Ökosysteme nicht auch anderswo (z.B. in Wattflächen oder der Tiefsee) festgelegt würde, wenn eine bestimmte Managementmaßnahme, z.B. Salzwiesenkonstruktion oder Sommerdeichöffnungen, nicht stattgefunden hätte. Das Verified Carbon Standard Protokoll zur Bewertung von Blue Carbon-Projekten (Needelman et al. 2018) verfolgt deshalb eine konservative Herangehensweise, bei der ein Großteil allochthoner C-Einträge – abhängig von ihrer mikrobiellen Abbaubarkeit – nicht angerechnet werden.

Da es sich bei den Salzwiesen der Nordsee um stark sedimentär geprägte (minerogene) Ökosysteme handelt, erfahren sie auch einen hohen allochthonen C-Eintrag (Allen 2000, Van de Broek et al. 2018, Müller et al. 2019b). Für die Salzwiesen des Wattenmeers beziffern erste Schätzungen, dass 15-35% des organischen Bodenkohlenstoffs der obersten 5 cm allochthoner Herkunft sind (Müller et al. 2019b). Problematischer aus einer Blue Carbon-Perspektive ist allerdings, dass dieser Anteil auf ca. 70% ansteigt, betrachtet man langfristig festgelegten C in tieferen Bodenschichten (Müller et al. 2019a). Diese Verschiebung mit zunehmender Bodentiefe zeigt einerseits, dass autochthone C-Einträge nur schlecht in den gut durchlüfteten Böden der Wattenmeersalzwiesen stabilisiert werden und andererseits, dass allochthone C-Einträge bereits vor ihrer Deposition in der Salzwiese eine recht hohe Stabilität (also schlechte mikrobielle Abbaubarkeit) aufwiesen (van de Broek et al 2018, Müller et al. 2019a). Der größere Anteil allochthoner versus autochthoner C-Festlegung in den Salzweisen des Wattenmeers schmälert deutlich ihr Blue Carbon-Potenzial.

## 2.3.2 Maßnahmen zu Hydrologie und Sedimentdynamik

**Rückdeichungsprojekte/Sommerdeichöffnungen:** Dieser Maßnahmentyp ist in der Literatur relativ häufig beschrieben. Studien kommen übereinstimmend zu der Schlussfolgerung, dass Rückdeichungsprojekte ein hohes Blue Carbon-Potenzial aufweisen. Hierfür sind drei Faktoren maßgeblich. 1.) Der wiederhergestellte Eintrag von Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ; ein in Meerwasser hochkonzentriertes Anion) führt zu einer effektiven Unterdrückung der  $\text{CH}_4$ -Produktion im Boden. 2.) Wiedereintretende regelmäßige Überflutungen reduzieren die Sauerstoffverfügbarkeit im Boden und unterbinden somit die schnelle mikrobielle Oxidation alter C-Vorräte. 3.) Tidalen Sedimenteintrag stellt die für die C-Festlegung notwendige Generierung von Bodenvolumen (Höhenaufwuchs) wieder her. Die Salzwiesenkomplexe des Wattenmeers bieten allein durch ihre knapp 2.300 ha an Sommerpoldern (ca. 6% der Gesamtfläche der Wattenmeer-Salzwiesen; in Niedersachsen fast 14%) ein hohes Potenzial zur Förderung von Blue Carbon durch rückdeichungsähnliche Maßnahmen, d.h. durch die Öffnung von Sommerdeichen.

**Steigerung/Optimierung des Sedimenteintrags:** Eine Steigerung des Sedimenteintrags durch direkte Deposition oder indirekt durch Erhöhung der Sedimentfracht im Flutstrom kann den Höhenaufwuchs von Salzwiesen steigern und somit gegen den MSA stabilisieren. Im Mittel ist der Höhenaufwuchs der Wattenmeer-Salzwiesen allerdings deutlich höher als die derzeitige MSA-Rate (Esselink et al. 2017). Somit ist zumindest derzeit die Notwendigkeit dieser Maßnahme nicht unmittelbar für den größten Teil der Salzwiesen ableitbar, könnte aber lokal zur Stabilisierung einzelner, schnell erodierender oder absinkender Flächen in Betracht gezogen werden. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein übermäßiger Höhenaufwuchs zu verstärkter Durchlüftung des Oberbodens und somit zur schnelleren Oxidation von C-Einträgen führen kann. Somit sollte für die Salzwiesen in der Wattenmeer-Region stets die Balance zwischen ausreichend Höhenaufwuchs und möglichst niedriger Geländehöhe über dem Meeresspiegel angestrebt werden.

**Aufgabe von Entwässerungsgräben und Bodenabtrag:** Solange die Aufgabe der anthropogenen Entwässerung nicht zur Destabilisierung des Ökosystems durch eine starke Verminderung des Höhenaufwuchses führt, sollte aus einer Blue Carbon-Perspektive von einer Unterhaltung der Grabensysteme abgesehen werden. Der Grund hierfür liegt in der geringen Stabilisierung von autochthonen C-Einträgen in den gut durchlüfteten Böden der Wattenmeer-Salzwiesen (Müller et al. 2019a). Maßnahmen, die zu einer schnelleren Auflandung (Verschlacken) aufgegebener Entwässerungsgräben führen, sollten hingegen als mögliche Maßnahme zur Blue Carbon-Förderung in Betracht gezogen werden. Auch die Entnahme des Oberbodens zum Absenken des Geländeniveaus und zur Wiederherstellung einer natürlichen Hydrologie, charakterisiert durch eine langsamere Entwässerung, könnte zu einer effektiveren C-Stabilisierung im Boden führen. Im Niedersächsischen Bereich des Wattenmeers gibt es mehrere Flächen, in denen diese Maßnahme in der Vergangenheit durchgeführt wurde (Esselink et al. 2017). Ihr potenziell günstiger Einfluss auf C-Festlegung sollte wissenschaftlich untersucht werden.

**Konstruktion von Salzwiesen mit Lahnungen:** Konstruierte Salzwiesen sind global auf wenige Pilotprojekte beschränkt. Es besteht allerdings ein schnell wachsendes Interesse, diese Maßnahme gezielt zur Förderung von Blue Carbon einzusetzen (Craft et al. 2011, Macreadie et al. 2019). Häufig wird dabei das Potenzial zur C-Festlegung der künstlichen mit einer natürlichen Salzwiese als wichtiges Erfolgskriterium herangezogen. Die Salzwiesenkomplexe des Wattenmeers stellen eine Besonderheit dar. Sie sind überwiegend künstlich entstanden und natürlich entstandene Flächen

sind, zumindest entlang der Festlandküste, eine Seltenheit. In der Wattenmeer-Region entstehen künstliche Salzwiesen durch die Umwandlung anderer intertidaler Ökosysteme, die ebenfalls als wichtige C-Senke fungieren könnten – Wattflächen. In einer ersten vergleichenden Studie konnten Müller et al. (2019a) zeigen, dass das Potenzial zur C-Festlegung in Salzwiesen deutlich höher als in vorgelagerten Wattflächen ist. Die anthropogen vorangetriebene seewärtige Expansion von Salzwiesen erscheint somit zur Förderung der C-Festlegung entlang der Wattenmeerküste durchaus sinnvoll. Derzeit wächst die Salzwiesen-Fläche in der Wattenmeer-Region jährlich um über 200 ha, wobei die seewärtige Expansion der Festlandsalzwiesen überwiegend anthropogen bedingt ist (Esselink et al. 2017). Die derzeitige Flächenausdehnung der Festland-Salzwiesen ist zum größten Teil abhängig vom Erhalt von Lahnungsstrukturen. Eine seewärtige Expansion ohne diesen anthropogenen Einfluss stellt die Ausnahme dar (Dijkema 1997; Esselink et al. 2017). Lahnungsstrukturen erhöhen die Sedimentationsrate durch Strömungsreduktion und können dadurch die Salzwiesen-Sukzession initiieren (Hofstede 2003). Somit handelt es sich bei den neuentwickelten Flächen ebenfalls um anthropogen konstruierte Ökosysteme. Die Notwendigkeit zur Salzwiesenkonstruktion durch andere Maßnahmen, z.B. durch direkte Deposition von aufgebaggertem Sediment zum Anheben des Geländeniveaus (Tabelle 1), erscheint für den Großteil der Wattenmeerregion nicht gegeben, könnte aber lokal, wie beispielsweise derzeit im niederländischen Bereich des Dollart (Baptist et al. 2019), zur Stabilisierung einzelner schnell erodierender oder absinkender (d.h. negative Akkretion) Flächen in Betracht gezogen werden.

### 2.3.3 Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere

Die Schlussfolgerungen aus Studien zum Einfluss der Nutztierhaltung auf C-Festlegung in Salzwiesen sind nicht eindeutig und bilden wahrscheinlich eine starke regionale Variabilität der Effekte ab (Davidson et al. 2017). Studien aus der Wattenmeer-Region weisen auf einen positiven Beweidungseffekt auf die C-Festlegung hin (Elschot et al. 2015; Müller et al. 2017, 2019b). Bis jetzt fehlt eine breite, systematische Erfassung von Beweidungseffekten, auch unter Berücksichtigung der Beweidungsintensität, auf die C-Festlegung in der Region, doch zeigen die verfügbaren Studien deutlich, dass die trittbedingte Verdichtung des Bodens die Sauerstoffverfügbarkeit herabsetzt und somit den mikrobiellen Abbau hemmt. Da die Böden der Wattenmeer-Salzwiesen stark durchlüftet sind, können sie vergleichsweise wenig C langfristig stabilisieren. Maßnahmen zur Reduzierung der Durchlüftung könnten somit Schlüsselstrategien zur Steigerung des Blue Carbon-Potenzials dieser Ökosysteme darstellen. Eine ganzheitliche Betrachtung von Beweidungseffekten auf C-Bilanzen bedarf allerdings auch die Einberechnung von zusätzlichen CH<sub>4</sub>-Emissionen durch Nutztiere. Falls die Erschließung von Salzwiesenfläche zu einer Nettosteigerung der Nutztieranzahl führt ist es möglich, dass positive Effekte auf die C-Festlegung im Boden durch zusätzliche Emissionen des starken Treibhausgases CH<sub>4</sub> ausgeglichen oder gar ins Gegenteil verkehrt werden. Eine Empfehlung zur Nutztierhaltung als Werkzeug zur Maximierung von Blue Carbon in der Wattenmeer-Region kann basierend auf dem jetzigen Wissensstand nicht ausgesprochen werden.

### 2.3.4 Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzen

Weltweit handelt es sich bei invasiven Pflanzen in Salzwiesenökosystemen auffallend konsistent um äußerst produktive, biomassereiche und tiefwurzelnde Gräser. Prominente Beispiele sind *Phragmites australis* sowie eine Vielzahl an Arten der Gattung *Spartina*. Vor dem Hintergrund der hohen Produktivität dieser Pflanzen ist es nicht verwunderlich, dass ihr Einfluss auf C-Festlegung in Salzwiesen zumeist positiv ist. Durch erhöhte oberirdische Biomasse im Vergleich zur verdrängten ursprünglichen Vegetation kann Sedimentation und somit Höhengrowth gesteigert werden. Unterirdische Biomasseproduktion ist entscheidend für die Speisung des langlebigen C-Vorrats in Salzwiesenböden: Unterirdisch produzierte Biomasse ist dem anaeroben Milieu des Bodens, welches meist nicht direkt unter der Bodenoberfläche beginnt, deutlich näher als oberirdisch produzierte Biomasse und wird somit zu einem deutlich höheren Anteil dauerhaft stabilisiert (Langley et al. 2009, Kirwan and Megonigal 2013). In den Wattenmeer-Salzwiesen befinden sich dauerhaft anaerobe Bodenschichten erst in relativ großer Tiefe (Müller et al. 2019a), selbst in den vergleichsweise häufig überfluteten Pionierzonen (Müller et al. 2020). Es wird angenommen, dass dies der Hauptgrund für ihre relativ geringe C-Festlegungsrate ist (Müller et al. 2019a).

*Spartina anglica* ist in den Wattenmeer-Salzwiesen die einzige flächenrelevante invasive Pflanzenart. Die Ausbreitung von *Elymus athericus* wird hier nicht thematisiert, da es sich um eine einheimische Art handelt und ihre Ausbreitungsdynamik eng an das Flächenmanagement hinsichtlich Nutztierhaltung gekoppelt ist (Nolte et al. 2019). *S. anglica* wurzelt im Vergleich zu anderen Arten der Wattenmeer-Salzwiesen auffällig tief (bis zu 1,2 m Tiefe) und dringt weit in anaerobe, stark reduzierende Bodenschichten ein (P. Müller, unveröffentlichte Daten). Dies bietet ein hohes Potenzial, Biomasse direkt dem stabilisierenden anaeroben Bereich des Bodens zu übergeben, ohne dass ein Großteil im darüber liegenden aeroben Boden oxidiert wird. Des Weiteren weisen *S. anglica*-dominierte Flächen durch effizientes Einfangen von Sedimenten ein besonders schnelles Höhenwachstum in der Pionierzone auf (Stock 2015). Sie initiieren somit die schnelle Entwicklung des Blue Carbon-Ökosystems. Im Gegensatz zu den etablierten Salzwiesen der Festlandküste, mit einer regelmäßigen Struktur von künstlich angelegten Entwässerungsgräben, bilden die neu gewachsenen Schlickgras-Flächen zumeist ein natürlich mäandrierendes Prielsystem (Stock 2015). Es ist möglich, dass diese natürlich entwässernden Flächen weniger stark oder tief durchlüftet sind als die künstlich entwässernden Flächen und somit mehr C im Boden stabilisieren. Hierzu bedarf es weiterer Forschung.

Relevante Steigerungen der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus *S. anglica*-dominierten Flächen, wie dies z.T. für andere invasive Pflanzen in ästuarinen Systemen beschrieben wurde, sind wenig wahrscheinlich in dem für *S. anglica* typischen Salinitätsbereich, da CH<sub>4</sub>-Emissionen ab einer Salinität des Flutwassers von 18 ppt zu vernachlässigen sind (Poffenbarger et al. 2011).

### 2.3.5 Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen

Eutrophierung kann über unterschiedliche Mechanismen sowohl zu einer Steigerung wie zu einer Verminderung der C-Festlegung in Salzwiesen führen. So können zusätzliche Nährstoffeinträge zu einer erhöhten oberirdischen Biomasseproduktion führen und somit Sedimentation und

Höhenaufwuchs beschleunigen (Langley et al. 2013, Kirwan and Megonigal 2013). Gleichzeitig können Nährstoffeinträge die Produktion unterirdischer Biomasse reduzieren, den mikrobiellen Abbau von Biomasse im Boden beschleunigen und sogar alte, tiefreichende C-Vorräte des Bodens unter anoxischen Bedingungen mobilisieren (Deegan et al. 2012, Müller et al. 2018, Bulseco et al. 2019). Dies ist möglich, da Nitrat als äußerst starker terminaler Elektronenakzeptor alternativ zu Sauerstoff von Mikroorganismen im Boden genutzt werden kann (Megonigal et al. 2004). In den schnellwachsenden Wattenmeer-Salzwiesen mit ihren tiefreichenden aeroben Böden sind verminderte Wurzelproduktion sowie verstärkter mikrobieller Abbau wahrscheinlich die maßgeblicheren Faktoren als eine gesteigerte oberirdische Produktion. Es besteht somit die Gefahr, dass Eutrophierung zu einer Reduktion des Blue Carbon-Potenzials der Wattenmeer-Salzwiesen führt. Regionale Forschung hierzu ist nicht bekannt, aber dringend erforderlich.

### 2.3.6 Zusammenfassende Empfehlung

Die folgenden Maßnahmentypen werden für die weitere Betrachtung aus der Blue Carbon-Perspektive empfohlen:

- Rückdeichungen (d.h. hier v.a. Öffnen von Sommerpoldern)
- Aufgabe von Entwässerungsgräben und Förderung von Maßnahmen zur Herstellung einer natürlichen Hydrologie
- Beibehaltung/Förderung von Buschlandungen zur Förderung der Salzwiesenexpansion
- Ungehinderte Ausbreitung von *Spartina anglica*

Des Weiteren wird unter Vorbehalt bzw. nach weiterer Forschung empfohlen:

- Sedimenteinträge regulieren/optimieren, damit Flächen ausreichend Höhenaufwuchs generieren, um mit dem MSA schrittzuhalten, aber kein langfristig extremes Wachstum generieren, was zur Entwicklung von tiefreichenden oxidierenden Böden führen würde
- Aufrechterhaltung oder Förderung von Beweidung
- Reduktion von Nährstoffeinträgen

Die Abb. 1 auf der folgenden Seite visualisiert die Wirkweise der hier diskutierten Maßnahmen zur Maximierung der C-Festlegung in den Wattenmeer-Salzwiesen.

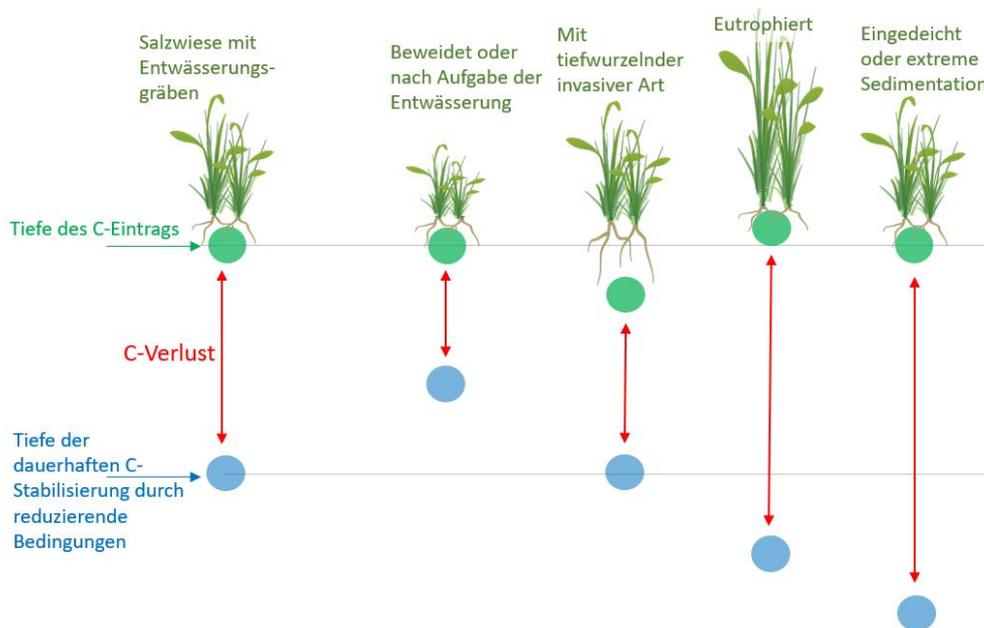


Abb. 1: Konzeptionelle, nicht quantitative Darstellung zur Maximierung der C-Festlegung in Wattenmeer-Salzwiesen.

Erläuterungen zur Abbildung: C-Festlegung in Blue Carbon-Ökosystemen ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen Nettoprimärproduktion (C-Eintrag) und mikrobiellem Abbau (C-Verlust). Zumeist findet man in Blue Carbon-Ökosystemen eine feuchtgebietstypische Biogeochemie vor, die durch sauerstoffarme, reduzierende Bodenbedingungen geprägt ist, welche den mikrobiellen Abbau hemmen. (1) Erste Studien aus der Wattenmeer-Region deuten allerdings darauf hin, dass diese sauerstoffarmen, reduzierenden Bodenbedingungen erst in relativ großer Bodentiefe auftreten, so dass es zu hohen C-Verlusten kommt. Eine grundlegende Leitstrategie zur Förderung von Blue Carbon in der Region sollte deshalb darauf ausgerichtet sein, reduzierende Bedingungen im Oberboden und/oder größere Eintragstiefen der Nettoprimärproduktion zu fördern. (2) Trittbedingte Bodenverdichtung durch Beweidung und die Aufgabe von anthropogenen Entwässerungsstrukturen könnten zu einer geringeren Bodendurchlüftung führen und somit zu einer früheren Stabilisierung von C-Einträgen. Obwohl Beweidung auch die oberirdische Biomasse reduziert, zeigen bisherige Studien aus der Wattenmeer-Region, dass dies keinen negativen Einfluss auf die C-Festlegung hat. (3) Die Ausbreitung der tiefwurzelnden invasiven Art *S. anglica* könnte C-Verluste reduzieren, indem C-Einträge näher am oder direkt im reduzierenden Bereich des Bodens stattfinden. (4) Zusätzliche Nährstoffeinträge führen zu einer erhöhten oberirdischen Biomasseproduktion und können somit Sedimentation und Höhenaufwuchs beschleunigen. Gleichzeitig können Nährstoffeinträge die Produktion unterirdischer Biomasse reduzieren, den mikrobiellen Abbau von Biomasse im Boden beschleunigen und sogar alte, tiefreichende C-Vorräte des Bodens unter anoxischen Bedingungen mobilisieren. Es besteht somit die Gefahr, dass Eutrophierung C-Verluste in Wattenmeer-Salzwiesen erhöht. (5) In eingedeichten und entwässerten Flächen mit schnellem Höhenaufwuchs können sich dauerhaft reduzierende Bodenbedingungen in größere Bodentiefe verschieben und dadurch C-Verluste verstärken.

## 2.4 Anwendbarkeit auf das Emsästuar

Die Salzwiesen im Gebiet weisen eine Vielzahl an Elementen zur Regulierung von Hydrologie und Sedimentdynamik auf, die hinsichtlich ihres Einflusses auf C-Festlegung evaluiert werden können. Ein großer Teil der Salzwiesen, vor allem im Bereich der Deichacht Krummhörn, befinden sich hinter einer äußerst dichten Linie schwerer Lahnungselemente zur Erosionskontrolle, welche seewärts der Salzwiesen parallel zur Küstenlinie verläuft. Die Lahnungslinie ist in regelmäßigen Abständen mit Durchlässen versehen, so dass die Salzwiesen nicht tidal abgeschnitten sind. Es muss jedoch geprüft werden, ob die Durchlässe genügend Salzwasser- und damit Sulfateintrag in die Vorlandflächen ermöglichen, um somit die Produktion des starken Treibhausgases  $\text{CH}_4$  effektiv

unterdrücken zu können. Es muss zusätzlich geprüft werden, ob Sedimenteinträge ausreichend sind, um Höhengewinn mindestens äquivalent zum MSA zu generieren. Gleichzeitig ist es möglich, dass potenziell geringerer Höhengewinn als in vergleichbaren Flächen mit weniger stark ausgeprägter Lahnungsstruktur zu einem niedrigeren Geländeniveau relativ zum Meeresspiegel führt und somit die Bodendurchlüftung und C-Verluste verringert. Die Lahnungsstrukturen könnten folglich als Werkzeug zur Einstellung möglichst günstiger Blue Carbon-Bedingungen genutzt werden. Hierzu sind Feldstudien erforderlich, in denen die wesentlichen Umweltparameter zur Bewertung des Blue Carbon-Potenzials einer Fläche erfasst werden (vgl. Tab. 5).

Das Aufrechterhalten von Zuggräben zur Gewährleistung der Entwässerung über Durchlässe im Lahnungssystem verhindert die Entwicklung einer natürlichen Hydrologie und führt möglicherweise zu einer starken Durchlüftung der Salzwiesenböden und folglich zu erhöhtem C-Verlust. Obwohl Notwendigkeit und Struktur dieses Grabensystems größtenteils durch die seewärtige Parallellahnung vorgegeben sind, sollte zur Maximierung des Blue Carbon-Potenzials der Flächen geprüft werden, inwieweit Entwässerungsgräben aufgegeben werden können.

Ein großer Teil der Salzwiesen im Bereich sieht die (bedarfsweise) Unterhaltung von Gräbenstrukturen vor. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme sollte geprüft werden, um Entwässerung und Bodendurchlüftung möglichst minimal zu halten. Bereits stattgefundenen Renaturierungsmaßnahmen, im Speziellen die Absenkung des Geländeniveaus im Bereich Rysumer Nacken und die Sommerdeichaufgabe im Bereich Hauener Hooge, erscheinen aus einer Blue Carbon-Perspektive sinnvoll. Um das tatsächliche Potenzial dieser Maßnahmen zur Steigerung der Kohlenstoffbindung zu erfassen, sollten ähnliche zukünftige Maßnahmen entsprechend wissenschaftlich begleitet werden. Entscheidend dabei wird die regelmäßige Erfassung von C- und Treibhausgasflüssen im zeitlichen Verlauf vor und nach der Implementierung sein (Tab. 5).

In einem großen Teil der Salzwiesen des Gebiets, vor allem im Bereich Dollart, findet Beweidung durch Nutztiere oder Mahd statt. Genau hier ist allerdings die Bewertung dieses Flächenmanagements aus einer Blue Carbon-Perspektive komplex, da die tidebeeinflussten Feuchtgebiete in diesem Bereich als Brackwassermarschen, weniger als Salzwiesen, eingeordnet werden müssen. Die geringere Salinität und damit eine geringere Sulfatverfügbarkeit könnte zu einer nennenswerten Produktion von  $\text{CH}_4$  in den Böden dieser Ökosysteme führen. Der Einfluss von Beweidung auf die  $\text{CH}_4$ -Biogeochemie in frischeren tidebeeinflussten Feuchtgebieten ist nicht erforscht. Im Dollart würde die Aufgabe der Beweidung wahrscheinlich zu einer großen Flächendominanz von Röhrichtern führen. Die typischerweise tiefwurzelnden Gräser dieser Pflanzengemeinschaft, wie etwa *Phragmites*, *Phalaris* und *Typha*, könnten zum einen dazu beitragen, dass assimilierter C tief in den Boden eingetragen wird und somit effektiver festgelegt wird (vgl. Spartina-Management). Allerdings kann das tiefe Wurzeln dieser Pflanzen gleichzeitig extrem hohe  $\text{CH}_4$ -Emissionen verursachen, da  $\text{CH}_4$  durch das ausgedehnte Luftleitgewebe von Röhrichtpflanzen schnell vom Ort der Produktion im Boden an die Atmosphäre geleitet wird, ohne dass es im besser durchlüfteten Oberboden von methanoxidierenden Bakterien in weniger klimaaktives  $\text{CO}_2$  umgewandelt werden kann (Müller et al. 2016). Dieser unerwünschte Effekt des Tiefwurzelns betrifft nur Ökosysteme mit inhärent hoher mikrobieller  $\text{CH}_4$ -Produktion, welche wahrscheinlich in Flächen mit einer Salinität des Flutwassers  $< 18$  ppt ist (Poffenbarger et al. 2011). Aufgrund der äußerst starken Hebelwirkung von  $\text{CH}_4$ -Emissionen auf die Klimabilanz von Feuchtgebieten sind zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Flächennutzungstypen im frischeren Bereich des Dollart dringend Feldstudien erforderlich (Tab. 5).

**Tab. 5:** Übersicht wesentlicher Parameter zur Bestimmung des Blue Carbon-Potenzials einer Salzwiesen-Fläche. Diese Parameter sollten zu einen regelmäßigen Flächenmonitoring herangezogen werden sowie zur Evaluierung des Blue Carbon-Potenzials einer Management-Maßnahme.

Parameter	Messmethode	Erläuterung	Referenz zur Methodik
Höhenaufwuchs/ Akkretion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentation-Erosion Bars (SEBs)</li> <li>- Surface-Elevation-Tables (SETs)</li> <li>- Regelmäßiges Nivellieren</li> </ul>	Die Höhenaufwuchsrate wird benötigt zur Berechnung der C-Festlegungsrate	Nolte et al. 2013b
C-Dichte des Bodens	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Beprobung des Bodens, i.d.R. bis 1 m Tiefe</li> <li>2) Bestimmung der Lagerungsdichte</li> <li>3) Bestimmung des Gehalts an organischem Kohlenstoff, z.B. Glühverlustmethode</li> </ol>	Die C-Dichte des Bodens wird benötigt zur Berechnung der C-Festlegungsrate und zur Quantifizierung von C-Vorräten	Müller et al. 2019a, Chmura et al. 2003
Methanemissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haubenmessungen im Gelände</li> </ul>	In häufig überfluteten, ästuarinen Flächen mit geringem Meerwassereinfluss können Methanemissionen die C-Festlegungsleistung ausgleichen. Ab einer Salinität von 25 ppt sollte deshalb immer auch die Methandynamik einer Fläche evaluiert werden	Müller et al. 2016
Redox-Potenzial des Bodens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redox-Sonde</li> <li>- Indicator of Reduction in Soils (IRIS) Stäbe</li> </ul>	Wesentlicher Umweltparameter, der die O <sub>2</sub> -Verfügbarkeit im Boden anzeigt	Müller et al. 2020 Castenson und Rabenhorst 2006
Salinität des Boden- und Überflutungswassers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitfähigkeitsmessung</li> <li>- Refraktometer</li> <li>- direkte Bestimmung der Ionen-Konzentration</li> </ul>	Wesentlicher Umweltparameter zum Abschätzen von Methanemissionen	Poffenbarger et al. 2011

### 3. Synergien und Konfliktpotenziale zwischen Blue Carbon-Maßnahmen und den Zielen verschiedener rechtlicher Instrumente und Strategien

#### 3.1 Berücksichtigung von Blue Carbon in der aktuellen Planungskulisse

In diesem Kapitel wird analysiert, ob und wie der Themenkomplex Blue Carbon sowie das Klimaschutzpotenzial von Salzwiesen in den folgenden rechtlichen Instrumenten und Strategien bereits heute berücksichtigt wird:

- EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)
- EG-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)
- Masterplan Ems 2050
- Integrierter Bewirtschaftungsplan Ems (IBP Ems)
- Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer
- Klimaanpassungsstrategien mit Bezug zum Betrachtungsraum (Nds. Wattenmeer und insbesondere das Emsästuar)

Dazu werden diese Instrumente und Strategien jeweils kurz vorgestellt. Anschließend wird versucht, in den Dokumenten zur Umsetzung bzw. Implementierung der o. g. rechtlichen Instrumenten und Strategien direkte oder indirekte Bezüge zu Blue Carbon zu identifizieren.

Direkte Bezüge lassen sich über die Suche mit entsprechenden Schlagworten finden (blue carbon, Senke, Kohlenstoff, sequestration etc.). Indirekte Bezüge liegen vor, wenn beispielsweise der Schutz von Ökosystemfunktionen oder der Klimaschutz thematisiert werden, ohne dabei explizit auf die Senkenfunktion von Salzwiesen bzw. Blue Carbon einzugehen.

Die Ergebnisse dieser Recherche dienen als Grundlage, um im nachfolgenden Kapitel 3.2 mögliche Synergieeffekte, aber auch Konflikte zwischen einer Blue Carbon-Förderung einerseits und den rechtlichen Instrumenten und Strategien andererseits zu skizzieren.

### 3.1.1 EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Die WRRL dient der Schaffung eines Ordnungsrahmens zum Schutz aller Oberflächengewässer (inkl. der Übergangs- und Küstengewässer) sowie des Grundwassers. Sie bündelt einen Großteil der in Europa bestehenden Regelungen zum Gewässerschutz und hat das ambitionierte Ziel, den Gewässerzustand bis spätestens 2027 wesentlich zu verbessern.

Die Online- und Literaturrecherche nach direkten und indirekten Bezügen zu Blue Carbon umfasste im Wesentlichen folgende Dokumente:

- Gesetzestexte (WRRL, WHG, OGewV)
- Internationaler Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm der FGG Ems 2015 - 2021 (FGE EMS 2015)
- Niedersächsischer Beitrag zum Bewirtschaftungsplan und Maßnahmenprogramm der FGE Ems 2015 – 2021 (NMU 2015a, b)
- Wichtige Wasserbewirtschaftungsfragen in der FGE Ems zur Aktualisierung des Bewirtschaftungsplans 2021 – 2021 (FGE EMS 2019)
- Fitness Check of the Water Framework Directive and the Floods Directive, EU Commission Staff working Document (EUROPEAN COMMISSION 2019)

Grundsätzlich wird der Schutz oder die Wiederherstellung der Senkenfunktion von Feuchtgebieten, insbesondere von Salzwiesen, in den Dokumenten zur Umsetzung der WRRL nicht explizit thematisiert bzw. forciert. Aktuell wird jedoch im jüngst durchgeführten „Fitness-Check“ der EU Kommission diese Ökosystemdienstleistung und ihr Klimaschutzpotenzial explizit erwähnt:

*"As wetlands offer huge potential as carbon sinks, their protection or restoration through WFD [Water Framework Directive] implementation would be an important climate mitigation action"*(EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 102)

Dieser direkte Zusammenhang zwischen der WRRL und Blue Carbon wird durch eine Vielzahl indirekter Bezüge zum Klimawandel untermalt. Die aktuellen und zukünftigen klimatischen Veränderungen rücken zunehmend in den Fokus der Gewässerbewirtschaftung, weil sie Einfluss auf alle wichtigen Handlungsfelder der WRRL haben und sowohl in der Planung als auch der Umsetzung von Maßnahmen einbezogen werden müssen. Dazu heißt es in FGE EMS (2019):

*Die Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels ist ein strategisches Handlungsfeld, das eine umfassende und über alle wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder integrierende Betrachtungsweise notwendig macht [...] Ziel ist eine umfassende Berücksichtigung der potenziellen Auswirkung des Klimawandels bei der Maßnahmenauswahl einschließlich der ggf. infolge des Klimawandels veränderten Wirksamkeit der Maßnahme." (S. 22)*

Im aktuellen Bewirtschaftungsplan für den Zeitraum 2015-2021 werden deshalb die möglichen Auswirkungen des Klimawandels, die daraus resultierenden Folgen für die Wasserwirtschaft und entsprechende Anpassungsmaßnahmen beschrieben (NMU 2015a, Anhang C). Im dazugehörigen Maßnahmenprogramm wird zudem festgestellt, dass die Maßnahmen zur Erreichung der WRRL-

Ziele oft multifunktional sind und gleichzeitig auch zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Allgemeinen beitragen können – beispielsweise beim Küstenschutz. Daher sollen „Maßnahmentypen mit Synergieeffekten für unterschiedliche Klimafolgen“ bevorzugt umgesetzt werden (NMU 2015b, S. 16). Auf diese Weise sollen die Ziele der WRRL trotz der klimatischen Veränderungen erreicht und gleichzeitig Möglichkeiten zur Anpassung an die Klimafolgen wahrgenommen werden.

Deutlich wird jedoch, dass der Fokus bisher klar auf der Klimaanpassung liegt, während mögliche Synergieeffekte zwischen WRRL und Klimaschutz (z.B. durch die Festlegung von Kohlenstoff in Salzwiesen) nicht thematisiert werden. Eine Ausnahme bildet lediglich der „Klimacheck“ des LAWA-BLANO-Maßnahmenkatalogs, auf dem die Maßnahmenpläne für die WRRL und MSRL (Kap. 3.1.2) basieren. In diesem Check wurde neben der Sensitivität der Maßnahmen gegenüber Klimaveränderungen auch abgeschätzt, ob aus ihrer Umsetzung mögliche Auswirkungen für den Klimaschutz resultieren (positiv, negativ oder neutral; vgl. NMU 2015b, Anhang Tab. 34). Den morphologischen Maßnahmen mit den Nummern 70-87, unter die beispielsweise Sonnerdeichöffnungen fallen würden, wird im Klimacheck keine positive Wirkung für den Klimaschutz attestiert. Das potenziell hohe Klimaschutz- und Synergiepotenzial solcher Maßnahmen scheint in der Prüfung unterschätzt oder nicht berücksichtigt worden zu sein.

### 3.1.2 EG-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)

Die MSRL bildet in Europa das räumlich und inhaltlich umfassendste Regelungswerk zum Schutz der Meere. Sie findet auf die Meeres- und Küstengewässer Anwendung und überlappt hier u. a. mit dem Geltungsbereich der WRRL (vgl. Kap. 3.1.1). Die Bewertungen, Ziele und Maßnahmen der WRRL werden durch die MSRL aufgegriffen und ergänzt (vgl. LAWA 2014).

Die Online- und Literaturrecherche nach direkten und indirekten Bezügen zu Blue Carbon umfasste im Wesentlichen folgende Dokumente:

- Gesetzestext (MSRL)
- Zustandsberichte für die deutsche Nord- und Ostsee (BMU 2018)
- Maßnahmenprogramm zum Meeresschutz der deutschen Nord- und Ostsee (BMUB 2016)

Obwohl die MSRL 8 Jahre später als die WRRL in Kraft trat, thematisch breiter aufgestellt ist und ausdrücklich einen Ökosystemansatz verfolgt, sind auch hier keine Bezüge zur Kohlenstofffixierung zu finden.

Die MSRL fokussiert im Wesentlichen auf den Schutz und den Erhalt der benthischen und pelagischen Lebensräume des Meeres sowie der damit verknüpften Ökosystemdienstleistungen. Der unmittelbare Küstenbereich fällt nicht in den Geltungsbereich der MSRL. Insbesondere Salzwiesen der Lebensraumtypen 1310-1330 werden durch die MSRL nicht behandelt (BSH 2012). Vor diesem Hintergrund konnten auch keine indirekten Bezüge zwischen der MSRL, Salzwiesen, ihre Funktion als Kohlenstoffsenske und dem damit verbundenen Klimaschutzpotenzial identifiziert werden.

### 3.1.3 Masterplan Ems 2050

Der Masterplan Ems bildet die vertragliche Grundlage für eine nachhaltigere und ökologisch verträglichere Entwicklung des Emsästuars unter Erhaltung der Ems als Bundeswasserstraße. Der Masterplan entstand im Jahr 2015 vor dem Hintergrund eines drohenden Vertragsverletzungsverfahrens durch die EU-Kommission. Anlass war der schlechte Erhaltungszustand der betroffenen Natura 2000-Gebiete. Der Masterplan soll es ermöglichen, bis 2050 konkrete Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen und gleichzeitig die wirtschaftliche Entwicklung der Region zu sichern (vgl. NMU 2015b). Im Rahmen des Masterplans werden verschiedene Forschungsprojekte gefördert, so u. a. auch eine Studie der Naturschutzverbände zum Thema Ökosystemdienstleistungen (s. u.).

Die Online- und Literaturrecherche nach direkten und indirekten Bezügen zu Blue Carbon umfasste im Wesentlichen folgende Dokumente:

- Masterplan Ems 2050 (Vertragstext)
- Broschüre zum Masterplan (GESCHÄFTSSTELLE MASTERPLAN EMS 2017)
- Studie „Lebensraum Tideems“ der Naturschutzverbände (WWF DEUTSCHLAND 2019)

Mit Blick auf die drängenden Probleme im Emsästuar – allen voran die Schlicksituation und die fortschreitende ökologische Degeneration – zielt der Masterplan auch primär auf deren Lösung ab. Für die Berücksichtigung weiterer, nicht zwingend zu behandelnder Themen lässt das Spannungsfeld zwischen Ökologie, wirtschaftlicher Interessen und drohendem Vertragsverletzungsverfahren derzeit wenig Spielraum. Die Aspekte Klimaanpassung und Klimaschutz finden trotz des Planungshorizonts 2050 überhaupt keine Erwähnung im Masterplan. Salzwiesen sind laut Masterplan zwar ein wichtiger Bestandteil der Region und seien daher gezielt „zu sichern und zu entwickeln“, werden aber lediglich mit Blick auf ihre floristische und faunistische Bedeutung beurteilt; die Senkenfunktion bleibt unberücksichtigt.

Insgesamt weist der Masterplan weder direkte noch indirekte Bezüge zu Blue Carbon auf, obwohl viele der geplanten Maßnahmen (u. a. Tidepolder, Sommerdeichöffnungen) ein hohes Synergiepotenzial mit der Kohlenstofffixierung in Salzwiesen und anderen Habitaten aufweisen.

Um auch die sozialen und wirtschaftlichen Vorteile der Ems-Sanierung zu verdeutlichen, haben die am Masterplan beteiligten Naturschutzverbände eine Bilanzierung der Ökosystemdienstleistungen beauftragt. Betrachtet wurde hier auch die Kohlenstofffixierung in ästuartypischen Habitaten (u. a. Salzwiesen), die im Masterplan selbst nicht thematisiert wird (s.o.). Laut der Studie könnte sich das CO<sub>2</sub>-Speichervolumen im Emsästuar nach Umsetzung aller im Masterplan vorgesehenen Maßnahmen bis 2050 um rund 32% erhöhen. Die Region könnte damit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten (rel. Anstieg gegenüber 2010, gemessen in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent/Jahr).

### 3.1.4 Integrierter Bewirtschaftungsplan Ems (IBP)

Weite Teile des Emsästuars stehen als Teil des Natura 2000-Netzwerks unter Schutz nach der Europäischen FFH-Richtlinie. Um die Ziele der Richtlinie mit den vielfältigen wirtschaftlichen, sozialen und infrastrukturellen Interessen innerhalb der Ems-Dollart-Region in Einklang zu bringen, haben Niedersachsen und die Niederlande im Jahr 2016 gemeinsam einen sog. Integrierten Bewirtschaftungsplan aufgestellt. Der IBP ist zwar nicht rechtlich bindend, dient aber als gutachterliche Grundlage für die weitere Entwicklung des Emsästuars. So wird u. a. im Rahmen des Masterplans Ems 2050 auf die Ergebnisse des IBP zurückgegriffen (vgl. Kap. 3.1.3).

Die Online- und Literaturrecherche umfasste den IBP EMS (2016) mit allen dazugehörigen Teilbeiträgen. Direkte Bezüge zu Blue Carbon konnten darin nicht identifiziert werden.

Der Klimawandel wird im IBP Ems als eine der größten Herausforderungen für die zukünftige Gewässerbewirtschaftung betrachtet. Möglichkeiten zur Klimaanpassung werden daher in allen Handlungsfeldern mit einbezogen; der Klimaschutz spielt dagegen auch im IBP keine Rolle.

Salzwiesen sollen laut IBP gemeinsam mit anderen ästuartypischen Habitaten wie Röhricht- und Wattflächen erhalten oder entwickelt werden. Dazu werden diverse Maßnahmen vorgeschlagen und auch hinsichtlich ihres Synergie- und Konfliktpotenzials mit anderen Zielen oder Nutzungen bewertet (siehe u. a. M10 - „Maßnahmen zur Sicherung und Entwicklung von Salzwiesengesellschaften“). Das große Synergiepotenzial zwischen Salzwiesenentwicklung einerseits und der Kohlenstofffixierung bzw. dem Klimaschutz andererseits wird im IBP jedoch nicht aufgegriffen.

### 3.1.5 Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer

Der Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer erstreckt sich zwischen der Elbmündung im Osten und dem Dollart im Westen. Er umfasst die Küsten- und Meeresbereiche von der Hauptdeichlinie bis zur offenen Nordsee mit einer Gesamtfläche von inzwischen rund 345.000 ha (vgl. [www.nationalpark-wattenmeer.de](http://www.nationalpark-wattenmeer.de)).

Die Online- und Literaturrecherche nach direkten und indirekten Bezügen zu Blue Carbon umfasste im Wesentlichen folgende Dokumente:

- Gesetzestext (NWattNPG)
- Wadden Sea Quality Status Report 2017 (QSR, diverse Teilberichte)<sup>1</sup>

Auch in den gesichteten Unterlagen zum Nationalpark Wattenmeer bzw. der Trilateralen Wattenmeer Kooperation konnten keine direkten Bezüge zu Blue Carbon gefunden werden.

<sup>1</sup> Der Nationalpark ist Teil der Trilateralen Wattenmeer Kooperation zwischen den Ländern Deutschland, Dänemark und den Niederlanden. Die Aktivitäten dieser Kooperation werden länderübergreifend vom Common Wadden Sea Secretariat (CWSS) koordiniert. Dazu gehören u. a. auch die gemeinsamen Quality Status Reports (QSR) sowie eine Klimaanpassungsstrategie.

Den Salzwiesen ist ein eigener Teilbericht des QSR gewidmet. Darin wird der Erhalt oder die Wiederherstellung von möglichst naturnahen und diversen Salzwiesen als wichtiges Ziel für das Wattenmeer proklamiert. Auch das niedersächsische NWattNPG nennt in § 1 den Fortbestand der „natürlichen Abläufe in diesem Lebensraum [das Wattenmeer]“ als vorrangigen Schutzzweck. Obwohl die ökologische Funktion „Kohlenstoffsенke“ dabei nicht explizit erwähnt wird, fällt sie per Definition unter die o. g. Zielvorgaben des QSR und NWattNPG (indirekter Bezug zu Blue Carbon).

Den Auswirkungen des Klimawandels und einer möglichen Anpassung daran kommt im QSR eine zentrale Rolle zu; parallel wurde deshalb vom CWSS auch eine Anpassungsstrategie für das Wattenmeer entwickelt (vgl. Kap. 3.1.6). Explizit werden im QSR Möglichkeiten erörtert, wie Maßnahmen zur Klimaanpassung möglichst synergetisch und multifunktional gestaltet werden können (vgl. QSR Teilbericht „climate ecosystems“, PHILIPPART et al. 2017). Das Klimaschutzpotenzial des Wattenmeeres – hier insbesondere in Form der Kohlenstofffixierung durch Salzwiesen – wird jedoch nicht aufgegriffen.

### 3.1.6 Klimaanpassungsstrategien

Der Klimawandel wirft fundamentale ökologische, wirtschaftliche und soziale Fragen auf, denen gesamtgesellschaftlich begegnet werden muss. Der Bund hat deshalb mit der „Deutschen Anpassungsstrategie (2008)“ und dem dazugehörigen „Aktionsplan Anpassung (2011)“ einen ersten Orientierungsrahmen vorgegeben, mit dessen Hilfe andere Akteure – u. a. die Länderregierungen – konkrete Klimaschutz- und Anpassungsstrategien entwickeln können. In Niedersachsen wurde daraufhin per Regierungsbeschluss die sog. „Regierungskommission Klimaschutz“ gebildet, die im Jahr 2012 ihre Empfehlungen für eine niedersächsische Klimaschutz- und Anpassungsstrategie veröffentlichte. Ferner haben auch andere Akteure wie das CWSS entsprechende Anpassungsstrategien entwickelt, um den Folgen des Klimawandels bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben adäquat begegnen zu können.

Die Online- und Literaturrecherche nach direkten und indirekten Bezügen zu Blue Carbon umfasste im Wesentlichen folgende Dokumente:

- Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (BUNDESREGIERUNG 2008)
- Aktionsplan zur Deutschen Anpassungsstrategie (BUNDESREGIERUNG 2011) mit Fortschrittsbericht (BUNDESREGIERUNG 2015)
- Empfehlungen für eine Niedersächsische Strategie zur Klimaanpassung (NMU 2012b) sowie zum Klimaschutz (NMU 2012a)
- Klimaanpassungsstrategie des CWSS (CWSS 2014) mit Monitoring Report (CWSS 2017)

In den o. g. Klimastrategien des Bundes und des Landes Niedersachsen spielen die Wechselwirkungen zwischen Landnutzung, Ökosystemdienstleistungen und Klimawandel eine zunehmend wichtige Rolle.

Obwohl das primäre Ziel beim Klimaschutz weiterhin die drastische Senkung der Treibhausgasemissionen ist, v. a. im Energiesektor, wird auch explizit auf die Speicherfunktion natürlicher Kohlenstoffsenken verwiesen. So sollen laut deutscher Anpassungsstrategie möglichst integrative Maßnahmen ergriffen werden,

*„die Synergien zwischen Naturschutz, Klimaschutz und Anpassung nutzen und die Biodiversität erhalten. Dies ist beispielsweise möglich, wenn Maßnahmen die Speicherfunktion von Feuchtgebieten für Kohlenstoff sowie deren Pufferfunktion für Folgen von Extremereignissen auf den Wasserhaushalt nutzen.“* (BUNDESREGIERUNG 2008, S. 26)

In diesem Zusammenhang werden bereits diverse Forschungsvorhaben und Modelprojekte zur Kohlenstofffixierung durchgeführt. Der Fokus liegt hier auf terrestrischen und semi-terrestrischen Kohlenstoffsenken wie Mooren, Wälder und humusreichen Böden (siehe z. B. das Handlungsfeld „Landwirtschaft und Erhalt organischer Böden“ in der Nds. Klimaschutzstrategie). Salzwiesen oder vergleichbare Ökosysteme mit Senkenfunktion im Küstenraum finden dagegen keine Erwähnung, obwohl hier mit Blick auf das obige Zitat erhebliches Synergiepotenzial zu vermuten ist.

In der Strategie des CWSS (CWSS 2014) spielt der Klimaschutz und die Kohlenstofffixierung bisher keine nennenswerte Rolle. Das Wattenmeer, welches von „einzigartigem Wert“ und gleichzeitig besonders vulnerabel gegenüber den klimatischen Veränderungen ist, soll mit Hilfe der Strategie in erster Linie anpassungsfähig bleiben.

## 3.2 Mögliche Synergien und Konflikte

Im Ergebnis von Kapitel 3.1 wird deutlich, dass das Wattenmeer und speziell die Ästuare im Rahmen der hier betrachteten rechtlichen Instrumente und Strategie als „funktionale Einheiten“ betrachtet und nach Möglichkeit auch als solche bewirtschaftet werden sollen. Salzwiesen werden zwar als integraler und schützenswerter Bestandteil der Küstenökosysteme verstanden, ihre Bedeutung als Kohlenstoffsenken wird bisher jedoch fast nicht thematisiert.

Die grundsätzliche Strategie zur Förderung der Kohlenstofffixierung in Salzwiesen beruht auf der Annahme, dass der Verlust autochthoner C-Einträge deutlich reduziert werden muss. Dies kann durch eine reduzierte Durchlüftung des Bodens und eine größere Eintragstiefe der Nettoprimärproduktion erreicht werden. In Kapitel 2.2 wurden vier Maßnahmenkategorien herausgearbeitet, mit denen sich das Blue Carbon-Potenzial der Wattenmeer-Salzwiesen entsprechend erhöhen ließe.

Nachfolgend werden mögliche Synergien und Konflikte zwischen diesen Maßnahmentypen einerseits und den Zielen der in Kapitel 3.1 betrachteten rechtlichen Instrumente und Strategien andererseits skizziert. Die Tab. 6 gibt dazu einen Überblick.

**Tab. 6:** Übersicht möglicher Synergien (grün) und Konflikte (rot) zwischen den Maßnahmentypen zur Förderung von Blue Carbon und den relevanten Schutzregimen und –instrumenten. Maßnahmen, welche nur unter Vorbehalt bzw. nach weiterer Forschung empfohlen werden, sind grau markiert (vgl. Kap. 2.3.6). Kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Maßnahmentypen	WRRL	MSRL	Masterpl an Ems 2050	IBP Ems (bzw. Natura 2000)	National park Watten- meer	Klimaan- passung
Maßnahmen zu Hydrologie und Sedimentdynamik						
Rückdeichungen/ Sommerdeichöffnung*	X		X	X/X	X	X
Aufgabe von Entwässerungsgräben und Bodenabtrag	X		X	X/X	X	X
Konstruktion künstlicher Salzwiesen mit Hilfe von Lahnungen	X/X		X	X/X	X	X
Steigerung/Optimierung des Sedimenteintrags	<i>keine pauschale Abschätzung möglich (siehe Textteil)</i>					
Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere						
Aufrechterhaltung/ Förderung d. Beweidung	X		X/X	X/X	X	X
Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzenarten						
Förderung bestimmter invasiver Arten mit Vorteil für C-Festlegung	X			X	X	X
Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen						
Reduktion der Nährstoffeinträge	X	X		X	X	

\* **Hinweis zu Rückdeichungen:** Obwohl Rückdeichungen und Sommerdeichöffnungen Ähnlichkeiten miteinander aufweisen, sind Rückdeichungen mit deutlich größerem planerischem und baulichem Aufwand verbunden als die Öffnung eines Sommerdeichs. Rückdeichungsprojekte treffen deshalb in Deutschland weiterhin auf erheblichen Widerstand. In absehbarer Zeit ist nicht damit zu rechnen, dass solche Projekte hierzulande in relevantem Umfang umgesetzt werden. Der Maßnahmentyp Rückdeichungen wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

### 3.2.1 Maßnahmen zu Hydrologie und Sedimentdynamik

**Sommerdeichöffnungen:** Sommerdeiche sind dem Hauptdeich bzw. Winterdeich vorgelagert und schützen das Deichvorland vor kleineren (sommerlichen) Hochwasserereignissen, v.a. um die landwirtschaftliche Nutzung zu erleichtern. Diese Flächen sind vom Tidegeschehen weitgehend entkoppelt und stehen deshalb über weite Teile des Jahres für die Beweidung und andere Nutzungen zur Verfügung. Sie sind außerdem Teil des Küstenschutzsystems und häufig von großer Bedeutung für den Vogelschutz (vgl. IBP EMS 2016). Die sommerbedeichten, stark ausgesüßten

Vorländer werden Sommerkoog, -polder oder –groden genannt und nehmen entlang der deutschen Wattenmeer-Küste eine Fläche von rund 2.300 ha ein (vgl. Kapitel 2.3.2)

Bei einer sog. Sommerdeichöffnung wird eben dieser vollständig entfernt oder punktuell geöffnet. Gelegentlich wird als Kompromisslösung auch ein Sperrwerk in den Sommerdeich eingesetzt, um den Ein- und Ausstrom der Tide zu kontrollieren und das Vorland auch weiterhin zur Weidehaltung nutzen zu können. Sommerdeichöffnungen ermöglichen eine, je nach Ausgestaltung, unterschiedlich naturnahe Hydrodynamik im dahinterliegenden Vorland und haben die Entwicklung von neuen Salzwiesenlebensräumen zum Ziel. Die Deichöffnung geht meist mit der Anlage von naturnahen Prielstrukturen und einer Abflachung von Geländeteilen einher (siehe auch Maßnahmentyp „Aufgabe von Entwässerungsgräben“). Sommerdeichöffnungen weisen grundsätzlich ein hohes Blue Carbon-Potenzial auf, weil sie die Entwicklung naturnaher Salzwiesenlebensräume ermöglichen und infolge der flächenhaften (Wieder-)Vernässung der Vorländer die Durchlüftung des Bodens reduzieren.

Aus ökologischer Sicht wird mit solchen Maßnahmen eine umfängliche Aufwertung des Vorlands erreicht. Sommerdeichöffnungen werden bisher fast immer als naturschutzfachliche Kompensationsmaßnahmen durchgeführt, sind aber in den Dokumenten von WRRL, IBP, Masterplan Ems und Nationalpark auch explizit als Maßnahmenvorschläge zur Erreichung der Umweltziele, also als Verbesserungsmaßnahmen, enthalten (siehe u.a. IBP-Maßnahme M38 „Öffnung bzw. Rückbau von Sommerdeichen oder Verwallungen“). Durch die Wiederherstellung des Tideeinfluss gelangen zudem wieder Schwebstoffe in die Vorländer und ermöglichen so das Mitwachsen der Fläche mit dem MSA (Klimaanpassung). Maßnahmenbeispiele finden sich inzwischen an der gesamten deutschen Nordseeküste und in den Ästuaren.

Wenn bestehende Lebensräume im Deichvorland in Salzwiesen umgewandelt werden, kann es auch zu Zielkonflikten mit dem Naturschutz kommen. Für das Vorland typische Hochstaudenfluren oder Wiesen sind beispielsweise von großer Bedeutung für Brut- und Rastvögel und häufig als Teil des Natura 2000-Netzwerks geschützt. Der Verlust solcher Lebensräume als Folge einer Sommerdeichöffnung setzt daher eine entsprechende Abwägung der verschiedenen Schutzziele voraus. Weiteres Konfliktpotenzial besteht mit den menschlichen Nutzungsansprüchen im Vorland; so ist eine Beweidung in solchen neu geschaffenen Sommerpoldern nicht mehr oder nur noch eingeschränkt möglich (WWF DEUTSCHLAND 2019). Die Aufgabe von Zuwegungen, Verwallungen und Deckwerken bzw. das vollständige Entfernen des Sommerdeichs kann außerdem mit den Erfordernissen des Küstenschutzes und der Deichpflege kollidieren (vgl. IBP EMS 2016); der örtliche Widerstand gegen solche Maßnahmen war und ist deshalb z.T. hoch.

Insgesamt ist festzustellen, dass Sommerdeichöffnungen ein hohes Blue Carbon-Potenzial aufweisen und weitgehend im Einklang mit den hier betrachteten rechtlichen Instrumenten und Strategien stehen. Das Synergiepotenzial ist grundsätzlich hoch, Ziel- und Nutzungskonflikte lassen sich aber nicht ausschließen.

**Aufgabe von Entwässerungsgräben und Bodenabtrag:** Um v.a. die landwirtschaftliche Nutzung auch von unbedeckten Salzwiesen zu verbessern, sind in der Vergangenheit umfangreiche Grabensysteme zur Entwässerung in den Salzwiesen bzw. Vorländern angelegt und unterhalten worden. Dies führt zu einer verstärkten Durchlüftung des Bodes, wodurch sich die Stabilisierung autochthoner C-Einträge deutlich reduziert. Die Aufgabe dieser Entwässerungsgräben

in Kombination mit einem flächenhaften Abtrag des Oberbodens unterstützt die dauerhafte Wiedervernässung der Salzwiesen und erhöht so die C-Fixierung.

Durch Verschluss bzw. Verfüllung von Entwässerungsgräben und die Reduzierung der Geländehöhe durch Bodenabtrag kann in den betroffenen Flächen eine natürlichere Hydrodynamik hergestellt werden, welche die Entwicklung von Salzwiesen und anderen tidebeeinflussten Lebensräumen ermöglicht oder deren Zustand verbessert. Im IBP wird dieses Vorgehen explizit in der Maßnahme M10 – „Sicherung und Entwicklung von Salzwiesengesellschaft“ aufgegriffen (IBP EMS 2016). Im Nds. Bewirtschaftungsplan für die WRRL wird dieser IBP-Maßnahmenvorschlag unverändert übernommen (NMU 2015a, b). Auch die Nationalparkverwaltung nutzt diesen Ansatz bei verschiedenen Projekten, um die stark anthropogen überprägten Salzwiesenlebensräume naturnäher zu gestalten (schriftl. Mitteilung Fr. Rupprecht, NLPV Nds. Wattenmeer).

Mögliche Konfliktpotenziale einer so grundsätzlichen Umgestaltung von bestehenden Vorlandlebensräumen wurden bereits beim Maßnahmentyp „Sommerdeichöffnung“ beschrieben. Auch hier sind Zielkonflikte mit dem Naturschutz, eine Flächenkonkurrenz mit der Landwirtschaft und etwaige Bedenken aus Sicht des Küstenschutzes möglich und machen eine entsprechende Interessensabwägung notwendig.

**Konstruktion von Salzwiesen mit Lahnungen:** Salzwiesen weisen ein höheres Potenzial zur C-Festlegung auf als Wattflächen. Die Umwandlung von Wattflächen in Salzwiesen mit Hilfe von Lahnungsstrukturen oder anderer Techniken ist daher aus Sicht von Blue Carbon zu fördern.

Der überwiegende Teil der Salzwiesen entlang der Festlandküste des Wattenmeeres ist im Zuge der künstlichen Landgewinnung entstanden. Dazu legte man in der Vergangenheit großflächige Lahnungsstrukturen an, mit deren Hilfe auf ehemaligen Wattflächen die Sedimentation erhöht und die Bildung von Salzwiesen initiiert wurde. Heute werden Lahnungen in erster Linie zur Stabilisierung der Vorlandkante genutzt (vgl. IBP-Maßnahme M 11 „Anlage von Lahnungsbauwerken zur Einschränkung von Erosionsprozessen“). Lahnungsstrukturen sind damit auch Teil des Küstenschutzsystems und können durch das beschleunigte Höhenwachstum bei der Anpassung an den MSA helfen. Im Ems-Dollart könnten zusätzliche Lahnungsstrukturen auch zur Reduktion der extrem hohen Schwebstoffgehalte beitragen (vgl. WWF DEUTSCHLAND 2019).

Anders als bei den vorgenannten zwei Maßnahmentypen, bei denen terrestrische und stark anthropogen überformte Vorländer in Salzwiesen umgewandelt werden, ginge die seeseitige Landgewinnung durch Lahnungsbau auf Kosten von Wattflächen. Aus naturschutzfachlicher Sicht wird dies auch kritisch beurteilt. So ist die Nds. Nationalparkverwaltung der Ansicht,

*„[...] dass dieser Maßnahmenvorschlag für eine natürliche Salzwiesenentwicklung nicht zielführend ist. Die aktive Schaffung von Salzwiesen durch den Bau von Lahnungsfeldern unter Verlust bestehender, gleichwertiger Wattflächen entspräche nicht den Zielen des Nationalparks.“* (IBP EMS 2016, S. 141)

Im Rahmen der WRRL wird unter der Qualitätskomponente „Morphologie“ zwar nicht explizit auf Wattflächen abgestellt, es werden jedoch die Anteile der Litoralfächen zueinander bewertet. Wenn eulitorale Flächen (u.a. Wattflächen) zugunsten supralitoral Vorländer (>MThw) verloren gehen, stellt diese eine negative Entwicklung dar; die Umwandlung eulitoraler Wattflächen in ebenfalls

eulitorale Salzwiesen führt dagegen zu keiner unmittelbaren Veränderung der Bewertung (vgl. Bewertungsverfahren für die Qualitätskomponente „Morphologie“ in den Küstengewässern, [www.gewaesser-bewertung.de](http://www.gewaesser-bewertung.de)). In den Übergangsgewässern wird zusätzlich zu den Flächenanteilen die qualitative Ausprägung der Salzwiesen erfasst (WRRL-Bewertungsverfahren nach NLWKN (2010)). Ob sich der Lahnungsbau in diesem Kontext positiv oder negativ auf die bewerteten Parameter auswirkt (u.a. die Vegetationszonierung) lässt sich pauschal nicht beurteilen.

Insgesamt stellt der Lahnungsbau eine gängige Technik der Vorlandsicherung dar, die von Seiten des Naturschutzes unterschiedlich beurteilt wird. Aus Sicht von Blue Carbon, Küstenschutz und Klimaanpassung wäre eine seeseitige Expansion der Salzwiesen durch Lahnungen als positiv zu bewerten (vgl. Tab. 6).

**Steigerung/Optimierung des Sedimenteintrags:** Obwohl die Wattenmeer-Salzwiesen im Mittel ein stabiles Höhenwachstum verzeichnen, sinken vereinzelte Flächen auch infolge fortschreitender Erosion ab. Hier kann eine direkte oder indirekte Steigerung des Sedimenteintrags u.U. zu einer Stabilisierung des Niveaus und einer entsprechenden Erhöhung der C-Fixierung führen. Dieser Maßnahmentyp wird mit Blick auf die komplexen Wirkzusammenhänge und den bestehenden Forschungsbedarf nur unter Vorbehalt empfohlen (vgl. Kap.2.3.6).

Die direkte oder indirekte Aufspülung von Sediment zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Höhenaufwuchses der Salzwiesen ist grundsätzlich im Sinne der Klimaanpassung und des Küstenschutzes, weil hierdurch aktiv dem MSA begegnet werden kann. Schon heute wird Baggergut häufig zur Stabilisierung von Kolken, Ufern oder Leitdämmen genutzt; diese Technik ließe sich problemlos auf Salzwiesen übertragen. In der Ems-Dollart-Region werden derzeit bereits Konzepte entwickelt, um das anfallende Baggergut als Ressource für den Küstenschutz einzusetzen und so das Mitwachsen der Vorländer zu unterstützen (FGE EMS 2019).

Aus Sicht des Naturschutzes kann dieser zielgerichtete und multifunktionale Einsatz von Baggergut gegenüber der Entsorgung auf See vorteilhaft sein, denn solche „Verklappungen“ haben häufig einen erheblich negativen Einfluss auf die Meeresumwelt (z.B. WARE et al. 2010) und stehen damit u. a. im Konflikt mit den Zielen von WRRL und MSRL. Eine direkte Ablagerung von Baggergut auf Wattflächen oder Salzwiesen würde allerdings zu einer temporären Degradation führen (Überdeckung von Flora und Fauna). In einem Pilotprojekt in den Niederlanden wird weshalb aktuell die indirekte Disposition getestet („Mudmotor“, vgl. BAPTIST 2019). Die Nds. Nationalparkverwaltung befürwortet solche Maßnahmen grundsätzlich nicht, weil die Sedimentzusammensetzung des verwendeten Baggerguts i.d.R. der Entwicklung von naturnahen Salzwiesen entgegensteht und dieser außerdem mit Schadstoffen und Schwermetallen belastet sein kann (schriftl. Mitteilung Fr. Rupprecht, NLPV Nds. Wattenmeer).

Insgesamt erscheinen Effekte einer direkten oder indirekten Deposition von Sediment auf die Entwicklung der Salzwiesen und deren „Blue-Carbon“-Potenzial derzeit noch schwer abzuschätzen. Dasselbe gilt für mögliche Synergien und Konflikte mit den hier betrachteten rechtlichen Instrumenten und Strategien. Eine pauschale Beurteilung dieses Maßnahmentyps ist daher nicht möglich (Tab. 6).

### 3.2.2 Maßnahmen zur Regulierung der Flächennutzung durch Nutztiere

Die Beweidung von Salzwiesen kann durch die trittbedingte Bodenverdichtung (geringere Durchlüftung) zu einer verbesserten C-Festlegung führen. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen der Nutztiere müssen allerdings in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden und könnten diesen positiven Effekt wieder ausgleichen oder sogar ins Negative verkehren; hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Auf Basis des aktuellen Wissensstands ist die Beweidung nur unter Vorbehalt als Mittel zur Steigerung des Blue Carbon-Potenzials in Salzwiesen zu empfehlen.

Grundsätzlich wird die Beweidung durch Nutztiere als wichtiger Bestandteil des Vorland-Managements verstanden und stellt gleichzeitig einen Kompromiss zwischen landwirtschaftlichen Interessen, den Erfordernissen des Küstenschutzes und dem Naturschutz dar (IBP EMS 2016). Die in der Vergangenheit flächenhafte und intensive Beweidung der Deichvorländer (inkl. Salzmarschen) hat in den vergangenen Jahrzehnten aber zugunsten des Naturschutzes deutlich abgenommen oder wurde stetig extensiviert (vgl. QSR Teilbericht „Salt marshes“, ESSELINK et al. 2017).

Die Beweidung verhindert durch das kurzhalten der Pflanzen die Entwicklung von hochwachsender Vegetation im Vorland („Verbuschung“). Dadurch wird die Gefahr der Deichschädigung durch anfallende Pflanzenreste (Treibsel/Teek) verringert und das Vordringen von Röhrichten und die Salzwiesen verhindert. Zudem schützt die trittbedingte Verdichtung des Bodens auch vor Erosion und unterstützt so den Küstenschutz.

Verschiedene Studien zeigen, dass der Effekt der Beweidung auf den ökologischen Zustand von Salzwiesen im Kontext der jeweiligen Zielsetzung beurteilt werden muss. So führt eine extensivierte Beweidung in Kombination mit der Wiederherstellung des Tideeinflusses zu einer vergleichsweise hohen Biodiversität. Die Entwicklung von naturnahen Salzmarschen mit verschiedenen Vegetationszonen setzt dagegen eher die Einstellung der Beweidung voraus (u.a. WOLTERS et al. 2005). Letzteres Ziel steht auch im Einklang mit den Zielen der WRRL, weil diese auf eine möglichst natürliche Vegetationszonierung innerhalb der Salzwiesen abzielt (innerhalb der Übergangsgewässer, vgl. den Bewertungsansatz nach NLWKN (2010)). Die Nationalparkverwaltung verfolgt einen ähnlichen Ansatz und versucht die Beweidung auf ein Minimum zu beschränken (ESSELINK et al. 2017). Ferner wird die Beweidung der Vorländer auch im IBP als problematisch bezeichnet, weil sie mit der angestrebten Entwicklung naturnaher Habitats (u.a. Salzwiesengesellschaften) sowie dem Vogelschutz schwer zu vereinbaren ist. Gleichzeitig wird im IBP aber anerkannt, dass das aktuelle Vorlandmanagement gegenüber anderen Konfliktfeldern einen vergleichsweise guten Kompromiss darstellt.

Insgesamt wird die Beweidung von Salzwiesen aus naturschutzfachlicher Sicht eher als Problem betrachtet, aber weitgehend als Teil des Vorlandmanagements geduldet. Für den Artenschutz kann eine entsprechend durchgeführte extensive Beweidung jedoch auch zielführend sein. Aus Sicht des Küstenschutzes und der Klimaanpassung sowie für das Blue Carbon-Potenzial der Salzwiesen wäre tendenziell eine Beibehaltung oder sogar die Intensivierung der Beweidung vorteilhaft (Tab. 6).

### 3.2.3 Maßnahmen zur Regulierung der Ausbreitung invasiver Pflanzen

Gebietsfremde, aber besonders produktive und tiefwurzelnde Pflanzenarten haben zumeist positiven Einfluss auf die C-Festlegung in Salzwiesen; im Wattenmeer trifft dies insbesondere auf *Spartina anglica* (Salz-Schlickgras) zu.

*Spartina anglica* wurde Anfang des 20. Jhd. beabsichtigt in das Wattenmeer eingeführt, weil ihr tiefes Wurzelwachstum die Erosion an Wattflächen und Salzwiesen reduziert und gleichzeitig das Längs- und Höhenwachstum des Vorlandes beschleunigt (vgl. QSR Teilbericht „Alien species“, BÜTTGER et al. 2017). Diese „Vorteile“ der Art stehen auch weiterhin im Einklang mit den Erfordernissen des Küstenschutzes und werden im Rahmen der Klimaanpassung (u. a. Mitwachsen mit dem MSA, Schutz vor Sturmfluten) an Bedeutung gewinnen.

Aus naturschutzfachlicher Sicht wird die Ausbreitung von *Spartina anglica* dagegen als problematisch erachtet. Die Art zählt zu den 100 „World’s Worst invaders“ (LOWE et al. 2004). Dementsprechend ist die Art im Vergleich zu anderen Schlickgrasarten auch nicht als gefährdet eingestuft besondere Maßnahmen zum Schutz der Art gelten nicht als erforderlich (vgl. Steckbrief zu Habitattyp 1320 des BfN).

Im Rahmen der WRRL werden invasive Arten nicht explizit als Parameter erfasst und bewertet, spielen aber bei der Definition von Referenzzuständen und der Ableitung von Störfaktoren eine Rolle. In den Übergangsgewässern werden Salzwiesen beispielsweise als Teil der Qualitätskomponente Makrophyten bewertet. Da *Spartina anglica* häufig in starker Konkurrenz zu den natürlich vorkommenden Queller-Fluren steht, zählt die Art zu den Störungsindikatoren und beeinflusst die Bewertung der Qualitätskomponente Makrophyten negativ. Im IBP Ems wird die Art zwar nicht explizit benannt, es soll aber ganz grundsätzlich die weitere Verbreitung invasiver Arten verhindert werden (vgl. Maßnahme M26 des IBP Ems).

Auch seitens der Nationalparkverwaltung wird die Ausbreitung von *Spartina anglica* aufmerksam bis kritisch betrachtet. Vorrangiges Ziel ist es jedoch, die natürlichen Abläufe in den Lebensräumen zu schützen. Maßnahmen zur Eindämmung von *Spartina anglica* wären daher nur zu rechtfertigen, wenn die Ausbreitung der Art gravierende negative Auswirkungen auf andere Schutzgüter nach sich ziehen würde und die Maßnahmen ohne Eingriffe in natürliche Abläufe durchführbar wären (sondern diese optimaler Weise noch fördern). Dies ist derzeit weder ersichtlich noch künftig absehbar, so dass Schlickgrasbestände derzeit als Bestandteil der Wattenmeervegetation angesehen werden (schriftl. Mitteilung Fr. Rupprecht, NLPV Nds. Wattenmeer). Zudem zeigen neue Studien, dass *Spartina anglica* in positiver Weise zur Diversität der Arten und zum Höhenwachstum von Salzmarschen beiträgt (insb. wenn *Spartina* in der Entstehungsphase dominierte; vgl. GRANSE 2020).

Eine Duldung oder die zusätzliche Förderung der Ausbreitung von *Spartina anglica* zur Erhöhung des Blue Carbon Potenzials in Salzwiesen steht somit den Zielen der WRRL und des IBP sowie des Nationalparks Wattenmeer entgegen (vgl. Tab. 6). Dieselbe Argumentation würde für andere gebietsfremde Arten gelten, die ggf. zur Förderung des Blue Carbon Potenzials in Betracht kommen.

### 3.2.4 Maßnahmen zur Regulierung von Nährstoffeinträgen

Die Wirkzusammenhänge zwischen Nährstoffverfügbarkeit und C-Festlegung in den Wattenmeer-Salzwiesen sind komplex und bisher nicht ausreichend erforscht, um eine konkrete Empfehlung abzugeben. Voraussichtlich würde ein Rückgang der Eutrophierung jedoch das „Blue-Carbon“-Potenzial der Salzwiesen erhöhen.

Obwohl die Nährstoffbelastungen im Wattenmeer infolge einer Begrenzung der landseitigen Nährstoffeinträge seit den 1980er Jahren kontinuierlich abgenommen haben, stellt der Eutrophierungsgrad in den meisten Küstenbereichen weiterhin ein Problem dar (QSR Teilbericht „Eutrophication“, BEUSEKOM et al. 2017). Die zusätzliche Reduktion der Nährstoffeinträge bzw. der Eutrophierung wirkt daher unterstützend auf die Erreichung der Ziele der WRRL, MSRL, des IBP und des Nationalparks Wattenmeer (vgl. u.a. FGE EMS 2019) (vgl. Tab. 6).

Im Gegensatz zu den anderen eher praktisch ausgerichteten Maßnahmentypen (Kap. 3.2.1 bis 3.2.3) stellt die „Regulierung von Nährstoffeinträgen“ jedoch eine konzeptionelle Aufgabe dar, die nicht im Rahmen einer Blue Carbon-Förderung umzusetzen ist. Vielmehr handelt es sich um einen überregional zu koordinierenden Aufgabenbereich, an dem eine Vielzahl von Akteuren beteiligt ist. Ein wichtiger Schritt ist hier beispielsweise die konsequente Umsetzung der neuen Düngeverordnung durch die Landwirtschaft (2020).

## 3.3 Anwendbarkeit auf das Emsästuar

Das primäre Ziel der Klimaschutzstrategien des Bundes und der Länder ist die Senkung der Treibhausgasemissionen, u. a. im Verkehrs- und Energiesektor. Weil diese Ziele jedoch konsequent verfehlt werden, gewinnt die Speicherung von CO<sub>2</sub> in natürlichen Senken sowie die Verhinderung von zusätzlichen Treibhausgasemissionen aus diesen Senken heraus zunehmend an Bedeutung (vgl. NMU 2012a, BUNDESREGIERUNG 2015). Zwar kann die angepasste landwirtschaftliche Nutzung auf organischen Böden (u. a. Moore) einen wesentlich größeren Beitrag zur Klimaregulation leisten als z.B. die Umwandlung von Grünländern in ästuartypische Lebensräume; mit Blick auf die gestiegene Nachfrage nach solchen Klimaregulationsleistungen können Salzwiesenkomplexe des Wattenmeers zukünftig jedoch eine zunehmend wichtigere Rolle spielen (WWF DEUTSCHLAND 2019).

Kapitel 2 hat gezeigt, dass das Blue Carbon-Potenzial von Salzwiesen theoretisch gesteigert werden kann, wenn es gelingt, mit Hilfe geeigneter Maßnahmen den Verlust der autochthonen C-Einträge zu reduzieren. Vier Maßnahmentypen wurden zu diesem Zweck empfohlen. Das Emsästuar bietet im Rahmen des derzeitigen Vorlandmanagements und einiger bereits durchgeführter Renaturierungsmaßnahmen verschiedene Möglichkeiten, um diese Maßnahmen umzusetzen bzw. zu testen (vgl. Kapitel 2.4). Um die Steigerung der C-Festlegung verlässlich prognostizieren zu können, müssen aber die biogeologischen Randbedingungen auf der jeweiligen Maßnahmenfläche hinreichend bekannt sein und kontinuierlich gemessen werden, darunter die Höhengewinnsrate, die C-Dichte des Bodens und mögliche Methanemissionen (vgl. die Parameter in Tab. 5). Zudem muss das z.Z. noch lückenhafte Verständnis zu den Wirkmechanismen solcher Maßnahmen weiter verbessert werden (vgl. Kapitel 5).

In Kapitel 3 wurden die zuvor beschriebenen Blue Carbon-Maßnahmen im Kontext der rechtlichen Rahmenbedingungen betrachtet, die im Niedersächsischen Wattenmeer und speziell im Emsästuar eine Rolle spielen. In den Küstenzonen überlagern sich eine Vielzahl solcher Rechtsrahmen und Zielvorgaben mit lokalen Nutzerinteressen zu einer hochkomplexen Planungskulisse. Jeder Eingriff – zum Beispiel eine Blue Carbon-Maßnahme – birgt hier sowohl Synergie- als auch Konfliktpotenziale und erfordert eine sorgsame Interessenabwägung. Schon heute verfolgt die Gewässerbewirtschaftung und Maßnahmenplanung in den Küstenregionen deshalb weitgehend ganzheitliche und kooperative Ansätze, bei denen die Belange von Küsten- und Naturschutz, Wirtschaft und Öffentlichkeit gleichermaßen berücksichtigt werden sollen. Beispiele hierfür sind die „Integrierten Bewirtschaftungspläne“, der „Masterplan Ems“ oder die „Trilaterale Wattenmeer Kooperation“. Diese Plattformen erlaubt es, trotz der vielfältigen Nutzerinteressen und Zielvorgaben mögliche Synergieeffekte auszuschöpfen und Konflikte frühzeitig zu lösen. Weil sich die Planungssituation in Zuge des Klimawandels noch deutlich verkomplizieren wird, gewinnen solche kooperativen Ansätze zukünftig weiter an Bedeutung. Sie bieten damit zugleich einen guten Anknüpfungspunkt, um die Förderung von Blue Carbon möglichst synergetisch und konfliktfrei in die schon bestehende Bewirtschaftungs- und Maßnahmenplanung zu integrieren.

Bisher spielen die Aspekte Klimaschutz und Blue Carbon jedoch noch keine nennenswerte Rolle in den gesichteten rechtlichen Instrumenten und Strategien; sie geraten gegenüber der Klimaanpassung deutlich ins Hintertreffen. Im Masterplan Ems wird überhaupt kein Bezug zum Klima genommen, obwohl die dort vorgesehenen Maßnahmen laut WWF DEUTSCHLAND (2019) ein hohes Blue Carbon Potenzial aufweisen. Diese Unterpräsenz resultiert u. a. sicherlich daraus, dass Blue Carbon ein relativ junges Forschungsfeld ist (vgl. Kapitel 2.2).

Eine zusätzliche Hürde für die Förderung von Blue Carbon wird in Kapitel 3 deutlich – nämlich die räumlichen und zeitlichen Maßstäbe, auf denen solche Maßnahmen wirken. Dieses „Maßstabs-Dilemma“ betrifft grundsätzlich alle Maßnahmen zum Klimaschutz und wird in der Literatur entsprechend diskutiert (u. a. BASTIAN et al. 2012). Denn während z. B. eine Renaturierungsmaßnahme in relativ kurzer Zeit zu messbaren Verbesserungen auf lokaler Ebene führt, wirken Klimaschutzmaßnahmen eher auf globaler Ebene und mit deutlicher Verzögerung. Ohne einen „greifbaren“ Effekt vor Ort haben solche Maßnahmen in der Interessenabwägung jedoch einen klaren Nachteil, insbesondere, wenn sie im Konflikt mit anderen Zielvorgaben stehen. Die Maßnahmenplanung im Rahmen von WRRL, IBP oder Masterplan Ems erfolgt daher häufig nur mit Blick auf die unmittelbar quantifizierbaren und vor Ort eintretenden Effekte, während mögliche Synergien mit anderen Schutzziele (z.B. des Klimaschutzes) kaum Beachtung finden. Zu diesem Schluss kommt auch der Fitness-Check der WRRL (EUROPEAN COMMISSION 2019) mit Blick auf die bisherige Umsetzung der Richtlinie innerhalb der EU.

Für Abhilfe könnte hier die CO<sub>2</sub>-Bepreisung sorgen. Mit diesem Mechanismus lässt sich die C-Fixierung in Salzwiesen und anderen Habitaten direkt monetarisieren und die Bereitschaft zur Förderung von Blue Carbon zukünftig steigern. Ferner ließe sich der Stellenwert der Klimaregulationsleistung von Salzwiesen auf diese Weise hervorheben, sodass mögliche Synergieeffekte mit Blue Carbon in der Maßnahmenplanung mehr Beachtung finden.

Überträgt man die wissenschaftlichen und planerisch-rechtlichen Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel auf das Emsästuar, erscheint es ratsam, die Förderung von Blue Carbon in einem ersten Schritt als Re-Evaluierung und ggf. Anpassung der bereits bestehenden

Bewirtschaftungs- und Maßnahmenplanung zu verstehen. Denn viele Maßnahmen zur Wiederherstellung einer natürlichen Hydrodynamik – meist Kompensationsmaßnahmen – führen *per se* zu einer erhöhten Kohlenstofffixierung. Die Nationalparkverwaltung verfolgt beispielsweise das übergeordnete Ziel, die stark anthropogen überprägten Lebensräume des Ästuars naturnäher zu gestalten und zu bewirtschaften (vgl. Kapitel 3.2.1). Solche ohnehin stattfindenden Maßnahmen mit einem hohem Blue Carbon-Potenzial können durch ein entsprechendes Monitoring begleitet werden und eignen sich für Feldexperimente in kleinerem Maßstab (vgl. den Methodik-Vorschlag für ein solches Monitoring in Tab. 5). Auf diese Weise ließe sich das Verständnis zu den Wirkmechanismen sowie den Synergie- und Konfliktpotenzialen von Blue Carbon weiter verbessern. Dies ist neben der Monetarisierung der C-Fixierung (s. o.) eine wichtige Voraussetzung, um den Bedenken anderer Interessengruppen zu begegnen und sowohl ideelle als auch finanzielle Unterstützung für eine weitreichendere Applikation von Blue Carbon zu sammeln.

Darauf aufbauend ließen sich dann in einem zweiten Schritt Pilotprojekte initiieren, in denen Blue Carbon-Maßnahmen großflächig getestet und intensiv wissenschaftlich begleitet werden. Für solche Pilotprojekte wird in nachfolgenden Kapitel 4 eine Bewertungsmatrix entwickelt.

## 4. Bewertungsmatrix für zukünftige Blue Carbon-Pilotprojekte

Nachfolgend wird auf der Grundlage der vorangegangenen Kapitel eine Bewertungsmatrix entwickelt. Mit ihr sollen die Sinnhaftigkeit und die Umsetzbarkeit von Blue Carbon Pilotprojekttypen im Vorlandbereich des niedersächsischen Wattenmeeres (Fokus Außenems) abgeschätzt bzw. beurteilt werden können.

Sinnhaftigkeit meint nachfolgend, dass durch den Maßnahmentyp eine darstellbare Erhöhung der C-Festlegung im Vergleich zum Status quo zu erreichen ist.

Umsetzbarkeit meint, dass der Maßnahmentyp die Zielvorgaben der hier relevanten Gesetze, Pläne und Strategien unterstützt (Synergiepotenzial) bzw. nicht in direktem Konflikt mit ihnen steht, in der Öffentlichkeit voraussichtlich überwiegend auf Akzeptanz stößt und mit Blick auf die Erfahrungen bei der Realisierung von Naturschutzprojekten innerhalb des Betrachtungsraumes insgesamt umsetzbar erscheint.

### **Ableitung von Kriterien**

Folgende Fragestellungen erscheinen mit Blick auf die wissenschaftlichen und planerisch-rechtlichen Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 3 relevant für die Bewertung von Blue Carbon Pilotprojekten:

#### Nutzen der Maßnahme:

- Kommt es zu einer mehr als marginalen Erhöhung der C-Festlegung pro Flächeneinheit im Vergleich zum Status quo?

#### Realisierungschancen:

- Steht der (Kosten-)Aufwand für Planung, Umsetzung und begleitendes Monitoring in einem angemessenen Verhältnis zum voraussichtlichen Nutzen der Maßnahme (mit Blick auf den Blue Carbon Aspekt, aber auch unter Berücksichtigung möglicher Synergieeffekte)?

#### Synergie- und Konfliktpotenziale:

- Unterstützt die Maßnahme den Schutz und Erhalt der im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer relevanten und im NWattNPG genannten Naturschutzgüter (natürliche Hydrodynamik, Vegetation, Artengruppen, Biodiversität) oder steht sie in Konflikt mit diesen?
- Unterstützt die Maßnahme die Ziele von WRRL, MSRL, Masterplan Ems 2050, IBP und den relevanten Klimaanpassungsstrategien oder steht sie in Konflikt mit diesen?
- Unterstützt die Maßnahme die verschiedenen Ziele des Küstenschutzes (Schutzniveau, Unterhaltungsaufwand, Klimaanpassung) oder steht sie in Konflikt mit diesen?
- Unterstützt die Maßnahme die Interessen der Landwirtschaft bzw. der Wasser- und Bodenverbände oder steht sie in Konflikt mit diesen?

- Wird die Maßnahme durch die Öffentlichkeit voraussichtlich begrüßt oder ist mit Widerstand zu rechnen (z.B. durch Bürgerinitiativen, Verbände, mediale Berichterstattung)?

Aus diesen Fragestellungen lassen sich im Folgenden Kriterien mit einer positiven Ausprägung ableiten („Maßnahme unterstützt die Ziele von...“) und zu einer Bewertungsmatrix arrangieren (Tab. 7). Die Bewertung der Kriterien erfolgt in drei Stufen: trifft zu (+), trifft nicht zu (-), Zusammenhang unklar oder auf Basis vorliegender Informationen nicht bewertbar (?).

Die Bewertung der einzelnen Kriterien muss die aktuelle Wissensbasis zur C-Fixierung (Kriterien unter 1), die im Rahmen der Planung ermittelten Angaben zu den Kosten und anderen Aufwänden (Kriterien unter 2), die im Rahmen der Planung beschriebenen Konsequenzen auf die Schutzgüter und die Ziele des Naturschutzes und anderer Ziele des Umweltschutzes und der Wasserwirtschaft (Kriterien unter 3 und 4) und die im Rahmen der Planung beschriebenen Konsequenzen für den Küstenschutz und die Landwirtschaft (Kriterien unter 5 und 6) berücksichtigen. Die voraussichtliche Akzeptanz durch verschiedene Gruppen der Öffentlichkeit muss auf der Grundlage der regionalen umweltpolitischen Diskurse erfolgen. Die Bewertung der einzelnen Kriterien erfolgt also wissenschaftlich, die Bewertungsmaßstäbe werden v.a. aus den rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Zielen abgeleitet. Sie erfolgt zwar soweit möglich datengestützt aber überwiegend qualitativ als „Experteneinschätzung“.

Für die nachstehende exemplarische Bewertung von 2 Maßnahmentypen lagen, da es sich nicht um konkrete Projekte handelt, diese Informationen kaum vor. Es wurden die Ergebnisse der vorangegangenen wissenschaftlichen (Kriterium 1) und planerisch-rechtlichen Betrachtung (Kriterium 3, 4, 5, 6) zugrunde gelegt. Für das Kriterium 6 wurde v. a. auf die Erkenntnisse aus bereits umgesetzten und vergleichbaren Vorhaben zurückgegriffen. Für das Kriterium 2 konnte hingegen ohne eine konkrete Maßnahmenplanung keine Bewertung vorgenommen werden.

### **Exemplarisch betrachtete Maßnahmentypen**

Mit Hilfe der Matrix sollen exemplarisch die beiden Maßnahmentypen „Sommerdeichöffnung“ und „flächiger Bodenabtrag“ bewertet werden. Eine Fokussierung auf diese beiden Maßnahmentypen erscheint sinnvoll, weil ihr Blue Carbon Potenzial einerseits hoch ist und sie andererseits schon heute fester Bestandteil der aktuellen Maßnahmenplanung im Betrachtungsraum sind (siehe u. a. Masterplan Ems und IBP Ems). In Anlehnung an die Beschreibungen der Maßnahmen in Kapitel 2.3.2 werden der Bewertung die folgenden Maßnahmenkonzeptionen zugrunde gelegt:

Sommerdeichöffnung: vollständiger Rückbau des Sommerdeiches; partielle Schließung der Entwässerungsgräben; Herstellung einer Berme am Hauptdeich, um den Verlust der Schutzfunktion durch den (vormals vorgelagerten) Sommerdeich auszugleichen.

Flächiger Bodenabtrag: höhere Salzwiesen im unbedeckten Vorland werden durch flächigen Bodenabtrag auf etwa MThw abgesenkt; partielle Schließung der Entwässerungsgräben; ggf. Herstellung einer Berme am Hauptdeich, um den Verlust der Schutzfunktion durch das (vormals erhöhte) Vorland auszugleichen.

### **Bewertungsergebnisse und Evaluation der Bewertungsmatrix**

Die entwickelte Matrix sowie das Bewertungsergebnis für die beiden exemplarisch betrachteten Maßnahmentypen zeigt die Tab. 7 auf der folgenden Seite.

**Tab. 7:** Bewertungsmatrix für Blue Carbon Maßnahmen und exemplarische Bewertungsergebnisse für die beiden Maßnahmentypen „Sommerdeichöffnung“ und „flächiger Bodenabtrag“. Bewertung erfolgt dreistufig: trifft zu (+), trifft nicht zu (-), Zusammenhang unklar oder auf Basis vorliegender Informationen nicht bewertbar (?).

Kriterien	Sommerdeichöffnung	Flächiger Bodenabtrag
<b>1. Der Maßnahmentyp führt zu einer (Netto-)Erhöhung der C-Festlegung:</b>		
Es kommt zu keiner baubedingten C-Freisetzung	+	-
Die langfristige C-Festlegung erhöht sich	+	+
<b>2. Der Maßnahmentyp weist ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf:</b>		
Finanzielle Kosten	?	?
Aufwand für Planung, Umsetzung und Monitoring	?	?
<b>3. Der Maßnahmentyp unterstützt den Schutz/Erhalt der Naturschutzgüter nach NWattNPG:</b>		
Nat. Hydrodynamik	+	+
Vegetation	+	+
Insekten/Wirbellose	+	+
Brutvögel	-	-
Rastvögel	?	?
Biodiversität	+	+/-
<b>4. Der Maßnahmentyp ist mit den relevanten Plänen und Strategien vereinbar:</b>		
WRRL	+	+
MSRL	?	?
Masterplan Ems 2050	+	+
IBP Ems	+/-	+/-
Klimaanpassungsstrategien	+	+
<b>5. Der Maßnahmentyp ist mit den relevanten Zielvorgaben vereinbar:</b>		
Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus	+/-	+/-
Möglichst geringer Unterhaltungsaufwand	+	+/-
Klimaanpassung	+	-
<b>6. Der Maßnahmentyp ist mit den relevanten Zielvorgaben vereinbar:</b>		
Flächenertrag	-	-
Bearbeitbarkeit bzw. Zugänglichkeit	-	-
<b>7. Der Maßnahmentyp wird von der Öffentlichkeit voraussichtlich begrüßt:</b>		
Anlieger	-	-
Touristen	+/-	+/-

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die aufgestellten Kriterien relativ eindeutig für beide Blue Carbon Maßnahmentypen zu bewerten sind. Sowohl „Sommerdeichöffnungen“ als auch der „flächige Bodenabtrag“ führen zu einer Netto-Zunahme der C-Festlegung und sind weitgehend vereinbar mit den hier relevanten Gesetzen, Plänen und Strategien. Konfliktpotenzial ist v. a. mit Blick auf die Landwirtschaft und die öffentliche Unterstützung zu erwarten (vgl. hierzu auch Kapitel 3.2). Zu bedenken ist jedoch, dass Nutzen, Auswirkungen und Realisierungschancen einer Maßnahme immer auch von den örtlichen Randbedingungen abhängen (Geochemie, Hochwassergefahr, Flächenverfügbarkeit etc.). Diese kann bei einer so allgemeinen Bewertung von Maßnahmentypen nicht gebührend berücksichtigt werden, sodass eine ortsspezifische Betrachtung sicherlich zu Änderungen im Bewertungsergebnis führen würde. Dies gilt insbesondere für das Kosten-Nutzen-Verhältnis; eine Bewertung dieses Kriteriums ist ohne den konkreten Ortsbezug kaum möglich.

Die hier entwickelte Matrix bietet lediglich eine erste Orientierung bei der Bewertung von Blue Carbon Maßnahmentypen. In der jetzigen Form unterscheidet die Matrix beispielsweise noch nicht hinreichend, ob ein Maßnahmentyp im Konflikt mit einem der Kriterien steht, oder dieses nur nicht aktiv unterstützt (Bewertung also „neutral“ ausfällt). Auch eine Gewichtung der Kriterien erscheint sinnvoll, weil z.B. der grundsätzliche „Nutzen“ einer Maßnahme vermutlich von größerer Bedeutung ist als ein positiver Einfluss auf ein einzelnes Naturschutzgut.

Die Matrix sollte daher weiter ausdifferenziert und angepasst werden, sobald neue Erkenntnisse aus der Forschung und ggf. aus Blue Carbon-Pilotprojekten vorliegen. Einen Überblick zum weiteren Forschungsbedarf zu Blue Carbon gibt das nachfolgende Kapitel 5.

## 5. Weiterer Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf zu Blue Carbon in den Salzwiesen der Wattenmeer-Region wurde zwischen den Co-Autoren dieses Berichts, Dr. Peter Müller und Prof. Dr. Kai Jensen der Universität Hamburg, und weiteren führenden Wissenschaftler\*innen auf dem Gebiet diskutiert:

- **Dr. Kelly Elschot** (Wageningen University and Research, Wageningen, NL) arbeitet seit vielen Jahren zu Blue Carbon in den Salzwiesen der Niederlande und ist Pionierin auf dem Gebiet der Blue Carbon-Forschung im Wattenmeer.
- **Prof. Dr. Franziska Eller** (Aarhus University, DK) arbeitet zurzeit an der ersten Quantifizierung von Blue Carbon in den Wattenmeer-Salzwiesen der dänischen Küste.
- **Dr. Ketil Koop-Jakobsen** (Alfred-Wegener-Institut, Wattenmeerstation Sylt) hat langjährige Erfahrung im Bereich Salzwiesen-Biogeochemie und arbeitet zur Zeit im Rahmen der *Helmholtz-Initiative Climate Adaptation and Mitigation* zu C-Festlegung in Salzwiesen und Seegraswiesen in Nord- und Ostsee.
- **Prof. Dr. Martin Zimmer** (Leibniz Zentrum für Marine Tropenforschung, Bremen) hat Expertise im Bereich C-Dynamik in Küstenfeuchtgebieten sowie „Ökosystem-Design“.

Weiterer Forschungsbedarf wurde insbesondere zu den folgenden Bereichen identifiziert:

- Relevanz von nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgasemissionen (Methan und Lachgas) im C-Budget der Wattenmeer-Salzwiesen
- Relevanz allochthoner C-Einträge im C-Budget der Wattenmeer-Salzwiesen
- Potenzial zur Treibhausgasreduktion durch Wiedervernässung von Sommerpoldern
- Potenzial zur gesteigerten C-Festlegung durch Aufgabe der Entwässerung bzw. Herstellung einer natürlicheren Hydrologie
- Potenzial zur gesteigerten C-Festlegung durch Ausbreitung von *Spartina anglica*
- Optimiertes „Ökosystem-Design“ zur Maximierung von C-Festlegung (gezielte Steuerung ökosystemarer Prozesse und Funktionen zur Erreichung bestimmter Ziele)
- Potenzial zur gesteigerten C-Festlegung durch Regulation/Optimierung von direkten und indirekten Sedimenteinträgen
- Einfluss des Klimawandels (steigende atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, steigende Temperaturen, beschleunigter Meeresspiegelanstieg) auf Blue Carbon in der Wattenmeer-Region
- Einfluss gesteigerter Nährstoffeinträge auf die Stabilität von C-Vorräten im Boden

## Literatur

- ALLEN, J. R. L. 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews* 19:1155–1231.
- BAPTIST, M. J., P. DANKERS, J. CLEVERINGA, L. SITTONI, P. WILLEMSSEN, K. ELSCHOT, M. E. B. VAN PUIJENBROEK, AND M. HENDRIKS. 2019. A large-scale field experiments on salt marsh construction in the Ems estuary, the Netherlands. RCEM 2019" the 11th symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics: *book of abstracts* (pp. 95-95).
- BASTIAN, O., K. GRUNEWALD AND R.-W. SYRBE. 2012. Space and time aspects of ecosystem services, using the example of the EU Water Framework Directive, *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 8:5-16.
- DI BELLA, C. E., A. M. RODRÍGUEZ, E. JACOBO, R. A. GOLLUSCIO, AND M. A. TABOADA. 2015. Impact of cattle grazing on temperate coastal salt marsh soils. *Soil Use and Management* 31:299-307.
- BEUSEKOM, J. E. E. V., P. BOT, J. CARSTENSEN, A. GRAGE, K. KOLBE, H.-J. LENHART, J. PÄTSCH, T., PETENATI & J. RICK, 2017: Eutrophication. - In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany: o. S.
- BMU, 2018: Zustand der deutschen Nordseegewässer 2018. Aktualisierung der Anfangsbewertung nach § 45c, der Beschreibung des guten Zustands der Meeresgewässer nach § 45d und der Festlegung von Zielen nach § 45e des WHG zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Bonn: 191 S.
- BMUB, 2016: MSRL-Maßnahmenprogramm zum Meeresschutz der deutschen Nord- und Ostsee - Bericht gemäß §45h Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes. Bonn. - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: o. S.
- BRIDGHAM, S. D., J. P. MEGONIGAL, J. K. KELLER, N. B. BLISS, AND C. TRETTIN. 2006. The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands* 26:889–916.
- VAN DE BROEK, M., C. D, VANDENDRIESSCHE, D. POPPELMONDE, R. MERCKX, S. TEMMERMAN, AND G. GOVERS. 2018. Long-term organic carbon sequestration in tidal marsh sediments is dominated by old-aged allochthonous inputs in a macrotidal estuary. *Global Change Biology* 24:2498–2512.
- BSH, 2012: Monitoring-Kennblatt 1320 - FFH-LRT Schlickgrasbestände. Stand: 2012-06-15. - Bundesländer-Messprogramm Meeresumwelt Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg: 12 S.
- BULSECO, A. N., A. E. GIBLIN, J. TUCKER, A. E. MURPHY, J. SANDERMAN, K. HILLER-BITTROLFF, AND J. L. BOWEN. 2019. Nitrate addition stimulates microbial decomposition of organic matter in salt marsh sediments. *Global Change Biology* 25:3224–3241.
- BUNDESREGIERUNG, 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dez. 2008 beschlossen. - 73 S. + Anhang.
- BUNDESREGIERUNG, 2011: Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 31. Aug. 2011 beschlossen. - 54 S. + Anhang.
- BUNDESREGIERUNG, 2015: Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Stand: 15. Nov. 2015. - 98 S. + Anhang.
- BURDEN, A., R. A. GARBUTT, C. D. EVANS, D. L. JONES, AND D. M. COOPER. 2013. Carbon sequestration and biogeochemical cycling in a saltmarsh subject to coastal managed realignment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 120:12–20.
- BÜTTGER, H., C. BUSCHBAUM, P. DOLMER, A. GITTENBERGER, K. JENSEN, S. KABUTA, K. D. LACKSCHEWITZ & K. TROOST, 2017: Alien species. - In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany: o. S.

- CHEN, Y., G. CHEN, AND Y. YE. 2015. Coastal vegetation invasion increases greenhouse gas emission from wetland soils but also increases soil carbon accumulation. *Science of the Total Environment* 526:19-28.
- CASTENSON, K.L. AND M.C. RABENHORST. 2006. Indicator of Reduction in Soil (IRIS). *Soil Science Society of America Journal* 70:1222–1226.
- CHENG, X., J. CHEN, Y. LUO, R. HENDERSON, S. AN, Q. ZHANG, J. CHEN, AND B. LI. 2008. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes. *Geoderma* 145:177–184.
- CHMURA, G. L., S. C. ANISFELD, D. R. CAHOON, AND J. C. LYNCH. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17:22-1-22–11.
- CRAFT, C., S. BROOME, AND C. CAMPBELL. 2002. Fifteen years of vegetation and soil development after brackish-water marsh creation. *Restoration Ecology* 10:248–258.
- CRAFT, C., P. MEGONIGAL, S. BROOME, J. STEVENSON, R. FREESE, J. CORNELL, L. ZHENG, AND J. SACCO. 2003. The pace of ecosystem development of constructed *Spartina alterniflora* marshes. *Ecological Applications* 13:1417–1432.
- CWSS, 2010: Wadden Sea Plan 2010. - 11th trilateral governmental Conference on the protection of the Wadden Sea Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven: o.S.
- CWSS, 2014: Climate Change Adaption Strategy (final). Ministerial Council Declaration, Annex 4. 12th Trilateral Governmental Conference in the protection of the Wadden Sea. - Common Wadden Sea Secretariat, Tondern: o.S.
- CWSS, 2017: Trilateral Climate Change Adaption Strategy - Monitoring Report. - Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven: 31 S.
- DAVIDSON, K. E., M. S. FOWLER, M. W. SKOV, S. H. DOERR, N. BEAUMONT, AND J. N. GRIFFIN. 2017. Livestock grazing alters multiple ecosystem properties and services in salt marshes: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* 54:1395–1405.
- DEEGAN, L. A., D. S. JOHNSON, R. S. WARREN, B. J. PETERSON, J. W. FLEEGER, S. FAGHERAZZI, AND W. M. WOLLHEIM. 2012. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature* 490:388–392.
- DIJKEMA, K.S. 1997. Impact prognosis for salt marshes from subsidence by gas extraction in the Wadden Sea. *Journal of Coastal Research* 13/4: 1294–1304.
- DREXLER, J. Z., I. WOO, C. C. FULLER, AND G. NAKAI. 2019. Carbon accumulation and vertical accretion in a restored versus historic salt marsh in southern Puget Sound, Washington, United States. *Restoration Ecology* 27:1117–1127.
- DUARTE, C. M., I. J. LOSADA, I. E. HENDRIKS, I. MAZARRASA, AND N. MARBÀ. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change* 3:961–968.
- ELSCHOT, K., J. P. BAKKER, S. TEMMERMAN, J. VAN DE KOPPEL, AND T. J. BOUMA. 2015. Ecosystem engineering by large grazers enhances carbon stocks in a tidal salt marsh. *Marine Ecology Progress Series* 537:9–21.
- ESSELINK, P., W. E. V. DUIN, J. BUNJE, J. CREMER, E. O. FOLMER, J. FRIKKE, M. GLAHN, A. V. D. GROOT, N. HECKER, U. HELLWIG, K. JENSEN, P. KÖRBER, J. PETERSEN & M. STOCK, 2017: Salt marshes. - In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany: o.S.
- EUROPEAN COMMISSION, 2019: Fitness Check of the Water Framework Directive and the Floods Directive. Commission Staff Working Document. - Brüssel: 140 S. + Anhang S.
- FENG, J., J. ZHOU, L. WANG, X. CUI, C. NING, H. WU, X. ZHU, AND G. LIN. 2017. Effects of short-term invasion of *Spartina alterniflora* and the subsequent restoration of native mangroves on the soil organic carbon, nitrogen and phosphorus stock. *Chemosphere* 184:774–783.
- FGE EMS, 2015: Internationaler Bewirtschaftungsplan nach Artikel 13 Wasserrahmenrichtlinie für die Flussgebietseinheit Ems -Bewirtschaftungszeitraum 2015 -2021. - 226 S.
- FGE EMS, 2019: Wichtige Wasserbewirtschaftungsfragen in der Flussgebietseinheit Ems (FGE Ems) zur Aktualisierung des Bewirtschaftungsplans 2021-2027. Anhörungsdokument für den deutschen Teil der FGE Ems gem. Art. 14 WRRL und § 83 WHG. - 33 S.

- FORD, H., A. GARBUTT, L. JONES, AND D. L. JONES. 2012. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from a temperate salt marsh: Grazing management does not alter Global Warming Potential. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 113:182–191.
- FORD, M. A., D. R. CAHOON, AND J. C. LYNCH. 1999. Restoring marsh elevation in a rapidly subsiding salt marsh by thin-layer deposition of dredged material. *Ecological Engineering* 12:189–205.
- FRENCH, J. R., AND H. BURNINGHAM. 2009. Restoration of an eroded estuarine foreshore using cohesive dredge material, Orwell Estuary, UK. *Journal of Coastal Research*:1444–1448.
- GESCHÄFTSSTELLE MASTERPLAN EMS, 2017: Masterplan Ems 2050. Die ökologischen und ökonomischen Interessen der Emsregion. - Oldenburg: 36 S.
- GRANSE, D., S. SUCHROW, AND K. JENSEN. 2020. Long-term invasion dynamics of *Spartina* increase vegetation diversity and geomorphological resistance of salt marshes against sea level rise. *Biological Invasions* 23:871–833.
- HARVEY, R. J., A. GARBUTT, S. J. HAWKINS, AND M. W. SKOV. 2019. No Detectable Broad-Scale Effect of Livestock Grazing on Soil Blue-Carbon Stock in Salt Marshes. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7:1–12.
- HERR, D. PIDGEON, E. AND LAFFOLEY, D. (eds.) (2012). *Blue Carbon Policy Framework: Based on the discussion of the International Blue Carbon Policy Working Group*. Gland, Switzerland: IUCN and Arlington, USA: C. vi+39pp.
- HICKS, W. S., AND G. M. B. AND R. W. FITZPATRICK. 1999. East Trinity Acid Sulfate Soils Part 1: Environmental Hazards. Report No.:14/99.
- HOFSTEDT, J.L.A. 2003. Integrated management of artificially created salt marshes in the Wadden Sea of Schleswig-Holstein, Germany. *Wetlands Ecology and Management* 11:183–194.
- HOWE, A. J., J. F. RODRÍGUEZ, AND P. M. SACO. 2009. Surface evolution and carbon sequestration in disturbed and undisturbed wetland soils of the Hunter estuary, southeast Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 84:75–83.
- IBP EMS, 2016: Integrierter Bewirtschaftungsplan Emsästuar für Niedersachsen und die Niederlande, Stand: Nov. 2016. - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Rijksoverheid & Provincie Groningen, 109 S.
- KIRWAN, M. L., AND J. P. MEGONIGAL. 2013. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature* 504:53–60.
- KIRWAN, M. L., S. TEMMERMAN, E. E. SKEEHAN, G. R. GUNTENSPERGEN, AND S. FAGHERAZZI. 2016. Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature climate change* 6:253–260.
- KROEGER, K. D., S. CROOKS, S. MOSEMAN-VALTIERRA, AND J. TANG. 2017. Restoring tides to reduce methane emissions in impounded wetlands: A new and potent Blue Carbon climate change intervention. *Scientific Reports* 7:1–12.
- LANGLEY, J. A., K. L. MCKEE, D. R. CAHOON, J. A. CHERRY, AND J. P. MEGONIGAL. 2009. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates marsh elevation gain, counterbalancing sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:6182–6186.
- LANGLEY, J. A., AND J. P. MEGONIGAL. 2010. Ecosystem response to elevated CO<sub>2</sub> levels limited by nitrogen-induced plant species shift. *Nature* 466:96–99.
- LANGLEY, J. A., T. J. MOZDZER, K. A. SHEPARD, S. B. HAGERTY, AND J. P. MEGONIGAL. 2013. Tidal marsh plant responses to elevated CO<sub>2</sub>, nitrogen fertilization, and sea level rise. *Global Change Biology* 19:1495–503.
- LAWA, 2014: Empfehlungen zur koordinierten Anwendung der EG-MSRL und EG-WRRL. Parallelen und Unterschiede. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Ständiger Ausschuss "Oberirdische Gewässer und Küstengewässer (LAWA-AO). - 40 S. + Anhang.
- LIAO, C., Y. LUO, L. JIANG, X. ZHOU, X. WU, C. FANG, J. CHEN, AND B. LI. 2007. Invasion of *Spartina alterniflora* enhanced ecosystem carbon and nitrogen stocks in the Yangtze Estuary, China. *Ecosystems* 10:1351–1361.
- LOWE, S.M., BROWNE, M. AND DE POORTER, M. 2004. 100 of the Worlds Worst Invasive Alien Species: A Selection From The Global Invasive Species Database Published by The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission

- (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 12pp. First published as special lift-out in *Aliens* 12, December 2000. Updated and reprinted version: November 2004.
- MACREADIE, P. I., A. ANTON, J. A. RAVEN, N. BEAUMONT, R. M. CONNOLLY, D. A. FRIESS, J. J. KELLEWAY, H. KENNEDY, T. KUWAE, P. S. LAVERY, C. E. LOVELOCK, D. A. SMALE, E. T. APOSTOLAKI, T. B. ATWOOD, J. BALDOCK, T. S. BIANCHI, G. L. CHMURA, B. D. EYRE, J. W. FOURQUREAN, J. M. HALL-SPENCER, M. HUXHAM, I. E. HENDRIKS, D. KRAUSE-JENSEN, D. LAFFOLEY, T. LUISETTI, N. MARBÀ, P. MASQUE, K. J. MCGLATHERY, J. P. MEGONIGAL, D. MURDIYARSO, B. D. RUSSELL, R. SANTOS, O. SERRANO, B. R. SILLIMAN, K. WATANABE, AND C. M. DUARTE. 2019. The future of Blue Carbon science. *Nature Communications* 10:1–13.
- MARTIN, R. M., AND S. MOSEMAN-VALTIERRA. 2015. Greenhouse Gas Fluxes Vary Between *Phragmites Australis* and Native Vegetation Zones in Coastal Wetlands Along a Salinity Gradient. *Wetlands* 35:1021–1031.
- MCLEOD, E., G. L. CHMURA, S. BOUILLON, R. SALM, M. BJÖRK, C. M. DUARTE, C. E. LOVELOCK, W. H. SCHLESINGER, AND B. R. SILLIMAN. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:552–560.
- MEGONIGAL, J. P., M. E. HINES, AND P. T. VISSCHER. 2004. Anaerobic metabolism: linkages to trace gases and aerobic processes. Pages 317–424 in W. H. Schlesinger, editor. *Biogeochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, UK.
- MORRIS, J. T., AND P. M. BRADLEY. 1999. Effects of nutrient loading on the carbon balance of coastal wetland sediments. *Limnology and Oceanography* 44:699–702.
- MORRIS, J. T., AND A. JENSEN. 1998. The carbon balance of grazed and non-grazed *Spartina anglica* saltmarshes at Skallingen, Denmark. *Journal of Ecology* 86:229–242.
- MORRIS, J. T., P. V. SUNDARESHWAR, C. T. NIETCH, B. KJERFVE, AND D. R. CAHOON. 2002. Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology* 83:2869–2877.
- MÜLLER, P., H. T. DO, K. JENSEN, AND S. NOLTE. 2019a. Origin of organic carbon in the topsoil of Wadden Sea salt marshes. *Marine Ecology Progress Series* 624:39–50.
- MÜLLER, P., N. LADIGES, A. JACK, G. SCHMIEDL, L. KUTZBACH, K. JENSEN, AND S. NOLTE. 2019b. Assessing the long-term carbon-sequestration potential of the semi-natural salt marshes in the European Wadden Sea. *Ecosphere* 10:e02556.
- MÜLLER, P., D. GRANSE, S. NOLTE, H. T. DO, M. WEINGARTNER, S. HOTH, AND K. JENSEN. 2017. Top-down control of carbon sequestration: Grazing affects microbial structure and function in salt marsh soils: Grazing. *Ecological Applications* 27:1435–1450.
- MÜLLER, P., D. GRANSE, S. NOLTE, M. WEINGARTNER, S. HOTH, AND K. JENSEN. 2020. Unrecognized controls on microbial functioning in Blue Carbon ecosystems: The role of mineral enzyme stabilization and allochthonous substrate supply. *Ecology and Evolution* 10:998–1011.
- MÜLLER, P., R. N. HAGER, J. E. MESCHTER, T. J. MOZDZER, J. A. LANGLEY, K. JENSEN, AND J. P. MEGONIGAL. 2016. Complex invader-ecosystem interactions and seasonality mediate the impact of non-native *Phragmites* on CH<sub>4</sub> emissions. *Biological Invasions* 18:2635–2647.
- MÜLLER, P., L. M. SCHILE-BEERS, T. J. MOZDZER, G. L. CHMURA, T. DINTER, Y. KUZYAKOV, A. V. DE GROOT, P. ESSELINK, C. SMIT, A. D'ALPAOS, C. IBÁÑEZ, M. LAZARUS, U. NEUMEIER, B. J. JOHNSON, A. H. BALDWIN, S. A. YARWOOD, D. I. MONTEMAYOR, Z. YANG, J. WU, K. JENSEN, AND S. NOLTE. 2018. Global-change effects on early-stage decomposition processes in tidal wetlands-implications from a global survey using standardized litter. *Biogeosciences* 15:3189–3202.
- NEEDELMAN, B. A., I. M. EMMER, S. EMMETT-MATTOX, S. CROOKS, J. P. MEGONIGAL, D. MYERS, M. P. J. ORESKA, AND K. MCGLATHERY. 2018. The Science and Policy of the Verified Carbon Standard Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. *Estuaries and Coasts* 41:2159–2171.
- NELLEMANN, C. CORCORAN, E. C. M. DUARTE, L. VALDÉS, C. DE YOUNG, L. FONSECA, AND G. GRIMSDITCH. (EDS). 2009. *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment. GRID-Arendal: o.S.

- NLWKN, 2010: Umsetzung der EG-WRRL-Bewertung des ökologischen Zustands der niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer (Stand: Bewirtschaftungsjahr 2009). Küstengewässer und Ästuare 1/2010. - 59 S.
- NMU, 2012a: Empfehlungen für eine niedersächsische Klimaschutzstrategie. - Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Regierungskommission Klimaschutz, 148 S. + Anhang.
- NMU, 2012b: Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. - Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Regierungskommission Klimaschutz, 145 S. + Anhang.
- NMU, 2015a: Niedersächsischer Beitrag zu den Bewirtschaftungsplänen 2015 bis 2021 der Flussgebiete Elbe, Weser, Ems und Rhein nach § 118 des Niedersächsischen Wassergesetzes bzw. nach § 13 der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover. - Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover: 196 S. + Anhang.
- NMU, 2015b: Niedersächsischer Beitrag zu den Maßnahmenprogrammen 2015 bis 2021 der Flussgebiete Elbe, We-ser, Ems und Rhein nach § 117 des Niedersächsischen Wassergesetzes bzw. nach § 11 der EG-Wasserrahmenrichtlinie. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover. - Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover: 129 S. + Anhang.
- NOLTE, S., F. MÜLLER, M. SCHUERCH, A. WANNER, P. ESSELINK, J. P. BAKKER, AND K. JENSEN. 2013a. Does livestock grazing affect sediment deposition and accretion rates in salt marshes? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 135:296–305.
- NOLTE, S., E. KOPPENAAL, P. ESSELINK, K. DIJKEMA, M. SCHUERCH, A. DE GROOT, J. BAKKER AND S. TEMMERMAN. 2013b. Measuring sedimentation in tidal marshes: A review on methods and their applicability in biogeomorphological studies. *Journal of Coastal Conservation* 17:301-325.
- NOLTE, S., A. WANNER, M. STOCK, AND K. JENSEN. 2019. *Elymus athericus* encroachment in Wadden Sea salt marshes is driven by surface elevation change. *Applied Vegetation Science* 22:454–464.
- OLSEN, Y. S., A. DAUSSE, A. GARBUTT, H. FORD, D. N. THOMAS, AND D. L. JONES. 2011. Cattle grazing drives nitrogen and carbon cycling in a temperate salt marsh. *Soil Biology and Biochemistry* 43:531–541.
- PHILIPPART, C. J. M., L. MEKKES, C. BUSCHBAUM, K. M. WEGNER & K. LAURSEN, 2017: Climate Ecosystems. - In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany: o.S.
- POFFENBARGER, H. J., B. A. NEEDELMAN, AND J. P. MEGONIGAL. 2011. Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. *Wetlands* 31:831–842.
- READER, J., AND C. CRAFT. 1999. Comparison of wetland structure and function on grazed and ungrazed salt marshes. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society* 115:236–249.
- ROOTH, J. E., AND J. C. STEVENSON. 2000. Sediment deposition patterns in *Phragmites australis* communities: Implications for coastal areas threatened by rising sea-level. *Wetlands Ecology and Management* 8:173–183.
- RYBCZYK, J., S. CROOKS, K. O'CONNELL, D. DEVIER, AND K. POPPE. 2014. Snohomish Estuary Blue Carbon Assessment. Report by Environmental Science Associates, Western Washington University, EarthCorps, and Restore America's Estuaries: 122 S.
- SAINTILAN, N., ROGERS, K., MAZUMDER, D. AND C. WOODROFFE. 2013. Allochthonous and autochthonous contributions to carbon accumulation and carbon store in southeastern Australian coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 128: 84-92.
- SLOCUM, M. G., I. A. MENDELSSOHN, AND N. L. KUHN. 2005. Effects of sediment slurry enrichment on salt marsh rehabilitation: Plant and soil responses over seven years. *Estuaries* 28:519–528.
- SPIVAK, A. C., J. SANDERMAN, J. L. BOWEN, E. A. CANUEL, AND C. S. HOPKINSON. 2019. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Nature Geoscience* 12:685–692.

- STAVER, L. W., J. C. STEVENSON, J. C. CORNWELL, N. J. NIDZIEKO, K. W. STAVER, M. S. OWENS, L. LOGAN, C. KIM, AND S. Y. MALKIN. 2020. Tidal Marsh Restoration at Poplar Island: II. Elevation Trends, Vegetation Development, and Carbon Dynamics. *Wetlands* 40:1687-1701.
- STOCK, M. 2015. Das Schlickgras-Dilemma. In: MELUR 2015, Jahresbericht 2015 - Jagd und Artenschutz. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR), Kiel: 115-118.
- SUCHROW, S., N. POHLMANN, M. STOCK, AND K. JENSEN. 2012. Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 98:71-83.
- WANG, F., K. D. KROEGER, M. E. GONNEEA, J. W. POHLMAN, AND J. TANG. 2019. Water salinity and inundation control soil carbon decomposition during salt marsh restoration: An incubation experiment. *Ecology and Evolution* 9:1911-1921.
- WARE, S., S. G. BOLAM & H. REES, 2010: Impact and recovery associated with the deposition of capital dredgings at UK disposal sites: Lessons for future licensing and monitoring. - *Marine Pollution Bulletin* 60: 79-90.
- WOLLENBERG, J. T., A. BISWAS, AND G. L. CHMURA. 2018. Greenhouse gas flux with reflooding of a drained salt marsh soil. *Biodiversity and Conservation: PeerJ* 6:e5659.
- WWF DEUTSCHLAND, 2019: Lebensraum Tideeems. Ökosystemleistungen 1930-2010-2050. Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Zukunftsperspektive Tideeems"; Gemeinschaftsprojekt der Umweltverbände BUND Niedersachsen, NABU Niedersachsen und WWF Deutschland. - WWF Deutschland, Berlin: 56 S.
- XIANG, J., D. LIU, W. DING, J. YUAN, AND Y. LIN. 2015. Invasion chronosequence of *Spartina alterniflora* on methane emission and organic carbon sequestration in a coastal salt marsh. *Atmospheric Environment* 112:72-80.
- XU, X., X. ZOU, L. CAO, N. ZHAMANGULOVA, Y. ZHAO, D. TANG, AND D. LIU. 2014. Seasonal and spatial dynamics of greenhouse gas emissions under various vegetation covers in a coastal saline wetland in southeast China. *Ecological Engineering* 73:469-477.
- YANG, W., S. Q. AN, H. ZHAO, S. FANG, L. XIA, Y. XIAO, Y. QIAO, AND X. CHENG. 2015. Labile and Recalcitrant Soil Carbon and Nitrogen Pools in Tidal Salt Marshes of the Eastern Chinese Coast as Affected by Short-Term C4 Plant *Spartina alterniflora* Invasion. *Clean - Soil, Air, Water* 43:872-880.
- YANG, W., S. AN, H. ZHAO, L. XU, Y. QIAO, AND X. CHENG. 2016a. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon and nitrogen pools sizes, stability, and turnover in a coastal salt marsh of eastern China. *Ecological Engineering* 86:174-182.
- YANG, W., Y. YAN, F. JIANG, X. LENG, X. CHENG, AND S. AN. 2016b. Response of the soil microbial community composition and biomass to a short-term *Spartina alterniflora* invasion in a coastal wetland of eastern China. *Plant and Soil* 408:443-456.
- YANG, W., H. ZHAO, X. CHEN, S. YIN, X. CHENG, AND S. AN. 2013. Consequences of short-term C4 plant *Spartina alterniflora* invasions for soil organic carbon dynamics in a coastal wetland of Eastern China. *Ecological Engineering* 61:50-57.
- YU, O. T., AND G. L. CHMURA. 2009. Soil carbon may be maintained under grazing in a St Lawrence Estuary tidal marsh. *Environmental Conservation* 36:312-320.
- YUAN, JUNJI, DING, WEIXIN, LIU, DEYAN, KANG, HOJEONG, FREEMAN, CHRIS, XIANG, JIAN, LIN, YONGXIN, JJ, DING, WX, LIU, DY, KANG, H, FREEMAN, C, XIANG, J, LIN, AND YX. 2015. Exotic *Spartina alterniflora* invasion alters ecosystem-atmosphere exchange of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O and carbon sequestration in a coastal salt marsh in China. *Global change biology* 21:1567-1580.

# Impressum

## Zitiervorschlag:

Martens, M., Müller, P., Gösele, C., Jensen, K., Schuchardt, B. (2021). Blue Carbon im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Grundlagen für eine Prüfung und Bewertung möglicher Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstofffixierung in Salzwiesen. Berichte aus dem Nationalpark und der Biosphärenregion Niedersächsisches Wattenmeer 2021–02.

**Bilder Umschlag:** Titelseite/Rückseite – Natürlich entstandene und anthropogen überprägte Salzwiesen in der Leybucht (Foto: Norbert Hecker/NLPV Nds. Wattenmeer)

## Autorenschaft:

Mike Martens

Bioconsult Schuchardt & Scholle GbR Bremen, Auf der Muggenburg 30, D-28217 Bremen,  
[martens@bioconsult.de](mailto:martens@bioconsult.de)

Prof. Dr. Peter Müller

Universität Münster, Institut für Landschaftsökologie, Heisenbergstr. 2, D-48149 Münster,  
[mueller.p@uni-muenster.de](mailto:mueller.p@uni-muenster.de)

Clarisse Gösele

Universität Hamburg, Institut für Pflanzenwissenschaften und Mikrobiologie, Ohnhorststr. 18,  
D-22609 Hamburg, [clarisse.goesele@uni-hamburg.de](mailto:clarisse.goesele@uni-hamburg.de)

Prof. Dr. Kai Jensen

Universität Hamburg, Institut für Pflanzenwissenschaften und Mikrobiologie, Ohnhorststr. 18,  
D-22609 Hamburg, [kai.jensen@uni-hamburg.de](mailto:kai.jensen@uni-hamburg.de)

Bastian Schuchardt

Bioconsult Schuchardt & Scholle GbR Bremen, Auf der Muggenburg 30, D-28217 Bremen,  
[schuchardt@bioconsult.de](mailto:schuchardt@bioconsult.de)

**Herausgegeben** durch die  
Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer  
Virchowstr. 1, D-26382 Wilhelmshaven  
[Poststelle@nlpvw.niedersachsen.de](mailto:Poststelle@nlpvw.niedersachsen.de)  
[www.nationalpark-wattenmeer.de](http://www.nationalpark-wattenmeer.de)

Schriftleitung der Berichtereihe: Dr. Rune Michaelis  
Ansprechpartner für diesen Band: Bernd Oltmanns



Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>).

Berichte aus dem Nationalpark und der Biosphärenregion Niedersächsisches Wattenmeer 2021–02

**ISSN:** 2940-8350 (online)

**DOI:** 10.4126/FRL01-006472657

Wilhelmshaven, Dezember 2023

