



baltic.earth

Earth System Science for the Baltic Sea Region

Klimawandel in der Ostsee 2021 Faktenblatt

Klimawandel



Herausgeber der englischsprachigen Originalversion:
Helsinki Commission – HELCOM
Katajanokanlaituri 6 B
00160 Helsinki, Finland
www.helcom.fi

Englischsprachige Originalversion veröffentlicht als BSEP No. 180, 2021.

Dieses Dokument ist Teil der „Baltic Sea Environment Proceedings (BSEP)“, einer Serie von HELCOM „Flagship“-Publikationen, die seit dem Inkrafttreten der Helsinki Konvention 1980 veröffentlicht werden. Der englischen Originalversion dieses Faktenblatts wurde durch die Mitglieder der Helsinki-Kommission zugestimmt, jedoch können Ansichten einzelner Autoren von denen der Helsinki-Kommission oder ihrer Mitglieder abweichen. Sämtliche Karten in dieser Publikation erfüllen ausschließlich illustrative Zwecke und geben nicht notwendigerweise den exakten Verlauf der Grenzen souveräner Länder bzw. Verwaltungseinheiten wider.

Die englischsprachige Originalversion dieser Veröffentlichung wurde vom gemeinsamen HELCOM/Baltic Earth Expert Network on Climate Change (EN CLIME) erarbeitet. Sie sollte zitiert werden als:

“Climate Change in the Baltic Sea. 2021 Fact Sheet. Baltic Sea Environment Proceedings n°180. HELCOM/Baltic Earth 2021.”

© 2021 Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission – HELCOM). ISSN: 0357-2994. DOI 10.12754/misc-2022-0001

Alle Rechte vorbehalten. Die in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen oder Auszüge daraus, mit Ausnahme von Bildern und grafischen Elementen, die nicht von HELCOM oder Baltic Earth stammen und als solche gekennzeichnet sind, dürfen ohne vorherige Genehmigung vervielfältigt werden, vorausgesetzt, dass die vollständige Referenz der Veröffentlichung wie oben angegeben wird..

Autoren:

Markus Ahola, Lena Bergström, Mats Blomqvist, Dieter Boedeker, Florian Börgel, Ida Carlén, Thomas Carlund, Jacob Carstensen, Jesper Philip Aagaard Christensen, Martyn Futter, Elie Gaget, Oksana Glibko, Matthias Gröger, Volker Dierschke, Christian Dieterich, Morten Frederiksen, Anders Galatius, Bo Gustafsson, Claudia Frauen, Antti Halkka, Christina Halling, Jürgen Holfort, Magnus Huss, Kari Hyytiäinen, Klaus Jürgens, Mart Jüssi, Meri Kallasvuo, Markus Kankainen, Agnes ML Karlsson, Martin Karlsson, Anders Kiessling, Erik Kjellström, Antanas Kontautas, Dorte Krause-Jensen, Karol Kuliński, Sanna Kuningas, Jukka Käyhkö, Janika Laht, Ari Laine, Gesine Lange, Antti Lappalainen, Terhi Laurila, Maiju Lehtiniemi, Knut-Olof Lerche, Urmas Lips, Georg Martin, Michelle McCrackin, H.E. Markus Meier, Noora Mustamäki, Bärbel Müller-Karulis, Rahmat Naddafi, Lauri Niskanen, Antonia Nyström Sandman, Jens Olsson, Diego Pavón-Jordán, Jonas Pålsson, Mika Rantanen, Artūras Razinkovas-Baziukas, Gregor Rehder, Jan H. Reißmann, Martin Reutgård, Stuart Ross, Anna Rutgersson, Jarkko Saarinen, Lauri Saks, Oleg Savchuk, Mikhail Sofiev, Katarzyna Spich, Jani Särkkä, Markku Viitasalo, Jouni Vielma, Joonas Virtasalo, Isa Wallin, Ralf Weisse, Johan Wikner, Wenyan Zhang, Eduardo Zorita, Örjan Östman

Die folgenden Personen haben die Erstellung des Faktenblatts zum Klimawandel unterstützt::

Maris Arro, Paweł Banaś, Imre Banyasz, Edyta Białowas, Penina Blankett, Matthias Brenner, Laura Briekmane, Michele Casini, Johan Dannewitz, Michael Dähne, Jacques Delsalle, Rune Dietz, Łukasz Dziemian, Anthony David Fox, Oksana Glibko, Magnus Huss, Norbert Häubner, Birgit Hünicke, Tamara Jadczyzyn, Eglė Jakubavičiūtė, Dominika Juskowska, Laura Kaikkonen, Magdalena Kamińska, Agnes Karlsson, Marcin Kawka, Ilga Kokorite, Harri Kuosa, Joakim Lagner, Kristina Lehnert, Adam Lejk, Peter Löwe, Katarina Magnusson, Sofia Malmsten, Piotr Margoński, Johanna Mattila, Iwona Pawliczka, Liisa Pietola, Maris Plikss, Konrad Prandecki, Marcus Reckermann, Berit Recklebe, Marta Ruiz, Daria Ryabchuk, Hanna Sjölund, Piotr Skowron, Miriam Sollich, Henrik Svedäng, Agata Świącka, Morten Tange, Maciej Tomczak, Lasse Tor, Emma Undeman, Jacek Walczak, Tamara Zalewska, Sergey Zhuravlev, Marek Zieliński

EU-Projekt FutureMARES (<https://www.futuremares.eu/>)

Wir danken vier anonymen und unabhängigen Gutachtern für ihre detaillierten und konstruktiven Kommentare, die erheblich zur Qualität dieses Faktenblatts beigetragen haben.

Herausgeber der englischsprachigen Originalversion: Jannica Haldin, Petra Kääriä, H.E. Markus Meier, Jonas Pålsson
Layout: Dominik Littfass

Die deutsche Übersetzung wurde gemeinsam erstellt von Barbara Hentzsch, Kristin Beck, Markus Meier (alle Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und Marcus Reckermann (Helmholtz-Zentrum Hereon). Wir danken Johanna Schumacher (IOW) für Hilfe bei der Übersetzung des Abschnitts "Ökosystemleistungen" und Beate Meiners (Hereon) für die graphische Umsetzung.

Die deutsche Version sollte zitiert werden als:

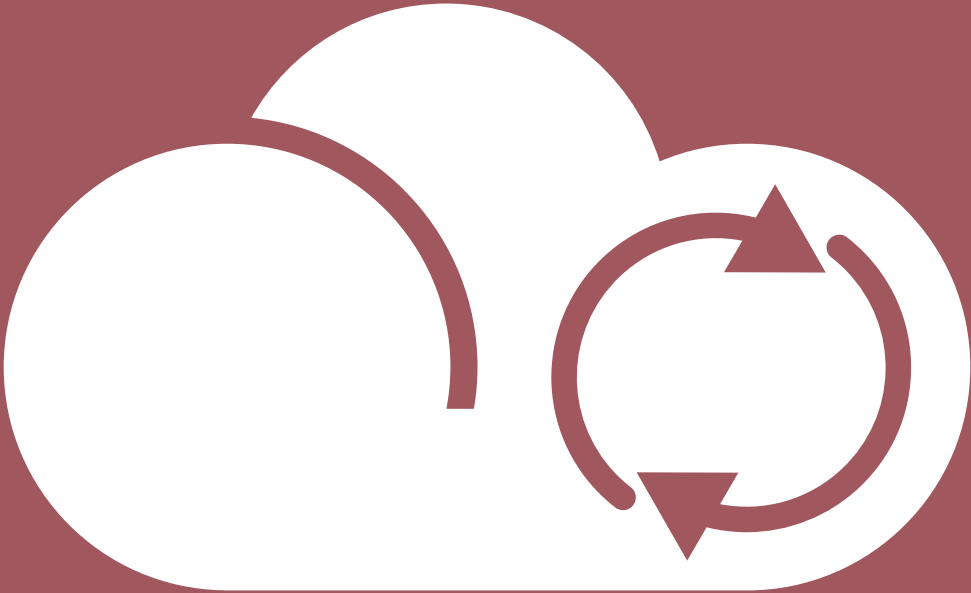
Klimawandel in der Ostsee 2021 Faktenblatt, Deutsche Übersetzung von "Climate Change in the Baltic Sea. 2021 Fact Sheet. Baltic Sea Environment Proceedings n°180. HELCOM/Baltic Earth 2021", 2022. DOI 10.12754/misc-2022-0003



Inhalt

Die Ostsee: Ein Meer im Wandel.....	6	Indirekte Parameter: Ökosysteme.....	36
Das Expertennetzwerk zum Klimawandel in der Ostsee		Sauerstoff.....	38
– EN CLIME.....	7	Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse.....	39
Die Klimafolgenkarte.....	7	Benthische Habitate.....	40
Bewertung des Konfidenzniveaus.....	7	Küsten- und Wanderfische.....	41
Erfasste Parameter.....	8	Pelagische und bodennahe Fische.....	42
Begutachtung der Kernbotschaften.....	8	Wasservögel.....	43
Der Klimawandel und potenzielle Maßnahmen.....	8	Meeressäuger.....	44
Verbindungen zwischen den Parametern.....	9	Nicht-einheimische Arten.....	45
Die Ostsee im Klima der Zukunft.....	10	Marine Schutzgebiete.....	46
Projektionen nach dem mittleren Klimaszenario RCP4.5.....	10	Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung.....	47
		Ökosystemfunktionen.....	48
Direkte Parameter (Überblick).....	12	Indirekte Parameter: Nutzung durch den Menschen.....	50
Indirekte Parameter: Ökosystem (Überblick).....	14	Offshore-Windparks.....	52
Indirekte Parameter: Nutzung durch den Menschen		Küstenschutz.....	53
(Überblick).....	16	Schifffahrt.....	54
Direkte Parameter.....	18	Tourismus.....	55
Lufttemperatur.....	20	Fischerei.....	56
Wassertemperatur.....	21	Aquakultur.....	57
Großräumige atmosphärische Zirkulation.....	22	Marine Kohlenstoffspeicherung.....	58
Meereis.....	23	Ökosystemleistungen von Meer und Küste.....	59
Sonneneinstrahlung.....	24		
Salzgehalt und Salzwassereinträge.....	25	Politische Verknüpfungen.....	61
Schichtung.....	26	Referenzen.....	62
Niederschlag.....	27		
Flussabfluss.....	28		
Karbonatchemie.....	29		
Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre.....	30		
Meeresspiegel.....	31		
Wind.....	32		
Wellen.....	33		
Sedimentverlagerungen.....	34		





Der Klimawandel

wirkt sich vielfältig auf die Ostsee und ihre Umwelt aus. Es wird zum Beispiel erwartet, dass die Wassertemperatur und der Meeresspiegel ansteigen, und die Eisbedeckung abnimmt, mit Folgen für Ökosysteme und Lebewesen. Bei einigen Arten werden Verschiebungen in den Verbreitungsgebieten erwartet, während für bodenlebende Organismen eine geringere Produktivität und für Ringelrobben ein reduzierterer Bruterfolg angenommen wird. Neben den Ökosystemen ist auch die menschliche Nutzung des Meeres betroffen. So werden die Fanggebiete der Fischerei den verschobenen Verbreitungsgebieten folgen. In Aquakultur werden zukünftig mehr bzw. andere Arten gezüchtet. Die meisten Ökosystemleistungen werden beeinflusst, und all dies ist nur eine Auswahl der zu erwartenden Änderungen.

Dieses Faktenblatt enthält aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zu den bisherigen und erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Ostsee. Es soll politische Entscheidungsträger unterstützen, wendet sich aber auch an die Öffentlichkeit. Alle sieben Jahre ist eine Aktualisierung dieser Zusammenstellung geplant.

Die Ostsee: Ein Meer im Wandel

Einleitung



Die Auswirkungen des Klimawandels sind in der Ostsee unübersehbar. Die Wassertemperatur steigt, die Eisausdehnung nimmt ab, und im Norden der Region nimmt der durchschnittliche Jahresniederschlag zu. Diese Veränderungen wirken sich auf die Natur der Ostsee, ihre Ökosysteme und Ökosystemleistungen aus, aber auch auf die an das Meer gebundenen menschlichen Aktivitäten. Viele Zugvögel haben ihr Überwinterungsgebiet nach Norden verlagert, die Zahl der Warmwasserfischarten (z. B. Stichlinge) nimmt zu, das Risiko einer Infektion mit humanpathogenen Bakterien (*Vibrio spp.*) ist gestiegen, und die Schleppnetzfisherei beginnt nun früher im Jahr.

Es ist ein komplexes System von Wirkungen und Rückkopplungen zwischen klimatischen und nichtklimatischen Faktoren, das auf die Ostsee einwirkt. Viele Umweltbelastungen beeinflussen das Ökosystem bereits jetzt, und der Klimawandel fügt weitere hinzu. Die verschiedenen Effekte des Klimawandels sowie deren Wechselwirkungen mit anderen menschlichen Einflüssen sind komplex und schwer einzuordnen. Hinzu kommt, dass sich zwischen den verschiedenen Regionen der Ostsee die Einflüsse des Klimas und anderer menschlicher Einflussfaktoren beträchtlich unterscheiden. Einfache Lösungen, die überall funktionieren, gibt es nicht. Entscheidungsträger müssen sich dieser Umstände bewusst sein

und einen adaptiven Managementansatz anwenden, auf der Grundlage der besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse.

Dieses Faktenblatt enthält diese aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse in kompakter Form. Es ist das erste in einer Reihe von Faktenblättern zum Klimawandel in der Ostsee. Ziel ist es, das immer besser werdende Verständnis des Klimawandels sowie seiner Auswirkungen auf den Zustand des Meeres zu dokumentieren.

Anhand der 34 Parameter, die von EN CLIME als relevant für Wissenschaft und Management ausgewählt wurden, werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ostsee jetzt und in Zukunft beschrieben. Es handelt sich um direkt vom Klimawandel betroffene physikalische und chemische Parameter (Seite 18) sowie um indirekte Ökosystem- und menschliche Nutzungsparameter (Seite 36). Die vollständige Liste ist in Tabelle 1 (Seite 8) dargestellt.

Der erste Teil dieses Berichts enthält kurze Zusammenfassungen der Auswirkungen auf die einzelnen Parameter (Seite 12-17) sowie eine Klimafolgenkarte, die die projizierten regionalen Veränderungen für ausgewählte Parameter unter dem RCP4.5-Klimaszenario zeigt. Der zweite Teil des Berichts (Seite 18-59) enthält für jeden einzelnen Parameter die Kernaussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels.



Expertennetzwerk zum Klimawandel in der Ostsee - EN CLIME

HELCOM, die gemeinsame Kommission der Ostseeanrainerstaaten zum Schutz der Ostsee und das Forschungsnetzwerk Baltic Earth haben 2018 ein gemeinsames Expertennetzwerk zum Klimawandel im Ostseeraum (EN CLIME) gegründet, an dem über 110 Forscher aus dem gesamten Ostseeraum beteiligt sind. Ziel ist eine Plattform zur Koordinierung und Nutzung der vorhandenen Expertise für politische Entscheidungsträger, um einen engeren Dialog zwischen Wissenschaft und Politik zu ermöglichen.

Die Klimafolgenkarte

Die Klimafolgenkarte (Seiten 10-11) zeigt die projizierten regionalen Veränderungen für einige Parameter in Teilen der Ostsee unter dem RCP4.5-Szenario. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurde die Anzahl der Parameter reduziert, obwohl alle 34 Parameter wichtig sind. Die ausgewählten Parameter haben

1) eine direkte gesellschaftliche Relevanz und/oder Relevanz für andere Parameter, zeigen 2) bezüglich ihrer Veränderungen im Vergleich zu dem Hintergrundrauschen in den Daten und der Unsicherheit von Modellen/ Expertenbeurteilung unter dem RCP4.5-Szenario einen mittleren bis hohen Vertrauensgrad, und haben 3) in einer der Unterregionen der Ostsee einen Hotspot, mit Veränderungsmustern von mittlerer bis hoher Zuverlässigkeit.

Bewertung des Konfidenzniveaus

Der Grad der Zuverlässigkeit der Aussagen wird auf einer Skala mit niedriger-mittlerer-hoher Zuverlässigkeit bewertet (Abbildung 1). Bei der Festlegung der Zuverlässigkeit der Aussagen wurde sowohl der Konsensgrad als auch der Evidenzumfang berücksichtigt und insgesamt die jeweils niedrigste Stufe gewählt, also das Vorsorgeprinzip angewandt. So wird z. B. die Zuverlässigkeit einer Aussage als insgesamt gering eingeschätzt, wenn der Konsens niedrig und die Evidenz im mittleren Bereich angenommen werden.

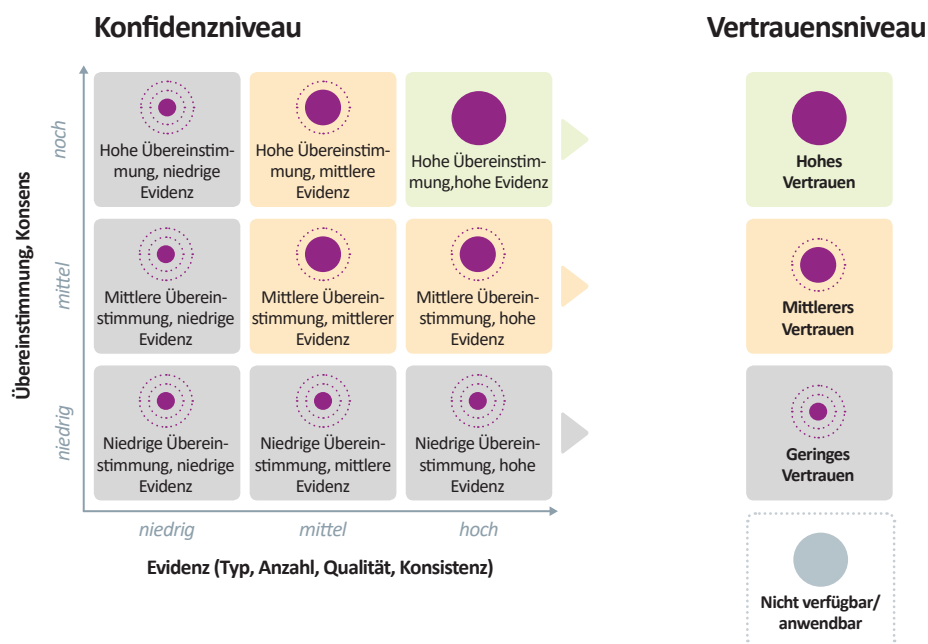


Abbildung 1. Das Vertrauensniveau ergibt sich aus der Einschätzung der Konfidenzniveaus, also der Übereinstimmung und Evidenz der verwendeten Daten.



Erfasste Parameter

Die Parameter verteilen sich auf sechs Kategorien: Energiekreislauf, Wasserkreislauf, Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf, Meeresspiegel und Wind, Biota und Ökosysteme, menschliche Aktivitäten und Ökosystemleistungen. Die folgenden ebenfalls relevanten Parameter konnten in Ermangelung federführender Autoren nicht in diese Version des Faktenblatts aufgenommen werden:

- Pelagische Habitate (inkl. Struktur der Phytoplankton- und Zooplanktongemeinschaften, Frühjahrsblüten, funktionelle Merkmale usw.)
- Schädliche Algenblüten (HABs)
- Verschmutzung und gefährliche Stoffe
- Ökotoxikologie
- Menschliche Gesundheit
- Krankheitserreger

Begutachtung der Kernaussagen

Die Kernaussagen durchliefen ein zweistufiges Begutachtungsverfahren. Die erste Begutachtungsrunde wurde von sechs externen Wissenschaftlern durchgeführt, die zweite Runde von den EN-CLIME-Co-Chairs und dem HELCOM-Sekretariat.

Der Klimawandel und Handlungsoptionen

Treibhausgasemissionen durch die Nutzung fossiler Brennstoffe und eine veränderte Landnutzung ändern das globale Klima. Bereits heute zeigen sich weitreichende Auswirkungen auf menschliche und natürliche Systeme.

Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) schätzt, dass menschliche Aktivitäten für eine globale Erwärmung um etwa 1,1°C über dem vorindustriellen Niveau bislang verantwortlich sind. In den kommenden Jahrzehnten wird sich diese Entwicklung fortsetzen, wobei Tempo und Ausmaß von der Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen abhängen.

Um die Folgen des Temperaturanstiegs einzudämmen, sind alle politischen Maßnahmen auf globaler Ebene bedeutsam, die auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen abzielen. Klimamodelle und verschiedene Emissionsszenarien erstellen Projektionen des globalen und regionalen Klimas, um politische Entscheidungen wie das Pariser Abkommen zu unterstützen.

Um zukünftige Bedingungen für Treibhausgasemissionen zu beschreiben, werden sogenannte Repräsentative Konzentrationspfade (RCPs) verwendet. Die RCPs geben die mögliche Bandbreite des Strahlungsantriebs (Unterschied zwischen der einfallenden Energie des Sonnenlichts und der in den Weltraum abgestrahlten Energie) im Jahr 2100 an. Das „Eindämmungs“-Szenario (RCP2.6) zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf weniger als 2°C über den vorindustriellen Temperaturen zu halten, während das „Worst Case“-Szenario (RCP8.5) von unverändert hohen Emissionen ausgeht. Hier wird das zwischen diesen Extremen angesiedelte Szenario (RCP4.5) verwendet. Dabei wird von einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von bis zu 2 bis 3 °C bis zum Jahr 2100 ausgegangen.

Die in diesem Faktenblatt genannten Zahlen beruhen auf dem IPCC-Sachstandsbericht 5 (2013), dem Sonderbericht über Ozean und Kryosphäre im Klimawandel (2019), sowie früheren Veröffentlichungen, da der jüngste Sachstandsbericht 6 zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Blattes noch nicht vorlag. Die Informationen zum regionalen Klimawandel basieren auf den BACC-Berichten (BALTEX und Baltic Earth Assessments of Climate Change for the Baltic Sea Basin, BACC Author Team, 2008; BACC II Author Team, 2015; siehe baltic.earth.)

Tabelle 1. Liste der EN CLIME Parameter. Mit Sternchen (*) gekennzeichnete Parameter haben Bedeutung für Extremereignisse.

Direkte Parameter	Kategorie
Lufttemperatur*	Energiekreislauf
Wassertemperatur*	Energiekreislauf
Großräumige atmosphärische Zirkulation	Energiekreislauf
Meereis*	Energiekreislauf
Sonneneinstrahlung	Energiekreislauf
Salzgehalt und Salzwassereinträge*	Wasserkreislauf
Schichtung	Wasserkreislauf
Niederschlag*	Wasserkreislauf
Flussabfluss*	Wasserkreislauf
Karbonatchemie	Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre	Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
Meeresspiegel*	Meeresspiegel und Wind
Wind*	Meeresspiegel und Wind
Wellen*	Meeresspiegel und Wind
Sedimentverlagerungen*	Meeresspiegel und Wind

Indirekte Parameter	Kategorie
Sauerstoff	Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse	Biota und Ökosysteme
Benthische Habitate	Biota und Ökosysteme
Küsten- und Wanderfische	Biota und Ökosysteme
Pelagische und bodennahe Fische	Biota und Ökosysteme
Wasservögel	Biota und Ökosysteme
Meeressäuger	Biota und Ökosysteme
Nicht-einheimische Arten	Biota und Ökosysteme
Marine Schutzgebiete	Biota und Ökosysteme
Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung	Biota und Ökosysteme
Ökosystemfunktionen	Biota und Ökosysteme
Offshore-Windparks	Menschliche Aktivitäten
Küstenschutz	Menschliche Aktivitäten
Schifffahrt	Menschliche Aktivitäten
Tourismus	Menschliche Aktivitäten
Fischerei	Menschliche Aktivitäten
Aquakultur	Menschliche Aktivitäten
Marine Kohlenstoffspeicherung	Ökosystemleistungen
Ökosystemleistungen von Meer und Küste	Ökosystemleistungen



Verbindungen zwischen den Parametern

Abbildung 2 zeigt die komplexen Zusammenhänge zwischen abiotischen, Ökosystem- und menschlichen (Nutzungs-) Parametern. Ein Parameter und der von ihm ausgehende Pfeil haben die gleiche Farbe.

Kategorie

- Energiekreislauf
- Wasserkreislauf
- Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
- Meeresspiegel und Wind
- Biota und Ökosysteme
- Menschliche Aktivitäten
- Ökosystemleistungen

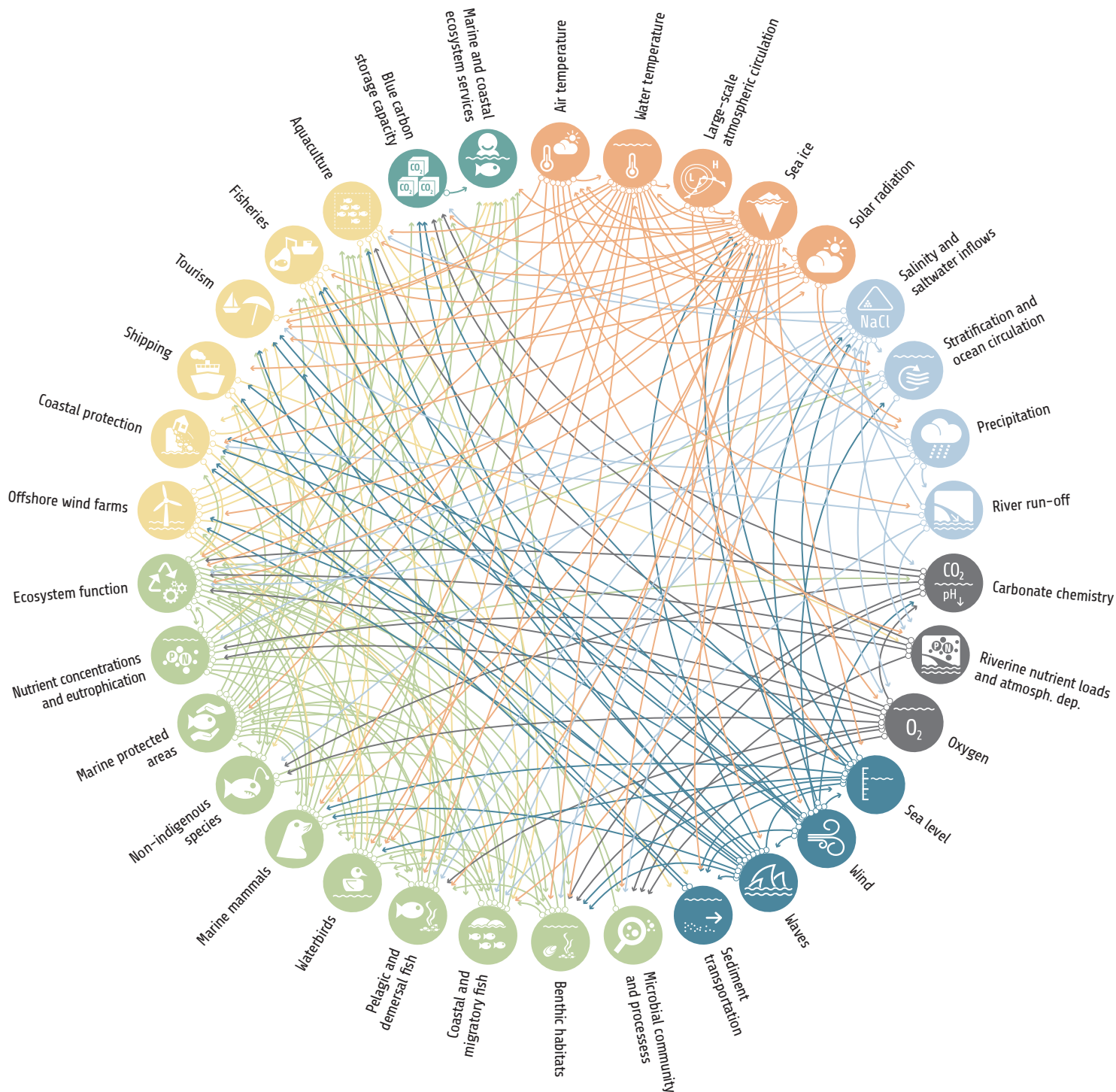


Abbildung 2. Verbindungen zwischen den in diesem Faktenblatt genutzten Parametern.

Die Zukunft der Ostsee im Klimawandel

Projektionen nach dem Klimaszenario RCP4.5

Diese Karte zeigt die projizierten regionalen Veränderungen für einige Parameter in Teilen der Ostsee, falls das RCP4.5-Szenario eintritt. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten wurde die Anzahl der Parameter reduziert, obwohl alle 34 Parameter wichtig sind. Die ausgewählten Parameter haben 1) eine direkte gesellschaftliche Relevanz und/oder Relevanz für andere Parameter, zeigen 2) bezüglich ihrer Veränderungen im Vergleich zu dem Hintergrundrauschen in den Daten und der Unsicherheit von Modellen/Expertenbeurteilung unter dem RCP4.5-Szenario einen mittleren bis hohen Vertrauensgrad, und haben 3) in einer der Unterregionen der Ostsee einen Hotspot, mit Veränderungsmustern von mittlerer bis hoher Zuverlässigkeit.



Bottensee

Die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche steigt überall und zu allen Jahreszeiten an, am stärksten im Sommer in der Bottenwiek und Bottensee. Winterniederschläge, auch Extremniederschläge, nehmen zu. Ein erhöhter Süßwasserzufluss trägt mehr gelösten organischen Kohlenstoff ein, was einen Rückgang in der pelagischen Primärproduktion und Sedimentation des Phytoplanktons nach sich zieht und sich negativ auf die benthischen Habitate auswirkt. In der Bottensee, dem Finnischen Meerbusen und im Golf von Riga geht die Eisbedeckung am stärksten zurück. In Folge kommt es zu höheren Wellen, aber auch zu einer Zunahme der Schifffahrt. Die verbesserte Nahrungssituation für ziehende Wasservögel führt zu einer Verlagerung der Brut- und Überwinterungsgebiete nach Norden in eisfreie Küstengebiete. Im Schärenmeer können die Ringelrobbenpopulationen abnehmen..



Der Eingangsbereich der Ostsee

Die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche steigt an. Der mittlere Meeresspiegel steigt relativ zum Land an und es treten höhere Extremwasserstände auf. Eine Zunahme an atmosphärischem pCO_2 führt zu verstärkter Versauerung. Zunahme an atmosphärischem pCO_2 führt zu verstärkter Versauerung.

Bottenwiek

Die Lufttemperatur steigt an, am stärksten im Winter in der nördlichen Ostseeregion. Auch die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche erhöht sich, während die Dicke des Meereises und die Dauer der Eissaison abnehmen. Winterniederschläge, auch Extremniederschläge, nehmen zu. Ein erhöhter Süßwasserzufluss bringt mehr gelösten organischen Kohlenstoff ins Meer, was zum Rückgang der pelagischen Primärproduktion und Sedimentation des Phytoplanktons, und damit zur Beeinträchtigung benthischer Habitate führt. Das Land hebt sich schneller als der projizierte Meeresspiegel, der mittlere Meeresspiegel sinkt relativ zum Land.



Finnischer Meerbusen

Die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche steigt an. Eisbedeckung, Eisdicke und Länge der Eissaison nehmen ab, mit Auswirkungen auf den Bruterfolg der Ringelrobben und einem wahrscheinlichen Rückgang der Populationen im östlichen Finnischen Meerbusen. Auch die Brut- und Überwinterungsgebiete von Zugwasservögeln sind betroffen. Mit geringerer Eisbedeckung nehmen die Wellenhöhen zu, aber auch das Potenzial für die Schifffahrt erhöht sich, wobei dies stärker von ökonomischen Faktoren als vom Klimawandel abhängt. Im östlichen Finnischen Meerbusen steigt der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es kommt zu höheren Extremwasserständen..



Die zentrale Ostsee

Die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche steigt an. Würden die BSAP-Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffbelastung umgesetzt, gingen Phosphorkonzentration und Algenblüten zurück und die Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser verbesserten sich. Ohne diese Maßnahmen sind nur geringe Änderungen der Nährstoffkonzentrationen zu erwarten. Die kombinierte Wirkung von Erwärmung und geplanter Nährstoffreduktion kann dazu führen, dass weniger Kohlenstoff den Meeresboden erreicht, was die Biomasse der bodenlebenden Tiere verringert. In den flachen Schärengewässern prägen lokale Unterschiede in Biogeochemie und Primärproduktivität das Benthos. In der südlichen Ostsee steigt der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es kommt zu höheren Extremwasserständen und die Sedimenttransporte verändern sich.



Rigaer Bucht

Die Wassertemperatur an der Meeresoberfläche steigt an, die Eisbedeckung nimmt ab, was die Ringelrobbenpopulationen in der nördlichen Rigaer Bucht beeinträchtigt und Einfluss auf die Brut- und Überwinterungsgebiete ziehender Wasservögel hat. In der südlichen Rigaer Bucht steigt der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es kommt zu höheren Extremwasserständen.



Unterteilung der Ostsee für diese Beurteilung

1. Bottenwiek (Bottenwiek und Quark)
2. Bottensee (Bottensee und Ålandsee)
3. Finnischer Meerbusen
4. Rigaischer Meerbusen
5. Zentrale Ostsee (Nord- und Westteil, Gotlandbecken, östliches Gotlandbecken, Bornholmbecken und Danziger Becken)
6. Eingangsbereich (Kattegat, Großer Belt, Sund, Kieler Bucht, Mecklenburger Bucht und Arkonabecken)



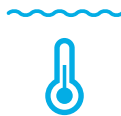
Direkte Parameter

Direkt vom Klimawandel beeinflusste physikalisch-chemische Parameter



Lufttemperatur

Die Lufttemperatur zeigt die deutlichste Reaktion auf erhöhte Treibhausgasemissionen. In der Ostseeregion wurde im letzten Jahrhundert ein signifikanter Anstieg der Lufttemperatur beobachtet, der über dem globalen Trend liegt. Dieser Anstieg wird sich voraussichtlich fortsetzen. Darüber hinaus werden längere und häufigere Hitzeperioden projiziert.



Wassertemperatur

Die Randmeere rund um den Globus haben sich in den letzten 40 Jahren erwärmt. Das Oberflächenwasser der Ostsee hat sich im Durchschnitt stärker erwärmt als das der Weltmeere und wird sich weiter erwärmen.



Großräumige atmosphärische Zirkulation

Das Klima in der Ostseeregion wird stark von der großräumigen atmosphärischen Zirkulation beeinflusst, insbesondere von der Nordatlantischen Oszillation, den atmosphärischen Blockierungsmustern und der Atlantischen Multidekadischen Oszillation. Da die Reaktion dieser atmosphärischen Zirkulationsmuster auf den Klimawandel in den verschiedenen Modellen unterschiedlich ausfällt, sind Zukunftsprojektionen sehr unsicher.



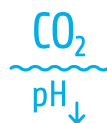
Meereis

Meereis bildet sich jeden Winter, wobei die Lufttemperatur neben Wind, Schneedecke und Meeresströmungen der wichtigste Faktor ist. In den letzten 100 Jahren sind die Winter milder geworden, die Eissaison kürzer und die maximale Eisausdehnung hat abgenommen. Es wird erwartet, dass sich diese Entwicklung in einem sich ändernden Klima fortsetzen wird.



Flussabfluss

Der Abfluss beschreibt die Menge an fließendem Wasser, die ins Meer gelangt. Der jährliche Gesamtabfluss der Flüsse hat sich in den letzten 500 Jahren nicht verändert, doch wurden in letzter Zeit ein deutlicher Anstieg der Winterabflüsse und ein Rückgang der Frühjahrshochwasser beobachtet. Der Gesamtabfluss in die Ostsee kann mit der Erwärmung der Temperaturen zunehmen.



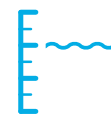
Karbonat-Chemie

Das Karbonatsystem reguliert den pH-Wert des Meerwassers. Die CO₂-Menge im Oberflächenwasser der Ostsee ändert sich saisonal, hauptsächlich aufgrund biologisch gesteuerter Prozesse (Photosynthese und Respiration), was zu Schwankungen des pH-Werts im Meerwasser führt. Langfristig wird der Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre die CO₂-Konzentration im Meerwasser erhöhen und zu einer Verringerung des pH-Werts führen.



Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre

Externe Nährstoffeinträge vom Land und aus der Atmosphäre sind die wichtigsten langfristigen Ursachen für die Eutrophierung der Ostsee. Seit den 1980er Jahren sind die Nährstoffeinträge zwar erheblich zurückgegangen, großflächige Auswirkungen auf den Zustand der Ökosysteme lassen sich jedoch noch nicht erkennen. In Zukunft wird das Nährstoffmanagement an Land größere Auswirkungen auf die Einträge haben als die Treibhausgasemissionen.



Meeresspiegel

Der mittlere Meeresspiegel der Ostsee reagiert auf den globalen Meeresspiegelanstieg und die regionale Landhebung und variiert je nach Jahreszeit und klimatischen Bedingungen. Der Meeresspiegel der Ostsee steigt und wird weiter ansteigen. Extreme Hochwasserstände reagieren empfindlich auf Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, zukünftige Veränderungen sind ungewiss.



Kategorien

- Energiekreislauf
- Wasserkreislauf
- Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
- Meeresspiegel und Wind
- Biota und Ökosysteme
- Menschliche Aktivitäten
- Ökosystemleistungen



■ Sonneneinstrahlung

Die Sonneneinstrahlung ist der Motor des Klimasystems. Die Sonneneinstrahlung, die die Oberfläche erreicht, hängt stark ab von der Bewölkung, auch von Aerosolen. Es gibt Anzeichen für einen Rückgang der Bewölkung in den letzten Jahrzehnten. Für die Zukunft gibt es nur sehr begrenzte Erkenntnisse.



■ Salzgehalt und Salzwassereinträge

Der Salzgehalt beeinflusst die Dynamik der Meeresströmungen und das Funktionieren der Ökosysteme. Vom Kattegat bis zum Bottnischen Meerbusen nimmt der Salzgehalt allmählich ab. Einströme aus der Nordsee erneuern das Tiefenwasser sporadisch mit salzigem, sauerstoffreichem Wasser. Es wurden keine statistisch signifikanten Trends beim Salzgehalt festgestellt, und die Unsicherheiten bei Zukunftsprojektionen sind groß.



■ Schichtung

Das Meerwasser ist entsprechend seiner Dichte geschichtet, eine Eigenschaft, die von Temperatur und Salzgehalt abhängt. In den letzten 40 Jahren hat sich die Schichtung in der Ostsee verstärkt. Dieser Trend könnte sich in Zukunft fortsetzen und dem marinen Ökosystem schaden, indem die Durchmischung zwischen Oberflächenwasser und Tiefenwasser verringert wird.



■ Niederschlag

Die Niederschläge hängen ab von der Zirkulation, der Wasserdampfmenge in der Luft, der Temperatur und dem Unterschied zwischen Land und Meer. Der mittlere Jahresniederschlag hat in der nördlichen Ostsee in letzter Zeit signifikant zugenommen, während im Süden nur geringe Veränderungen zu verzeichnen sind - ein Trend, der sich in Zukunft fortsetzen könnte.



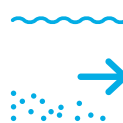
■ Wind

Das Windklima und die Stürme über der Ostsee werden durch die großräumige atmosphärische Zirkulation bestimmt. Stürme treten typischerweise im Winter häufiger und stärker auf. Die große natürliche Variabilität über der Ostsee verdeckt mögliche vergangene und zukünftige Trends.



■ Wellen

Das Wellenklima in der Ostsee hängt stark vom Windfeld ab und weist eine große langfristige Variabilität auf. Signifikante Trends in der Wellenhöhe wurden nicht festgestellt. Für die nördlichen und östlichen Teile der Ostsee ist ein leichter Anstieg zu verzeichnen, und extreme Wellenhöhen werden projiziert.



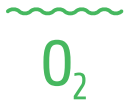
■ Sedimentverlagerungen

Der küstennahe Sedimenttransport wird durch Wellen und Wind ausgelöst und führt zu Erosion und Ablagerung von Sedimenten. Die Sandstrände entlang der südlichen und östlichen Ostseeküste sind besonders gefährdet, und der steigende Meeresspiegel wird den Sedimenttransport verstärken.



Indirekte Parameter: Ökosystem

Indirekt vom Klimawandel beeinflusste Parameter



Sauerstoff

Die Sauerstoffkonzentration wird durch den physikalischen Transport und die Remineralisierung von organischem Material gesteuert. Der in weiten Teilen der Ostsee beobachtete Sauerstoffmangel im Bodenwasser ist eine Folge der Schichtung der Wassersäule und der Überdüngung. Daher wird die künftige Sauerstoffverfügbarkeit von der Nährstoffbelastung abhängen, während die projizierte Erwärmung den Sauerstoffmangel verstärken könnte.



Mikrobielle

Gemeinschaften und Prozesse

Es wird erwartet, dass bakteriell gesteuerte Prozesse sowie das Auftreten von pathogenen Vibrationen mit den derzeitigen Umweltveränderungen zunehmen werden. In den letzten Jahrzehnten wurden jedoch nur geringe Veränderungen der bakteriellen Biomasse und des Wachstums festgestellt. Eine mögliche genetische Anpassung an den Klimawandel und das Fehlen geeigneter Modelle, die das Bakterioplankton einbeziehen, machen Vorhersagen für die Zukunft bislang unmöglich.



Benthische Habitate

In der Ostsee leben viele bodenlebende Arten am Rande ihres Verbreitungsgebiets, so dass sich selbst kleine Schwankungen der Temperatur und des Salzgehalts auf Häufigkeit, Biomasse und räumliche Verteilung auswirken können. Kommt es im Zuge des Klimawandels auch zu Veränderungen der trophischen Kaskaden und der Überdüngung, kann dies zu größeren Veränderungen der biologischen Vielfalt und der Ökosystemfunktionen benthischer Habitate führen.



Küsten- und Wanderfische

Küsten- und Wanderfische reagieren auf Veränderungen der Temperatur, der Eisbedeckung, des Salzgehalts und des Abflusses der Flüsse. Frühlings- und sommerlaichende Arten (z. B. Barsche, Cypriniden, Hechte) werden von steigenden Temperaturen profitieren, während Herbstlaicher (z. B. Salmoniden) benachteiligt sein können. Künftige Maßnahmen müssen Überdüngung, Fischerei, Interaktionen im Nahrungsnetz und die Habitatveränderungen für Wanderfische, auch in Flüssen, berücksichtigen.



Marine Schutzgebiete

Der Klimawandel kann sich auf Meeresschutzgebiete (Marine Protected Areas, MPA) auswirken, indem er Veränderungen in der abiotischen Umwelt hervorruft, die zu vielfältigen Veränderungen in der Struktur und den Funktionen der Ökosysteme führen und so die Naturschuttpotentiale der MPA verändern. Veränderungen werden zunächst bei Robben- und Wasservogelpopulationen erwartet, gefolgt von potenziellen großflächigen Veränderungen in benthischen Lebensräumen, falls ein möglicher Rückgang des Salzgehalts die Verbreitung von Schlüsselarten beeinträchtigt.



Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung

Die Stickstoff- und Phosphor-pools werden durch den Eintrag vom Land und aus der Atmosphäre gesteuert und durch sauerstoffsensitive biogeochemische Prozesse beeinflusst. Künftige Eintragsänderungen werden einen stärkeren Einfluss auf die Nährstoffe haben als der Klimawandel, auch wenn die projizierte Erwärmung den Nährstoffkreislauf verstärken und die Sauerstoffversorgung des Bodenwassers verringern wird.



Ökosystem-Funktionen

Die Ökosysteme der Ostsee bieten eine Reihe von Funktionen im Zusammenhang mit dem Nährstoff- und Kohlenstoffkreislauf, der Biomasseproduktion und der Regulierung. Das Klima beeinflusst die Ökosystemfunktionen über Temperatur, Wasserzirkulation, Salzgehalt, Flussabflüsse und Sonneneinstrahlung. In Zukunft werden eine höhere Produktivität, ein stärkerer Einfluss von Nährstoffen und ein geringerer Einfluss von räuberischen Arten das Funktionieren des Ökosystems Ostsee beeinflussen.



Kategorien

-  Energiekreislauf
-  Wasserkreislauf
-  Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
-  Meeresspiegel und Wind
-  Biota und Ökosysteme
-  Menschliche Aktivitäten
-  Ökosystemleistungen



Pelagische und bodennahe Fische

Fische marinen Ursprungs reagieren hauptsächlich auf Veränderungen von Temperatur, Salzgehalt, Wasserschichtung und Strömungen, die die Sauerstoffverhältnisse beeinflussen. Für das Management werden eine verringerte Überdüngung, verbesserte Sauerstoffverhältnisse sowie die Berücksichtigung der Nahrungsnetze an Bedeutung gewinnen.



Wasservögel

Die offensichtlichsten Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasservögel der Ostsee sind Verschiebungen der Verbreitungsgebiete im Winter (Zugvögel bleiben näher an den Brutgebieten). Das Nahrungsangebot (Fische, Muscheln) und die Brutbedingungen werden auf verschiedene Weise beeinflusst.



Meeressäuger

Der Bruterfolg von Kegelrobben und insbesondere Ringelrobben wird durch die geringere Fläche und Dicke des Meereises beeinträchtigt. Die Verbreitung von Seehunden und Kegelrobben in der südlichen Ostsee wird sich durch die Überflutung von Rückzugsgebieten verringern. Veränderungen in Temperatur, Schichtung, Beuteverteilung, -qualität und -quantität werden Einfluss auf Meeressäuger haben, aber die Gesamtwirkungen sind nicht vorhersehbar.



Nicht-einheimische Arten

Während die Schifffahrt die Hauptursache für den Eintrag neuer nicht-einheimischer Arten (Non-Indigenous Species, NIS) ist, können klimawandelbedingte Veränderungen der abiotischen Umwelt ihre Ansiedlung und Ausbreitung fördern. Steigende Wassertemperaturen können Arten aus warmen Gewässern begünstigen, und ein möglicher Rückgang des Salzgehalts wird NIS aus Süßwasser begünstigen, was sich wahrscheinlich auf die Ökosysteme der Ästuar auswirkt.



Indirekte Parameter: Nutzung durch den Menschen

Parameter, die an die menschliche Nutzung gebunden sind und indirekt vom Klimawandel beeinflusst werden



Offshore-Windparks

Windparks sind die wichtigsten Offshore-Bauwerke in der Ostsee. Der Rückgang der Eisbedeckung und der Anstieg des Meeresspiegels können sich auf Offshore-Windparks auswirken. Offshore-Windparks beeinflussen viele ozeanografische Prozesse und haben erhebliche Auswirkungen auf die strukturelle und funktionelle biologische Vielfalt des benthischen Systems. Sie machen 10% der europäischen Offshore-Windenergie aus und sind entscheidend für das Erreichen der neuen Energie- und Klimaziele.



Küstenschutz

Im Norden dominieren stabile, von Grundgestein geprägten Küsten, im Süden dagegen weiche, sandige Küsten, wo stürmische Perioden zu Küstenerosion führen. Die abnehmende Eisbedeckung und der steigende Meeresspiegel erhöhen das Potenzial für Küstenerosion.



Schifffahrt

Die Schifffahrt wird in erster Linie durch Meereis und Wetterextreme beeinflusst. Die abnehmende Eisbedeckung erleichtert die Schifffahrt, der zukünftige Schiffsverkehr hängt jedoch mehr von der Marktentwicklung als vom Klimawandel ab. Weitergehende Regulierungsmaßnahmen zur Dekarbonisierung der Schifffahrt führen zu wichtigen Anpassungen in der gesamten Branche.



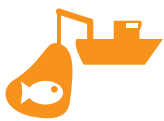
Tourismus

Der Klimawandel bestimmt mit, wo und wann die Menschen Urlaub machen. Die künftige Wettbewerbsfähigkeit des maritimen und Küstentourismus im Ostseeraum wird davon abhängen, wie sich der Sektor an den Klimawandel anpassen kann. Weiterhin spielen geänderte Werte und Unwägbarkeiten eine Rolle, wie z.B. natürliche und vom Menschen verursachte Gefahren, sowie wirtschaftliche und politische Gegebenheiten.



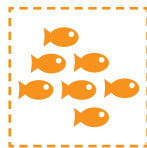
Kategorien

- Energiekreislauf
- Wasserkreislauf
- Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
- Meeresspiegel und Wind
- Biota und Ökosysteme
- Menschliche Aktivitäten
- Ökosystemleistungen



Fischerei

Die stärksten Auswirkungen auf die Fischerei werden in der nördlichen Ostsee zu verzeichnen sein. Die Schleppnetzfangsaison wird sich verlängern, die Einsatzgebiete werden sich nach Süden und in flachere Gebiete verlagern, die Zusammensetzung der Zielarten wird sich zugunsten von Arten verschieben, die wärmere Gewässer bevorzugen. Die Winterfischerei an den Küsten wird aufgrund der abnehmenden Eisbedeckung zurückgehen.



Aquakultur

Die Aquakultur in der Ostsee wird von offenen Käfigfarmen dominiert, in denen Regenbogenforellen gezüchtet werden. Hier zeigt sich nur eine geringe Auswirkung des Klimawandels. Pflanzen und wirbellose Tiere werden zunehmend ebenfalls kultiviert. Wärmere Bedingungen fördern Offshore-Standorte und ein breiteres Artenspektrum. Eine Ausweitung von industriellen, landgestützten Aquakulturfarmen abseits von Ballungszentren ist unwahrscheinlich, da sie stark von vorhandenen Ressourcen und Infrastruktur abhängen.



Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung

Blue Carbon (BC) bezeichnet den Kohlenstoff, den Meeresorganismen in ozeanischen Kohlenstoffsinken speichern. Es wird erwartet, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die BC-Habitate zunehmen werden. Dazu zählen z. B. die Kapazität der Kohlenstoffsinken und die veränderte Menge an Makrophyten, was wiederum die Eindämmung des Klimawandels beeinflusst.



Ökosystemleistungen des Meeres und der Küstengebiete

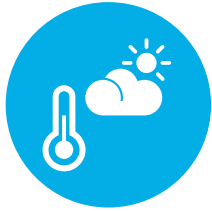
Die Ökosystemleistungen in den nördlichsten und küstennahen Gebieten, z.B. Schärengebieten und Lagunen mit geringerem Salzgehalt, werden zuerst betroffen sein. Es wird erwartet, dass die meisten Ökosystemleistungen zurückgehen werden, während nur die Leistungen, die mit Erholungsangeboten verbunden sind, von längeren Sommern und höheren Temperaturen profitieren könnten. Andere anthropogene Belastungen könnten positive Trends bei der Bereitstellung von Ökosystemleistungen aufheben und negative Trends verstärken.



Direkte Parameter







Lufttemperatur

Verbundene Parameter:

Wassertemperatur, großskalige atmosphärische Zirkulation, Meereis, Sonneneinstrahlung, Abfluss, Nährstoffeinträge über Flüsse und Atmosphäre, Wasservögel, Tourismus

Verbindungen zu politischen Zielen:
UN Sustainable Development Goal 13
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Da die Lufttemperatur am deutlichsten auf den verstärkten Treibhauseffekt reagiert, wird die oberflächennahe mittlere Lufttemperatur häufig als Hauptindikator für eine globale und regionale Klimaänderung verwendet. Änderungen der Temperaturextreme können biologische und menschliche Aktivitäten viel stärker beeinflussen als Änderungen der Durchschnittstemperatur.



Was ist bereits geschehen?

Durchschnittliche Veränderung: Im letzten Jahrhundert ist ein Anstieg der Lufttemperatur zu beobachten, der sich in den letzten Jahrzehnten beschleunigt hat¹⁻³. Die Trends der Jahresmitteltemperaturen im Zeitraum 1876-2018 zeigen, dass die Lufttemperatur in der Ostseeregion stärker angestiegen ist als auf globaler Ebene. Der Anstieg geht mit großen multidekadischen Schwankungen einher, insbesondere im Winter, aber die Erwärmung ist zu allen Jahreszeiten zu beobachten und im Frühling im Norden am stärksten.

Extreme: In den letzten zehn Jahren wurde die Region von Rekord-Hitzewellen heimgesucht, wobei die Dauer der Wärmeperioden tendenziell zunahm⁴⁻⁵. Die Dauer der Frostperiode und die Zahl der Frosttage sind rückläufig.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Die Lufttemperaturen werden in der Ostseeregion voraussichtlich stärker ansteigen als im globalen Mittel. Regionale Szenarien projizieren einen Anstieg der jährlichen mittleren oberflächennahen Temperatur über der Ostsee von 1,4°C (1,2-1,9°C, RCP2.6) bis 3,9°C (3,1-4,8°C, RCP8.5)* bis zum Ende dieses Jahrhunderts⁶ im Vergleich zu 1976-2005. Der Anstieg der Lufttemperatur ist im Norden größer als im Süden, da der Rückgang der Schnee- und Meereisbedeckung die Absorption von Sonnenlicht durch Boden und Wasser verstärkt².

Extreme: Bei den Kälteextremen wird eine stärkere Erwärmung erwartet als bei der mittleren Wintertemperatur⁷. Im Sommer werden Wärmeextreme voraussichtlich stärker ausgeprägt sein. Sie werden mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von heute 20 Jahren in Skandinavien im Zeitraum 2071-2100 etwa alle fünf Jahre auftreten⁸.



Wissenslücken

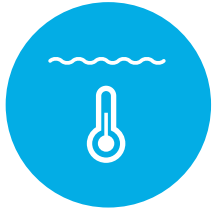
Die Schwankung der Temperatur und der Temperaturextreme wird zu einem großen Teil von den großräumigen Zirkulationsmustern bestimmt. Über die Veränderungen der großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmuster gibt es aber nur begrenzte Kenntnisse, da die Modellergebnisse stark variieren.



Politische Relevanz

Höhere Temperaturen lösen Hitzewellen aus und haben direkte und indirekte Auswirkungen auf Habitate, Arten und Populationen in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen. Höhere Durchschnittstemperaturen und eine größere Anzahl von Hitzewellen erhöhen das Risiko von Dürren und Waldbränden. Die Stadtplanung muss verbessert werden, z. B. durch die Anpassung der Baunormen an das wärmere Klima und die Vergrößerung der städtischen Grünflächen. Regionen wie Gotland haben die Kapazität ihrer Entsalzungsanlagen erhöht, um in Dürreperioden ausreichend Trinkwasser zu erhalten. Weitere Maßnahmen zum Hitze- und Trinkwassermanagement müssen umgesetzt werden.

*) Änderungen im Mittelwert, sowie die 5 und 95% Perzentile als Spannweite im Ensemble von 9 Klimamodellen



Wassertemperatur

Autoren
Christian Dieterich, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden;
H.E. Markus Meier, Leibniz Institut für Ostseeforschung (IOW), Deutschland, und Swedish
Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden

Energiekreislauf

Verbundene Parameter:

Lufttemperatur, Meereis, Sonneneinstrahlung, Schichtung, Karbonat-Chemie, Sauerstoff, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Wasservögel, Nicht-einheimische Arten, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystem-Funktionen, Tourismus, Aquakultur, Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 13 and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Wenn die Lufttemperatur steigt, steigt auch die Wassertemperatur¹. Ausgehend von der Meeresoberfläche breitet sich die Wärme durch verschiedene Prozesse nach unten aus und kann sogar das Tiefenwasser der Ostsee erwärmen.

Der Ozean spielt eine wichtige Rolle für das Klima, da der weitaus größte Teil der Wärme aus der globalen Erwärmung in den Ozeanen gespeichert ist. Aufgrund ihrer großen Wärmekapazität reagieren die Ozeane langsam und dämpfen den Temperaturanstieg in der Atmosphäre. Die Ozeane sind auch wichtig für die Versorgung der Atmosphäre mit Feuchtigkeit, und zwar umso mehr, je wärmer das Wasser ist



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Die Randmeere rund um den Globus haben sich schneller erwärmt als der globale Ozean², und die Ostsee hat sich von allen Randmeeren am stärksten erwärmt². Die durchschnittliche Oberflächenwassertemperatur stieg von 1990 bis 2018 um +0,59 °C Dekade und von 1856 bis 20053 um +0,03 in den nordöstlichen bzw. +0,06 °C/Dekade in den südwestlichen Gebieten⁴.

Extremwerte: Seit Beginn der Temperaturaufzeichnungen bis zum Jahr 2020 war der Sommer 2018 der wärmste instrumentell aufgezeichnete Sommer in Europa und auch der wärmste Sommer der letzten 30 Jahre in der südlichen Hälfte der Ostsee⁵, mit Oberflächenwassertemperaturen, die 4-5°C über dem langjährigen Mittel 1990-2018 lagen. Die Hitzewelle wurde auch bei den Wassertemperaturen am Meeresboden registriert⁶.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Die globalen Meerestemperaturen steigen immer schneller an⁷⁻⁸. Szenariosimulationen für die Ostsee projizieren einen Anstieg der Meeresoberflächentemperatur um 1,1°C (0,8-1,6°C, RCP2.6) bis 3,2°C (2,5-4,1°C, RCP8.5)* bis zum Ende dieses Jahrhunderts, im Vergleich zu 1976-2005⁹⁻¹². In allen Szenarien liegen die Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur am Ende des Jahrhunderts deutlich über der natürlichen Variabilität.

Extremwerte: Die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 projizieren mehr tropische Nächte über der Ostsee, was das Risiko von Rekord-Wassertemperaturen erhöht¹³



Wissenslücken

Für die Projektion der Wassertemperaturen in der Ostsee werden regionale Klimamodelle benötigt. Wie sich Aerosole in regionalen Klimamodellen auswirken, wurde noch nicht untersucht. Es muss mehr über die natürliche Variabilität der Ostseetemperatur und ihre Verbindung zur großräumigen atmosphärischen Zirkulation geforscht werden. Das Auftreten mariner Hitzewellen wird voraussichtlich zunehmen. Ihr Potenzial, das Ökosystem der Ostsee zu beeinträchtigen, ist jedoch nicht gut erfasst



Politische Relevanz

Die Wassertemperatur hat tiefgreifende Auswirkungen auf das marine Ökosystem. Die einzige Möglichkeit, dem Temperaturanstieg entgegenzuwirken, ist die Eindämmung des Klimawandels. Die beste Anpassungsmaßnahme besteht darin, die Umweltbelastungen für die Ostsee zu verringern und so die Widerstandsfähigkeit des marinen Ökosystems gegen den Klimawandel zu stärken. Der Schutz von Meeresgebieten, in denen mit einem geringeren Temperaturanstieg gerechnet wird, so genannte Klimarefugien, konzentriert sich auf Gebiete, in denen die Auswirkungen des Klimawandels nicht zu Mehrfachbelastungen beitragen¹⁴⁻¹⁵. Diese könnten zu letzten Rückzugsgebieten für vom Klimawandel betroffene Arten werden

*) Änderungen im Mittelwert, sowie die 5 und 95% Perzentile als Spannweite im Ensemble von 9 Klimamodellen



Großräumige atmosphärische Zirkulation

Verbundene Parameter:
Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Wind

Autoren
Claudia Frauen, Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland;
Anna Rutgersson, Universität Uppsala, Schweden;
Florian Börgel, Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland;
H.E. Markus Meier, Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland und
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden

Energiekreislauf

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Green Deal
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Das Klima in der Ostseeregion wird durch die großräumige atmosphärische Zirkulation beeinflusst. Die Variabilität dieser Zirkulation kann in verschiedene Modi unterschieden werden:

1. Die Nordatlantische Oszillation (NAO) beschreibt die Intensität der Westströmung. Eine positive NAO steht im Zusammenhang mit milden, feuchten Wintern und verstärkter Sturmtätigkeit¹⁻⁸.
2. Atmosphärische „Blockings“ treten auf, wenn anhaltende Hochdrucksysteme die normale Westströmung über den mittleren und hohen Breitengraden unterbrechen⁹⁻¹⁰.
3. Die Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO) beschreibt Schwankungen der Meeresoberflächentemperatur im Nordatlantik mit einer Periode von 50-90 Jahren¹¹⁻¹⁵, die die großräumige atmosphärische Zirkulation beeinflussen¹⁵.



Was ist bereits geschehen?

Die NAO weist eine hohe Variabilität zwischen den Jahren auf, zeigt aber während des letzten Jahrhunderts keinen signifikanten Trend. Nach einem Anstieg von 1960 bis 1990 (mit häufigeren feuchten und milden Wintern) kehrte der NAO-Index auf niedrigere Werte zurück, und nach 1990 verlagerte sich das Blocking-Muster nach Osten¹⁶⁻¹⁷ und die Dauer nahm zu, was zu stationäreren Zirkulationsmustern führte¹⁸. Die Aussagen zu Veränderungen bei den Blockingmustern sind jedoch noch wenig zuverlässig¹⁹. Im Rahmen der natürlichen Schwankungen führte die AMO zu einer Erwärmung von den späten 1970er Jahren bis 2014. Vor kurzem begann die AMO wieder in eine negative Phase überzugehen²⁰. Paläoklima-Rekonstruktionen und Modellsimulationen deuten darauf hin, dass die AMO ihre vorherrschende Frequenz im Laufe der Zeit ändern könnte²¹⁻²². Die Auswirkungen der AMO auf das nordeuropäische Klima sind jedoch unabhängig von ihrer Häufigkeit¹⁴⁻¹⁵.



Was ist zu erwarten?

In Zukunft wird die NAO höchstwahrscheinlich weiterhin große natürliche Schwankungen aufweisen, ähnlich wie in der Vergangenheit beobachtet. Als Reaktion auf die globale Erwärmung wird sie wahrscheinlich im Durchschnitt etwas positiver werden (häufigere feuchte und milde Winter)¹⁹. Die Entwicklung der Intensität und Persistenz der Blockingmuster bleibt unsicher²³. Selbst bei einer schwachen globalen Erwärmung wird die AMO voraussichtlich sehr empfindlich reagieren, d. h. mit einer Verkürzung der Zeitskala und einer Abschwächung der Amplitude²⁴.



Wissenslücken

Während Klimamodelle in der Lage sind, die Hauptmerkmale der NAO zu simulieren, können ihre künftigen Veränderungen von Randprozessen abhängen, wie z. B. den Wechselwirkungen zwischen Stratosphäre und Troposphäre oder der Reaktion der Atmosphäre auf den Rückgang des arktischen Meereises, die in vielen Klimamodellen noch nicht gut dargestellt sind¹⁹. Die meisten globalen Klimamodelle unterschätzen immer noch die Häufigkeit von Häufigkeit von Blocking über dem europäisch-atlantischen Sektor¹⁹.



Politische Relevanz

Die Auswirkungen der anthropogenen Treibhausgasemissionen könnten die großräumige Zirkulation, die Nordeuropa mit dem Nordatlantik verbindet, verändern. Kleine Änderungen der Strömung hätten große Konsequenzen für das Klima in der Ostseeregion, also ob eher ein maritimes oder ein kontinentales Klima vorherrscht.



Meereis

Verbundene Parameter:

Lufttemperatur, Wassertemperatur, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Meeresspiegel, Wind, Wellen, Sedimentverlagerungen, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Wasservögel, Meeressäuger, Ökosystem-Funktionen, Offshore-Windparks, Küstenschutz, Schifffahrt, Tourismus, Fischerei, Aquakultur, Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung, Ökosystemleistungen des Meeres und der Küstengebiete

Autoren
Jürgen Holfort, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Deutschland
Energiekreislauf

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 13 and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

In den nördlichen Regionen der Ostsee ist Meereis in jedem Winter vorhanden, während es weiter südlich nur sporadisch auftritt. Da Wasser die solare Einstrahlung effektiv absorbiert, während Meereis sie größtenteils reflektiert, ist der Einfluss auf die Energiebilanz der Ostsee groß. Eine Meereisdecke begrenzt auch den Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean und dämpft die Oberflächenwellen. Während die Lufttemperatur den größten Einfluss auf die Bildung und das Schmelzen von Meereis hat, hat der Wind einen großen Einfluss auf die räumliche Verteilung und die Deformationen, z.B. Bildung von Meereisrücken (Presseis) und übereinandergeschobenem Eis.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: In den letzten 100+ Jahren sind die Eiswinter milder geworden, die Eissaison kürzer (-18 Tage in Kemi/Bottenwiek und -41 Tage in Loviisa/Finnischer Meerbusen), und die maximale Eisausdehnung ist um etwa 30 % zurückgegangen (6.700 km² pro Dekade⁻¹). Indizes, die auf dem gesamten Wintereisvolumen basieren, zeigen einen rückläufigen Trend im Zeitraum 1985-2015 (mehr als 10 %/Jahrzehnt in vielen Regionen)².

Extremwerte: Die maximale Eisausdehnung in der Ostsee, einschließlich Kattegat, schwankt von Jahr zu Jahr zwischen 40.000 und 420.000 km². Die Wahrscheinlichkeit strenger Eiswinter hat abgenommen, eine Ausdehnung von mehr als 300.000 km² trat in 16 % der letzten 100 Winter auf, verglichen mit 3,3 % der letzten 30 Winter (1991-2020)³



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Es ist sehr wahrscheinlich, dass die maximale Meereisausdehnung in Zukunft abnehmen wird (zwischen 6.400 (RCP4.5) und 10.900 (RCP8.5) km² pro Jahrzehnt)⁴. Die Stärke der Festeisdecke wird ebenfalls sehr wahrscheinlich abnehmen, aber es gibt noch große Unsicherheiten für die Dicke des Presseises⁵. Die Anzahl der Tage mit Eis und die Länge der Eissaison werden wahrscheinlich abnehmen, allerdings mit beträchtlichen regionalen Unterschieden⁶.

Extreme: Die Schwankungsbreite zwischen den Jahren wird wahrscheinlich weiterhin groß sein, aber die Wahrscheinlichkeit von strengen bis sehr strengen Wintern wird abnehmen⁵.



Wissenslücken

Meereis als sprödes Material wird in numerischen Klimamodellen nicht gut dargestellt. Die Tatsache, dass die Eisdynamik, z. B. die Presseisbildung, nicht gut abgebildet wird, führt auch zu großen Unsicherheiten bei der Meereisdicke und der Albedo (d. h. der Menge des reflektierten/absorbierten Sonnenlichts). Es gibt nur wenige Informationen und Datenmaterial über die Meereisdicke und Eiskategorien über längere Zeiträume.



Politische Relevanz

Die Bedeutung der Meereisveränderung ist im nördlichen Teil der Ostsee hoch, insbesondere für Ringelrobben und die Schifffahrt. Die Schifffahrt profitiert zwar von einem geringeren Bedarf an Eisbrechern, aber eine geringere durchschnittliche Eisbedeckung bedeutet weder das Ausbleiben strenger Eiswinter noch das Vorhandensein von Pack- oder Presseis.

Die abnehmende Eisbedeckung erhöht auch das Risiko und die Schwere der Küstenerosion in gefährdeten Gebieten. Der Küstenschutz sollte sich auf eine ausbleibende Eisbedeckung einstellen und diesbezüglichen Strategien anpassen.





Sonneneinstrahlung

Energiekreislauf 

Verbundene Parameter:

Lufttemperatur, Wassertemperatur, Großräumige atmosphärische Zirkulation, Meereis, Schichtung, Niederschlag, Ökosystem-Funktionen, Tourismus

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2 and 14
EU Green Deal
EU Water Framework Directive (WFD)
EU National Emissions Ceilings Directive (NECD)
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Sonneneinstrahlung ist der Motor des Klimasystems. Die von der Sonne emittierte Strahlung variiert nur wenig. Abgesehen von den jahres- und tageszeitlichen Schwankungen hängt die Strahlung an der Oberfläche daher weitgehend von der Bewölkung ab. Die Gesamtbewölkung umfasst Wolken auf allen Ebenen (niedrig, mittel und hoch) und hängt mit der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation sowie dem Wasserkreislauf zusammen. Eine Wolken-schicht kann 40 bis 80 % der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren. Atmosphärische Aerosole haben einen geringeren, aber doch bedeutenden Einfluss auf die Sonnenstrahlung, sowohl direkt als auch indirekt durch die Wechselwirkung mit Wolken.



Was ist bereits geschehen?

In Europa und anderen Teilen der Welt, insbesondere auf der Nordhalbkugel, wurden mehrjährige Schwankungen der Sonneneinstrahlung beobachtet, die als "Verdunkelung" und "Aufhellung" bezeichnet werden¹⁻³. Aerosolbedingte multidekadische Schwankungen der Oberflächen-Sonnenstrahlung sind auch über den Ozeanen zu erwarten⁴, aber es fehlen langfristige Messungen. Satellitenerfasste Trends der Bewölkung seit den 1980er Jahren sind für viele Gebiete uneinheitlich, scheinen aber übereinstimmend einen Rückgang über der Ostseeregion zu zeigen⁵. Die Aufzeichnungen zeigen schwache, aber signifikante negative Trends (0,5-1,9 % pro Jahrzehnt) sowohl für die globale Bewölkung als auch für die Bewölkung in den nördlichen mittleren Breiten.



Was ist zu erwarten?

Die künftige Entwicklung ist ungewiss. Globale Klimamodelle deuten auf eine Zunahme der Sonneneinstrahlung an der Oberfläche hin, die über Südeuropa am stärksten ist und nach Norden hin abnimmt, über der Ostseeregion aber immer noch eine leichte Zunahme zeigt. Regionale Klimamodellrechnungen könnten stattdessen eine Abnahme der Sonneneinstrahlung über der Ostseeregion zeigen⁶. Unklarheit bei zukünftigen Aerosolemissionen trägt zur Unsicherheit bei.



Wissenslücken

Multidekadische Schwankungen der Oberflächen-Sonnenstrahlung werden von aktuellen Klimamodell-Simulationen im Allgemeinen nicht gut erfasst⁷⁻⁸. Das Ausmaß, in dem die beobachteten Schwankungen der Oberflächen-Sonnenstrahlung durch natürliche Schwankungen der Bewölkung hervorgerufen werden, die durch dynamische Variabilität in der Atmosphäre⁹⁻¹⁰, anthropogene Aerosolemissionen^{2,8,11,12} oder möglicherweise andere Faktoren verursacht werden, ist nicht gut bekannt.



Politische Relevanz

Die Sonneneinstrahlung beeinflusst die biologische Aktivität und die Ökosysteme durch Phytoplanktonwachstum und Algenblüten. Eine veränderte Sonneneinstrahlung würde biologische Aktivitäten (z. B. die Photosynthese) entweder verstärken oder verringern. Politische Maßnahmen zur Verringerung der Luftverschmutzung werden sich auf die Sonneneinstrahlung und damit auf den Klimawandel auswirken, da dadurch die Sonneneinstrahlung, die die Oberfläche erreicht, zunimmt. Die Verringerung der Konzentration an Aerosolpartikeln in der Atmosphäre ist wichtig für die Verbesserung der Luftqualität und der Gesundheit. Derzeit gibt es eine lebhafte Debatte über Geoengineering, einschließlich Methoden zur Erhöhung der Reflexion der Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum, um deren Erwärmungseffekt auf globaler Ebene zu verringern.



Salzgehalt und Salzwassereinströme

Autoren
H.E. Markus Meier, Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland
und Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden
Jan H. Reißmann, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Deutschland

Wasserkreislauf

Verbundene Parameter:

Schichtung Niederschlag Flussabfluss, Karbonat-Chemie, Meeresspiegel, Wind, Sauerstoff, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Nicht-einheimische Arten, Ökosystem-Funktionen, Aquakultur, Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Der Salzgehalt ist eine wichtige Variable für die Dichte des Seewassers, die die Dynamik der Strömungen im Ozean steuert. Er wirkt sich auch auf die Lebensgemeinschaften in der Ostsee aus, z. B. auf die Verteilung der Arten. Aufgrund der Süßwasserzufuhr aus dem Einzugsgebiet der Ostsee und des begrenzten Wasseraustauschs mit dem Weltmeer reicht der Oberflächensalzgehalt von mehr als 20 g kg⁻¹ im Kattegat bis zu weniger als 2 g kg⁻¹ in der Bottenwiek. Die Zirkulation ist durch einen ausgeprägten, ganzjährigen vertikalen Gradienten im Salzgehalt gekennzeichnet. Große, meteorologisch gesteuerte Salzwassereinträge erneuern das Tiefenwasser sporadisch mit salzhaltigem, sauerstoffreichem Wasser. Dies ist der einzige Prozess, der das Bodenwasser in großen Tiefen effektiv belüften kann¹⁻².



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Seit 1850 gibt es keine statistisch signifikanten Trends beim Salzgehalt, bei den Zuflüssen oder den Salzwassereinträgen, aber eine ausgeprägte multidekadische Schwankung mit einer Periode von etwa 30 Jahren²⁻⁸. Paläoklimamodellergebnisse deuten darauf hin, dass ein Jahrzehnt mit abnehmendem Salzgehalt, wie die Stagnation von 1983-1992, aufgrund der natürlichen Variabilität etwa einmal pro Jahrhundert auftritt⁹. Der Salzgehalt der Ostsee wird auch von der atlantischen multidekadischen Oszillation mit einer Periode von 50-90 Jahren beeinflusst¹⁰. Seit den 1980er Jahren ist der Salzgehalt am Boden gestiegen und an der Oberfläche gesunken¹¹.

Extreme: Die Häufigkeit von Salzwassereinträgen zeigt keinen statistisch signifikanten Trend in den Messdaten-Reihe (1886-2017) oder paläoklimatischen Perioden^{2,9}.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Ein Anstieg des Fluss-Eintrags aus dem nördlichen Einzugsgebiet wird den Salzgehalt tendenziell verringern, aber ein globaler Meeresspiegelanstieg wird den Salzgehalt tendenziell erhöhen, da der Wasserstand über den Schwellen am Eingang der Ostsee und damit die Salzwasserimporte aus dem Kattegat höher wären. Ein um 0,5 m höherer Meeresspiegel würde den durchschnittlichen Salzgehalt um etwa 0,7 g kg⁻¹ erhöhen¹². Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der projizierten Süßwasserzufuhr aus dem Einzugsgebiet, dem Wind und dem globalen Meeresspiegelanstieg zeigen die Salzgehaltsprojektionen einen breit gestreuten Trend, sodass keine robusten Aussagen zu Veränderungen gemacht werden können¹³⁻¹⁶.

Extreme: Die Häufigkeit von Salzwassereinträgen wird den Projektionen zufolge leicht zunehmen¹⁷.



Wissenslücken

Aufgrund der großen natürlichen Schwankungen und den Unsicherheiten bei den Veränderungen im regionalen Wasserkreislauf, die die Niederschläge im Ostsee-Einzugsgebiet, die Windfelder und den globalen Meeresspiegel umfassen, ist die Zuverlässigkeit von Zukunftsprojektionen zum Salzgehalt gering¹⁴. Die Modelldaten zeigen, dass sich das Nord-Süd-Gefälle mit einer Zunahme des Abflusses im Norden und einer Abnahme im Süden verändert hat⁵. Über die Veränderungen in der Zusammensetzung des Salzgehalts und ihre große dekadische Variabilität ist nicht viel bekannt. Die Veränderungen im gesamten Salzeinstrom sind nicht ausreichend untersucht worden, und Veränderungen der großräumigen Zirkulation in der Ostsee sind nicht gut verstanden^{18,19}.



Politische Relevanz

Der Salzgehalt und die Belüftung des Tiefenwassers mit Sauerstoff, die mit Salzwassereinträgen verbunden ist, sind wichtige Faktoren für die Funktionsweise und Struktur des Ökosystems der Ostsee, einschließlich der Fortpflanzung kommerziell wichtiger mariner Fischarten wie dem Dorsch^{20,21}. Die Verteilung von Süßwasser- und Meeresarten und die gesamte biologische Vielfalt hängen stark vom Salzgehalt und der Sauerstoffkonzentration ab²⁰. Daher ist die Dynamik des Salzgehalts eine wichtige Größe die bei der Umsetzung von Strategien zum Meeresschutz beachtet werden sollte²¹.



Schichtung

Autoren

Matthias Gröger, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland;
H.E. Markus Meier, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland,
und Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden;
Urmas Lips, Tallinn University of Technology, Estland;
Jan H. Reißmann, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Germany

Wasserkreislauf

Verbundene Parameter:

Wassertemperatur, Sonneneinstrahlung, Salzgehalt und Salzwassereinträge,
Wind, Sauerstoff, Pelagische und bodennahe Fische, Nährstoffkonzentrationen und
Überdüngung, Ökosystem-Funktionen

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13 and 14
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Schichtung wird durch Dichtegradienten bestimmt, die sich aus der Temperatur- und Salzgehaltsverteilung im Meer ergeben. Sie steuert die vertikale und horizontale Zirkulation und den Transport von Wassermassen. In der Ostsee sind die stärksten vertikalen Dichtegradienten die Thermokline (maximaler Temperaturgradient) und die Halokline (maximaler Salzgehaltgradient). Die Thermokline bildet sich während der warmen Jahreszeit in 10-20 m Tiefe aus, während eine ausgeprägte Halokline in 60-80 m Tiefe in den meisten tiefen Regionen über das Jahr hinweg bestehen bleibt. Der Windenergieeintrag kann die Wassersäule in einigen Flachwasserregionen vollständig, und in Tiefwasser-Regionen teilweise homogenisieren und so die Schichtung beeinflussen.



Was ist bereits geschehen?

In der Vergangenheit wurde die Salzgehaltsschichtung von sporadischen Einströmen aus der angrenzenden Nordsee und von Flusseinleitungen dominiert. Langfristige Trends im Salzgehalt¹ der Ostsee oder in der Haloklinentiefe² wurden nicht nachgewiesen, aber es wurde eine Zunahme im horizontalen Salzgehaltsunterschied³ an der Meeresoberfläche zwischen der nördlichen und der südlichen Ostsee im Zeitraum 1920-2005 festgestellt. Darüber hinaus stiegen die Meeresoberflächentemperaturen im Zeitraum 1856-2005 in den nordöstlichen und südwestlichen Gebieten um etwa 0,03 bzw. 0,06 °C pro Dekade an, was zu einer verstärkten vertikalen Schichtung geführt haben dürfte⁴. Die Schichtung nahm in den meisten Teilen der Ostsee zwischen 1982 und 2016 zu, wobei sich die saisonale Temperatursprungschicht und die ganzjährige Halokline verstärkten⁵.



Was ist zu erwarten?

Theoretische Überlegungen deuten an, dass eine erhöhte Süßwasserzufuhr aus dem Einzugsgebiet der Ostsee bei gleichzeitiger Zufuhr von salzreichem Tiefenwasser aus der Nordsee sowie eine Erwärmung der Oberflächenschicht eine stärkere Schichtung begünstigt. Die künftige Entwicklung der Schichtung hängt also hauptsächlich davon ab, wie stark sich die Oberfläche der Ostsee im Vergleich zu den tieferen Schichten erwärmt und wie sich die Süßwasserzufuhr und die Salzwasserzuflüsse verändern werden. Simulationen mit mehreren Modellszenarien haben bestätigt, dass die vertikale Sommerschichtung aufgrund der Erwärmung zunehmen wird³, während Projektionen des Salzgehalts und der damit zusammenhängenden Änderungen der Salzgehaltsschichtung eher unsicher sind⁶⁻⁸.



Wissenslücken

Das komplexe Zusammenspiel von Temperatur-, Wind- und Niederschlagsänderungen macht es schwierig, die Auswirkungen des künftigen Klimas auf die Schichtung zu projizieren. Die Zirkulation und ihr Einfluss auf die Schichtung sind nicht gut verstanden, und dasselbe gilt für den Einfluss von Mischungsprozessen (z. B. Winterkonvektion) auf die Schichtung. Es ist zu erwarten, dass die Temperatur der Meeresoberfläche aufgrund des Wärmeaustauschs zwischen Luft und Meer der Lufttemperatur folgt, aber die Zukunft des Salzgehalts und damit der vertikalen Salzgradienten ist unsicher. Aufgrund der ausgeprägten multidekadischen Schwankungen der gemessenen Wassertemperatur und des Salzgehalts können keine langfristigen Trends auf der Grundlage vergangener Klimaveränderungen projiziert werden.



Politische Relevanz

Die Schichtung ist ein wichtiger Faktor für das Funktionieren und die Struktur von Ökosystemen. Sie steuert den vertikalen Sauerstofffluss zwischen dem gut durchlüfteten Oberflächenwasser und dem sauerstoffarmen Tiefenwasser und wirkt sich beispielsweise auf benthische Lebensräume und die Fortpflanzung des Dorschs aus. Darüber hinaus kann eine verstärkte thermische Schichtung im Sommer den vertikalen Nährstofftransport aus tieferen Schichten in die euphotische Zone verringern, was sich möglicherweise auf die Algen- und Cyanobakterienblüte auswirkt, zumindest auf Artenebene⁹. Um der Sauerstoffverarmung im Tiefenwasser entgegenzuwirken, wurden verschiedene Geoengineering-Methoden zur Verringerung der vertikalen Schichtung - wie Wasser unterhalb der Halokline zu pumpen - erörtert. Deren beckenweite Wirksamkeit wird in der Fachliteratur jedoch in Frage gestellt¹⁰.



Niederschläge

Wasserkreislauf

Verbundene Parameter:

Großräumige atmosphärische Zirkulation, Meereis, Sonneneinstrahlung, Salzgehalt und Salzwassereinströme, Flussabfluss, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Tourismus

Autoren
Jukka Käyhkö, Universität von Turku, Finnland
Erik Kjellström, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Niederschlag entsteht in der Atmosphäre, wenn die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist und Tröpfchen oder Eiskristalle in den Wolken durch Kondensation bzw. Ablagerung groß genug werden, um sich unter der Schwerkraft abzuschneiden. Je nach den Bedingungen in der Wolke und auf dem Weg zum Boden liegen die fallenden Teilchen in flüssiger oder gefrorener Form vor (Tropfen, Flocken, Hagel, usw.). Der Niederschlag ist eng mit anderen Variablen des Wasserkreislaufs verknüpft. Da die Menge an Wasserdampf, die in der Luft gehalten werden kann, mit der Temperatur zunimmt, steigt parallel auch die Niederschlagsmenge. Im Allgemeinen fällt in weiten Teilen des Ostseeraums im Sommer mehr Niederschlag als im Winter^{1,2}. Der Niederschlag wird stark vom Landschaftsrelief und den Land-See-Unterschieden beeinflusst, was impliziert, dass die großräumige Zirkulation der Atmosphäre einschließlich Windrichtung und vertikaler Stabilität wichtige Faktoren sind.



Wissenslücken

Unterschiedliche Methoden und Datensätze, die in nationalen Studien in der Region verwendet werden, deuten darauf hin, dass das Wissen über das Niederschlagsklima nicht vollständig kohärent ist. Im Vergleich zu den traditionellen "hochauflösenden" Modellen haben die jüngsten sehr hochauflösenden Klimamodellprojektionen mit einer Auflösung von 1 bis 3 km erwiesenermaßen bei der Darstellung von Niederschlagssextremen eine bessere Übereinstimmung mit Beobachtungen gezeigt. Für die Ostseeregion müssen diese Modelle aber erst noch erstellt werden.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderungen: Im 20. Jahrhundert waren die Niederschläge großen Schwankungen³ unterworfen, was die Bestimmung statistisch signifikanter Trends oder Verschiebungen erschwerte. Im Allgemeinen nehmen die Niederschläge im Winter zu. In Schweden ist insbesondere seit den 1950er Jahren ein allgemeiner Trend zu mehr Niederschlag zu beobachten⁴. In Finnland ist der für den Zeitraum 1961-2010 festgestellte Gesamtanstieg weder regional konsistent noch immer statistisch signifikant⁵. Das Gleiche gilt für die Baltischen Länder⁶.

Extreme: Die täglichen Niederschlags-extreme liegen in der Regel zwischen 8 und 20 mm, wobei sie im Sommer häufiger auftreten⁷. Die Intensität der Extremniederschläge hat im Zeitraum 1960-2018 zugenommen. Der Index der maximalen jährlichen Niederschlagsmenge an fünf aufeinanderfolgenden Tagen (Rx5d) hat im östlichen Ostsee-einzugsgebiet um bis zu 5 mm pro Jahrzehnt signifikant zugenommen⁸. Die Veränderung war im Winter am stärksten ausgeprägt.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Es wird erwartet, dass die durchschnittlichen Niederschlags-mengen in Zukunft zunehmen werden. Der relative Anstieg wird im Winter im Norden am stärksten sein. Die meisten Simulationen zeigen eine Zunahme der Sommerniederschläge in den nördlichen Teilen der Region, während das Vorzeichen der Veränderung in den mittleren und südlichen Teilen der Region ungewiss ist⁹.

Extreme: Die Erwärmung erhöht das Potenzial für extreme Niederschläge aufgrund der Intensivierung des Wasserkreislaufs in Verbindung mit der Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts der Atmosphäre. Regionale Klimamodelle deuten auf einen allgemeinen Anstieg der Häufigkeit und des Umfangs von Starkniederschlägen in allen Jahreszeiten hin. Die projizierten Zunahmen in Nordeuropa könnten ab 2050 in allen Jahreszeiten erheblich sein^{9,10}. Der stärkste Anstieg der niederschlagsreichen Tage wird für den Herbst projiziert. Die Zahl der Dürreereignisse pro Jahr könnte ab-, ihre Dauer zunehmen⁹.



Politische Relevanz

Bei der Anpassung an veränderte Niederschläge müssen sowohl zunehmende Niederschläge mit Überschwemmungsrisiko als auch abnehmende Niederschläge mit Dürreerisiko berücksichtigt werden. Dies wird Auswirkungen auf die Landwirtschaftspolitik sowie auf das Hochwasser- und Regenwassermanagement in den Städten haben.





Flusseintrag

Verbundene Parameter:

Lufttemperatur, Salzgehalt und Salzwassereinträge,
Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Benthische Habitate,
Küsten- und Wanderfische, Küstenschutz

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Floods directive
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Der Flusseintrag beschreibt die Menge des fließenden Wassers, in der Regel in Litern pro Sekunde und Quadratkilometer ($L s^{-1} km^{-2}$) angegeben, um Vergleiche zwischen unterschiedlich großen Flüssen zu ermöglichen. Der Abfluss kann auch in Millimetern pro Jahr ($mm a^{-1}$) angegeben werden, um Vergleiche mit Niederschlägen und Verdunstung zu ermöglichen. Die Abflussmenge bezieht sich auf den Flusswassertransport und wird in der Regel in Kubikmetern pro Sekunde ($m^3 s^{-1}$) angegeben. Hochwasserereignisse sind extreme Abflussereignisse, bei denen normalerweise trockenes Land überflutet wird. Im Ostseeraum treten Überschwemmungen in der Regel während der Schneeschmelze im Frühjahr oder in Verbindung mit starkem bzw. lang anhaltendem Regen auf. Überschwemmungen sind eng verbunden mit Niederschlag, Temperatur (Schmelze, Verdunstung), Wind und den Eigenschaften des Einzugsgebiets (Landnutzung, Topografie).



Wissenslücken

Die Auswirkungen der beobachteten Niederschlagsänderungen auf den Abfluss der Flüsse sind unklar¹². Es ist noch unzureichend bekannt, wie sich die Übertragung der Klimamodell-Ergebnisse auf hydrologische Modelle auswirken wird. Es sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die Präzision und Unsicherheiten zu quantifizieren, die mit verschiedenen Methoden zur Korrektur von systematischen Fehlern (bias correction) einhergehen⁷. Ungewissheiten sind auch mit der Klimafolgen-Modellierung (impact modelling) verbunden, darunter die Parameterkalibrierung anhand historischer Daten und die Unsicherheiten der Modellstruktur.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: In den letzten Jahrhunderten wurde keine statistisch signifikante Veränderung des jährlichen Gesamtabflusses in den Flüssen festgestellt^{1,2}. Es treten große dekadische und regionale Schwankungen auf³. In der nördlichen Ostsee und im Finnischen Meerbusen steht ein größerer Flussabfluss statistisch gesehen in Zusammenhang mit wärmerer Lufttemperatur und mehr Niederschlägen, während weiter südlich ein geringerer jährlicher Abfluss mit steigenden Lufttemperaturen einhergeht¹. Im Laufe des 20. Jahrhunderts haben die Winterabflüsse zugenommen, während die Frühjahrshochwasserereignisse zurückgegangen sind⁴.

Extreme: Einem Beispiel aus Schweden zufolge gibt es keinen signifikanten Trend bei den täglichen Höchstabflüssen in den letzten 100 Jahren⁵.



Was ist zu erwarten?

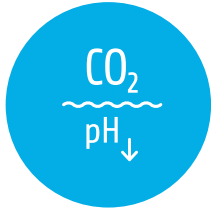
Mittlere Veränderung: Der Gesamtabfluss in die Ostsee wird den Projektionen zufolge mit der Erwärmung um 2-22 % zunehmen^{6,7}. Der Anstieg wird hauptsächlich im Norden^{3,6,8} stattfinden, während der Gesamtabfluss im Süden möglicherweise abnimmt⁹. Der winterliche Abfluss wird aufgrund zeitweisen Abschmelzens zunehmen⁸.

Extreme: Die Überschwemmungen werden den Projektionen zufolge im Norden aufgrund des wiederholten Abschmelzens während der Wintermonate und der dünneren Schneedecke ab-, südlich von 60°N jedoch aufgrund der höheren Niederschläge zunehmen^{10,11}. Große Frühjahrshochwasserereignisse werden um bis zu 20% zurückgehen¹⁰.



Politische Relevanz

Saisonale Abflussänderungen werden sich auf die Sediment- und Nährstoff-Fracht und damit auf die Überdüngung der Ostsee auswirken. Veränderungen im zeitlichen Auftreten von Überschwemmungen werden ufernahe Siedlungen bedrohen. Der HELCOM-Aktionsplan für die Ostsee verlangt von den Unterzeichnerstaaten eine Reduzierung der Nährstoffbelastung. Die EU-Mitgliedstaaten haben dies jedoch noch nicht umfänglich umgesetzt¹³. Die Minderung der Hochwassergefahr erfordert sowohl kurzfristige (Risikoabwendung) als auch langfristige (Planung und Bau) Maßnahmen. Die Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken verlangt angemessene und koordinierte Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserrisikos. Da laufend neue Projektionen verfügbar sind, ist es wichtig, den Klimawandel in die Flussabfluss- und Hochwasserpoltik einzubeziehen.



Karbonatchemie

Verbundene Parameter:

Wassertemperatur, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Wind, Wellen, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Nicht-einheimische Arten, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystem-Funktionen, Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung

Autoren
Karol Kulirski, Institute of Oceanology, Polish Academy of Sciences, Polen;
Gregor Rehder, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland;
Anna Rutgersson, Universität Uppsala, Schweden

Kohlen- und Nährstoffkreisläufe ■■■

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 12 and 14
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Das Säure-Basen-Gleichgewicht im Meerwasser und der pH-Wert des Meerwassers ist bestimmt durch das Karbonatsystem (CO_2 -System). Es ist gekennzeichnet als das thermodynamische Gleichgewicht zwischen den Wasserstoffionen (angegeben als pH-Wert) und den verschiedenen CO_2 -Spezies (CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) im Meerwasser^{1,2}. Unter Versauerung der Ozeane versteht man die Verringerung des pH-Werts des Meerwassers, das hauptsächlich auf die steigende CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre und deren Austausch mit dem Meerwasser an der Oberfläche zurückzuführen ist². Der CO_2 -Austausch zwischen dem Wasser und der Atmosphäre wird durch den CO_2 -Partialdruckunterschied zwischen Luft und Meeresoberfläche ($p\text{CO}_2$) und die Effizienz der Übertragungsprozesse gesteuert, wobei die Windgeschwindigkeit der wichtigste Parameter ist³⁻⁵.



Was ist bereits geschehen?

Die innerjährlichen Schwankungen des $p\text{CO}_2$ in den Oberflächengewässern der Ostsee werden durch biologische Prozesse (Produktion organischer Stoffe und Remineralisierung) sowie durch Veränderungen der Durchmischungstiefe und der Temperatur der Meeresoberfläche gesteuert^{1,2,6}. Die Überdüngung hat sowohl die Produktion als auch die Remineralisierung organischer Stoffe verstärkt und damit die Amplitude der saisonalen Veränderungen von $p\text{CO}_2$ und pH-Wert erhöht^{7,8}. Die Ostsee ist im Sommer eine CO_2 -Senke, im Winter eine Quelle^{1,6}. Der jährliche Netto- CO_2 -Fluss ist jedoch unbekannt. Der Anstieg der Gesamtalkalinität (ein Maß für die Pufferkapazität) mildert die Ozeanversauerung im Norden der Ostsee vollständig ab und verringert sie in der zentralen Ostsee erheblich (auf etwa $-0,0012$ pro Jahr)⁹.



Was ist zu erwarten?

Künftige Veränderungen des atmosphärischen $p\text{CO}_2$ und der Gesamtalkalinität werden den $p\text{CO}_2$ des Meerwassers und damit den pH-Wert beeinflussen^{2,4,7-10}. Die projizierte Zunahme des Flusseintrags in die nördliche Ostsee könnte die Alkalinität und den pH-Wert aufgrund des geringeren Salzgehalts senken⁷. Ein höherer atmosphärischer $p\text{CO}_2$ -Wert wird jedoch die Verwitterung an Land verstärken und Alkalinität aus dem Einzugsgebiet freisetzen, während die Überdüngung die interne Alkalinitätsbildung verstärken könnte, sodass der resultierende Nettoeffekt unbekannt ist^{7,8}. Selbst wenn die Alkalinität in der Ostsee zunähme, würde eine Verdopplung des atmosphärischen $p\text{CO}_2$ immer noch zu einem niedrigeren pH-Wert führen⁷.



Wissenslücken

Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität des $p\text{CO}_2$ im Meerwasser ist derzeit unklar, ob die Ostsee insgesamt eine Netto- CO_2 -Senke oder eine Netto-Quelle ist^{1,2,6}. Da der Ursprung des derzeit beobachteten Anstiegs der Alkalinität in der Ostsee noch unklar ist, ist es ungewiss, ob dieser Anstieg auch in Zukunft so stark sein wird⁹. Die Produktivität des Ökosystems in der Zeit nach der Frühlingsblüte (von Mitte April bis Mitte Juni) ist quantitativ nicht verstanden, da der $p\text{CO}_2$ -Abfall auch dann noch anhält, wenn der Nitratpool an der Oberfläche erschöpft ist^{1,2}.



Politische Relevanz

Die steigende CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ist die Hauptursache für die Versauerung der Ozeane. Diese kann sich auf die Meeresorganismen auswirken, insbesondere auf diejenigen, die ihr Exoskelett aus Kalziumkarbonat aufbauen^{1,2,9}. Die Umsetzung des Aktionsplans für die Ostsee mit dem Ziel einer vergleichsweise geringen Nährstoffbelastung und günstigen Sauerstoffverhältnissen, kann die winterliche pH-Senkung minimieren⁷.





Nährstoffeinträge von Land und aus der Atmosphäre

Verbundene Parameter:

Lufttemperatur, Niederschlag, Flussabfluss,
Karbonat-Chemie, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung,
Ökosystem-Funktionen, Schifffahrt

Kohlen- und Nährstoffkreisläufe

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2 and 14
EU Green Deal
EU Water Framework Directive (WFD)
EU National Emissions Ceilings Directive (NECD)
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Nährstoffeinträge von Land und aus der Atmosphäre sind die wichtigsten Ursachen für die Überdüngung der Ostsee^{1,2}. Sie werden sowohl durch natürliche (Niederschlag, Flussabfluss, Temperatur) als auch durch anthropogene Faktoren (demografische, landwirtschaftliche und industrielle Entwicklung, Abwasserbehandlung, internationaler Schiffsverkehr) bestimmt. Diese Faktoren ändern sich sowohl im Laufe der Zeit (saisonale Veränderungen, langfristige Trends und Prozesse im Einzugsgebiet) als auch räumlich (Nord-Süd-Gefälle bei Klima und Landnutzung, Ost-West-Gefälle bei sozioökonomischen Bedingungen und dem Klima)³. Die atmosphärische Deposition wird zusätzlich durch den weiträumigen Transport aus Mittel-, West- und Osteuropa und, für den Finnischen Meerbusen, aus Russland bestimmt^{4,5}.



Was ist bereits geschehen?

Seit den 1980er Jahren sind die Nährstoffeinträge in die Flüsse erheblich zurückgegangen⁶⁻⁹. Da es keine statistisch signifikanten Trends bei den jährlichen Flusseinleitungen gibt¹⁰, werden diese Verringerungen eher auf die sozioökonomische Entwicklung und Naturschutzmaßnahmen, als auf klimabedingte Effekte zurückgeführt^{8,11}. Auch die Gesamtstickstoffeinträge in die Ostsee sind seit den 1980er Jahren deutlich zurückgegangen, was auf die allgemeine Verringerung der europäischen Emissionen zurückzuführen ist¹². Allerdings hat sich der Rückgang der Stickstoffemissionen und -depositionen seit Beginn des 21. Jahrhunderts verlangsamt^{13,14}. Mengen und Trends in der atmosphärischen Phosphor-Deposition sind nach wie vor sehr unsicher^{4,15,16}.



Was ist zu erwarten?

Die Projektionen deuten darauf hin, dass der Abfluss in der nördlichen Ostseeregion zu-, in der südlichen Region abnehmen wird¹⁰, wodurch auch die waserseitigen Nährstoffeinträge jeweils zu- bzw. abnehmen können. Das Austreten von überschüssigem Phosphor, der sich in landwirtschaftlichen Böden angereichert hat, wird die Wirkung der Maßnahmen verzögern¹⁷. Simulationen deuten darauf hin, dass die landbasierte Nährstoffbewirtschaftung größere Auswirkungen auf die Nährstoffbelastung haben wird als die Treibhausgasemissionen¹⁸⁻²². Die atmosphärische Deposition kann durch Änderungen der Emissionen beeinflusst werden^{5,23}, beispielsweise durch eine erhöhte Ammoniakverdunstung aufgrund steigender Temperaturen^{24,25}.



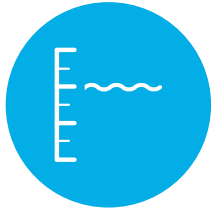
Wissenslücken

Neben den allgemeinen Unsicherheiten, die mit der Regionalisierung von Klimaszenarien für Niederschlag und Flussabfluss verbunden sind¹⁰, besteht eine wichtige Quelle der Unsicherheit in den unzureichenden Kenntnissen über die langfristige Reaktion terrestrischer biogeochemischer Prozesse auf die Klimaänderungen, insbesondere der Veränderungen in den Nährstoffpools in den Böden²⁶. Phosphorquellen und -transporte^{4,16,17} sowie Ammoniakemissionen und ihre Dynamik^{12,24,25} gehören unter den Prozessen, die die atmosphärische Nährstoffdeposition steuern, zu den am wenigsten erforschten. Wie sich die anthropogenen Ursachen der Bodenbelastung (Bodennutzung, landwirtschaftliche Praktiken, Abwasserbehandlung, anthropogener Netto-Nährstoffeintrag, usw.) als Reaktion auf den Klimawandel und die sozioökonomische Entwicklung verändern werden, ist höchst ungewiss²⁷.



Politische Relevanz

Die Verringerung von Nährstoffeinträgen gilt als wichtigste Maßnahme zur Eindämmung der Überdüngung der Ostsee, sowohl in den Küstengewässern als auch in der offenen Ostsee¹¹. Die Umsetzung der entsprechenden Maßnahmen innerhalb der Wasserrahmenrichtlinie, des Ostsee-Aktionsplans, der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und der Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen hat bereits zu einer erheblichen Verringerung der Einträge vom Land und über die Atmosphäre geführt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Übertragung von Nährstoffen vom Land ins Meer wurden jedoch noch nicht in diese Maßnahmen einbezogen. Darüber hinaus werden die Ammoniakemissionen (NH₃) umfangreiche Reduktionsmaßnahmen erfordern, da sie im Gegensatz zu den Stickoxidemissionen (NO_x) weitgehend unberücksichtigt geblieben sind²⁵.



Meeresspiegel

Autoren

Christian Dieterich, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden
Jürgen Höffert, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Deutschland
H.E. Markus Meier, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Deutschland, und
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden
Jani Särkkä, Finnish Meteorological Institute (FMI), Finnland
Ralf Weisse, Helmholtz-Zentrum Hereon, Deutschland
Eduardo Zorita, Helmholtz-Zentrum Hereon, Deutschland

Meeresspiegel und Wind

Verbundene Parameter:

Meereis, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Wind,
Wellen, Sedimentverlagerungen, Benthische Habitate

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Der relative Meeresspiegel in der Ostsee steigt, wenn Schmelzwasser dem Weltmeer zugeführt wird, wenn sich das Wasser durch Erwärmung ausdehnt, oder das Land absinkt¹. Der Wasserstand der Ostsee schwankt zwischen den Jahren und Jahreszeiten² und ist im Allgemeinen im Winter am höchsten³, insbesondere in milden Wintern mit überdurchschnittlich starken Winden^{4,5}. In Zeiten starker Westwinde füllt sich die Ostsee vorübergehend mit zusätzlichem Wasser aus der Nordsee⁶. Ein höherer mittlerer Meeresspiegel führt zu höheren Extremwasserständen. Stürme lösen Meeresspiegelschwankungen der Ostsee aus^{7,8}, ebenso wie Meteotsunamis^{9,10} (Meeresspiegелеxtreme, die sich parallel zu atmosphärischen Tiefdrucksystemen bewegen) und Wellenbildung, bei der sich brechende Wellen den Meeresspiegel lokal um bis zu einem halben Meter ansteigen lassen¹¹.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Der mittlere globale Meeresspiegel stieg im 20. Jahrhundert um 1-2 mm pro Jahr an¹²⁻¹⁴. Gegenwärtig werden für kürzere Zeiträume Raten von 3-4 mm pro Jahr geschätzt¹²⁻¹⁵. In Stockholm stieg beispielsweise der absolute Meeresspiegel zwischen 1886 und 2009 um etwa 20 cm¹⁶. Die Landhebung in der nördlichen Ostsee ist immer noch schneller als der absolute Meeresspiegelanstieg, so dass der Meeresspiegel dort relativ zum Land immer noch sinkt^{14,17-19}.

Extreme: Hochwasserereignisse stellen eine Bedrohung für niedrig gelegene Ostseeküsten dar^{9,20,21}. Im 20. Jahrhundert wurde für extreme Meeresspiegel in der Ostsee kein langfristiger steigender Trend im Vergleich zu den mittleren Veränderungen festgestellt^{14,22,23}.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderungen: Der globale Meeresspiegelanstieg wird sich beschleunigen^{12,13,24}. Aktuelle Projektionen schätzen einen Meeresspiegelanstieg in der Ostsee von etwa 87 % der globalen Rate^{25,26}. Die Schätzungen für den globalen mittleren Meeresspiegelanstieg bis 2100 liegen zwischen 43 cm (RCP2.6) und 84 cm (RCP8.5)¹³. Die wahrscheinlichen Schwankungsbreiten für diese Schätzungen liegen bei 29 bis 56 cm (RCP2.6) und 61 bis 110 cm (RCP8.5)¹³.

Extreme: Wie sich die Extreme verändern werden, ist ungewiss, da sie von der Bahn künftiger Tiefdruckgebiete abhängen^{6,27}. In der südlichen Ostsee werden Extreme, die heute selten sind, aufgrund des mittleren Meeresspiegelanstiegs häufiger auftreten^{28,29}.



Wissenslücken

Es besteht Forschungsbedarf in Bezug auf die natürliche Variabilität der Antriebskräfte von Extremereignissen in der Ostsee^{21,30-32}. Wie stark der Meeresspiegel in der Ostsee im Vergleich zum globalen Mittelwert ansteigt²⁵, ist von großen Unsicherheiten begleitet, aufgrund des Abschmelzens des antarktischen Eisschildes und anderer Auswirkungen des Klimawandels im Atlantik und in der Ostsee. Der Meeresspiegel wird in den flachen Schelfregionen proportional stärker ansteigen als im tieferen, offenen Ozean³³, aber wie stark dieser Effekt in der Ostsee wirkt, ist noch nicht untersucht. Extreme Wasserstände und andere Gefahren können sich zu Katastrophen entwickeln, wenn sie aufeinandertreffen³⁴. Über die Wechselwirkung von hohen Wasserständen und anderen Extremereignissen ist wenig bekannt.



Politische Relevanz

Der mittlere Meeresspiegelanstieg und Extremereignisse sind von großer Bedeutung, zum Beispiel für Stadtplanung und Handelshäfen und für den Hochwasserschutz. Häfen können sich an den mittleren Meeresspiegelanstieg anpassen, indem sie höhere Kais bauen oder ihren Standort verlagern. Die Schifffahrtswege müssten weniger ausgebaut werden, und Häfen könnten von Schiffen mit größerem Tiefgang angelaufen werden. Küstenüberschwemmungen können durch Schutzbauten verhindert werden, wie z.B. den St. Petersburger Hochwasserschutzkomplex, das Stockholmer Schleusen-Projekt, oder die Deiche entlang der deutschen und polnischen Küsten.





Wind

Autoren

Mika Rantanen and Terhi Laurila, Finnish Meteorological Institute (FMI), Finnland
Erik Kjellström, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden
Anna Rutgersson, Universität Uppsala, Schweden

Meeresspiegel und Wind

Verbundene Parameter:

Großräumige atmosphärische Zirkulation, Meereis, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Schichtung, Karbonat-Chemie, Meeresspiegel, Wellen, Sedimentverlagerungen, Küstenschutz, Offshore-Windparks, Schifffahrt, Tourismus, Fischerei

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity strategy



Beschreibung

Das Windklima im Ostseeraum wird durch die großräumige atmosphärische Zirkulation bestimmt. Die stärksten Windgeschwindigkeiten sind in der Regel mit dem Durchzug starker außertropischer Wirbelstürme verbunden. Diese Systeme und damit die Windextreime sind im Winterhalbjahr am häufigsten und intensivsten. Darüber hinaus können in Verbindung mit Gewittern, die im Sommer am stärksten ausgeprägt sind, starke lokale Winde auftreten.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Aufgrund der großen Klimavariabilität im Ostseeraum ist unklar, ob es bei der mittleren Windgeschwindigkeit einen allgemeinen Trend gibt. Die ermittelten Trends im Windklima unterscheiden sich zwischen den Jahreszeiten und hängen vom gewählten Zeitraum ab, für den der Trend berechnet wird, da die interne Variabilität groß ist^{1,2}. So zeigen beispielsweise die mittleren Windgeschwindigkeiten an der finnischen und schwedischen Küste seit den 1950er Jahren einen leicht negativen Trend^{3,4}.

Extrem: Die maximalen Windgeschwindigkeiten an der finnischen Küste zeigen einen Abschwächungstrend⁴, der auf eine Verlagerung der Sturmbahnen nach Norden zurückzuführen ist^{5,6}. Viele Studien zeigen widersprüchliche Trends bei der Sturmstärke im Ostseeraum¹.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Die projizierten Veränderungen des Windklimas sind aufgrund der großen natürlichen Schwankungen im Ostseeraum sehr unsicher⁷. Klimamodellsimulationen projizieren eine leichte, aber signifikante Zunahme der Windgeschwindigkeit im Herbst und eine Abnahme im Frühjahr⁸. In einigen Studien wird für Gebiete, die nicht mehr vom Meereis bedeckt sind, eine künftige Zunahme der Windgeschwindigkeiten angenommen^{7,9,10}.

Extrem: Die projizierten Veränderungen bei extremen Winden sind aufgrund von Unterschieden in der atmosphärischen Zirkulation zwischen den Klimamodellprojektionen mit Unsicherheiten behaftet⁹. Es wird projiziert, dass bis zum Jahr 2100 die Häufigkeit von schweren Windböen in Verbindung mit Gewittern im Sommer zunehmen kann¹¹.



Wissenslücken

Veränderungen des Windklimas gehören zu den unsichersten Aspekten des Klimawandels im Ostseeraum. Das liegt daran, dass die verschiedenen Klimamodelle unterschiedliche Projektionen der atmosphärischen Zirkulation liefern, was sich in einer großen Streuung der künftigen Änderungen der Windgeschwindigkeit widerspiegelt. Die Vergrößerung der Ensemble-Anzahl und die Verbesserung der hochauflösenden Klimamodelle können dazu beitragen, mögliche anthropogene Signale aus der großen natürlichen Variabilität herauszufiltern.



Politische Relevanz

Veränderungen bei extremen Windverhältnissen sind zum Beispiel für die Küsteninfrastruktur, den Küstentourismus und die Schifffahrt in der Ostsee von Bedeutung. Extremwasserstände, die typischerweise mit hohen Windgeschwindigkeiten einhergehen, können an verschiedenen Küstenabschnitten und in dicht besiedelten Küstenstädten Schäden verursachen. Die Kenntnis von Windextreimen in Verbindung mit Meereisereignissen ist für den Bau und das Management von Offshore-Wind- und Wellenenergieanlagen von zentraler Bedeutung. Die Anpassung an solche Ereignisse muss beim Management von Küsteninfrastrukturen berücksichtigt werden. Planung und Entwurf solcher Anlagen würden von besseren Windmodellen und einer höheren Windbelastungstoleranz profitieren.



Wellen

Autoren

Ralf Weisse, Helmholtz-Zentrum Hereon, Deutschland
Christian Dieterich, Swedish Meteorological Institute (SMHI), Schweden

Meeresspiegel und Wind

Verbundene Parameter:

Meeresspiegel, Sedimentverlagerungen, Benthische Habitate,
Meeressäuger, Küstenschutz, Offshore-Windparks, Schifffahrt, Tourismus,
Fischerei, Aquakultur, Kapazität für marine Kohlenstoff-Speicherung

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Habitats Directive
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Windwellen werden durch die Einwirkung des Windes auf die Meeresoberfläche erzeugt. In der Ostsee treten die höchsten Wellen typischerweise bei langanhaltenden Stürmen mit hohen Windgeschwindigkeiten und einer großen Windlauflänge (Fetch) auf. Das Wellenklima wird durch die signifikante Wellenhöhe, die Periode und die durchschnittliche Richtung charakterisiert. Das Wellenklima in der Ostsee hat einen ausgeprägten jahreszeitlichen Zyklus mit höheren Wellen im Winter. Brechende Wellen können den Meeresspiegel an der Küste erheblich erhöhen (Wellenaufbau). Wellen sind der Hauptfaktor für den küstennahen Sedimenttransport. Hohe Sturmwellen sind die wichtigsten Faktoren für Küstenerosion.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Es gibt keine signifikanten langfristigen Trends für Windgeschwindigkeit und -richtung, aber eine erhebliche dekadische Variabilität¹. Dementsprechend gibt es auch keine klaren Hinweise auf langfristige Trends bei der Wellenhöhe².

Extreme: Langfristig gesehen lassen sich keine robusten Signale für Veränderungen des Wellenklimas in der Ostsee erkennen².



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderungen: Veränderungen des Wellenklimas in der Ostsee sind eng mit Veränderungen des Windklimas verbunden, Projektionen deshalb höchst unsicher³⁻⁵. Es besteht jedoch eine klare Anhängigkeit zu einer geringeren Eisbedeckung. Diese kann den Fetch erhöhen und möglicherweise das Wellenklima verändern⁶. Bis zum Jahr 2100 wird die signifikante Wellenhöhe voraussichtlich etwa 5 % höher sein als heute, insbesondere im Norden und Osten der Ostsee⁵. Diese Veränderungen zeigen jedoch eine beträchtliche Schwankungsbreite über mehrere Dekaden und zwischen den Simulationen und sind nicht schlüssig, da nur ein Klimamodell berücksichtigt wurde⁵.

Extreme: Änderungen der extremen Wellenhöhen ergeben sich aus Änderungen der hohen Windgeschwindigkeiten, die ihrerseits sehr unsicher sind¹.



Wissenslücken

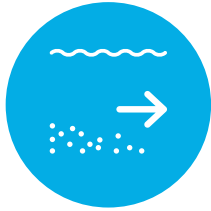
Es gibt nur wenige Projektionen des künftigen Wind-Wellen-Klimas und auch nur wenige Abschätzungen des küstenfernen Sedimenttransports einschließlich seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität. Größere, von vielen globalen Klimamodellen angetriebene Szenario-Ensembles sind erforderlich. Über die Rolle küstennaher Prozesse bei der Entstehung von Wellen, z. B. des Wellenaufbaus (wave set-up), ist wenig bekannt. Die Ermittlung signifikanter Trends sowie Zuordnungsstudien nebst der Entwicklung dekadischer Vorhersagen des Wellenklimas wären in Anbetracht der ausgeprägten interdekadischen Variabilität hilfreich, um die Auswirkungen des Klimawandels von anderen Faktoren unterscheiden zu können.



Politische Relevanz

Eine Zunahme des Wellengangs in der offenen See wird sich direkt auf die Sicherheit von Schifffahrt, Fischerei und Offshore-Betrieb auswirken. An der Küste wird sich ein stärkerer Wellengang auf Meeresspiegel und Küstenerosion auswirken mit unmittelbarer Bedeutung für den Küstenschutz. Anpassungen an ein verändertes Wellenklima können zum Beispiel höhere Anforderungen an die Stabilität von Schiffskörpern und maritimen Strukturen sowie an Küstenschutzstrategien erfordern. Dies sollte bei der Planung weiterer Windparks im Ostseeraum berücksichtigt werden, um die Ziele für erneuerbare Energien zu erreichen.





Sedimentverlagerungen

Meeresspiegel und Wind

Verbundene Parameter:

Meeresspiegel, Wind, Wellen, Küstenschutz, Tourismus

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 13
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Der marine Sedimenttransport wird hauptsächlich durch Strömungen und Wellen ausgelöst. Seine unmittelbaren Folgen sind Erosion oder Ablagerung, was zu einer allmählichen Veränderung der Küstenform und der Morphologie des Meeresbodens führt. Der kurzfristige, kleinräumige Sedimenttransport wird durch eine Vielzahl lokaler Bedingungen wie Ausgangszustand, Wind, Wasserstand, Wellen, und Strömungen bestimmt. Der langfristige, großräumige Sedimenttransport wird in erster Linie durch die Art des Sediments und sein Vorkommen gesteuert und durch großräumige Prozesse moduliert, insbesondere durch Meeresspiegel, Stürme, regionale Wind- und Wellenmuster sowie lokale technische Strukturen.



Was ist bereits geschehen?

Mittlere Veränderung: Die vertikalen Bewegungen an den Ostseeküsten zeigen derzeit Unterschiede von einer maximalen Landhebung von +9 mm pro Jahr im Norden bis zu einer Absenkung um -2 mm pro Jahr im Süden¹. Die Dominanz mobiler Sedimente macht die südlichen und östlichen Küsten anfällig für einen Windwellen-induzierten Transport². Die vorherrschenden Westwinde führen hauptsächlich zu einem West-Ost-Sedimenttransport und einem Wechsel von Steilküsten mit Moränen-Material (Quellen), Sandstränden und Nehrungen (Senken)².

Extreme: Viele Sandstrände und Steilküsten werden häufig von Hochwasserständen erodiert, und das Sediment anschließend von Strömungen abtransportiert³. Durch die Landhebung werden Flachwasser-Sedimente der Erosion durch Sturmwellen und dem Transport durch Strömungen ausgesetzt.



Was ist zu erwarten?

Mittlere Veränderung: Der globale Meeresspiegelanstieg beschleunigt sich⁴. Folglich ist zu erwarten, dass der Sedimenttransport in Küstengebieten zunimmt. Die Geschwindigkeit hängt sowohl vom Anstieg des Meeresspiegels als auch von Häufigkeit und Zugbahn der Stürme ab⁵. Aufgrund der in der Ostseeregion vorherrschenden Westwinde wird sich das vorherrschende regionale Transportmuster voraussichtlich nicht ändern, allerdings mit einer hohen lokalen Variabilität entlang der Küstenabschnitte, die durch einen kleinen Einfallswinkel der auftretenden Windwellen gekennzeichnet sind^{6,7}.

Extreme: Der sturmbedingte Sedimenttransport an der Küste hängt von der Höhe des Hochwasserextremeignisses und des Wellenaufpralls ab und wird wahrscheinlich mit dem Anstieg des... Meeresspiegels zunehmen⁸.



Wissenslücken

Es fehlt ein umfassendes Verständnis der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Sedimenttransports entlang der Küstenzone der Ostsee. Im Allgemeinen wird der primäre Sedimenttransport durch Strömungen und Wellen angetrieben, die durch die vorherrschenden Westwinde erzeugt werden². Die Intensität des sekundären Transports, der durch Ost- und Nordwinde ausgelöst wird, ist jedoch nur unzureichend bekannt⁶. In Kombination mit Veränderungen des Meeresspiegels, Stürmen (einschließlich deren Bahnen) und Meeresspiegel wird das Verständnis des Sedimenttransports zusätzlich erschwert^{5,9}. Vom Menschen geschaffene Bauwerke tragen zur Unsicherheit bei der Vorhersage des Sedimenttransports und der Erosionsmuster an der Küste bei¹⁰.

Politische Relevanz



Der Sedimenttransport, insbesondere die Erosion, ist wichtig für die Planung, den Bau und den Schutz von Küstengebieten. Zu den Managementstrategien gehört einerseits der Schutz durch „weiche“ oder „harte“ Maßnahmen und andererseits das Belassen einiger Abschnitte in einem ungeschützten Zustand. Zu den weichen Schutzmaßnahmen gehören z. B. Strandaufschüttungen und die Bepflanzung von Vorlanddünen. Zu den harten Schutzmaßnahmen gehören Buhnen, Deiche, Mauern, Deckwerke, künstliche Landzungen und Wellenbrecher. Die Managementbemühungen sind von Land zu Land unterschiedlich und komplex. Küstenschutz kann zu morphodynamischen Veränderungen führen, die möglicherweise auch die biologische Vielfalt in einigen Gebieten beeinträchtigen¹¹. Unterschiedliche Gesetzgebung und Managementstrategien in den verschiedenen Ländern erschweren abgestimmte Maßnahmen.



Indirekte Parameter Ökosysteme







Sauerstoff

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Schichtung, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Pelagische und bodennahe Fische, Nicht-einheimische Arten, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystem-Funktionen, Aquakultur



Beschreibung

Die Konzentration des gelösten Sauerstoffs in der Wassersäule wird durch den physikalischen Transport (Luft-Meer-Austausch, Advektion und Diffusion), die Wassertemperatur und biologische Prozesse wie Photosynthese und die Oxidation organischer Stoffe und Sulfid gesteuert¹. Sauerstoffzehrung und Hypoxie treten auf, wenn der Sauerstoffbedarf aufgrund erhöhter Konzentration organischer Stoffe in Wasser und Sediment nicht durch Durchmischung ausgeglichen werden kann¹⁻¹⁰. Ein hypoxisches Gebiet ist definiert als die Ausbreitung von Bodenwasser mit einer Sauerstoffkonzentration unter einem Schwellenwert von üblicherweise 2 mL O₂ L⁻¹. Hypoxie ist durch den Mangel an vielzelligem Leben gekennzeichnet¹.



Andere Antriebskräfte

Modellsimulationen deuten darauf hin, dass hohe Nährstofffrachten aus Flüssen und atmosphärische Nährstoffeinträge seit den 1950er Jahren die wichtigsten Ursachen für die Sauerstoffverarmung in der Ostsee sind^{3,5,7}. Die Auswirkungen anderer Faktoren wie die Erwärmung oder der eustatische Anstieg des Meeresspiegels waren in den Modellen vergleichsweise geringer, trugen aber dennoch erheblich zur Größe der hypoxischen Gebiete bei^{3,7}. Es gibt keinen statistisch signifikanten Trend bei der Schichtung und den Salzwassereinträgen seit 1850. Somit sind Variationen des Sauerstofftransports für die Schwankung der Sauerstoffkonzentration zwischen den Jahren und Jahrzehnten im Tiefenwasser der Ostsee verantwortlich, ohne jedoch den langfristigen Trend erklären zu können^{3,7}.



Was geschieht bereits?

Trotz des Rückgangs der Nährstoffbelastung nach den 1980er Jahren⁵ sind die in jüngster Zeit berechneten Sauerstoffzehrungsraten höher als die früher beobachteten, was der Wirkung einer natürlichen Belüftung des Tiefenwassers entgegenwirkt⁶. In einigen Küstengewässern, in denen der Eintrag von Nährstoffen und organischen Stoffen zurückgegangen ist, wurden verbesserte Sauerstoffbedingungen beobachtet¹¹. In anderen Küstengebieten ist die Hypoxie jedoch nach wie vor weit verbreitet, wobei sich die Bedingungen nicht verändert oder sogar verschlechtert haben^{4,6}. Im Jahr 2016 umfasste die maximale jährliche Ausdehnung der Hypoxie eine Fläche von etwa 70 000 km²; eine Fläche, die vor 150 Jahren vermutlich weitaus kleiner war³.



Wissenslücken

Die größten Unsicherheiten bei der Projektion biogeochemischer Kreisläufe sind neben der internen Variabilität (nicht in spezieller Reihenfolge):

- die unzureichend bekannten jetzigen und zukünftigen bioverfügbaren Nährstofffrachten vom Land und aus der Atmosphäre¹⁷;
- die Unterschiede zwischen den globalen und regionalen Klimamodellen, insbesondere bzgl. Projektionen des globalen Meeresspiegels, des Windes und dem regionalen Wasserkreislauf;
- die modellspezifischen Reaktionen der biogeochemischen Kreisläufe auf langfristige Änderungen der externen Nährstofffrachten und des Klimas in der Ostseeregion;
- die unzureichend bekannte langfristige Entwicklung der Treibhausgasemissionen^{10,11}, und
- die unzureichend bekannten Sedimentigenschaften hinsichtlich Sauerstoffbedarf und Nährstofffreisetzung.

Autoren

H.E. Markus Meier, Leibniz Institut für Ostseekunde Warnemünde, Deutschland
und Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Schweden
Jacob Carstensen, Universität von Århus, Dänemark
Oleg Savchuk, Baltic Nest Institute, Universität von Stockholm, Schweden

Kohlen- und Nährstoffkreisläufe

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2 and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Habitats Directive
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Was ist zu erwarten?

Die projizierte Erwärmung könnte die Sauerstoffverarmung in der Ostsee verstärken, indem sie den Luft-Meer-Austausch und den vertikalen Sauerstofftransport verringert und die Überdüngung durch die Intensivierung des internen Nährstoffkreislaufs und die Förderung stickstofffixierender Cyanobakterienblüten verstärkt¹²⁻¹⁶. Die künftige Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser wird jedoch hauptsächlich von der künftigen Nährstoffbelastung abhängen. Bei hohen Einträgen werden die Auswirkungen der Erwärmung beträchtlich und negativ sein; bei niedrigen Belastungen werden sie gering sein¹⁵. Szenariosimulationen deuten darauf hin, dass die vollständige Umsetzung des Ostsee-Aktionsplans mit den geforderten Belastungsreduzierungen zu einem deutlich verbesserten Zustand des Ökosystems der Ostsee führen wird, unabhängig davon, welches globale Klimamodell zugrunde gelegt wird^{12,13,15,16}.



Politische Bedeutung

Die Sauerstoffbedingungen im Meerwasser sind entscheidend für den Zustand des marinen Ökosystems. Sie hängen eng mit den Nährstoffen zusammen. Obwohl die Nährstoffbelastungen seit den 1980er Jahren⁵ zurückgegangen sind, wurden die Ziele für die maximal zulässigen Einträge noch nicht vollständig erreicht¹². Darüber hinaus reagiert das System nur langsam auf Veränderungen der Nährstofffrachten. Die langsame Reaktion hat bislang verhindert, dass die Ostsee einen guten ökologischen Status erreicht hat. Da aufgrund der globalen Erwärmung mit einer Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen gerechnet werden muss, sollten die im Aktionsplan für die Ostsee (BSAP) vorgesehenen Belastungsreduzierungen vollständig umgesetzt werden. Szenariosimulationen deuten darauf hin, dass dies zu einer erfolgreichen, wenn auch langsamen Abschwächung des Sauerstoffmangels führen wird^{15,16}. Die Ergebnisse der laufenden Szenariosimulationen sind für den BSAP von großer Bedeutung.



Bakterielle Lebensgemeinschaften und Prozesse

Biota und Ökosysteme

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meeresspiegel, Salzgehalt und Salzwassereinträge
Karbonatchemie, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre
Sauerstoff, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung
Ökosystemfunktionen

Verbindungen zu politischen Zielen
UN Sustainable Development Goals 2 and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Bathing water directive
HELCOM Baltic Sea Action Plan
EU Biodiversity Strategy
Y



Beschreibung

Das Bakterioplankton besteht aus aus einzelligen Prokaryoten. Diese mikroskopisch kleinen Organismen ohne Zellkern schweben in der Wassersäule und nutzen organischen Kohlenstoff als Energie- und Kohlenstoffquelle. Benthische Prokaryoten und Protozoen sind ebenfalls wichtig, werden hier aber nicht berücksichtigt. In aquatischen Lebensräumen sind Bakterien die wichtigsten metabolischen Transformatoren in den Kohlenstoff-, Stickstoff-, Schwefel- und Spurenmetallkreisläufen. Wie hoch die bakterielle Biomasseproduktion ist, wird im Wesentlichen vom Angebot an organischem Kohlenstoff gesteuert. Die Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaft ändert sich entlang der Salz- und Sauerstoffgradienten in der Ostsee¹. Veränderungen beim Nährstoffangebot, bei Temperatur und Sauerstoffkonzentration führen zu raschen Veränderungen der Bakterioplankton-Gemeinschaft^{2,3}. Dies kann sich auch auf die Gesamtfunktionen des Ökosystems auswirken, z. B. auf Respiration, Kohlenstoffverbrauch und Biomasseproduktion.



Andere Antriebskräfte

● Licht (beeinflusst z. B. durch Eintrübung des Wassers und Bewölkung) beeinflusst das Algenwachstum und die Produktion von bakteriellen Substraten. Licht spaltet auch refraktäre, d.h. von Organismen zunächst nicht nutzbare Verbindungen in verwertbare Nahrung für das Bakterioplankton¹¹. Auch Umweltgifte und ins Wasser gelangte Pharmaka können das Bakterioplankton beeinflussen, indem sie entweder Nahrung für das Bakterioplankton darstellen¹² oder das Bakterienwachstum behindern.



Was geschieht bereits?

● Langzeituntersuchungen von Bakterien in der Ostsee sind selten und weisen meist keine oder nur schwache Trends auf. In der südlichen Ostsee ging die Biomasse des Bakterioplanktons zwischen 1988 und 2007 um 3,6 % pro Jahr und das Wachstum der Gemeinschaft um 0,8 % pro Jahr zurück, was vor allem auf eine verbesserte Wasserbewirtschaftung und Veränderungen bei Temperatur und Salzgehalt zurückzuführen ist⁴. Die bakterielle Biomasse und das Wachstum in der Bottenwiek zeigten im Zeitraum 1999-2014⁵ keine oder nur schwache Trends, auch in tieferen Wasserschichten⁶. Die Erwärmung des Oberflächenwassers erhöhte das Risiko einer Infektion mit humanpathogenen *Vibrio* spp. und vergrößerte die für *Vibrio* geeigneten Gebiete in der Ostsee⁷.



Wissenslücken

Das Fehlen langer Zeitreihen über Wachstum, Abundanz und Zusammensetzung von Bakterien macht die Vorhersage langfristiger Auswirkungen unsicher. Nur wenige an die Meteorologie gekoppelte biogeochemische Modelle berücksichtigen die mikrobielle Aktivität angemessen, sodass großräumige und langfristige Auswirkungen nur schwer vorhersehbar sind. Die rasche bakterielle Anpassung an veränderte Bedingungen, die sowohl auf Populations- als auch auf genetischer Ebene stattfindet, ist oft mit evolutionären Veränderungen der Funktionen verbunden, was die Unsicherheit noch erhöht. Eine internationale Harmonisierung der Methodik in der mikrobiellen Ökologie ist für die Erarbeitung weiterer Kenntnisse ebenfalls von Bedeutung.



Was ist zu erwarten?

● Die anhaltende Überdüngung in Verbindung mit einer längeren Algenwachstumszeit und einer höheren Meeresoberflächentemperatur wird die bakteriell vermittelte Umwandlung organischer Stoffe, die CO₂-Produktion und den Sauerstoffverbrauch in der Ostsee verstärken^{8,9}. Im Gegenzug wird ein erhöhter Abfluss von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) aus den Flüssen aufgrund von Niederschlägen die Lichtbedingungen und damit die Algenproduktivität beeinträchtigen, während die bakterielle Produktion erhalten bleibt¹⁰. Derzeit gibt es keine zuverlässigen Modelle für diese Prozesse, mit denen sich das Nettoergebnis, z. B. für den Sauerstoffverbrauch im Meer, abschätzen ließe. Erwärmung und längere Hitzewellen werden das Risiko einer Infektion des Menschen durch pathogenes Bakterioplankton wie *Vibrio* erhöhen⁷.

Politische Bedeutung



Mikrobielle Mechanismen sind von grundlegender Bedeutung für die Kohlenstoffbilanz, den Sauerstoffstatus und die CO₂-Produktion, und entscheidend für das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels und der biogeochemischen Kreisläufe im Allgemeinen. Die Bemühungen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, zur Beendigung der Abholzung von Wäldern und zur Wiederaufforstung landwirtschaftlicher Flächen sind zwar im Gange, reichen aber nicht aus. Die Überwachung der Badegewässerqualität an den Küsten sollte verbessert werden. Globale Maßnahmen, z. B. die Bindung von CO₂ durch die Düngung von Algen, würden sich wahrscheinlich nachteilig auf den Sauerstoffgehalt der Ostsee auswirken. Da es derzeit keine Möglichkeit der direkten Kontrolle der mikrobiellen Abundanz und Aktivität durch den Menschen gibt, kann die mikrobielle Gemeinschaft nicht durch politische Maßnahmen gesteuert werden.



Benthische Habitate

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meeresspiegel, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Flussabfluss, Karbonatchemie, Meeresspiegel, Wellen, Sauerstoff, Pelagische und bodennahe Fische, Küsten- und Wanderfische, Wasservögel, Nicht-einheimische Arten, Marine Schutzgebiete, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystemfunktionen, Marine Kohlenstoffspeicherung



Beschreibung

Die benthischen Lebensräume in der Ostsee werden sowohl von Süßwasser- als auch von marinen Arten bewohnt¹. In den tiefen Regionen werden die Lebensgemeinschaften von wenigen wirbellosen Arten dominiert, während in den flachen lichtdurchfluteten Bereichen verschiedene Makroalgen und Seegräser einer großen Zahl von Wirbellosen und Fischen Nahrung und Schutz bieten, sowohl auf hartem als auch auf weichem Grund. Der Klimawandel kann sich auf Zusammensetzung, Abundanz, Biomasse und räumliche Verteilung benthischer Arten und Lebensräume auswirken, was zu einem potenziellen Verlust an biologischer Vielfalt und Ökosystemfunktionen führen kann².



Andere Antriebskräfte

Die Überdüngung hat erhebliche Auswirkungen auf das benthische Ökosystem, vor allem durch eine erhöhte Primärproduktion, die zu einer erhöhten Wassertrübung und einem Rückgang des Sauerstoffs im Bodenwasser führt³⁰. Der Nährstoffeintrag wird wahrscheinlich mit zunehmenden Niederschlägen zunehmen, insbesondere in der nördlichen Ostsee³¹. Bei steigenden Temperaturen sind Veränderungen auf allen trophischen Ebenen zu erwarten. Der Erfolg der Verringerung der Nährstoffbelastung kann jedoch größere Auswirkungen auf das benthische Ökosystem haben als der Klimawandel allein^{28,32}. Auch die Einführung nicht-einheimischer Arten kann zu Veränderungen der marinen Artenvielfalt³³ und der Ökosystemfunktionen³⁴⁻³⁶ führen. Der Rückgang von Raubfischen könnte die Funktionalität benthischer Lebensräume durch trophische Kaskaden beeinflussen³⁷⁻⁴⁰.



Was geschieht bereits?

Die benthischen Weichsubstrat-Gemeinschaften in weiten Teilen der Ostsee haben sich in den letzten Jahrzehnten drastisch verändert. Flohkrebs gingen zurück³, die Ostseemuschel *Limecola balthica* nahm zu und der nicht einheimische Borstenwurm *Marenzelleria* wurde dominant⁴. Die Veränderungen wurden bis zu einem gewissen Grad durch abiotische Faktoren wie Temperatur, Schwankungen des Salzgehalts und des Sauerstoffs sowie durch niederschlags- und abflussbedingte Veränderungen in den pelagischen Nahrungsnetzen erklärt^{4,5}. Die abnehmende Menge an Meereis hat Auswirkungen auf die Schichtung, die Nährstoffdynamik und damit auf die benthischen Gemeinschaften. Trotz abnehmender Nährstoffbelastung gibt es in der zentralen Ostsee weiterhin hypoxische Gebiete⁶, zunehmend auch in der Küstenzone⁷, was zum Verlust von Lebensgemeinschaften und Ökosystemfunktionen führt⁸⁻¹¹.



Wissenslücken

Der Rückgang des Salzgehalts gilt als Hauptursache für geografische Artenverschiebungen, doch nach neueren regionalen Klimamodellen sind zukünftige Salzgehaltsänderungen ungewiss^{41,42}. Die Auswirkungen des Klimawandels auf benthische Lebensräume sind aufgrund der kumulativen und sich verändernden Stressfaktoren und komplexen Wechselwirkungen im Nahrungsnetz schwer zu prognostizieren^{21,43}. Die Wechselwirkungen des Klimawandels mit anderen Stressfaktoren sind nicht genau bekannt, ebenso wenig wie die Fähigkeit der Organismen, sich an den Klimawandel anzupassen. So wurde beispielsweise in einigen Studien gezeigt, dass sich die Schlüsselart Blasenlang an den Klimawandel anpassen kann⁴⁴⁻⁴⁶, während andere Studien darauf hindeuten, dass die Art mit den prognostizierten Veränderungen des Salzgehalts nicht Schritt halten kann, was erhebliche Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und das Funktionieren des Ökosystems hätte^{19,36}.



Was ist zu erwarten?

Viele Ostseearten leben an ihrer geografischen Verbreitungsgrenze, und kleine Schwankungen der Temperatur und des Salzgehalts können große Auswirkungen haben, z. B. auf Blasenlang, Miesmuschel und Seegräs¹²⁻²⁰. Steigende Temperaturen wirken sich auf die Umsatzraten und die Physiologie der Arten aus^{12,21-24}. In Küstenökosystemen können verstärkte Niederschläge und Abflüsse zu Schwankungen des Salzgehalts führen²⁵, was sich auf die Reproduktion und das Überleben der Arten auswirkt²⁶. Der Anstieg des Meeresspiegels²⁷ wird Lebensräume wie flache Küstenhabitate verändern. In den derzeit oxischen Gebieten wird die Produktivität des Makrozoobenthos zurückgehen, wenn sich die Sauerstoffbedingungen verschlechtern^{28,29}. In Gebieten mit zunehmender Flussbelastung kann die pelagische Primärproduktion zurückgehen durch den gelösten organischen Kohlenstoff (DOC), was sich auf das benthische System auswirkt^{21,25}.



Politische Bedeutung

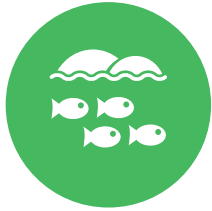
Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie verlangt eine Bewertung des Zustands benthischer Lebensräume^{46,47}. Die kumulativen Auswirkungen des Klimawandels und anderer Belastungen (z.B. Überdüngung) auf die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen sollten berücksichtigt werden. Gemäß der Habitat-Richtlinie darf das Ausmaß der Beeinträchtigung einen bestimmten Anteil der Lebensräume nicht überschreiten, und die Mitgliedstaaten müssen ein kohärentes Netz von Natura-2000-Gebieten einrichten, um die Struktur und Funktion der Ökosysteme zu sichern⁴⁹. Wenn der Klimawandel zu Veränderungen in der Ökologie führt, müssen die Erhaltungsziele aktualisiert und das Netz der marinen Schutzgebiete angepasst werden, um den prognostizierten Veränderungen Rechnung zu tragen⁵⁰. Außerdem muss der Klimawandel in die marine Raumplanung einbezogen werden, und zwar in einem angemessenen räumlichen und zeitlichen Rahmen⁵¹.

Autoren

Antonia Nyström Sandman, Aquabiota Water Research, Schweden
Markku Viltasalo, Finnish Environment Institute, Finnland
Jesper Philip Aagaard Christensen, Universität von Århus, Dänemark
Mats Blomqvist, Hafok AB, Schweden
Christina Halling, Swedish University of Agricultural Sciences, Schweden
Ari Laine, Parks and Wildlife Finland, Finnland
Georg Martin, Universität von Tartu, Estland

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen
HELCOM Baltic Sea Action Plan
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Habitats Directive (HD)
EU Birds Directive (BD)
EU Biodiversity Strategy
UN Convention on Biological Diversity (CBD)
UN Sustainable Development Goals (SDGs)
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)



Küsten- und Wanderfische

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meeresspiegel, Salzgehalt und Salzwassereinträge
Flussabfluss, Benthische Habitate, Wasservögel, Meeressäuger
Marine Schutzgebiete, Fischerei

Autoren
Örjan Östman, Jens Olsson, Noora Mustamäki und Rahmat Naddafi, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden
Meri Kallavuo, Sanna Kuningas und Antti Lappalainen, Natural Resources Institute Finland (Luke), Finnland
Lauri Saks, Universität von Tartu, Estland

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Habitats Directive
EU Common Fisheries Policy (CFP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Süßwasserfische dominieren in den meisten Küstengebieten der Ostsee, wobei einige warme (Barsch, Karpfenfische) und andere kalte Gewässer (Lachsfische, Quappen) bevorzugen¹. Diese Arten wandern zum Laichen oft in ihre Heimatgewässer zurück, was zu zahlreichen lokalen Populationen führt, die sich an die örtlichen Bedingungen anpassen. Kleineräumige Umweltschwankungen, lokal-intensive Fischerei, die Verfügbarkeit von Lebensräumen und Wechselwirkungen im Nahrungsnetz beeinflussen ihre Fortpflanzung, Rekrutierung, Wachstum und Sterblichkeit.



Was geschieht bereits?

- Höhere Wassertemperaturen haben die Reproduktion vieler Frühjahrs- und Sommerlaicher verbessert²⁻⁹.
- Im Gegensatz dazu wird die Fortpflanzung von Herbstlaichern, z. B. Maränen und Felchen, durch warme Winter benachteiligt, und ihre Verbreitung nimmt mit abnehmender Eisbedeckung und höheren Wintertemperaturen ab¹⁰⁻¹³.
- Arten, die warme Gewässer bevorzugen, sind im Vergleich zu winterlaichenden Arten häufiger geworden¹⁴.
- Wandernde Arten, wie der Lachs, kehren nach einem warmen Winter/Frühjahr früher in die Flüsse zurück. Hohe Wassertemperaturen im Herbst und Winter scheinen jedoch die Überlebensrate von Lachsen, die ins Meer zurückwandern, zu verringern¹⁵⁻¹⁹.



Was ist zu erwarten?

- Erwartet werden ein früheres Abbläichen, eine schnellere Entwicklung von Eiern und Larven, sowie bessere Überlebenschancen der Larven von im Frühjahr laichenden, küstennahen Süßwasserfischen^{6-9,20-22}.
- Eine frühere Abwanderung aus den Aufwuchshabitaten⁶ kann die Interaktionen im Nahrungsnetz beeinflussen, was sich negativ auf fischfressende Arten auswirkt²³.
- Es wird weiter erwartet, dass die Reproduktion von Wanderfischen, die im Herbst laichen, mit steigenden Temperaturen abnimmt und die Laichgebiete kleiner werden, wenn die Eisbedeckung weiter abnimmt¹¹⁻¹³.
- Die Auswirkung der Wassertemperatur auf das Körperwachstum ist je nach Art und Größenklasse unterschiedlich: Im Allgemeinen wird erwartet, dass das Wachstum bei kleinen, nicht aber bei großen Fischen zunimmt^{3,10,16,17,21,22}.
- Eine mögliche verstärkte Eintrübung der Küstengewässer kann das Körperwachstum verringern²⁴.



Andere Antriebskräfte

- Anthropogene Einflüsse wie Überdüngung, Fischerei und die Nutzung von Lebensräumen beeinträchtigen Fische in Küstengebieten.
- Pharmazeutische Rückstände und eingetragene Kunststoffe können sich lokal negativ auf Fische auswirken.
- Vermehrte Kormoran- und Robbenpopulationen verzehren erhebliche Mengen an Küstenfischen²⁵, doch die Auswirkungen auf die Fischpopulationen sind umstritten²⁶.
- Wanderfische sind ähnlichen Belastungen ausgesetzt wie Küstenfische, mehr noch: Flüsse sind weitgehend hydrologisch verbaut, und Wanderungen sind durch Dämme und erhöhte Sedimentation aufgrund von Landnutzung im Einzugsgebiet erschwert¹⁹.



Wissenslücken

Indirekte und wechselwirkende Auswirkungen von natürlichen und anthropogenen Belastungen sind nur unzureichend untersucht. Um kausale Zusammenhänge zu ermitteln, ist eine Modellierung auf der Grundlage von Monitoringdaten in Kombination mit experimentellen Studien erforderlich. Für einige klimabedingte Veränderungen, z. B. die schrumpfende Eisbedeckung und zunehmende Trübung sind die Auswirkungen auf Küsten- und Wanderfischbestände nur unzureichend untersucht. Die Bedeutung extremer Wetterereignisse auf Entwicklung und Zustand der Fischpopulationen ist ebenfalls noch unzureichend erforscht. Folgestudien nach extremen Wetterereignissen (wie Hitzewellen und eisfreien Wintern) sind von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Widerstandsfähigkeit von Fischpopulationen und -gemeinschaften.

Politische Bedeutung



Küsten- und Wanderfische sind Schlüsselemente für die Struktur und Funktion des Nahrungsnetzes der Ostseeküste und von grundlegender Bedeutung für die kommerzielle Küstenfischerei und, in kleinem Maßstab, die Freizeitfischerei. Die derzeitigen Maßnahmen zum Schutz und zur Wiederherstellung von Küsten- und Wanderfischpopulationen berücksichtigen die Auswirkungen des Klimawandels nicht. Gezielte kurzfristige Maßnahmen, z. B. vorübergehende Schließungen von Fanggebieten, könnten den betroffenen Fischpopulationen helfen, sich von extremen Wetterereignissen zu erholen. Bei zukünftigen Zustandsbewertungen und Bewirtschaftungsplänen sollten die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden.

*) aufgrund höherer Wassertemperaturen



Pelagische und bodennahe Fische

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meeresspiegel, Salzgehalt und Salzwassereinträge
Schichtung, Sauerstoff, Flussabfluss, Benthische Habitate, Wasservögel, Meeressäuger, Marine Schutzgebiete, Ökosystemfunktionen, Fischerei



Beschreibung

Fische marinen Ursprungs wie Dorsch, Hering, Sprotte und Plattfische (Flunder, Scholle, Steinbutt und Kliesche) dominieren die pelagischen und bodennahen Lebensräume der Ostsee¹. Diese Arten kommen in großen, oft international bewirtschafteten Beständen vor. Derzeit machen Stichlinge einen erheblichen Teil der pelagischen Fischbiomasse aus. Die Temperatur wirkt sich auf die Rekrutierung (erfolgreiche Fortpflanzung und Überleben der Nachkommen), das Körperwachstum und die Sterblichkeit von pelagischen und bodennah lebenden Fischen aus, was zu Veränderungen in der räumlichen und saisonalen Verteilung führt.



Andere Antriebskräfte

Die marinen Fischgemeinschaften der Ostsee werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst^{34,35}. Hohe Nährstoffeinträge haben bereits zu verstärkten hypoxischen Bedingungen geführt, die sich auf viele Fischarten negativ auswirken⁵⁻¹⁰, aber auch anderen zugute kommen^{36,37}.

Die Nährstoffbelastung ist seit den 1980er Jahren zurückgegangen, aber eine Änderung erfolgt nur langsam und wird auch durch Abfluss und klimatische Variablen wie Temperatur und Schichtung beeinflusst³¹.

Die Fischerei wirkt sich stark auf Dorsch, Hering und Sprotte aus. Schadstoffe, Abfälle im Meer und Arzneimittelrückstände können sich negativ auf einzelne Tiere auswirken, während die Auswirkungen auf die Populationen gering, aber ungewiss zu sein scheinen. Wechselwirkungen zwischen den Populationen sind im Nahrungsnetz offensichtlich (Konkurrenz, Fraßdruck, Nahrungsqualität).

Auch Vitaminmangel (z. B. Thiamin) kann sich auf Fischarten auswirken.

Was geschieht bereits?



Steigende Temperaturen und hypoxische Bedingungen haben die Fortpflanzung beeinträchtigt, die Nahrungsgebiete verkleinert und die Qualität der Nahrung verringert, was zu einer abnehmenden Verbreitung von Plattfischen, Heringen und Dorsch sowie zu einem geringeren Wachstum und einer schlechteren Körperkondition des Dorsch geführt hat²⁻¹⁰.

Steigende Temperaturen begünstigen Stichlinge^{11,12}.

Perioden mit niedrigem Salzgehalt führen zu einer geringeren Rekrutierung verschiedener Plattfische, Heringe und Dorsch¹³⁻¹⁸ sowie zu geringerer Abundanz und Lipidgehalt der Zooplanktonnahrung für Heringe und Sprotten¹⁹⁻²². Das geht mit geringerem Körperwachstum, einer schlechteren Kondition und einer geringeren Abundanz einher¹⁹⁻²³.

Die Rekrutierung von Sprotten ist in wärmeren Gewässern nach Wintern mit geringer Eisbedeckung höher, bei Heringen ist es umgekehrt^{24,25}.



Wissenslücken

Indirekte und wechselwirkende Auswirkungen von Klimaparametern und anderen Einflüssen auf Fische müssen besser untersucht werden³⁸⁻⁴¹. Um kausale Zusammenhänge zu klären, ist die Modellierung historischer Zeiträume in Kombination mit Experimenten erforderlich. Darüber hinaus sind die Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen wie Eisbedeckung, Wassertrübung und Versauerung in der Ostsee nur unzureichend untersucht. Die Bedeutung durchschnittlicher Veränderungen im Verhältnis zu extremen Wetterereignissen (z. B. Hitzewellen im Vergleich zur Durchschnittstemperatur) ist ebenfalls weitgehend unklar. Vor, während und nach Extremereignissen sollten Beobachtungsdaten erhoben und analysiert werden, ergänzt durch Experimente und Langzeitdaten. So könnte die Widerstandsfähigkeit und Erholungskapazität verschiedener Fischarten und -gemeinschaften nach extremen Wetterereignissen besser verstanden werden.

Was ist zu erwarten?



Steigende Wassertemperaturen führen zu früherem Laichen, kürzerer Entwicklung und verstärkter Rekrutierung von Sprotte^{24,26,27},

sowie zu verstärktem Larvenwachstum von Hering, Sprotte und Plattfisch. Auch das Körperwachstum von ausgewachsenen Stichlingen würde sich verstärken^{11,26,28,29}. Heranwachsender Hering und Dorsch könnte die optimalen Temperaturfenster verpassen, was zu einer geringeren Rekrutierung führen würde^{25,26,28,30,31}.

Steigende Temperaturen, insbesondere wenn sich die Halokline nach oben verschiebt und die Nährstoffbelastung nicht reduziert wird, können den Sauerstoffgehalt im Wasser und im Meeresboden verringern. Dies führt zu einer Verkleinerung der Reproduktions- und Nahrungsgebiete, zu verstärkter Nahrungskonkurrenz und zur Abhängigkeit von flacheren Laichgebieten für Dorsch und Plattfische^{5,32}.

Wenn der Salzgehalt abnimmt, kann dies auch die Rekrutierung, Abundanz und Verteilung von Plattfischen, Sprotte und Dorsch negativ beeinflussen^{2,6,8,15,28,33}.

Politische Bedeutung



Grundfische und pelagische Fische sind von grundlegender Bedeutung für die Struktur und Funktion sowohl des küstennahen Nahrungsnetzes der Ostsee als auch für die Hochseefischerei. Bei der Bewirtschaftung von Grundfischen und pelagischen Fischen, z. B. durch Quoten, Fangbeschränkungen und Schutzgebiete, werden zwar historische Veränderungen der Bestandsproduktivität berücksichtigt, nicht aber die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels. Außerdem muss die Bewirtschaftung dieser Bestände anpassungsfähig sein, um auf die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels reagieren zu können. Gezielte kurzfristige Maßnahmen, z. B. vorübergehende oder räumliche Schließungen von Fanggebieten, könnten den betroffenen Fischpopulationen helfen, sich von extremen Wetterereignissen zu erholen. Künftige Bewirtschaftungspläne sollten die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels auf Fischpopulationen und Gemeinschaften berücksichtigen.

Autoren

Örjan Östman, Jens Olsson, Noora Mustamäki und Rahmat Naddafi, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden
Meri Kallavuo, Sanna Kuningas und Antti Lappalainen, Natural Resources Institute Finland (Luke), Finnland
Lauri Saks, Universität von Tartu, Estland

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Habitats Directive
EU Birds Directive
EU Common Fisheries Policy (CFP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Wasservögel

Verbundene Parameter

Lufttemperatur, Wassertemperatur, Meeresspiegel, Benthische Habitate, Pelagische und bodennahe Fische, Küsten- und Wanderfische, Marine Schutzgebiete, Küstenschutz, Offshore-Windparks, Aquakultur, Ökosystemleistungen

Autoren

Volker Dierschke, Gavia EcoResearch, Deutschland
Morten Frederiksen, Universität von Århus, Dänemark
Elie Gaget, Department of Biology, Universität von Turku, Finnland
Diego Pavón-Jordán, Department of Terrestrial Ecology, Norwegian Institute for Nature Research (NINA), Norwegen

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Birds Directive, EU Habitats Directive
EU Common Fisheries Policy (CFP), EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR), EU Biodiversity Strategy
AEWA Agreement
Ramsar Convention



Beschreibung

Insgesamt nutzen etwa 100 Wasservogelarten das Seegebiet und die Küstenlebensräume der Ostsee zur Fortpflanzung, als Rastplatz während des Durchzugs, zur Mauser und/oder zur Überwinterung. Sie nutzen verschiedene Fischarten und wirbellose Tiere in unterschiedlichen Lebensräumen als Nahrung und erbringen zahlreiche Ökosystemleistungen¹



Was geschieht bereits?

Viele Wasservogelarten haben ihr Überwinterungsgebiet nach Norden verlagert²⁻¹⁰.

Einige Arten wandern im Frühjahr früher ab^{11,12}.

Die Auswirkungen wärmerer Wassertemperaturen können sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Futterbedingungen und die Nahrungsqualität haben, auch bzgl. wirbelloser Beutetiere und -Fische¹³⁻¹⁵.

Da die meisten Wasservögel der Ostsee Zugvögel sind, sind sie auch außerhalb der Region vom Klimawandel betroffen, zum Beispiel beim Brüten in der Arktis und beim Durchzug und Überwintern zwischen Südeuropa und Westafrika¹⁶.



Was ist zu erwarten?

Es wird erwartet, dass sich die nordwärtige Verschiebung von Verbreitungsgebieten fortsetzen wird^{9,10}.

Die Auswirkungen auf die Nahrung der Wasservögel werden vielfältig aber schwer vorhersagbar sein¹⁶.

Es wird erwartet, dass der steigende Meeresspiegel und die Küstenerosion die Verfügbarkeit von Bruthabitaten beeinflussen^{17,18}, und der steigende Meeresspiegel kann den Bruterfolg aufgrund der Überflutung von Brut- und Überwinterungshabitaten beeinträchtigen.



Andere Antriebskräfte

In der Ostsee werden Wasservogelpopulationen zunehmend durch menschliche Aktivitäten beeinträchtigt. Dazu gehören während der Brutzeit Freizeitaktivitäten^{19,20} und eingeschleppte Raubtiere (z. B. der Amerikanische Nerz²¹⁻²³), sowie Jagd^{24,25}, Fischerei^{26,27}, Schiffsverkehr^{28,29} und Offshore-Windparks^{30,31} während der Überwinterungszeit.

Überdüngung und Fischerei beeinflussen die Nahrungssuche von Wasservögeln stark^{3,32,33}



Wissenslücken

Aufgrund der Komplexität des Nahrungsnetzes und der Wechselwirkungen zwischen natürlichen und anthropogenen Einflüssen ist es schwierig, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Bestände der Wasservögel isoliert zu betrachten. Für einige gut untersuchte Arten sind diese Auswirkungen nachgewiesen, aber in den meisten Fällen ist unklar, wie sich insbesondere eine gestörte Entwicklung auf brütende und überwinternde Wasservögel aller Funktionsgruppen und Lebensweisen auswirken werden.



Politische Bedeutung

Wasservögel sind ein wichtiger Bestandteil des marinen Nahrungsnetzes der Ostsee. Veränderungen in Verbreitung und Entwicklung können eine Anpassung von Schutzmaßnahmen erforderlich machen, etwa durch die Ausweitung und Anpassung von Schutzgebieten^{17,34}, sowie durch eine solide Überwachung der Gebiete und deren Populationen⁹. Jagdregelungen müssen räumlich und zeitlich angepasst werden, um Änderungen in Verbreitung und Entwicklungsbiologie berücksichtigen zu können. Regelungen müssen insbesondere dort angepasst werden, wo der Klimawandel zu einer Bevorzugung bestimmter Standorte geführt hat, die somit zu bedeutenden Plätzen für Wasservögel geworden sind.



Marine Säugetiere

Verbundene Parameter

Meereis, Meeresspiegel, Wellen, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Marine Schutzgebiete, Offshore-Windparks, Ökosystemfunktionen, Schifffahrt, Fischerei, Aquakultur, Ökosystemleistungen

Autoren

Anders Galatius, Department of Bioscience, Universität von Århus, Dänemark
Markus Ahola, Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Schweden
Ida Carlén, Coalition Clean Baltic
Antti Halkka, Universität Helsinki, Finnland
Mart Jüssi, ProMare, Estland

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy
ASCOBANS Jastarnia Plan



Beschreibung

In der Ostsee leben drei Robbenarten und ein Wal: die Ringelrobbe (*Pusa hispida*), die Kegelrobbe (*Halichoerus grypus*), der Seehund (*Phoca vitulina*) und der Schweinswal (*Phocoena phocoena*). Da diese Raubtiere an der Spitze des marinen Nahrungsnetzes stehen, reagieren sie empfindlich auf Veränderungen im gesamten Ökosystem, auch auf solche, die mit dem Klima zusammenhängen. Darüber hinaus sind die Ausdehnung und die Qualität des Meereises besonders für die eisbrütenden Ringelrobben wichtig. Kegelrobben sind zur Brut nicht unbedingt auf Eisflächen angewiesen. In einigen Gebieten sind die Robben auf niedrig gelegene Rückzugsorte (Landgebiete zum Ausruhen, Brüten, zur Nahrungssuche usw.) angewiesen, die durch den Meeresspiegelanstieg bedroht sein könnten.



Was geschieht bereits?

Sowohl die Eisbedeckung als auch die Dauer der Eissaison haben sich bereits merklich verringert¹⁻⁸. Am auffälligsten sind die Veränderungen in den südlichen Gebieten, wo die Dauer der Eisbedeckung während der Brutzeit von Ringel- und Kegelrobben immer häufiger entweder zu kurz war oder ganz fehlte⁸. Dies beeinträchtigt den Bruterfolg von Ringelrobben

In geringerem Maße ist auch der Bruterfolg von Kegelrobben beeinträchtigt, insbesondere in den südlichen Gebieten, wo die zukünftige Eisbedeckung stark zwischen den Jahren schwanken würde.



Was ist zu erwarten?

Der prognostizierte Rückgang des Meereises^{4,9-11} und des Schnees für den Bau von Welpenhöhlen wird sich auf den Bruterfolg von Ringelrobben und Kegelrobben auswirken. Das Verschwinden der Ringelrobben aus den südlichen Gebieten ist möglich, und die Verlagerung der Kegelrobbenbrut an Land ist wahrscheinlich.

Der Anstieg des Meeresspiegels^{12,13}, der in der südlichen Ostsee zur Überflutung der Verstecke führt, könnte die brütenden Robben vertreiben. Dies wird wahrscheinlich zu einer Abnahme der Zahl nahrungssuchender Seehunde und Kegelrobben führen.

Änderungen der Temperatur und Schichtung des Wasserkörpers, sowie der Verbreitung, Qualität und Anzahl an Beutetieren werden sich auf alle Meeressäuger auswirken, wobei die Gesamtauswirkungen auf Abundanz und Verteilung nicht vorhersehbar sind.



Andere Antriebskräfte

Eisbrecher und die Schifffahrt im Winter können die Folgen des reduzierten Eises auf die Robbenzucht verstärken^{14,15}.

Beifang beeinträchtigt marine Säuger¹⁶⁻¹⁸.

Anthropogene Störungen wirken sich auf Verteilung und Überleben von Robben aus^{19,20}.

Epidemien können die Zahl von Robben und möglicherweise auch ihre Verbreitung verringern²¹.

Ökosystemveränderungen und Überfischung beeinflussen die Verfügbarkeit von Beutetieren^{22,23}.

Schadstoffe beeinträchtigen die Immunfunktionen und die Fruchtbarkeit von Meeressäugern^{24,25}.

Unterwasserlärm kann bei allen Arten zu Verletzungen und zur Verdrängung aus dem Lebensraum führen und das natürliche Verhalten stören, beim Schweinswal auch die Echoortung beeinträchtigen^{16,26}.



Wissenslücken

Die Nahrungssuche von Robben und Schweinswalen und wie sie mit den ehemaligen Rückzugsplätzen zusammenhängt ist nicht gut bekannt. Während der geringere Bruterfolg von Kegelrobben an Land im Vergleich zum Eis bekannt ist²⁷, wurde eine absolute Abhängigkeit der Ringelrobben vom Eis noch nicht eindeutig untersucht. Die Landbrut von Kegelrobben wird in den meisten baltischen Ländern nicht verfolgt. Ebenso ist der Bruterfolg von Ringelrobben bei günstigen Eisbedingungen kaum bekannt. Landbrutversuche sind aus extrem eisarmen Jahren bekannt, aber eine erfolgreiche Landbrut wurde für diese Art nicht dokumentiert. Eine Modellierung der klimabedingten Ökosystemveränderungen nebst deren Auswirkungen auf die Meeressäuger steht noch aus.



Politische Bedeutung

Meeressäuger sind die wichtigsten Raubtiere in der Ostsee und Indikatoren für den Zustand des Ökosystems²⁸, für das sie als Räuber an der Spitze der Nahrungskette eine regulierende Funktion haben. Beeinträchtigungen aufgrund des Klimawandels sind lokal unvermeidbar, aber künstliche Verstecke könnten den Bruterfolg verbessern. Saisonale Einschränkungen der Schifffahrt können die Auswirkungen auf die Robbenbrut verringern. Meeressäuger können gegenwärtig nicht direkt vor dem Klimawandel geschützt werden, aber Maßnahmen zur Vermeidung von Störungen wie Verschmutzung, Beifang oder der Jagd sind implementiert. Eine weitere Reduktion der Belastungen wird die Widerstandsfähigkeit gegen den Klimawandel verbessern. Nationale Bewirtschaftungspläne sollten den Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Meeressäuger-Populationen berücksichtigen.



Nicht-einheimische Arten (NIS)

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Karbonatchemie, Sauerstoff, Benthische Habitate, Marine Schutzgebiete, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystemfunktionen, Schifffahrt, Aquakultur



Beschreibung

Nicht-einheimische Arten (Non-Indigenous Species, NIS) sind in der betreffenden geographischen Region nicht heimisch, sondern werden durch menschliches Zutun dorthin verbracht. Ballastwasser von Schiffen und Bewuchs des Schiffsrumpfes sind die wichtigsten Übertragungswege¹⁻⁴. NIS sind in der Küstenzone häufiger anzutreffen als im offenen Meer⁵⁻⁸, und Häfen sind Hotspots für ihre Einschleppung⁹⁻¹². Aus der Ostsee sind etwa 170 NIS bekannt^{13,14}, von denen sich mehr als 70 dauerhaft etabliert haben. Die meisten NIS reagieren spezifisch auf Veränderungen in der Umwelt, sodass die durch den Klimawandel verursachten Veränderungen artspezifisch sind und durch komplexe Wechselwirkungen mit einheimischen Arten noch verstärkt werden.



Was geschieht bereits?

● Bislang kann keine Invasion mit Sicherheit auf den Klimawandel zurückgeführt werden. Durch den Klimawandel verursachte Umweltveränderungen können den Stress für einheimische Arten erhöhen¹⁵⁻¹⁸, einige NIS begünstigen und ihre ökologischen Auswirkungen verstärken¹⁹⁻²¹.

● Durch die klimabedingte Verschiebungen der Artgrenzen in Richtung höherer Breitengrade steigt das Potenzial für neue Einschleppungen in der Ostsee. Multidekadische Veränderungen des Salzgehalts haben sich ebenfalls auf die Verbreitung und Ansiedlung von NIS ausgewirkt²².



Was ist zu erwarten?

● Höhere Temperaturen und ein möglicher Rückgang des Salzgehalts können die Einführung und das Wachstum bestimmter NIS erhöhen, z. B. der Dreikantmuschel, verschiedener Süßwasserkrebse und der Rundgrundel²¹⁻³⁵.

● Veränderungen sind möglicherweise zuerst in Mündungsgebieten zu beobachten, wo der Beitrag der NIS bereits hoch ist^{36,37}.

● Wenn der Sauerstoffmangel in wärmeren Küstengewässern zunimmt, kann er das Wachstum der Rundgrundel einschränken³⁸, während tolerantere Arten wie der Borstenwurm *Marenzelleria* spp. zunehmen³⁹ können. Diese bodenlebenden Arten können die Nährstoffflüsse in den Sedimenten verändern und kontaminierte Sedimente resuspendieren⁴⁰.

● Wärmere Winter werden das Überleben eingeführter Warmwasserarten erleichtern^{41,42}.



Andere Antriebskräfte

Die überwiegende Mehrheit der NIS wird von Schiffen in das Ökosystem der Ostsee eingeschleppt. Auch die Aquakultur hat einen erheblichen Einfluss¹⁴. Eine Ausrottung nach der Einschleppung ist in den meisten Fällen unmöglich, und das Hauptaugenmerk muss darauf liegen, die Einschleppung von NIS von vornherein zu verhindern. Nicht-klimatische anthropogene Störungen wie Überdüngung und die Zerstörung von Lebensräumen beeinflussen die Ansiedlung von NIS ebenfalls.



Wissenslücken

Da die meisten NIS ökologisch einzigartig sind, ist es wichtig zu ergründen wie sich invasive Arten in einer neuen Umgebung verhalten und interagieren und in wiefern sie eine Gefahr für einheimische Arten und Ökosystemfunktionen darstellen. Managementmaßnahmen werden erschwert durch die Vielfalt und Unvorhersehbarkeit der potenziellen Eindringlinge.



Politische Bedeutung

Sind NIS erst einmal etabliert, ist es praktisch unmöglich, sie zu entfernen. Man konzentriert sich daher auf Präventivmaßnahmen. In der EU-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie, der EU-Verordnung über invasive gebietsfremde Arten und dem HELCOM-Aktionsplan für die Ostsee wurden Ziele zur Minimierung negativer Auswirkungen von NIS auf die biologische Vielfalt und Ökosysteme festgelegt. Der Klimawandel erschwert das Erreichen dieser Ziele. Der Schwerpunkt der Maßnahmen sollte auf der Verhinderung neuer Einschleppungen liegen, z. B. durch die Umsetzung von Vorschriften für die Aquakultur sowie Abkommen zum Management von Ballastwasser und Biofouling an Schiffsrümpfen (sowohl im kommerziellen als auch im Freizeitbereich).



Meeres- schutzgebiete

Verbundene Parameter

Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Wasservögel, Meeressäuger, Nicht-einheimische Arten, Offshore-Windparks, Küstenschutz, Schifffahrt, Tourismus, Fischerei, Aquakultur, Marine Kohlenstoffspeicherung, Ökosystemleistungen

Autoren

Ari Laine, Metsähallitus Parks and Wildlife Finland, Finland
Örjan Östman, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden
Dieter Boedeker, Bundesamt für Naturschutz (BfN), Deutschland
Gesine Lange, Bundesamt für Naturschutz (BfN), Deutschland

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Birds Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Meeresschutzgebiete (Marine Protected Areas, MPA) sollen ökologisch bedeutsame Aspekte der Meeres- und Küstenumwelt bewahren, einschließlich der biologischen und genetischen Vielfalt und den Ökosystemfunktionen. Diese sind unerlässlich für die Anpassung und das langfristige Überleben der Arten unter sich ändernden Umweltbedingungen¹. MPAs in ausreichender Größe und an geeigneter Stelle sollten dazu beitragen, dass sich Meeresorganismen an den Klimawandel anpassen und ihr Überleben sichern können, indem andere menschliche Einflüsse verringert werden². Im Jahr 2021 machten die HELCOM-MPAs etwa 13 % der Ostsee aus^{3,4}. Die Wirkungen des Klimawandels lassen sich durch die Bewertung der Folgen auf die Schutzfunktion der MPAs für benthischen Lebensräume, Fischbestände, Vögel und Robben abschätzen.



Was geschieht bereits?

Im Vergleich zu anderen Meeresgebieten ist die Ostsee anfällig für die mit dem Klimawandel verbundene Erwärmung und Sauerstoffverarmung⁵. Bisher haben sich die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem bereits durch dauerhafte Veränderungen im Ökosystem bemerkbar gemacht⁵. Mildere Winter mit kürzerer und geringerer Eisbedeckung schränken die Bruthabitate der Ringelrobbe ein (siehe Abschnitt "Meeressäuger").

Gleichzeitig gewinnen MPAs als Überwinterungsgebiet an Bedeutung durch die Verlagerung des Verbreitungsgebiets von Vögeln nach Norden (siehe Abschnitt "Wasservögel"). Veränderungen des Lebensraums durch höhere Temperaturen und Sauerstoffmangel (im Zusammenhang mit Eutrophierung) können Fischbestände und benthische Lebensgemeinschaften schädigen und damit



Was ist zu erwarten?

Bei zurückgehendem Meereis und zunehmendem Wasserstand, Küstenerosion und Überschwemmungen könnten einige MPAs einen Teil ihrer Funktion als Brut- und Nahrungsgebiete für Meeressäuger und Wasservögel verlieren^{6,7}.

Der Klimawandel könnte die Ausbreitung biologischer Gemeinschaften beeinflussen, somit die Funktion der MPAs beeinträchtigen und zusammen mit anderen anthropogenen Belastungen dazu führen, dass MPAs ihre Ziele nicht erreichen⁸⁻¹⁴.



Andere Antriebskräfte

Kumulative Belastungen durch eine Vielzahl menschlicher Aktivitäten sowohl innerhalb als auch außerhalb von MPAs sind entscheidende Faktoren für die Schädigung des Ökosystems und den Verlust der biologischen Vielfalt in der Ostsee. Intensive Schifffahrt und Fischerei, Sand- und Kiesabbau, Offshore-Anlagen sowie der Eintrag von Nährstoffen und gefährlichen Stoffen vom Land aus stellen eine große Bedrohung für das gesamte Ökosystem der Ostsee und seine Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel dar. Die Belastungen werden durch den eingeschränkten Wasseraustausch noch verschärft.



Wissenslücken

Es existiert keine allgemein anerkannte Methode zur Bewertung der ökologischen und administrativen Wirksamkeit von MPAs, was die Bewertung und Optimierung von MPAs erschwert. Außerdem gibt es keine vollständig abgekoppelten geschützten Gebiete, die als Referenzgebiete für die Bestimmung natürlicher Bedingungen dienen könnten, was die Festlegung der Ziele von MPAs ebenfalls erschwert. Wissenslücken bestehen auch beim Verständnis der Vernetzung von Gebieten, was sich auf die ökologische Kohärenz des MPA-Netzes auswirkt^{15,16}.



Politische Bedeutung

Wirksam verwaltete MPAs könnten die Auswirkungen des Klimawandels abmildern und die biologische Vielfalt sowie gesunde, widerstandsfähige Meeresökosysteme erhalten, die auch als Kohlenstoffspeicher fungieren¹⁷. Einen Wandel weg vom ausschließlichen Schutz bedrohter Arten und Biotop hin zur Sicherung der funktionalen Vielfalt und Biodiversität und zur Gewährleistung von Ökosystemleistungen würde viele Vorteile bringen. Ab 2021 unterstützt HELCOM ein Netzwerk von 177 MPAs, die als Mindestpuffer für die Widerstandsfähigkeit gegen den Klimawandel dienen könnten. Allerdings ist eine Erweiterung des HELCOM MPA-Netzes um Klimarefugien erforderlich, in denen die Aspekte des Nahrungsnetzes und die genetische Vielfalt berücksichtigt werden¹.



Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung

Verbundene Parameter

Wassertemperatur Schichtung, Niederschlag, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Kohlenstoff, Sauerstoff, Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Nicht-einheimische Arten, Ökosystemfunktionen, Aquakultur, Marine Kohlenstoffspeicherung, Ökosystemleistungen

Autoren
Bärbel Müller-Karulis, Baltic Nest Institute, Universität Stockholm, Schweden
Bo Gustafsson, Baltic Nest Institute, Universität Stockholm, Schweden
Oleg Savchuk, Baltic Nest Institute, Universität Stockholm, Schweden
Jacob Carstensen, Universität Århus, Dänemark

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2, 12 and 14
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Common Agricultural Policy (CAP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Stickstoff- und Phosphor pools werden bestimmt durch Einträge vom Land und aus der Atmosphäre und modifiziert durch biogeochemische Prozesse. Diese beiden Nährstoffe durchlaufen einen intensiven Kreislauf in der Wassersäule, in Organismen und dem Bodensediment. Stickstofffixierung und Denitrifikation fungieren als wichtige biogeochemische Quellen und Senken, während sich Phosphor eher in den Bodensedimenten anreichert. Erhebliche Mengen an Nährstoffen werden auch in die Nordsee exportiert^{1,2}. Die Sauerstoffverhältnisse am Boden regulieren die Denitrifikationsraten und die Verteilung von Phosphor zwischen Sediment und Wasser. Höhere Stickstoffverluste und Phosphorfreisetzungen aus den Sedimenten treten bei zunehmendem Sauerstoffmangel auf^{3,4}. Gelöster anorganischer Stickstoff wird in diesem Text mit der Abkürzung DIN und gelöster anorganischer Phosphor mit der Abkürzung DIP bezeichnet.



Andere Antriebskräfte

Die künftigen Änderungen der Nährstoffeinträge werden die Nährstoffkonzentrationen vermutlich stärker beeinflussen als der Klimawandel^{9,10}.

In der nährstoffärmeren Bottensee und in der Bottenwiek werden künftige Flussfrachten von gelöstem organischem Kohlenstoff ebenfalls eine wichtige Rolle spielen, da sie Bakterien dazu anregen, das Phytoplankton bei der Nährstoffnutzung zu verdrängen, was die Phytoplanktonbiomasse verringern kann¹⁶.



Was geschieht bereits?

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stickstoff- und Phosphor pools können noch nicht von anderen Belastungen getrennt werden. Die Auswirkungen der Erwärmung und des Meeresspiegelanstiegs werden durch Veränderungen der Nährstoffbelastung und des Sauerstoffgehalts im Bodenwasser überdeckt⁴. Die Stickstoffkonzentrationen sind in den meisten Ostseebecken seit 1990 zurückgegangen, aber die Phosphor pools zeigen keinen Trend⁵.

Die Überdüngung hat dazu geführt, dass flache Gebiete mit eingeschränktem Wasseraustausch anfälliger für hypoxische Ereignisse geworden sind⁶.

Nährstoffe, die während der hypoxischen Ereignisse aus den Sedimenten freigesetzt werden, fördern die sommerliche Phytoplanktonblüte⁷. Veränderungen der Schichtung und der Wolkendecke⁸ verlängern derzeit die Wachstumssaison des Phytoplanktons, mit einem früheren Beginn im Frühjahr und einer verlängerten Herbstblüte⁸, ohne klare Auswirkungen auf die Nährstoffkonzentrationen⁸.



Wissenslücken

Das Ausmaß künftiger Nährstoffbelastungen, die Bioverfügbarkeit ihres organischen Anteils sowie die Rückhaltepotenziale von Nährstoffen in der Küstenzone sind ungewiss, ebenso wie die künftigen Nährstoffeinträge über den Skagerrak¹⁷. Ein geringerer Salzgehalt im Wasser könnte die Phosphorbindung in den Sedimenten erhöhen¹⁸, aber sowohl das Ausmaß der künftigen Salzgehaltsänderung als auch die Reaktion der Sedimente sind ungewiss¹⁷. Die Rückkopplungen zwischen Klimawandel, Phytoplanktongemeinschaften und Sedimentation sind nur unzureichend bekannt¹⁹, und es werden mehr Zahlen über die Stickstoffumsetzungen benötigt, insbesondere für Küstengebiete²⁰. Gelöste organische Formen von Stickstoff und Phosphor sind wichtige biogeochemische Komponenten, deren Dynamik in Modellen nur unzureichend beschrieben wird.



Was ist zu erwarten?

Die Entwicklung der Nährstofffrachten wird die künftigen Nährstoffkonzentrationen dominieren^{9,10}. Die Erwärmung führt zu einer Abnahme der bodennahen Sauerstoffkonzentrationen durch Intensivierung interner Nährstoffkreisläufe und eine stärkere thermische Schichtung⁹⁻¹¹.

Es wird ein Rückgang des DIP-Pools prognostiziert¹² (*). Die DIP-Oberflächenkonzentrationen in der Ostsee werden gemäß den Eintragsszenarien bei Anwendung des BSAP abnehmen und bei den derzeitigen Nährstoffeinträgen in Zukunft leicht ansteigen, während die DIN-Konzentrationen an der Oberfläche in beiden Szenarien unverändert bleiben⁹.

Im Finnischen Meerbusen und in der Bottensee wird erwartet, dass die DIN-Konzentrationen in beiden Eintragsszenarien ansteigen und sich die DIP-Konzentrationen in ähnlicher Weise verändern wie in der zentralen Ostsee⁹.

Es wird erwartet, dass sich die Stickstoff fixierenden Cyanobakterienblüten ausbreiten¹³⁻¹⁵ (**).



Politische Bedeutung

Eine hohe Nährstoffbelastung führt zu Überdüngung, die ein großes Problem in der Ostsee darstellt. Der Nährstoffeintrag stammt in erster Linie aus der Landwirtschaft und dem Einsatz von Düngemitteln an Land. Die Eutrophierung ist ein zentrales Thema des HELCOM-Ostseeaktionsplans (Baltic Sea Action Plan, BSAP)²¹, der EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie²² und der EU-Wasserrahmenrichtlinie²³, und alle diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Überdüngung der Ostsee noch stärker als bisher zu reduzieren.

*) Die Berücksichtigung des Klimawandels in den Eintragsszenarien bei Anwendung des BSAP führt zu einem Rückgang von 50% des DIN-Pools bis 2070-2100; bei derzeitigen Einträgen (keine Anwendung des BSAP) von 25%¹².

**) Ohne eine Verringerung der Nährstoffbelastung wird mit einer Ausweitung der stickstofffixierenden Cyanobakterienblüten gerechnet.



Ökosystemfunktionen

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meereis, Sonneneinstrahlung, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Schichtung, Karbonatchemie, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Sauerstoff, Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse, Benthische Habitate, Küsten- und Wanderfische, Pelagische und bodennahe Fische, Wasservögel, Meeressäuger, Nicht-einheimische Arten, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Küstenschutz

Autoren

Örjan Östman, Rahmat Naddafi, Jens Olsson,
mit Zuarbeit von Agnes M. Karlsson und Magnus Huss, Swedish
University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden

Biota und Ökosysteme

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Birds Directive
EU Common Fisheries Policy (CFP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Ökosysteme der Ostsee verfügen über eine Reihe von Ökosystemfunktionen, z. B. den Nährstoff- und Kohlenstoffkreislauf oder die Produktion von Biomasse. Klimabedingte Faktoren strukturieren die Nahrungsnetze der Ostsee sowohl durch Top-down- (Fraßdruck) als auch durch Bottom-up-Prozesse (Biomasseproduktion)¹⁻⁷, die für das Funktionieren des Ökosystems grundlegend sind. Wechselwirkungen innerhalb der Nahrungsnetze, das Nährstoffrecycling und andere Ökosystemeigenschaften werden wahrscheinlich vom Klimawandel beeinflusst.



Was geschieht bereits?

Die langandauernde Überdüngung hat zu einer Erhöhung der Primärproduktion geführt, und in den letzten Jahrzehnten wurden in wärmeren Jahren häufiger Algenblüten beobachtet. Dies führt zu verstärktem Abbau von organischem Material und Sauerstoffarmut in den Bodensedimenten^{1-4,8-10}

Änderungen der Eisbedeckung, der Bewölkung und der Windverhältnisse im Frühjahr könnten zu zeitlich versetzten Algenblüten geführt haben, was sich auf die benthische Produktivität auswirkt^{1,4}.

Veränderungen der hydroklimatischen Bedingungen in Verbindung mit Fischerei und Überdüngung haben zu einer Verschiebung von größerem zu kleinerem Zooplankton^{8,9} geführt. Weiterhin ist sowohl in küstennahen Bereichen wie in der offenen See eine stärkere Bedeutung der Nährstoffverfügbarkeit (Bottom-up-Kontrolle) und einer schwächeren Regulierungskapazität des Fraßdrucks auf die Ökosystemstruktur (Top-down-Kontrolle) zu beobachten^{5-7,11-13}.



Was ist zu erwarten?

Wärmeres Wasser könnte zu einer Erhöhung der pelagischen und benthischen Primärproduktion führen^{1,2,8,9,14}.

Wenn die Nährstoffbelastung nicht verringert wird, wird der Sauerstoffgehalt in der Wassersäule und im bodennahem Wasser sinken¹⁵. Der Einfluss auf höhere trophische Ebenen hängt von der jeweiligen Organismengruppe ab^{8,16-19}.

Ein abnehmender Salzgehalt würde sich wahrscheinlich auf die Artenzusammensetzung des Zooplanktons und der Fischgemeinschaften auswirken, sowie auf die damit verbundenen Funktionen, z. B. den Fraßdruck^{9,17,20,21}.

Ein verstärkter Zufluss von gelösten organischen Stoffen kann die benthische Produktion erhöhen und die bakterielle Produktion gegenüber der des Phytoplanktons steigern. Reduzierte Lichtverhältnisse können die gesamte Primärproduktion benthischer und pelagischer Nahrungsnetze verringern^{22,23}.



Andere Antriebskräfte

Die Fischerei übt einen starken Druck auf einige Fischarten aus und führt dazu, dass einige Beuteorganismen einem schwächeren Fraßdruck unterliegen^{5-7,11-13}.

Die Nährstoffkonzentrationen sind ausschlaggebend für die Produktion von Biomasse, mit negativen Auswirkungen für Sauerstoffgehalt und Transparenz des Wassers, und der Klimawandel kann die Funktionsweise der Ökosysteme zusätzlich erheblich verschlechtern^{8,9,15,24}.

Robben und Kormorane sind an der Ostsee zahlreicher geworden, mit ungewissen Auswirkungen auf das Nahrungsnetz⁶. Toxine, Meeresmüll, Arzneimittelmüll und Vitaminmangel (z. B. Thiamin) belasten Individuen verschiedener funktioneller Gruppen, aber die Auswirkungen auf das Ökosystem sind ungewiss.



Wissenslücken

Parameter wie z. B. Sauerstoff, Salzgehalt und Temperatur unterliegen verschiedenen Wechselwirkungen, mit potenziell indirekten Auswirkungen auf das Funktionieren von Ökosystemen^{6,8,9,18,19,24}. Es ist daher wichtig, das Ausmaß und die Wechselwirkungen des Klimawandels mit anderen menschlichen Einflüssen abzuschätzen⁶. Wie Veränderungen in Struktur, Widerstandsfähigkeit und Funktionsweise des Nahrungsnetzes von langfristigen klimatischen Veränderungen abhängen, insbesondere in Bezug auf extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, ist unklar. Die Erhebung und Analyse von Monitoringdaten vor, während und nach extremen Ereignissen wie Hitzewellen oder geringer Eisbedeckung wäre wichtig^{25,26}.



Politische Bedeutung

Ökosystemfunktionen sind essenziell für Ökosysteme und Nahrungsnetze, einschließlich wichtiger Ökosystemleistungen für das menschliche Wohlbefinden. Das Management von Ökosystemen konzentriert sich im Allgemeinen auf Populationen (Fischerei/Jagd, Schutz) oder Einträge (Nährstoffe, toxische Verbindungen), berücksichtigen aber kaum die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels. Aktuelle Managementstrategien sollten diese Aspekte mit einbeziehen. Weiterhin sollte überlegt werden inwieweit extreme Wetterereignisse ökologische Regimewechsel (regime shifts) auslösen könnten (Vertrauensniveau: mittel), und wie vorbeugende Strategien aussehen könnten^{2,3,9,14,15}. Langfristige Managementstrategien sollten auch die erwarteten Veränderungen der Primärproduktion und der Nahrungsnetze mit berücksichtigen⁶.



Indirekte Parameter:

Nutzung durch den Menschen







Offshore-Windanlagen

Verbundene Parameter:

Meeresis, Wind, Wellen, Sedimentverlagerungen, Küsten- und Wanderfische, Wasservögel, Meeressäuger, Marine Schutzgebiete, Schifffahrt, Tourismus, Fischerei, Marine Kohlenstoffspeicherung

Verbindungen zu politischen Zielen:
UN Sustainable Development Goals 13 and 14
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
HELCOM Baltic Sea Action Plan
Renewable Energy Directive (2018/2001/EU)
EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future (COM(2020) 741)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Windparks sind die wichtigsten Offshore-Strukturen in der Ostsee und machten im Jahr 2021 mit einer installierten Leistung von derzeit 2 GW¹ etwa 10 % der europäischen Offshore-Windenergie aus. In einem ehrgeizigen Szenario wurde die Windkraftkapazität bis 2050 auf 32 GW² geschätzt. Die Umweltauswirkungen von Windparks sollten mit großer Vorsicht betrachtet werden. Sie wirken sich auf viele ozeanografische Prozesse aus, darunter Turbulenzen im Windschatten der Anlagen, Wellenenergie, lokale Unterspülung der Anlagen (Kolk), veränderte Strömungsmuster sowie Auftriebsphänomene. Die Unterwasserstrukturen können die strukturelle und funktionelle Artenvielfalt des benthischen Systems lokal verändern⁴. Meeressäuger können durch Unterwasserlärm während des Baus und Vögel und Fledermäuse durch Blockierung der Flugrouten und Kollisionen während des Betriebs der Anlagen beeinträchtigt werden⁵⁻⁹.



Was geschieht bereits?

Der erste Offshore-Windpark der Welt wurde 1991 in Vindeby, Dänemark, errichtet. Stand 2021 gibt es in der Ostsee Offshore-Windparks in Deutschland (1.074 MW), Dänemark (872 MW), Schweden (192 MW) und Finnland (68 MW)¹. Der Klimawandel (z. B. Veränderungen der Eisverhältnisse, Windfelder, Wellen) hat keinen großen Einfluss auf den Einsatz von Offshore-Strukturen¹⁰. Investitionen in erneuerbare Offshore-Energien wurden im Rahmen des europäischen Green Deal geleistet, und im November 2020 wurde eine spezielle EU-Strategie für erneuerbare Offshore-Energien zur langfristigen nachhaltigen Entwicklung dieses Sektors veröffentlicht¹¹.



Was ist zu erwarten?

Die Europäische Kommission schätzt, dass Europa bis 2050 240-450 GW an Offshore-Windenergie benötigen wird, was bis zu 30 % des geschätzten europäischen Strombedarfs zu diesem Zeitpunkt entspricht¹². Die Windenergiebranche argumentiert, dass zum Erreichen von 450 GW die Offshore-Windkapazität in der Ostsee auf 83 GW ansteigen müsste. Letzteres würde bedeuten, dass die jährliche Genehmigungsrate zwischen 2030 und 2040 von 2,2 GW (430 km²) auf 3,6 GW (720 km²) pro Jahr steigen müsste. Der zunehmende Raumbedarf, die gegensätzlichen Interessen und die Risiken für die Ökosysteme erfordern eine maritime Raumplanung sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen^{13,14}.



Andere Antriebskräfte

Der Kampf gegen den Klimawandel ist die wichtigste Triebfeder für den Ausbau der Offshore-Windparkindustrie. Neben dem Klimawandel gibt es jedoch andere Faktoren, die den Einsatz dieser Offshore-Anlagen beeinflussen. Dazu zählen Wassertiefe (< 50 m), Windverhältnisse (> 7 m s⁻¹) und verschiedene Planungsfragen². Weitere Triebkräfte sind z. B. Investitionen, industrielle und beschäftigungspolitische Fragen, regionale und internationale Zusammenarbeit, rechtliche Rahmenbedingungen, Versorgungsketten, technologische Innovationen⁶, sowie Ausschüsse aufgrund militärischer Gegebenheiten¹³.



Wissenslücken

Es ist wenig bekannt wie die Größe der Anlagen die Organismen beeinflusst. Numerische Modelle können die Auswirkungen großflächiger Bauten, mögliche kumulative Effekte mehrerer Parks oder Fernwirkungen an der Küste nicht vorherzusagen. Der weitere Ausbau der Offshore-Windenergie sollte schrittweise und mit angemessenen Umweltverträglichkeitsprüfungen erfolgen. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen des Ausbaus der Offshore-Windenergie auf die biologische Vielfalt durch umfassende, kontinuierliche und engmaschige Forschung und Überwachung weiter untersucht werden. Beobachtungsstudien sind auch notwendig, um die Modelle zu validieren, und eine umfassende standortspezifische Datenerhebung ist erforderlich, um etwaige Veränderungen verglichen mit dem natürlichen Zustand zu dokumentieren³.



Politische Bedeutung

Die Offshore-Windenergie ist einer der Eckpfeiler der Energie- und Klimaziele der EU. Der Europäische Green Deal erkennt das Potenzial der Offshore-Windenergie als Beitrag zu einer modernen, ressourcenschonenden und wettbewerbsfähigen Wirtschaft an. Die Kommission hat eine EU-Strategie für erneuerbare Offshore-Energien veröffentlicht und die Interessengruppen aufgefordert, die vorgeschlagenen politischen Maßnahmen zu erörtern und voranzutreiben¹¹. Die EU und die nationalen Regierungen haben sich jedoch auch zum Schutz der Ökosysteme verpflichtet, die durch die zunehmenden Offshore-Strukturen gefährdet sein könnten. Daher ist eine breite politische Diskussion erforderlich, um ein Gleichgewicht zwischen dem Bedarf an erneuerbarer Energie und ihren Umweltauswirkungen herzustellen.



Küstenschutz

Verbundene Parameter

Meeres, Flussabfluss, Meeresspiegel, Wind, Wellen, Sedimentverlagerungen, Wasservögel, Marine Schutzgebiete, Ökosystemfunktionen, Tourismus

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 13 and 14
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Floods Directive
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Ostseeküsten sind aufgrund des Klimawandels und verschiedener menschlicher Aktivitäten einer Vielzahl von Stressoren ausgesetzt^{1,2}. Die Auswirkungen sind regional unterschiedlich und hängen von der Küstenbeschaffenheit und den dort ablaufenden Prozessen ab¹. Im Laufe der Jahrzehnte wurden vor allem an den weichen Sedimentküsten der südlichen Ostseeküste verschiedene Küstenschutzbauten errichtet, darunter Buhnen, Schotten, Mauern, Deckwerke, Wellenbrecher, Schwellen und Sandwälle³. Diese Strukturen ändern die natürlichen Prozesse und reduzieren die natürliche Dynamik des Lebensraums. Hochwasserschutz an den Küsten ist notwendig, weckt aber Bedenken hinsichtlich der langfristigen Nachhaltigkeit und des Nutzens für das Ökosystem⁴.



Was geschieht bereits?

Die weichen Sedimentküsten im Süden sind am anfälligsten¹ und weisen auch die meisten Küstenschutzstrukturen auf. Es setzt sich jedoch immer mehr die Erkenntnis durch, dass "weiche Maßnahmen" anstelle von "harten" Strukturen ein besser sein könnten. Die Ökosystemleistungen, die z. B. von Gezeitenfeuchtgebieten erbracht werden, können eine entscheidende Rolle bei der Verringerung der Anfälligkeit von Küstengemeinden für den Anstieg des Meeresspiegels und für Küstengefahren spielen⁵. Es gibt Beispiele für den Verzicht auf traditionelle "harte" Küstenschutzmaßnahmen an der Ostseeküste, wie z. B. Sandaufschüttungen, um eine Erholung der natürlichen Dynamik zu ermöglichen^{6,7}.



Was ist zu erwarten?

Küstenschutzstrategien müssen zunehmend die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigen⁸. Entlang der niedrigen Küsten der südlichen Ostsee wird der Anstieg des Meeresspiegels voraussichtlich die Erosion von Klippen und Stränden verstärken und die Zufuhr von Sedimenten in die Küstenzone erhöhen⁹. Der Klimawandel könnte die gesellschaftlichen Kosten für den Küstenschutz, für den Verlust von Sedimenten für den Küstenwiederaufbau, für den Verlust wertvoller natürlicher Lebensräume sowie für den Verlust von wirtschaftlichem Wert und Eigentum erhöhen¹⁰. Daher müssen innovative Ansätze wie der Systemansatz (Systems Approach Framework - SAF) als Instrument für den Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung der Küstenzonensysteme stärker genutzt werden^{11,12}.



Andere Antriebskräfte

Menschliche Aktivität wirkt sich auf Küstenprozesse aus, und zwar durch Veränderungen der Landnutzung und Bodenbedeckung, den Bau von Küsten- und Offshore-Infrastrukturen, oder die Verklappung von Material und Baggerarbeiten. Die regionale demografische Entwicklung und andere sozioökonomische Aspekte beeinflussen das Küstenökosystem, da neben der Anpassung an den Klimawandel auch verschiedene gesellschaftliche und wirtschaftliche Ansprüche in die regionale Raumordnungspolitik integriert werden müssen⁸.



Wissenslücken

Veränderungen bei Landnutzung, Bodenbedeckung und dem Bau von küstennaher Infrastruktur sind von entscheidender Bedeutung, da sie mit sedimentären Prozessen wechselwirken und unerwartete morphodynamische Folgen haben können. Ein regionales Sedimentbudget für die südliche und östliche Ostsee muss noch erstellt werden. Dies erfordert eine interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit¹. In vielen Teilen der südlichen Ostseeküste stehen bestehenden Küstenschutzstrukturen unter den sich ändernden klimatischen Bedingungen bzgl. ihrer Nachhaltigkeit und Effizienz in der Diskussion, auch hinsichtlich von Anpassung, Entfernung oder Ersatz⁴.



Politische Bedeutung

Küstenprozesse und ihr nachhaltiges Management unter dem Einfluss des Klimawandels haben weltweit und in der Ostsee eine hohe politische Relevanz. Küstenschutzmaßnahmen sollten auf nationaler oder regionaler Ebene in integrierte Managementstrategien einfließen, die physikalische und ökologische Parameter, Kosten-Nutzen-Analysen sowie Verwaltungs- und Rechtsstrukturen umfassen¹³. Der natürliche Küstenschutz und wichtige Ökosystemleistungen² der Küste werden bei der Raumplanung zu Lande als auch zu Wasser in der Regel vernachlässigt, aufgrund der Komplexität der Küstensysteme und des Mangels an präzisen wirtschaftlichen Bewertungen. Dies sollte in zukünftigen Managementplänen berücksichtigt werden.



Schifffahrt

Verbundene Parameter:

Meereis, Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre, Wind, Wellen, Meeressäuger, Nicht-einheimische Arten, Marine Schutzgebiete, Off-shore-Windparks, Fischerei

Autoren

Anna Rutgerström, Uppsala University, Sweden
Stuart Ross, European Community Shipowners' Associations
Jonas Pålsson, Swedish Agency for Marine and Water Management, Sweden

Menschliche Aktivitäten

Verbindungen zu politischen Zielen:

HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy
MARPOL Annex VI



Beschreibung

Die Ostsee ist seit der Vorgeschichte eine wichtige Route für den Seehandel und gehört heute zu den verkehrsreichsten Schifffahrtsgebieten der Welt. Im Jahr 2017 gab es 40.391 Passagen in die Ostsee¹. Im Jahr 2018 verkehrten rund 8.300 Schiffe in diesem Gebiet². Obwohl die Schifffahrt ein vergleichsweise effizientes Transportmittel ist, bezogen auf Kohlenstoffemissionen, gibt es Probleme in Bezug auf Luftqualität, Eutrophierung und andere Aspekte der Meeresumwelt³.



Was geschieht bereits?

In den letzten Jahrzehnten haben Anzahl und Größe der Schiffe in der Ostsee zugenommen. Das Klima hat sich verändert, die Eissaison ist kürzer und das Eis bricht früher auf^{4,5}, was die Schifffahrt in normalerweise eisbedeckten Gebieten erleichtert. Die Veränderungen im Windfeld waren bisher gering und hängen vom untersuchten Zeitraum und Gebiet ab⁶. Extreme Wellen haben sich in ihrer Stärke oder Intensität nicht wesentlich verändert⁶. Veränderungen bei Wind und Wellen könnten sich jedoch möglicherweise in Zukunft auf die Sicherheit und den Treibstoffverbrauch auswirken.



Was ist zu erwarten?

Modellrechnungen sagen einen jährlichen Anstieg des Schiffsverkehrs in Europa um 2,5 % im Fracht- und 3,9 % im Personenverkehr voraus⁷. Weniger Meereis wird weniger Eisbrecher erfordern, aber das Eis wird mobiler sein. Das Wellenklima in der nördlichen und östlichen Ostsee wird sich voraussichtlich verschärfen, und es wird erwartet, dass gefährliche Eisbildung auf den Schiffen durch gefrierende Gischt häufiger wird.

Häfen und Schifffahrtswege müssen möglicherweise verlegt werden oder aufgrund des steigenden Meeresspiegels und zunehmender Sedimentation durch Küstenerosion mehr oder weniger ausgebaut werden.



Andere Antriebskräfte

Ökonomische Faktoren und neue Vorschriften werden die künftige Schifffahrt wahrscheinlich viel stärker beeinflussen als der direkte Klimawandel. Insbesondere Vorschriften zur CO₂, NO_x, SO_x-Verringerung und von Partikelemissionen werden Konstruktion und Kraftstoffverbrauch beeinflussen. Der Klimawandel kann die Transportmuster einiger Güter beeinflussen, da diese an anderen Standorten produziert werden könnten. Folglich werden sich die Handelsströme verschieben.



Wissenslücken

Es ist unklar, wie sich maritime Vorschriften zur Eindämmung des Klimawandels auf die Zusammensetzung der Flotte, die Auswahl der Kraftstoffe und zusätzliche technologische Entwicklungen auswirken werden. Eine Abschätzung, wie die Schifffahrt auf der Ostsee auf diese Änderungen reagiert, ist daher nicht möglich.



Politische Bedeutung

Die Schifffahrt ist ein vergleichsweise CO₂-effizienter Weg, um Güter zu transportieren, hat aber dennoch einen beträchtlichen Kohlenstoff-Fußabdruck. Die Mitgliedstaaten der International Maritime Organisation (IMO) haben sich verpflichtet, die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen des internationalen Seeverkehrs bis 2050 (ab 2008) um 50 % zu reduzieren und bis 2100⁸ ganz einzustellen. Änderungen der IMO-Umweltvorschriften, die verbindliche, zielgerichtete technische und betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionen vorsehen, wurden 2021 verabschiedet. Die zunehmende Schifffahrt in zuvor vereisten Gebieten kann die Umweltbelastungen erhöhen, aber neue Vorschriften über Lärm und Emissionen könnten Schiffe aus sensiblen Meeresgebieten ausschließen. Die Errichtung von Offshore-Windparks sollte bei der Meeresraumplanung berücksichtigt werden. Die Umweltauswirkungen der Schifffahrt müssen besser mit denen der Industrie an Land, einschließlich des Landverkehrs, verglichen und priorisiert werden.



Tourismus

Verbundene Parameter

Lufttemperatur, Wassertemperatur, Meereis, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Meeresspiegel, Wind, Wellen, Sedimentverlagerungen, Marine Schutzgebiete, Küstenschutz, Offshore-Windparks, Ökosystemleistungen

Autoren
Kari Hyytiäinen, Department of Economics and Management, Universität Helsinki, Finnland
Jarkko Saarinen, Geography Research Unit, Universität Oulu, Finnland
Janika Laht, Climate Department, Ministry of the Environment, Estland

Menschliche Aktivitäten

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goal 14
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Bathing water Directive
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Recommendation on Integrated Coastal Zone Management
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Ostsee ist eine wichtige Region für den Küsten- und Meerestourismus. Die Tourismusindustrie der Region beschäftigt etwa 640.000 Menschen und verzeichnet jährlich über 227 Millionen Übernachtungen¹. Die Küstengebiete der Ostsee bieten Möglichkeiten für eine breite Palette von Tourismusformen, darunter Kuren, Sonnenbaden und Strandaktivitäten, Bootsfahrten, Angeln, Schlittschuhlaufen und Aufenthalte in Ferienhäusern. Der Anteil des internationalen Tourismus ist beträchtlich, vor allem im Kreuzfahrttourismus². Im Jahr 2019 war der Hafen von Helsinki mit insgesamt 12,2 Millionen Passagieren der verkehrsreichste internationale Passagierhafen in Europa³.



Was geschieht bereits?

Verschiedene Ökosystemleistungen und Ressourcen sind für den Küstentourismus relevant, und der Klimawandel kann diese vorteilhaft oder nachteilig gestalten⁴. Wärmere Sommer locken immer mehr Küstentouristen nach Nordeuropa, die Wintersport-Saison verkürzt sich jedoch durch weniger Tage mit Minusgraden. Die Wachstumssaison von Cyanobakterien hat sich in den letzten Jahrzehnten deutlich verlängert⁵, was das Baden potenziell weniger attraktiv macht. Die Einführung nicht einheimischer Arten kann sowohl die Fischerei als auch die Möglichkeiten zur Erholung beeinträchtigen⁶. Touristen sind jedoch recht flexibel, wenn es um Ort, Zeitpunkt oder Art des Urlaubs geht, und können diese je nach den Bedingungen vor Ort anpassen.



Was ist zu erwarten?

Reiseziele in höheren Breitengraden (wie der Ostseeregion) werden aufgrund der Klimaerwärmung voraussichtlich profitieren, auch da die Wahrscheinlichkeit von Klimaextremen und Gesundheitsrisiken (z. B. Wiederauftreten von Malaria) in den derzeit beliebtesten Reisezielen in Süd- und Mitteleuropa steigt⁷. Andererseits könnten die Küstengebiete der Ostsee, je nach Umfang der Klimaschutzmaßnahmen, unter häufigeren und ausgedehnteren Cyanobakterienblüten und den damit verbundenen Gesundheits- und Imageproblemen leiden. Der Tourismus im Küsten- und Meeresraum der Ostsee kann stärker wachsen als im weltweiten Durchschnitt.



Andere Antriebskräfte

Die Tourismusbranche ist anfällig für externe Veränderungen und Belastungen, einschließlich globaler und regionaler wirtschaftlicher und politischer Prozesse⁸. Die sich verändernden Umweltbedingungen und ihre lokalen Auswirkungen können das Entwicklungspotenzial und die Nachfrage nach Küsten- und Meerestourismus im Ostseeraum entweder fördern oder hemmen. Obwohl der Küstentourismus seit langem zunimmt, können globale Gesundheitskrisen oder Sicherheitsprobleme die Zahl der Besuche auf globaler, regionaler und lokaler Ebene schnell verringern, je nach geografischem Gebiet und Kundensegmenten, die von den Folgen betroffen sind. So führte beispielsweise der Ausbruch von COVID-19 im Jahr 2020 zu einem raschen Einbruch des internationalen Reiseverkehrs.



Wissenslücken

Das Potenzial für den Küsten- und Meerestourismus im Ostseeraum hängt neben dem Klimawandel selbst von den mit ihm verbundenen sozioökonomischen Entwicklungen ab, etwa der Häufigkeit und Art noch unbekannter Gefahren und Verschlechterungen der Meeres- und Küstenumwelt, und den sich ändernden Kundenpräferenzen. Daher ist es schwierig, die künftige Nachfrage nach touristischen Dienstleistungen im Ostseeraum zu prognostizieren oder auch nur Wahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Was genau die Wahl des Reiseziels bestimmt, ist nur unzureichend bekannt.



Politische Bedeutung

Der Küsten- und Kreuzfahrttourismus an der Ostsee ist wichtig für die Sozioökonomie der Region. Die Wettbewerbsfähigkeit dieses Tourismuszweigs hängt weitgehend ab vom Umweltzustand der Ostsee und der Widerstandsfähigkeit der Tourismusindustrie gegenüber natürlichen, sozialen und wirtschaftlichen Veränderungen. Um den maritimen Tourismus zu erhalten, müssen Schadstoffbelastungen, Nährstoffeinträge, Vermüllung und Ölverschmutzung kontrolliert werden. Weiterhin ist die Einbindung verschiedener Interessengruppen (*multi-stakeholder governance*) und die Erstellung von Indikatoren zur wirtschaftlichen, ökologischen, kulturellen und sozialen Nachhaltigkeit wichtig⁸. Der aus Unternehmen verschiedenster Größe bestehende Tourismussektor sollte sorgsam beobachtet werden um seine interne Entwicklung zu fördern, aber auch um Klimafolgen soweit wie möglich abfedern zu können.





Fischerei

Verbundene Parameter:

Meereis, Meeresspiegel, Wind, Wellen, Pelagische und bodennahe Fische, Küsten- und Wanderfische, Meeressäugtiere, Marine Schutzgebiete, Offshore Windfarms, Ökosystemfunktionen, Schifffahrt, Aquakultur, Ökosystemleistungen

Autoren

Meri Kallavuo, Sanna Kuningas, Antti Lappalainen, Natural Resources Institute Finland (Luke), Finnland
Örjan Östman, Jens Olsson, Rahmat Naddaf, Lena Bergström, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden
Oksana Glibko, St. Petersburg State Geological University "Specialized Firm Mineral", Russland
Antanas Kontautas, Marine Research Institute, Universität Klaipėda, Litauen

Menschliche Aktivitäten

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan (BSAP)
UN Sustainable Development Goals 2 and 14
UN Convention on Biological Diversity (CBD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Common Fisheries Policy (CFP)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die kommerzielle Fischerei in der Ostsee umfasst pelagische Hochsee- und Grundfischflotten, die zu 95 % der Gesamtanlandungen beitragen, sowie eine Vielzahl kleiner Küstenfischereien. Die wichtigsten Zielarten sind Ostseehering, Sprotte, Dorsch und verschiedene Plattfische. Darüber hinaus wird eine Vielzahl von Süßwasser- und Wanderfischen in den Küstengewässern gefangen. Als Fanggeräte werden hauptsächlich Schwimm- und Grundschleppnetze, Stellnetze und Reusen eingesetzt¹. Die Freizeitfischerei ist in den Küstengebieten weit verbreitet². Bei bestimmten Küstenfischarten sind die Fangmengen der Freizeitfischerei vergleichbar oder sogar höher als die der kommerziellen Fischerei^{3,4}.



Was geschieht bereits?

In der nördlichen Ostsee hat die Schleppnetzsaison in einigen Jahren bereits früher begonnen und profitiert aufgrund der kürzeren Eisbedeckung⁵, wobei die küstennahe Freizeitfischerei eingeschränkt wurde². In weiten Teilen der Ostsee hat die winterliche Küstenfischerei auch unter der Konkurrenz mit Robben gelitten, die eisfreie Fangplätze leichter erreichen können⁵. Die Zielarten, insbesondere der Küsten- und Grundfischerei, wechseln aufgrund von Eutrophierung und Klimawandel^{6,7}. Außerdem ist ein erhöhter Aufwand für die Wartung der Fanggeräte erforderlich, da sich Biofilm und fädige Blaualgen ansammeln⁵.



Was ist zu erwarten?

Die Schleppnetzsaison in der nördlichen Ostsee wird sich aufgrund einer kürzeren Eisbedeckungszeit wahrscheinlich verlängern. Die wichtigsten Schleppnetzfischereigebiete für pelagische Arten werden sich wahrscheinlich in südlichere, flachere Gebiete verlagern^{8,9}. Die Küsten- und Freizeitfischerei wird sich zunehmend auf Arten konzentrieren, die wärmere und nährstoffreichere Gewässer bevorzugen¹⁰. Fischerei im Winter wird unter Eismangel und zunehmender Konkurrenz mit Robben leiden. Die Freizeitfischerei könnte allerdings durch längere Saisonzeiten für Bootsausflüge und Angeln populärer werden.



Andere Antriebskräfte

Gesellschaftliche Veränderungen, Fischereivorschriften sowie Änderungen bei Fischbeständen und Märkten werden wahrscheinlich ebenso tiefgreifende Auswirkungen auf den Fischereisektor haben wie der Klimawandel. So könnten beispielsweise Verbrauchernachfrage oder Subventionen die Rentabilität der Fischerei beeinträchtigen. Andere Umweltaspekte, die teilweise mit dem Klimawandel in Wechselwirkung stehen, werden sich ebenfalls auf Nachfrage, Quantität und Qualität auswirken. Dazu gehören z. B. die eventuell zunehmende Eutrophierung, die Regulation der Schadstoffbelastung, Infektionen von Fischparasiten und die Ausbreitung nicht-heimischer Arten.



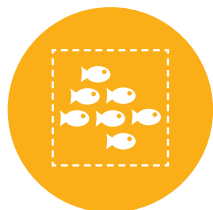
Wissenslücken

Wissenschaftliche Belege für die durch den Klimawandel bedingten Veränderungen in der Ostseefischerei sind noch spärlich. Komplizierte Wechselwirkungen und potenzielle kumulative Effekte in Umwelt, Ökosystem und Gesellschaft machen es sehr schwierig, die potenziellen Folgen des Klimawandels für die verschiedenen Fischereiparten vorherzusagen. Daher beschränken sich die Schlussfolgerungen auf die derzeit beobachteten Trends.



Politische Bedeutung

Die Fischerei spielt eine wichtige Rolle in der Meereswirtschaft, da sie Arbeit und gesunde Nahrungsmittel liefert. Die Fischereiaktivitäten werden durch die gemeinsame Fischereipolitik der EU und auf nationaler Ebene geregelt. Die Überwachungs- und Bewirtschaftungspläne für Fischbestände sollten sich flexibel den Erfordernissen anpassen um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern und die Widerstandsfähigkeit des Ökosystems zu gewährleisten¹¹. Um den potenziell negativen Auswirkungen auf Fischbestände Rechnung zu tragen, sollte der Vorsorge-Ansatz verfolgt werden. Der Klimawandel ist nur eine von vielen Herausforderungen, mit denen der Fischereisektor konfrontiert ist: Wettbewerb mit marinen Raubtieren und zwischen den Fischereisektoren, geringe Rentabilität, Konflikte um gemeinsame Ressourcen, abnehmende Bestände von Zielarten sowie Schadstoffe sind ernsthafte Probleme.



Aquakultur

Verbundene Parameter

Wassertemperatur, Meeresspiegel, Salzgehalt und Salzwasereinströme, Wellen, Sauerstoff, Pelagische und bodennahe Fische, Küsten- und Wanderfische, Wasservögel, Meeressäuger, Nicht-einheimische Arten, Marine Schutzgebiete, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Fischerei, Marine Kohlenstoffspeicherung, Ökosystemleistungen

Autoren
Anders Kiessling und Martyn Futter, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Schweden
Georg Martin, UT, Universität Tartu, Estland
Lauri Niskanen, Markus Kankainen und Jouni Vielma, Natural Resources Institute Finland (Luke), Finnland
Martin Karlsson und Martin Reutgård, Ecopelag
Knut-Olof Lerche, Raisio

Menschliche Aktivitäten

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2, 6, 12, and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Die Aquakultur in der Ostsee wird derzeit von Regenbogenforellenfarmen in offenen Käfigen dominiert und trägt <0,5 % zur gesamten Nährstoffbelastung der Ostsee bei¹. Die Zuchtbetriebe befinden sich in der gesamten Ostsee: auf Åland und im Åbo-Archipel (Finnland), in den dänischen Meerengen und an einigen anderen verstreuten Standorten. Sowohl in Finnland als auch in Schweden haben Stilllegungen und Verlagerungen von Betrieben die Umweltbelastungen auf lokaler Ebene deutlich verringert. Finnland und Estland prüfen derzeit Offshore-Standorte mit einer ersten Pilotanlage in der Bottenwiek und der estnischen Bucht von Tagalaht. Auch das „Extractive Farming“, bei dem Miesmuscheln und Makroalgen geerntet werden um überschüssige Nährstoffe im Seewasser für die Verwendung an Land zurückzugewinnen, wird derzeit untersucht.



Was geschieht bereits?

Die sommerlichen Oberflächentemperaturen überschreiten in der gesamten Ostsee und insbesondere in den nördlichen Gebieten² regelmäßig die für Regenbogenforellen optimalen Werte, was die körperliche Leistungsfähigkeit verringert³, das Wachstum beeinträchtigt und die Sterblichkeit erhöht. Aktuell in der Ostsee gezüchtete Fischarten werden wahrscheinlich nicht von einem veränderten Salzgehalt betroffen sein, aber ein Anstieg der terrestrischen Nährstoffbelastung könnte sich negativ auf die Aquakultur auswirken. Wärmeres Wasser könnte die Zucht von temperaturresistenteren Arten wie Barsch und Zander fördern.

Die Zucht von Miesmuscheln und Makroalgen wird sowohl durch wärmeres Wasser als auch durch den niedrigeren Salzgehalt beeinträchtigt. Ein höherer Wellengang und mehr Hitzewellen sowie eine verstärkter Fraßdruck durch Fische und Vögel würden die Miesmuschelverluste erhöhen^{4,5}.



Was ist zu erwarten?

Höhere Temperaturen, insbesondere in Verbindung mit hohen Algenkonzentrationen, wird die derzeit kultivierten Arten weiter belasten. Ein möglicher Rückgang des Salzgehalts wird die Muschelzucht einschränken und eine Umstellung auf süßwassertolerante Pflanzen und wirbellose Tiere erzwingen. Die Förderung exponierterer Standorte wird die Produktionskosten erhöhen. Die Offshore-Aquakultur für Muscheln und Fische könnte mit Offshore-Windparks zusammengelegt werden. An Standorten mit hohem Wasseraustausch könnten so Anlagen installiert werden, ohne die Schifffahrt zu beeinträchtigen⁶.



Andere Antriebskräfte

Die Förderung von geschlossenen Kreisläufsystemen wirkt sich positiv auf die Aquakultur aus, jedoch werden größere landbasierte industrielle Anlagen aufgrund der geringen Infrastruktur in abgelegenen Schärengebieten wahrscheinlich nicht umgesetzt werden. Verschiedene Faktoren, wie der die maritime Raumplanung, die Akzeptanz von Zuchtfischen als Ergänzung zu Wildfischen durch die Verbraucher, sowie die politische Akzeptanz von marinen Zwischenfruchtkulturen sind für die zukünftige Aquakultur in der Ostsee von großer Bedeutung. Synergien zwischen erneuerbaren Energien und der Nahrungsmittelproduktion, die auf der gemeinsamen Nutzung von Aquakultur und Offshore-Energie beruhen, sollten insbesondere die extraktive Aquakultur fördern. Die Nachfrage nach einer lokalen und nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion zusammen mit der Möglichkeit, Futter für Aquakulturanwendungen lokal und kreislaufbasiert zu produzieren, sollte zu einer weiteren Förderung aller Arten der Aquakultur beitragen.



Wissenslücken

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Aquakultur in der Ostsee und dessen regionale Unterschiede sind ungewiss. Für die Ansiedlung neuer Betriebe sind verlässliche Projektionen über künftige Wassertemperaturen, den Salzgehalt, das Auftreten und die Toxizität von Algenblüten und die Eisbedeckung auf lokaler Ebene erforderlich. Die Verwendung einheimischer Arten, die gegenüber möglichen künftigen Bedingungen tolerant sind, erfordert technische und ökologische Kenntnisse, einschließlich der Verwendung sterilisierter Fische. Neue wirtschaftlich tragfähige Filtertechnologien sowie Lösungen für Tiefwasseranlagen müssen ebenfalls entwickelt und bewertet werden. Eine glaubwürdige Umweltbewertung der Sediment- und Gesamtnährstoffbilanzen von Offshore-Farmen, die Futtermittel aus der Ostsee verwenden, ist ebenfalls erforderlich. Darüber hinaus sind neue Arten, vor allem solche auf den unteren Ebenen der Nahrungskette, und ihre Akzeptanz durch die Verbraucher nicht ausreichend untersucht.



Politische Bedeutung

Die Aquakultur hat das Potenzial, nachhaltige, klimaverträgliche lokale Nahrungsmittel zu liefern und gleichzeitig der Eutrophierung der Meere entgegenzuwirken. Politische Hindernisse und die öffentliche Wahrnehmung stellen für die Aquakultur in der Ostsee wahrscheinlich eine größere Herausforderung dar als der Klimawandel. Durch die Zucht von sterilen Fischen, die sich nicht fortpflanzen können, lässt sich die biologische Vielfalt der Ostsee schützen. Wissenschaftlich fundierte, technologisch innovative sowie bewährte Lösungen sollten unterstützt werden, ebenso wie eine maritime Raumplanung, die ökologisch sensible Gebiete schützt aber dennoch die Entwicklung der Aquakultur ermöglicht, um auf europäischer wie regionaler Ebene politische Ziele wie die Blue Growth-Strategie der EU zu erreichen.



Marine Kohlenstoffspeicherung (Blue Carbon)

Autoren
Dorte Krause-Jensen, Universität Århus, Dänemark
Ökosystemleistungen

Verbundene Parameter:

Wassertemperatur, Meereis, Salzgehalt und Salzwassereinträge, Kohlenstoffchemie, Meeresspiegel, Wellen, Benthische Habitate, Marine Schutzgebiete, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Offshore Windfarms, Aquakultur, Ökosystemleistungen

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 13 and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)
EU Biodiversity Strategy



Beschreibung

Blue Carbon (BC) bezieht sich auf organischen Kohlenstoff, der von Meeres- und Küstenökosystemen aufgenommen und gespeichert wird. Von Pflanzen dominierte Ökosysteme entlang der globalen Küsten sind unverhältnismäßig große Kohlenstoffspeicher und stehen daher hier im Mittelpunkt^{1,2}. Diese "BC-Ökosysteme" stehen unter Druck und haben weltweit große Flächenverluste erlitten^{3,4}. Damit verringerte sich auch ihre Kapazität, Kohlenstoff zu binden^{5,6}. Bewirtschaftungsstrategien zum Schutz und zur Wiederherstellung dieser Ökosysteme tragen daher zur Abschwächung des Klimawandels bei². Dabei handelt es sich um eine *win-win*-Strategie, da die Küstenzonen-Ökosysteme auch einen natürlichen Küstenschutz darstellen und die biologische Vielfalt sowie andere Ökosystemleistungen unterstützen^{2,4,7,8}. In der Ostsee zählen hierzu Küstenwiesen, Seegraswiesen und Makroalgenbetten.



Was geschieht bereits?

Blue-Carbon-Ökosysteme bieten zwar die Möglichkeit dem Klimawandel zu begegnen, sind aber auch anfällig für seine verschiedenen Auswirkungen wie Erwärmung, häufigere Hitzewellen, geringere Meereisbedeckung, veränderter Salzgehalt und Anstieg des Meeresspiegels^{7,9,10}. Für die *Blue-Carbon*-Ökosysteme in der Ostsee liegen noch relativ wenige Studien vor, aber z.B. könnte sich eine Erwärmung auf die Unterwasservegetation auswirken^{11,12}. Die Wechselwirkungen zwischen dem Klimawandel und anderen vom Menschen verursachten Belastungen, die in der Ostsee besonders ausgeprägt sind¹³, verstärken tendenziell solche negativen Auswirkungen^{11,14}.



Was ist zu erwarten?

Es wird erwartet, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die *Blue-Carbon*-Ökosysteme zunehmen werden. Negative Auswirkungen des Klimawandels auf Seegraswiesen und Makroalgenbänke in der Ostsee^{14,15} und Überflutungen von Küstenwiesen bei steigendem Meeresspiegel¹⁶ werden projiziert. Das Ausmaß dieser Belastungen hängt jedoch vom Umgang mit dem Klimawandel und anderen Faktoren ab^{11,13}. Eine kürzlich durchgeführte Studie zeigt das Potenzial für eine wesentliche Erholung der Meeresfauna und -flora bis zum Jahr 2050, wenn die Hauptbelastungen, einschließlich des Klimawandels, gemildert werden¹⁷.(*)



Andere Antriebskräfte

Vegetationsbedeckte Küstenökosysteme werden neben dem Klimawandel durch eine Vielzahl von anthropogenen Einflüssen beeinträchtigt, darunter Eutrophierung (Reduktion von Wassertransparenz), Landnutzungsänderungen und Fischerei^{13,17}. So stellt beispielsweise die Erwärmung im Zusammenspiel mit Eutrophierung und Schleppnetzerei eine der größten Bedrohungen für die Seegraswiesen in der Ostsee dar¹¹. Die Aufhebung lokaler Belastungen kann die Widerstandsfähigkeit der Wiesen gegen die aktuelle und weitere Erwärmung erhöhen^{11,14}. Die Erhaltung von Küstenwiesen durch geeignetes Landnutzungsmanagement kann gleichzeitig den Küstenschutz unterstützen^{16,18,19}. Die Zukunft von *Blue-Carbon*-Ökosystemen und ihrer Fähigkeit, den Klimawandel abzumildern, hängt daher von einem nachhaltigen, ganzheitlichen Management der mehrfachen Belastungen ab.



Wissenslücken

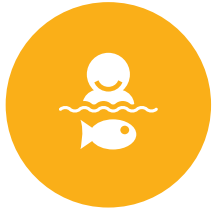
Die Rolle pflanzlich dominierter Küstenlebensräume im marinen Kohlenstoffkreislauf der Region ist offen. Eine Kartierung ihrer Flächen und der damit verbundenen Kohlenstoffflüsse (Primärproduktion, Sequestrationsraten, Exportflüsse und Verbleib), sowie die Identifizierung von Kohlenstoffspeichern außerhalb dieser Lebensräume fehlen. Veränderungen der bewachsenen Flächen sollten quantifiziert und das Potenzial für ihre Ausweitung durch Wiederherstellung und Schutz als naturbasierte Lösung zur Abschwächung des Klimawandels abgeschätzt werden. Ein kürzlich veröffentlichter Bericht enthält weitere Leitlinien für die Wissenschaft und das Management²⁰ von *Blue Carbon*. Das kürzlich abgeschlossene *Nordic Blue Carbon*-Projekt bietet einen aktuellen Überblick über Seegras und Makroalgen im *Blue-Carbon*-Kontext²¹.



Politische Bedeutung

Die Wiederherstellung und Erhaltung vegetationsreicher Küstenökosysteme sind direkte nachhaltige Managementmaßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels, die gleichzeitig die biologische Vielfalt und zusätzliche Ökosystemfunktionen fördern. *Blue-Carbon*-Strategien sind daher wichtige naturbasierte Lösungen für zwei zusammenhängende globale Herausforderungen: Klimawandel und Verlust der biologischen Vielfalt. Diese werden in der internationalen Politik zunehmend thematisiert, z. B. in der *Blue Carbon Initiative*²², der *IUCN*²³, im *Ocean Panel*¹¹, *Nordischen Minister-rat*²⁴ und *EU-Initiativen für naturbasierte Lösungen*²⁵, die auch die Ostsee einbeziehen²⁶. In der Ostsee gibt es lokale Initiativen zum Schutz und zur Wiederherstellung von Seegras und Küstenwiesen und zur Wiederherstellung von Riffen. Koordinierte *Blue-Carbon*-Strategien für die Ostsee stellen jedoch ein noch ungenutztes Potenzial dar.

*) Einige Studien bestätigen klimabedingte Auswirkungen auf die Meeresvegetation und deren damit verbundene Kapazität als Kohlenstoffspeicher zu fungieren. Das Ausmaß und die Richtung der Veränderung sind zwischen den Regionen jedoch unterschiedlich, z. B. sind sie abhängig vom Breitengrad und der Wechselwirkung mit anderen Belastungen.



Ökosystemleistungen von Meer und Küste

Autoren
Artūras Razinkovas-Baziukas, Marine Research Institute, Klaipėda University, Lithuania

Ökosystemleistungen

Verbundene Parameter

Meereis, Wasservogel, Marine Säuger, Meeresschutzgebiete, Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung, Ökosystemfunktion, Tourismus, Fischerei, Aquakultur, Marine Kohlenstoffspeicherung

Verbindungen zu politischen Zielen:
HELCOM Baltic Sea Action Plan
UN Sustainable Development Goals 2, 6, 8, 12, and 14
UN Convention on Biological Diversity
EU Green Deal
EU Water Framework Directive (WFD)
EU Maritime Spatial Planning Directive (MSP)
EU Biodiversity Strategy
EU Habitats Directive
EU Strategy for the Baltic Sea Region (EUSBSR)



Beschreibung

Bei der Bewertung von Ökosystemleistungen (ÖSL) kann zwischen der ÖSL-Bereitstellung (die von biophysikalischen oder ökologischen Merkmalen der Umwelt abhängig ist), der ÖSL-Nachfrage (die von gesellschaftlichen Faktoren abhängig ist) und dem ÖSL-Fluss (der die tatsächliche Nutzung von ÖSL beschreibt) unterschieden werden. Die Werte der ÖSL-Bereitstellung beziehen sich direkt auf die Ökosystemkomponenten¹, die ihrerseits durch den Klimawandel verändert werden. Die Bewertung der ÖSL-Nachfrage basiert hauptsächlich auf Veränderungen von allgemeinen gesellschaftlichen Faktoren, wie die Änderung von Lebensgewohnheiten, aber auch auf Änderungen der Bereitstellung von Ökosystemleistungen auf globaler Ebene, die durch den Klimawandel hervorgerufen wurden (z.B. erhöhter Bedarf an Urlaubsmöglichkeiten an der Ostsee aufgrund steigender Sommertemperaturen). Der ÖSL-Fluss resultiert aus der ÖSL-Bereitstellung und der ÖSL-Nachfrage und könnte in manchen Fällen leicht bewertet werden, auch mit ökonometrischen Methoden.



Was geschieht bereits?

Die derzeitigen Trends bei den kulturellen Ökosystemleistungen, vor allem Tourismus und Erholung²⁻⁴, sind positiv, aber aufgrund des Zusammenspiels der verschiedenen Faktoren ist die Beziehung zum Klimawandel ungewiss. Bei der Aquakultur (einer Ökosystemleistung, die der Versorgung mit Nahrungsmitteln dient) ist ein negativer Trend zu verzeichnen, da die Wassertemperaturen für die Regenbogenforellen-, Muschel- und Algenzucht suboptimal sind. Die Auswirkungen auf die Fischerei sind uneinheitlich⁵⁻⁷. Die Trends bei der Bereitstellung von regulierenden und erhaltenden Ökosystemleistungen im Hinblick auf Überdüngung, benthische Lebensräume und Ökosystemfunktionen variieren in den verschiedenen Teilen der Ostsee⁸⁻¹².



Was ist zu erwarten?

Die kulturellen Ökosystemleistungen (vor allem für Tourismus und Freizeitgestaltung, einschließlich der Sportschifffahrt) könnten von einer längeren Badesaison und höheren Luft- und Wassertemperaturen im Sommer profitieren. Allerdings könnte die Erwärmung diese Vorteile aufgrund der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zunichtemachen. Außerdem werden sich die Möglichkeiten des Eisfischens und die erwartete Verlagerung auf kleinere Fische negativ auf die Freizeitfischerei auswirken. Das Angebot an Ökosystemleistungen (vor allem im Hinblick auf die wertvollsten Fischbestände in der Ostsee) wird voraussichtlich sowohl quantitativ als auch vor allem qualitativ¹³ abnehmen, während die Aquakultur einer solchen potenziellen Entwicklung nicht durch die Bereitstellung von mehr hochwertigem Fisch entgegenwirken kann. Die Bedeutung von Buchten, Bodden und Haffen als Küstenfilter wird unter den projizierten klimatischen Veränderungen abnehmen¹⁴.



Wissenslücken

Im terrestrischen Bereich gibt es bereits viele wissenschaftlich fundierte biophysikalische Modelle, die in der Lage sind, räumlich variierende Instrumente für die Bewirtschaftung der biologischen Vielfalt und der natürlichen Ressourcen bereit zu stellen. Die Modellierung aquatischer Ökosystemleistungen ist bisher weitgehend unterentwickelt^{3,15}. Darüber hinaus ist das Verständnis der Beziehungen und Rückkopplungen zwischen aquatischen Ökosystemen und den von ihnen erbrachten Leistungen bisher gering, was dazu führt, dass die wirtschaftliche Bedeutung von Ökosystemleistungen der Küsten und Meeresgebiete kaum Auswirkungen auf die politischen Prozesse hat⁴.



Politische Bedeutung

Die Ökosystemleistungen der Meeres- und Küstengebiete sind sowohl für die strategische territoriale Planung im Ostseeraum von entscheidender Bedeutung, weil die Gesellschaft auf sie angewiesen ist. Mitigationsmaßnahmen für die Ökosystem-Parameter sind vielfältig und werden in den anderen Kernaussagen beschrieben. Auf das Konzept der Ökosystemleistungen hat man sich in den meisten internationalen Umweltschutzabkommen geeinigt. Es wird insbesondere im Global Assessment Report der Intergovernmental Science-Policy Platform über Biodiversität und Ökosystemleistungen 2019 hervorgehoben. Das Ökosystemleistungskonzept sollte für die Ostseepolitik richtungsweisend sein, aber da es keine gemeinschaftlich vereinbarte Methode zur Berechnung oder Bewertung von Ökosystemleistungen gibt, muss eine solche Methode erst entwickelt werden.



Andere Antriebskräfte

Verschiedene anthropogene Belastungen wie Überdüngung, Verschmutzung, Mikroplastik, Fischerei sowie die Verschlechterung von Habitaten könnten die positiven Trends bei der Bereitstellung von Ökosystemleistungen zunichtemachen und die negativen Trends verstärken, während Schutz- und Wiederherstellungsmaßnahmen zu ihrer Verbesserung führen könnten. Die Ungewissheit über die künftigen Belastungen erhöht die Unsicherheit der Projektionen für Ökosystemleistungen.

Verbindungen zu politischen Zielen
Referenzen



Verbindungen zu politischen Zielen

- Kategorien
- Energiekreislauf
 - Wasserkreislauf
 - Kohlen- und Nährstoffkreisläufe
 - Meeresspiegel und Wind
 - Biota und Ökosysteme
 - Menschliche Aktivitäten
 - Ökosystemleistungen

Wie die vom Klimawandel beeinflussten Parameter mit verschiedenen politischen Zielen zusammenhängen

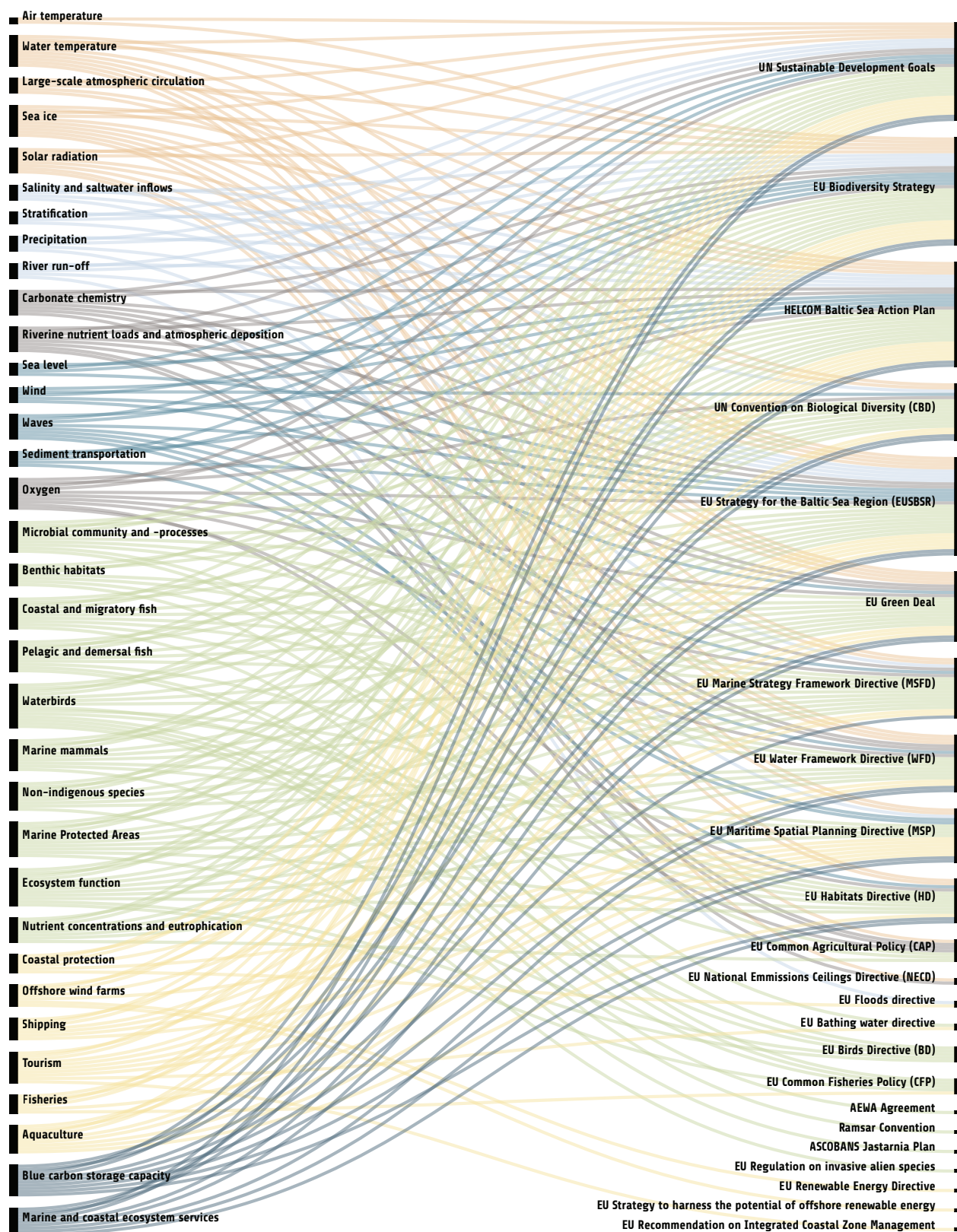


Abbildung 3. Zusammenhänge zwischen den verschiedenen hier beschriebenen Parametern und einigen wichtigen politischen Zielen.





Referenzen

Einleitung

- 1 IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- 2 IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 3 IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- 4 BACC Author Team, 2008: Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Verlag, 474 p.
- 5 BACC II Author Team, 2015: Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Regional Climate Studies Open Access, 501 p

Lufttemperatur

- 1 ACC Author Team. Assessment of climate change for the Baltic Sea basin. (Springer Science & Business Media, 2008).
- 2 BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. (Springer International Publishing, 2015).
- 3 Rutgersson, A., Jaagus, J., Schenk, F. & Stendel, M. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. *Clim. Res.* 61, 177-190, <https://doi.org/10.3354/cr01244> (2014).
- 4 Huth, R., Kysely, J. & Pokorný, L. A GCM Simulation of Heat Waves, Dry Spells, and Their Relationships to Circulation. *Clim. Change* 46, 29-60, <https://doi.org/10.1023/A:1005633925903> (2000).
- 5 Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U. L. F., Strandberg, G. & Ullerstig, A. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63, 24-40, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00475.x> (2011).
- 6 Gröger, M., Dieterich, C. & Meier, H. E. M. Is interactive air sea

coupling relevant for simulating the future climate of Europe? *Clim. Dyn.* 56, 491-514, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05489-8> (2021).

- 7 Nikulin, G., Kjellström, E., Hansson, U. L. F., Strandberg, G. & Ullerstig, A. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63, 41-55, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x> (2011).
- 8 Benestad, R. E. How often can we expect a record event? *Clim. Res.* 25, 3-13 (2003).

Wassertemperatur

- 1 Prandle, D. & Lane, A. The annual temperature cycle in shelf seas. *Cont. Shelf Res.* 15, 681-704, [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)E0029-L](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)E0029-L) (1995).
- 2 Belkin, I. M. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog. Oceanogr.* 81, 207-213, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.011> (2009).
- 3 Siegel, H. & Gerth, M. Sea Surface Temperature in the Baltic Sea 2018. 7pp (2019).
- 4 Kniebusch, M., Meier, H. E. M., Neumann, T. & Börgel, F. Temperature Variability of the Baltic Sea Since 1850 and Attribution to Atmospheric Forcing Variables. *J. Geophys. Res.-Oceans* 124, 4168-4187, <https://doi.org/10.1029/2018jc013948> (2019).
- 5 Naumann, M. et al. Hydrographic-hydrochemical assessment of the Baltic Sea 2018. *Meereswiss. Ber., Warnemünde* 110, <https://doi.io-warnemuende.de/10.12754/msr-2019-0110> (2019).
- 6 Humborg, C. et al. High Emissions of Carbon Dioxide and Methane From the Coastal Baltic Sea at the End of a Summer Heat Wave. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00493> (2019).
- 7 Balmaseda, M. A., Mogensén, K. & Weaver, A. T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 139, 1132-1161, <https://doi.org/10.1002/qj.2063> (2013).
- 8 Balmaseda, M. A., Trenberth, K. E. & Källén, E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1754-1759, <https://doi.org/10.1002/grl.50382> (2013).
- 9 Meier, H. E. M. & Saraiva, S. Projected Oceanographical Changes in the Baltic Sea until 2100. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.699> (2020).
- 10 Gröger, M., Arneborg, L., Dieterich, C., Höglund, A. & Meier, H. E. M. Summer hydrographic changes in the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean-sea ice-atmosphere model. *Clim. Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04908-9> (2019).
- 11 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 12 Meier, H. E. M., Dieterich, C. & Gröger, M. Natural variability is a large source of uncertainty in future projections of hypoxia in the Baltic Sea. *Commun. Earth Environ.* 2, 50, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00115-9> (2021).
- 13 Meier, H. E. M. et al. Future projections of record-breaking sea



surface temperature and cyanobacteria bloom events in the Baltic Sea. *Ambio* 48, 1362-1376, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01235-5> (2019).

- 14 Perry, D., Hammar, L., Linderholm, H. W. & Gullström, M. Spatial risk assessment of global change impacts on Swedish seagrass ecosystems. *PLoS ONE* 15, e0225318, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225318> (2020).
- 15 Queirós, A. M. et al. Solutions for ecosystem-level protection of ocean systems under climate change. *Global Change Biol.* 22, 3927-3936, <https://doi.org/10.1111/gcb.13423> (2016).

Großräumige atmosphärische Zirkulation

- 1 Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G. & Visbeck, M. An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophys. Monogr. Ser.* 134, 1-36 (2003).
- 2 Andersson, H. C. Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic sea level. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 54, 76-88, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12125> (2002).
- 3 Lehmann, A., Krauß, W. & Hinrichsen, H.-H. Effects of remote and local atmospheric forcing on circulation and upwelling in the Baltic Sea. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 54, 299-316, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i3.12138> (2002).
- 4 Kauker, F. & Meier, H. E. M. Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 1. Reconstructing atmospheric surface data for the period 1902-1998. *J. Geophys. Res-Oceans* 108, <https://doi.org/10.1029/2003JC001797> (2003).
- 5 Meier, H. E. M. & Kauker, F. Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 2. Role of freshwater inflow and large-scale atmospheric circulation for salinity. *J. Geophys. Res-Oceans* 108, <https://doi.org/10.1029/2003JC001799> (2003).
- 6 Omstedt, A. & Chen, D. Influence of atmospheric circulation on the maximum ice extent in the Baltic Sea. *J. Geophys. Res-Oceans* 106, 4493-4500, <https://doi.org/10.1029/1999JC000173> (2001).
- 7 Tinz, B. On the relation between annual maximum extent of ice cover in the Baltic Sea and sea level pressure as well as air temperature field. *Geophysica* 32, 319-341 (1996).
- 8 Zorita, E. & Laine, A. Dependence of salinity and oxygen concentrations in the Baltic Sea on large-scale atmospheric circulation. *Clim. Res.* 14, 25-41, <https://doi.org/10.3354/cr014025> (2000).
- 9 Rex, D. F. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. Part II: The climatology of blocking action. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 2, 275-301, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i4.8603> (1950).
- 10 Rex, D. F. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. Part I: An aerological study of blocking action. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 2, 196-211, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i3.8546> (1950).
- 11 Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M. & Trimble, P. J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.* 28, 2077-2080, <https://doi.org/10.1029/2000gl012745> (2001).
- 12 Kerr, R. A. A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries. *Science* 288, 1984, <https://doi.org/10.1126/science.288.5473.1984> (2000).

- 13 Knight, J. R., Folland, C. K. & Scaife, A. A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 33, <https://doi.org/10.1029/2006gl026242> (2006).
- 14 Börgel, F., Frauen, C., Neumann, T., Schimanke, S. & Meier, H. E. M. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on Baltic Sea Variability. *Geophys. Res. Lett.* 45, 9880-9888, <https://doi.org/10.1029/2018GL078943> (2018).
- 15 Börgel, F., Frauen, C., Neumann, T. & Meier, H. E. M. The Atlantic Multidecadal Oscillation controls the impact of the North Atlantic Oscillation on North European climate. *Environ. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba925> (2020).
- 16 Davini, P., Cagnazzo, C., Gualdi, S. & Navarra, A. Bidimensional Diagnostics, Variability, and Trends of Northern Hemisphere Blocking. *J. Climate* 25, 6496-6509, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00032.1> (2012).
- 17 Croci-Maspoli, M., Schwierz, C. & Davies, H. C. A Multifaceted Climatology of Atmospheric Blocking and Its Recent Linear Trend. *J. Climate* 20, 633-649, <https://doi.org/10.1175/JCLI4029.1> (2007).
- 18 Mokhov, I. I. et al. Blockings in the Northern hemisphere and Euro-Atlantic region: Estimates of changes from reanalysis data and model simulations. *Dokl. Earth Sci.* 449, 430-433, <https://doi.org/10.1134/S1028334X13040144> (2013).
- 19 IPCC. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1535pp (Cambridge University Press, 2014).
- 20 Frajka-Williams, E., Beaulieu, C. & Duchez, A. Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Sci. Rep.-UK* 7, 11224, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11046-x> (2017).
- 21 Knudsen, M. F., Seidenkrantz, M.-S., Jacobsen, B. H. & Kuijpers, A. Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years. *Nat. Commun.* 2, 178, <https://doi.org/10.1038/ncomms1186> (2011).
- 22 Wang, J. et al. Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate variability over the past 1,200 years. *Nat. Geosci.* 10, 512-517, <https://doi.org/10.1038/ngeo2962> (2017).
- 23 Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D. & Woollings, T. in *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* (ed Trevor M Letcher) Ch. 15, (Elsevier, 2020).
- 24 Wu, S., Liu, Z.-Y., Cheng, J. & Li, C. Response of North Pacific and North Atlantic decadal variability to weak global warming. *Adv. Clim. Chang. Res.* 9, 95-101, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.03.001> (2018).

Meereis

- 1 Haapala, J. J., Ronkainen, I., Schmelzer, N. & Sztobryn, M. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC II Author Team) 145-153 (Springer International Publishing, 2015).
- 2 Schwegmann, S. & Holfort, J. Regional distributed trends of sea ice volume in the Baltic Sea for the 30-year period 1982 to 2019. *Meteorol. Z.* 30, 33-43, <https://doi.org/10.1127/metz/2020/0986> (2020).
- 3 Seinä, A. & Palosuo, E. The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720-1995. *Meri* 27, 79-91 (1996).
- 4 Luomaranta, A. et al. Multimodel estimates of the changes in



the Baltic Sea ice cover during the present century. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 66, 22617, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.22617> (2014).

- 5 Höglund, A., Pemberton, P., Hordoir, R. & Schimanke, S. Ice conditions for maritime traffic in the Baltic Sea in future climate. *Boreal Environ. Res.* 22, 245-265 (2017).
- 6 Schmelzer, N. & Holfort, J. Climatological Ice Atlas for the Western and Southern Baltic Sea (1961-2010): Digital Supplement: Comparison of Ice Conditions in the 30-year Periods 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010. (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 2012).
- 7 Dansereau, V., Weiss, J., Saramito, P. & Lattes, P. A Maxwell elasto-brittle rheology for sea ice modelling. *Cryosphere* 10, 1339-1359, <https://doi.org/10.5194/tc-10-1339-2016> (2016).
- 12 Philippon, R., Behrens, K. & Ruckstuhl, C. How declining aerosols and rising greenhouse gases forced rapid warming in Europe since the 1980s. *Geophys. Res. Lett.* 36, <https://doi.org/10.1029/2008GL036350> (2009).

Sonneneinstrahlung

- 1 Wild, M. et al. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science* 308, 847, <https://doi.org/10.1126/science.1103215> (2005).
- 2 Wild, M. Enlightening Global Dimming and Brightening. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 27-37, <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00074.1> (2012).
- 3 Wild, M. et al. The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth Syst. Sci. Data* 9, 601-613, <https://doi.org/10.5194/essd-9-601-2017> (2017).
- 4 Wild, M. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *Wires. Clim. Change* 7, 91-107, <https://doi.org/10.1002/wcc.372> (2016).
- 5 Karlsson, K.-G. & Devasthale, A. Inter-comparison and evaluation of the four longest satellite-derived cloud climate data records: CLARA-A2, ESA Cloud CCI V3, ISCCP-HGM, and PAT-MOS-x. *Remote Sens.-Basel* 10, 1567, <https://doi.org/10.3390/rs10101567> (2018).
- 6 Bartók, B. et al. Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. *Clim. Dyn.* 49, 2665-2683, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3471-2> (2017).
- 7 Allen, R. J., Norris, J. R. & Wild, M. Evaluation of multidecadal variability in CMIP5 surface solar radiation and inferred underestimation of aerosol direct effects over Europe, China, Japan, and India. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 118, 6311-6336, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50426> (2013).
- 8 Storelvmo, T. et al. Lethargic Response to Aerosol Emissions in Current Climate Models. *Geophys. Res. Lett.* 45, 9814-9823, <https://doi.org/10.1029/2018GL078298> (2018).
- 9 Stanhill, G., Achiman, O., Rosa, R. & Cohen, S. The cause of solar dimming and brightening at the Earth's surface during the last half century: Evidence from measurements of sunshine duration. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 119, 9092-9109, <https://doi.org/10.1002/2013JD021308> (2014).
- 10 Parding, K., Olseth, J. A., Dagestad, K. F. & Liepert, B. G. Decadal variability of clouds, solar radiation and temperature at a high-latitude coastal site in Norway. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 66, 25897, <https://doi.org/10.3402/tellusb.v66.25897> (2014).
- 11 Ruckstuhl, C. et al. Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming. *Geophys. Res. Lett.* 35, L12708, <https://doi.org/10.1029/2008GL034228> (2008).
1. Schinke, H., & Matthäus, W. (1998). On the causes of major Baltic inflows—an analysis of long time series. *Continental Shelf Research*, 18(1), 67-97.
2. Mohrholz, V. (2018). Major Baltic Inflow Statistics – Revised. *Frontiers in Marine Science* 5, 384. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384>.
3. Fonselius, S., & Valderrama, J. (2003). One hundred years of hydrographic measurements in the Baltic Sea. *Journal of Sea Research*, 49(4), 229-241.
4. BACC II Author Team (2015). Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. *Regional Climate Studies*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>.
5. Kniebusch, M., H. E. M. Meier, and H. Radtke, 2019: Changing salinity gradients in the Baltic Sea as a consequence of altered freshwater budgets. *Geophysical Research Letters*, 46, 9739–9747. <https://doi.org/10.1029/2019GL083902>
6. Meier, H. E. M., and Kauker, F. (2003). Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 2. Role of freshwater inflow and large-scale atmospheric circulation for salinity. *Journal of Geophysical Research - Oceans* 108(C11), <https://doi.org/10.1029/2003JC001799>
7. Meier, H. E. M., Eilola, K., Almroth-Rosell, E., Schimanke, S., Kniebusch, M., Höglund, A., ... & Saraiva, S. (2019). Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Climate Dynamics*, 53(1-2), 1145-1166.
8. Radtke, H., Brunnabend, S. E., Gräwe, U., & Meier, H. E. (2020). Investigating interdecadal salinity changes in the Baltic Sea in a 1850–2008 hindcast simulation. *Climate of the Past*, 16(4), 1617-1642.
9. Schimanke, S. and H. E. M. Meier, 2016: Decadal to centennial variability of salinity in the Baltic Sea. *Journal of Climate*, 29(20), 7173-7188. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0443.1>
10. Börgel, F., C. Frauen, T. Neumann, S. Schimanke, and H. E. M. Meier, 2018: Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on Baltic Sea variability. *Geophysical Research Letters*, 45(18), 9880-9888, <https://doi.org/10.1029/2018GL078943>.
11. Liblik, T. and Lips, U. 2019. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea – An Analysis of 35 Years of Observational Data. *Frontiers in Earth Science*, 7. doi:10.3389/feart.2019.00174
12. Meier, H. E. M., A. Höglund, E. Almroth-Rosell, and K. Eilola, 2017: Impact of accelerated future global mean sea level rise on hypoxia in the Baltic Sea. *Climate Dynamics*, 49, 163-172, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3333-y>
13. Saraiva, S., Meier, H. E. M., Andersson, H. C., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., and Eilola, K. (2019). Uncertainties in projections of the Baltic Sea ecosystem driven by an ensemble of global climate models. *Frontiers in Earth Science*, 6:244, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244>.
14. Meier, H. E. M., M. Edman, K. Eilola, M. Placke, T. Neumann, H. Andersson, S.-E. Brunnabend, C. Dieterich, C. Frauen, R. Friedland, M. Gröger, B. G. Gustafsson, E. Gustafsson, A. Isae, M. Kniebusch, I. Kuznetsov, B. Müller-Karulis, A. Omstedt, V.

Salzgehalt und Salzwassereinträge



- Ryabchenko, S. Saraiva, and O. P. Savchuk, 2018: Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations. *Frontiers in Marine Science*, 5:440, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00440>
15. Meier, H. E. M., M. Edman, K. Eilola, M. Placke, T. Neumann, H. Andersson, S.-E. Brunnabend, C. Dieterich, C. Frauen, R. Friedland, M. Gröger, B. G. Gustafsson, E. Gustafsson, A. Isaev, M. Kniebusch, I. Kuznetsov, B. Müller-Karulis, M. Naumann, A. Omstedt, V. Ryabchenko, S. Saraiva, and O. P. Savchuk, 2019: Assessment of uncertainties in scenario simulations of biogeochemical cycles in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6:46, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00046>
 16. Schimanke, S., C. Dieterich, and H. E. M. Meier, 2014: An algorithm based on SLP fluctuations to identify major Baltic inflow events. *Tellus A*, 66, 23452, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66>
 17. Gröger, M., L. Arneborg, C. Dieterich, A. Höglund, and H. E. M. Meier, 2019: Hydrographic changes in the North Sea and Baltic Sea projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean-sea ice-atmosphere model. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04908-9>
 18. Placke, M., Meier, H. E. M., and T. Neumann, 2021: Sensitivity of the Baltic Sea overturning circulation to long-term atmospheric and hydrological changes. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, provisionally accepted.
 19. Vuorinen, I., J. Hänninen, M. Rajasilta, P. Laine, J. Eklund, F. Montesino-Pouzols, F. Corona, K. Junker, H. E. M. Meier, and J. W. Dippner, 2015: Scenario simulations of future salinity and Ecological Consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas - implications for environmental monitoring. *Ecological Indicators*, 50, 196 - 205.
 20. HELCOM (2018): State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011–2016. *Baltic Sea Environment Proceedings* 155, ISSN 0357-2994. Available at: www.HELCOM.fi/baltic-sea-trends/holistic-assessments/state-of-the-baltic-sea-2018/reports-and-materials/.
- Schichtung**
- 1 Kniebusch, M., Meier, H. E. M. & Radtke, H. Changing Salinity Gradients in the Baltic Sea As a Consequence of Altered Freshwater Budgets. *Geophys. Res. Lett.* 46, 9739-9747, <https://doi.org/10.1029/2019GL083902> (2019).
 - 2 Väli, G., Meier, H. E. M. & Elken, J. Simulated halocline variability in the Baltic Sea and its impact on hypoxia during 1961–2007. *J. Geophys. Res-Oceans* 118, 6982-7000, <https://doi.org/10.1002/2013JC009192> (2013).
 - 3 Gröger, M., Arneborg, L., Dieterich, C., Höglund, A. & Meier, H. E. M. Summer hydrographic changes in the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean–sea ice–atmosphere model. *Clim. Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04908-9> (2019).
 - 4 Kniebusch, M., Meier, H. E. M., Neumann, T. & Börgel, F. Temperature Variability of the Baltic Sea Since 1850 and Attribution to Atmospheric Forcing Variables. *J. Geophys. Res-Oceans* 124, 4168-4187, <https://doi.org/10.1029/2018jc013948> (2019).
 - 5 Liblik, T. & Lips, U. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea – An Analysis of 35 Years of Observational Data. *Front. Earth Sci.* 7, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00174> (2019).
 - 6 Meier, H. E. M. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC II Author Team) 243-252 (Springer International Publishing, 2015).
 - 7 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
 - 8 Meier, H. E. M., Dieterich, C. & Gröger, M. Natural variability is a large source of uncertainty in future projections of hypoxia in the Baltic Sea. *Commun. Earth Environ.* 2, 50, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00115-9> (2021).
 - 9 Lips, I. & Lips, U. Abiotic factors influencing cyanobacterial bloom development in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Hydrobiologia* 614, 133-140, <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9449-2> (2008).
 - 10 Conley, D. J. et al. Tackling Hypoxia in the Baltic Sea: Is Engineering a Solution? *Environ. Sci. Technol.* 43, 3407-3411, <https://doi.org/10.1021/es8027633> (2009).
- Niederschlag**
- 1 HELCOM. *Climate Change in the Baltic Sea Area - HELCOM Thematic Assessment in 2007*. 54pp (Helsinki, Finland, 2007).
 - 2 Kriaučiūnienė, J. et al. Variability in temperature, precipitation and river discharge in the Baltic States. *Boreal Environ. Res.* 17, 150-162 (2012).
 - 3 BACC II Author Team. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. (Springer International Publishing, 2015).
 - 4 Chen, D. et al. Hydroclimate changes over Sweden in the twentieth and twenty-first centuries: a millennium perspective. *Geogr. Ann. A*, 1-29, <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1841410> (2020).
 - 5 Aalto, J., Pirinen, P. & Jylhä, K. New gridded daily climatology of Finland: Permutation-based uncertainty estimates and temporal trends in climate. *J. Geophys. Res-Atmos.* 121, 3807-3823, <https://doi.org/10.1002/2015JD024651> (2016).
 - 6 Jaagus, J., Briede, A., Rimkus, E. & Sepp, M. Changes in precipitation regime in the Baltic countries in 1966–2015. *Theor. Appl. Climatol.* 131, 433-443, <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1990-8> (2018).
 - 7 Cardell, M. F., Amengual, A., Romero, R. & Ramis, C. Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches. *Int. J. Climatol.* 40, 4800-4827, <https://doi.org/10.1002/joc.6490> (2020).
 - 8 European Environment Agency. Heavy precipitation in Europe. Indicator Assessment CLIM 004. IND-92-en, https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/998f8be113cc84e9a978b-eed87079f874, (last access: 24-03-2021).
 - 9 Christensen, O. B. & Kjellström, E. Projections for Temperature, Precipitation, Wind, and Snow in the Baltic Sea Region until 2100. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science* Oxford University Press, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.695> (2018).
 - 10 Rajczak, J. & Schär, C. Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations. *J. Geophys. Res-Atmos.* 122, 10,773-710,800, <https://doi.org/10.1002/2017JD027176> (2017).



Flussabfluss

- 1 Hansson, D., Eriksson, C., Omstedt, A. & Chen, D. Reconstruction of river runoff to the Baltic Sea, AD 1500–1995. *Int. J. Climatol.* 31, 696–703, <https://doi.org/10.1002/joc.2097> (2011).
- 2 Meier, H. E. M. et al. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Clim. Dyn.* 53, 1145–1166, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4296-y> (2019).
- 3 Jaagus, J., Sepp, M., Tamm, T., Järvet, A. & Möisja, K. Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff in Estonia during 1951–2015. *Earth Syst. Dynam.* 8, 963–976, <https://doi.org/10.5194/esd-8-963-2017> (2017).
- 4 Sarauskienė, D., Kriauciuniene, J., Reihan, A. & Klavins, M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 23, 28–38, <https://doi.org/10.3846/16486897.2014.937438> (2015).
- 5 Arheimer, B. & Lindström, G. Climate impact on floods: changes in high flows in Sweden in the past and the future (1911–2100). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 771–784, <https://doi.org/10.5194/hess-19-771-2015> (2015).
- 6 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369–3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 7 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 8 Stonevičius, E., Rimkus, E., Štaras, A., Kažys, J. & Valiūškevičius, G. Climate change impact on the Nemunas River basin hydrology in the 21st century. *Boreal Environ. Res.* 22, 49–65 (2017).
- 9 Šarauskienė, D. et al. Projection of Lithuanian river runoff, temperature and their extremes under climate change. *Hydrol. Res.* 49, 344–362, <https://doi.org/10.2166/nh.2017.007> (2017).
- 10 Roudier, P. et al. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Clim. Change* 135, 341–355, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4> (2016).
- 11 Veijalainen, N., Lotsari, E., Vehviläinen, B., Alho, P. & Käyhkö, J. in 6th Alexander von Humboldt International Conference on Climate Change (2010).
- 12 Hisdal, H. et al. Has streamflow changed in the Nordic countries? Report No. NVE-1/2010, 28pp (Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), Norway, 2010).
- 13 European Court of Auditors. Combating eutrophication in the Baltic Sea: further and more effective action needed. 71pp (Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016).

Karbonatchemie

- 1 BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. (Springer International Publishing, 2015).
- 2 Kuliński, K., Schneider, B., Szymczycha, B. & Stokowski, M. Structure and functioning of the acid–base system in the Baltic Sea. *Earth Syst. Dynam.* 8, 1107–1120, <https://doi.org/10.5194/esd-8-1107-2017> (2017).
- 3 Norman, M., Rutgersson, A. & Sahlée, E. Impact of improved air–sea gas transfer velocity on fluxes and water chemistry in a

- Baltic Sea model. *Journal of Marine Systems* 111–112, 175–188, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.10.013> (2013).
- 4 Omstedt, A. et al. Biogeochemical control of the coupled CO₂–O₂ system of the Baltic Sea: a review of the results of Baltic-C. *Ambio* 43, 49–59, <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0485-4> (2014).
- 5 Parard, G., Rutgersson, A., Raj Parampil, S. & Charantonis, A. A. The potential of using remote sensing data to estimate air–sea CO₂ exchange in the Baltic Sea. *Earth Syst. Dynam.* 8, 1093–1106, <https://doi.org/10.5194/esd-8-1093-2017> (2017).
- 6 Kuliński, K. & Pempkowiak, J. The carbon budget of the Baltic Sea. *Biogeosciences* 8, 3219–3230, <https://doi.org/10.5194/bg-8-3219-2011> (2011).
- 7 Gustafsson, E. & Gustafsson, B. G. Future acidification of the Baltic Sea – A sensitivity study. *Journal of Marine Systems* 211, 103397, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103397> (2020).
- 8 Omstedt, A. et al. Future changes in the Baltic Sea acid–base (pH) and oxygen balances. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 19586, <https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.19586> (2012).
- 9 Müller, J. D., Schneider, B. & Rehder, G. Long-term alkalinity trends in the Baltic Sea and their implications for CO₂-induced acidification. *Limnol. Oceanogr.* 61, 1984–2002, <https://doi.org/10.1002/lno.10349> (2016).
- 10 Kuznetsov, I. & Neumann, T. Simulation of carbon dynamics in the Baltic Sea with a 3D model. *Journal of Marine Systems* 111–112, 167–174, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.10.011> (2013).

Nährstoffeinträge aus Flüssen und der Atmosphäre

- 1 Zillén, L., Conley, D. J., Andrén, T., Andrén, E. & Björck, S. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth Sci. Rev.* 91, 77–92, <https://doi.org/10.1016/j.jears-ci-rev.2008.10.001> (2008).
- 2 Gustafsson, B. G. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006. *Ambio* 41, 534–548, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x> (2012).
- 3 HELCOM. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. 48pp (Helsinki, Finland, 2018).
- 4 Ruoho-Airola, T., Eilola, K., Savchuk, O. P., Parviainen, M. & Tarvainen, V. Atmospheric Nutrient Input to the Baltic Sea from 1850 to 2006: A Reconstruction from Modeling Results and Historical Data. *Ambio* 41, 549–557, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0319-9> (2012).
- 5 Engardt, M., Simpson, D., Schwikowski, M. & Granat, L. Deposition of sulphur and nitrogen in Europe 1900–2050. Model calculations and comparison to historical observations. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 69, 1328945, <https://doi.org/10.1080/16000889.2017.1328945> (2017).
- 6 Savchuk, O. P., Eilola, K., Gustafsson, B. G., Medina, M. R. & Ruoho-Airola, T. Long term reconstruction of nutrient loads to the Baltic Sea, 1850–2006. *Baltic Nest Institute Techn. Rep.* 6 (2012).
- 7 Savchuk, O. P. Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Front. Mar. Sci.* 5, 95, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00095> (2018).
- 8 HELCOM. Input of nutrients by the seven biggest rivers in the Baltic Sea region. 31pp (Helsinki, Finland, 2018).



- 9 HELCOM PLC waterborne database: http://nest.su.se/HELCOM_plc
- 10 BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. (Springer International Publishing, 2015).
- 11 HELCOM. HELCOM thematic assessment of eutrophication 2011-2016, 83pp (Helsinki, Finland, 2018).
- 12 Bartnicki, J. 53-57 (Springer International Publishing).
- 13 Colette, A. et al. Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. 105pp (Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Norway, 2016).
- 14 Gauss, M., Bartnicki, J. & Klein, H. Atmospheric nitrogen deposition to the Baltic Sea. 9pp (https://emep.int/publ/HELCOM/2018/B_BSEFS_N_dep_v2.pdf EMEP MSC-W, 2018).
- 15 HELCOM. Updated Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5.5). 143pp (Helsinki, Finland, 2015).
- 16 Kanakidou, M., Myriokefalitakis, S. & Tsigaridis, K. Aerosols in atmospheric chemistry and biogeochemical cycles of nutrients. *Environ. Res. Lett.* 13, 063004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabcbd> (2018).
- 17 McCrackin, M. L. et al. A Century of Legacy Phosphorus Dynamics in a Large Drainage Basin. *Global Biogeochem. Cy.* 32, 1107-1122, <https://doi.org/10.1029/2018GB005914> (2018).
- 18 Meier, H. E. M. et al. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Clim. Dyn.* 53, 1145-1166, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4296-y> (2019).
- 19 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369-3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 20 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 21 Meier, H. E. M. et al. Correction to: Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Clim. Dyn.* 53, 1167-1169, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4483-x> (2019).
- 22 Bartosova, A. et al. Future socioeconomic conditions may have a larger impact than climate change on nutrient loads to the Baltic Sea. *Ambio* 48, 1325-1336, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01243-5> (2019).
- 23 Simpson, D. et al. Impacts of climate and emission changes on nitrogen deposition in Europe: a multi-model study. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 6995-7017, <https://doi.org/10.5194/acp-14-6995-2014> (2014).
- 24 Skjøth, C. A. & Geels, C. The effect of climate and climate change on ammonia emissions in Europe. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 117-128, <https://doi.org/10.5194/acp-13-117-2013> (2013).
- 25 Sutton, M. A. et al. Towards a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition. *Philos. T. Roy. Soc. B.* 368, 20130166, <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0166> (2013).
- 26 Meier, H. E. M. et al. Assessment of Uncertainties in Scenario Simulations of Biogeochemical Cycles in the Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00046> (2019).
- 27 Zandersen, M. et al. Shared socio-economic pathways extended for the Baltic Sea: exploring long-term environmental problems. *Reg. Environ. Change* 19, 1073-1086, <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1453-0> (2019).
- Meeresspiegel
- 1 Hünicke, B. et al. in Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (ed BACC II Author Team) 155-185 (Springer International Publishing, 2015).
- 2 Chen, D. & Omstedt, A. Climate-induced variability of sea level in Stockholm: influence of air temperature and atmospheric circulation. *Adv. Atmos. Sci.* 22, 655-664, <https://doi.org/10.1007/BF02918709> (2005).
- 3 Samuelsson, M. & Stigebrandt, A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus A* 48, 672-683, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1996.t01-4-00006.x> (1996).
- 4 Andersson, H. C. Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic sea level. *Tellus A* 54, 76-88, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12125> (2002).
- 5 Karabil, S., Zorita, E. & Hünicke, B. Contribution of atmospheric circulation to recent off-shore sea-level variations in the Baltic Sea and the North Sea. *Earth Syst. Dynam.* 9, 69-90, <https://doi.org/10.5194/esd-9-69-2018> (2018).
- 6 Lehmann, A., Getzlaff, K. & Harlaß, J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Clim. Res.* 46, 185-196, <https://doi.org/10.3354/cr00876> (2011).
- 7 Weisse, R. & Weidemann, H. Baltic Sea extreme sea levels 1948-2011: Contributions from atmospheric forcing. *Proc. IUTAM* 25, 65-69, <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2017.09.010> (2017).
- 8 Wübbler, C. & Krauss, W. The two dimensional seiches of the Baltic Sea. *Oceanol. Acta* 2, 435-446 (1979).
- 9 Wolski, T. et al. Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast**This work was financed by the Polish National Centre for Science research project No. 2011/01/B/ST10/06470. *Oceanologia* 56, 259-290, <https://doi.org/10.5697/oc.56-2.259> (2014).
- 10 Wiśniewski, B. & Wolski, T. Physical aspects of extreme storm surges and falls on the Polish coast. *Oceanologia* 53, 373-390, <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.373> (2011).
- 11 Eelsalu, M., Soomere, T., Pindsoo, K. & Lagemaa, P. Ensemble approach for projections of return periods of extreme water levels in Estonian waters. *Cont. Shelf Res.* 91, 201-210, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.09.012> (2014).
- 12 Church, J. A. et al. in Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds T.F. Stocker et al.) 1137-1216 (Cambridge University Press, 2013).
- 13 Oppenheimer, M. et al. in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (eds H.-O. Pörtner et al.) (2019).
- 14 Weisse, R. et al. Sea Level Dynamics and Coastal Erosion in the Baltic Sea Region. *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, 1-40, <https://doi.org/10.5194/esd-2021-6> (2021).
- 15 Balmaseda, M. A., Trenberth, K. E. & Källén, E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophys. Res. Lett.* 40, 1754-1759, <https://doi.org/10.1002/grl.50382> (2013).
- 16 Hammarklint, T. Swedish Sea Level Series - A Climate Indicator. 5pp (Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), 2009).
- 17 Hill, E. M., Davis, J. L., Tamisiea, M. E. & Lidberg, M. Combination of geodetic observations and models for glacial isostatic adjustment fields in Fennoscandia. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.* 115,



- <https://doi.org/10.1029/2009jb006967> (2010).
- 18 Richter, A., Groh, A. & Dietrich, R. Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 53-54, 43-53, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.04.011> (2012).
 - 19 Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H. & Tarasov, L. NKG-2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *J. Geod.* 93, 1759-1779, <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01280-8> (2019).
 - 20 Meier, H. E. M., Broman, B. & Kjellström, E. Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Clim. Res.* 27, 59-75, <https://doi.org/10.3354/cr027059> (2004).
 - 21 Dieterich, C., Gröger, M., Arneborg, L. & Andersson, H. C. Extreme sea levels in the Baltic Sea under climate change scenarios – Part 1: Model validation and sensitivity. *Ocean Sci.* 15, 1399-1418, <https://doi.org/10.5194/os-15-1399-2019> (2019).
 - 22 Madsen, K. S., Hoyer, J. L., Suursaar, Ü., She, J. & Knudsen, P. Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry. *Front. Earth Sci.* 7, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00243> (2019).
 - 23 Ribeiro, A., Barbosa, S. M., Scotto, M. G. & Donner, R. V. Changes in extreme sea-levels in the Baltic Sea. *Tellus A* 66, 20921, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.20921> (2014).
 - 24 Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P. & Cooke, R. M. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 116, 11195, <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116> (2019).
 - 25 Grinsted, A. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Regional Climate Studies* (ed BACC II Author Team) 253-263 (Springer International Publishing, 2015).
 - 26 Pellikka, H., Särkkä, J., Johansson, M. & Pettersson, H. Probability distributions for mean sea level and storm contribution up to 2100 AD at Forsmark. 49pp (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), 2020).
 - 27 Suursaar, Ü. & Sooäär, J. Decadal variations in mean and extreme sea level values along the Estonian coast of the Baltic Sea. *Tellus A* 59, 249-260, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00220.x> (2007).
 - 28 Andersson, H. C. Stigande havsnivåer och ökad översvämningsrisk Report No. MSB 1243, 31pp (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2018).
 - 29 Hieronymus, M. & Kalén, O. Sea-level rise projections for Sweden based on the new IPCC special report: The ocean and cryosphere in a changing climate. *Ambio*, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01313-8> (2020).
 - 30 Södrling, J. & Nerheim, S. Statistisk metodik för beräkning av extrema havsvattenstånd. 44pp (SMHI, Norrköping, Sweden, 2017).
 - 31 Fredriksson, C., Tajvidi, N., Hanson, H. & Larson, M. Statistical analysis of extreme sea water levels at the falsterbo peninsula, south Sweden. *Vatten, J. Water Manage. Res.* 72, 129-142 (2016).
 - 32 Lang, A. & Mikolajewicz, U. The long-term variability of extreme sea levels in the German Bight. *Ocean Sci.* 15, 651-668 (2019).
 - 33 Bingham, R. J. & Hughes, C. W. Local diagnostics to estimate density-induced sea level variations over topography and along coastlines. *J. Geophys. Res-Oceans* 117, <https://doi.org/10.1029/2011jc007276> (2012).
 - 34 Zscheischler, J. et al. Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Change* 8, 469-477, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3> (2018).

Wind

- 1 Feser, F. et al. Storminess over the North Atlantic and north-western Europe—A review. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 141, 350-382, <https://doi.org/10.1002/qj.2364> (2015).
- 2 Feser, F. et al. 11. Hurricane Gonzalo and its extratropical transition to a strong European storm. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, S51-S55 (2015).
- 3 Minola, L., Azorin-Molina, C. & Chen, D. Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends across Sweden, 1956–2013. *J. Climate* 29, 7397-7415, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0636.1> (2016).
- 4 Laapas, M. & Venäläinen, A. Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015. *Int. J. Climatol.* 37, 4803-4813, <https://doi.org/10.1002/joc.5124> (2017).
- 5 Rutgersson, A., Jaagus, J., Schenk, F. & Stendel, M. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. *Clim. Res.* 61, 177-190, <https://doi.org/10.3354/cr01244> (2014).
- 6 Rutgersson, A. et al. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Regional Climate Studies* (ed BACC II Author Team) 69-97 (Springer International Publishing, 2015).
- 7 Christensen, O. B., Kjellström, E. & Zorita, E. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC I. I. Author Team The) 217-233 (Springer International Publishing, 2015).
- 8 Ruosteenoja, K., Vihma, T. & Venäläinen, A. Projected Changes in European and North Atlantic Seasonal Wind Climate Derived from CMIP5 Simulations. *J. Climate* 32, 6467-6490, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0023.1> (2019).
- 9 Räisänen, J. (Oxford University Press, 2017).
- 10 Meier, H. E. M. et al. Quality assessment of atmospheric surface fields over the Baltic Sea from an ensemble of regional climate model simulations with respect to ocean dynamics. *Oceanologia* 53, 193-227, <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-Tl.193> (2011).
- 11 Rädler, A. T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R. & Púčik, T. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *npj Clim. Atmos. Sci.* 2, 30, <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0083-7> (2019).

Wellen

- 1 Rutgersson, A. et al. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Regional Climate Studies* (ed BACC II Author Team) 69-97 (Springer International Publishing, 2015).
- 2 Hünicke, B. et al. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC II Author Team) 155-185 (Springer International Publishing, 2015).
- 3 Christensen, O. B., Kjellström, E. & Zorita, E. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC I. I. Author Team The) 217-233 (Springer International Publishing, 2015).
- 4 Meier, H. E. M. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC II Author Team) 243-252 (Springer International Publishing, 2015).
- 5 Groll, N., Grabemann, I., Hünicke, B. & Meese, M. Baltic Sea wave conditions under climate change scenarios. *Boreal Environ. Res.* 22, 1-12 (2017).



- 6 Tobin, I. et al. Climate change impacts on the power generation potential of a European mid-century wind farms scenario. *Environ. Res. Lett.* 11, 034013, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034013> (2016).

Sedimentverlagerungen

- 1 Harff, J. et al. in *Coastline changes: interrelation of climate and geological processes* Vol. 426 (eds J. Harff, W. W. Hay, & D.M. Tetzlaff) 133-142 (SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 2007).
- 2 Harff, J. et al. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 15-35 (Springer International Publishing, 2017).
- 3 Łabuz, T. A. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (ed BACC II Author Team) 381-396 (Springer International Publishing, 2015).
- 4 Dangendorf, S. et al. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nat. Clim. Change* 9, 705-710, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8> (2019).
- 5 Zhang, W., Schneider, R., Harff, J., Hünicke, B. & Fröhle, P. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 107-135 (Springer International Publishing, 2017).
- 6 Musielak, S., Furmańczyk, K. & Bugajny, N. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 69-85 (Springer International Publishing, 2017).
- 7 Soomere, T., Viška, M. & Pindsoo, K. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 327-361 (Springer International Publishing, 2017).
- 8 Zhang, W., Harff, J. & Schneider, R. Analysis of 50-year wind data of the southern Baltic Sea for modelling coastal morphological evolution – a case study from the Darss-Zingst Peninsula. *Oceanologia* 53, 489-518, <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-Tl.489> (2011).
- 9 Tõnisson, H., Orviku, K., Lapinskis, J., Gulbinskas, S. & Žaromskis, R. in *Coastal Erosion and Protection in Europe* (eds Enzo Pranzini & Allan Williams) Ch. 4, 34pp (Routledge, 2013).
- 10 Dudzińska-Nowak, J. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 219-255 (Springer International Publishing, 2017).
- 11 BACC II Author Team. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. (Springer International Publishing, 2015).

Sauerstoff

- 1 Conley, D. J. et al. Hypoxia-Related Processes in the Baltic Sea. *Environ. Sci. Technol.* 43, 3412-3420, <https://doi.org/10.1021/es802762a> (2009).
- 2 BACC II Author Team. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. (Springer International Publishing, 2015).
- 3 Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G. & Conley, D. J. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 5628-5633, <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111> (2014).

- 4 Conley, D. J. et al. Hypoxia Is Increasing in the Coastal Zone of the Baltic Sea. *Environ. Sci. Technol.* 45, 6777-6783, <https://doi.org/10.1021/es201212r> (2011).
- 5 Gustafsson, B. G. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850-2006. *Ambio* 41, 534-548, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x> (2012).
- 6 Meier, H. E. M., Väli, G., Naumann, M., Eilola, K. & Frauen, C. Recently accelerated oxygen consumption rates amplify deoxygenation in the Baltic Sea. *J. Geophys. Res-Oceans* 123, 3227-3240, <https://doi.org/10.1029/2017JC013686> (2018).
- 7 Meier, H. E. M. et al. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Clim. Dyn.* 53, 1145-1166, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4296-y> (2019).
- 8 Meier, H. E. M. et al. Correction to: Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Clim. Dyn.* 53, 1167-1169, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4483-x> (2019).
- 9 Savchuk, O. P. in *Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces* 137-160 (Berlin, Heidelberg: Springer, 2010).
- 10 Savchuk, O. P. Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970-2016. *Front. Mar. Sci.* 5, 95, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00095> (2018).
- 11 Andersen, J. H. et al. Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biol. Rev.* 92, 135-149, <https://doi.org/10.1111/brv.12221> (2017).
- 12 Meier, H. E. M. et al. Future projections of record-breaking sea surface temperature and cyanobacteria bloom events in the Baltic Sea. *Ambio* 48, 1362-1376, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01235-5> (2019).
- 13 Meier, H. E. M. et al. Assessment of Eutrophication Abatement Scenarios for the Baltic Sea by Multi-Model Ensemble Simulations. *Front. Mar. Sci.* 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00440> (2018).
- 14 Meier, H. E. M. et al. Assessment of Uncertainties in Scenario Simulations of Biogeochemical Cycles in the Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00046> (2019).
- 15 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369-3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 16 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 17 Carstensen, J. et al. Factors regulating the coastal nutrient filter in the Baltic Sea. *Ambio* 49, 1194-1210, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01282-y> (2020).

Mikrobielle Gemeinschaften und Prozesse

- 1 Herlemann, D. P. R. et al. Transitions in bacterial communities along the 2000 km salinity gradient of the Baltic Sea. *The ISME Journal* 5, 1571-1579, <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.41> (2011).
- 2 Shen, D., Jürgens, K. & Beier, S. Experimental insights into the importance of ecologically dissimilar bacteria to community assembly along a salinity gradient. *Environ. Microbiol.* 20, 1170-1184, <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14059> (2018).
- 3 Herlemann, D. P. R., Manecki, M., Dittmar, T. & Jürgens, K. Differential responses of marine, mesohaline and oligoha-



line bacterial communities to the addition of terrigenous carbon. *Environ. Microbiol.* 19, 3098-3117, <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13784> (2017).

- 4 Hoppe, H. G., Giesenhausen, H. C., Koppe, R., Hansen, H. P. & Gocke, K. Impact of change in climate and policy from 1988 to 2007 on environmental and microbial variables at the time series station Boknis Eck, Baltic Sea. *Biogeosciences* 10, 4529-4546, <https://doi.org/10.5194/bg-10-4529-2013> (2013).
- 5 Ahlgren, J., Grimvall, A., Omstedt, A., Rolff, C. & Wikner, J. Temperature, DOC level and basin interactions explain the declining oxygen concentrations in the Bothnian Sea. *J. Mar. Syst.* 170, 22-30, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.12.010> (2017).
- 6 Huseby, S. Pelagic biology: bacterioplankton (in Swedish). (The Swedish Agency for Marine and Water Management and The Swedish Environmental Protection Agency, 2016).
- 7 Huseby, S. & Wikner, J. Bacterioplankton growth, <https://HELCOM.fi/wp-content/uploads/2020/06/BSEFS-Bacterioplankton-growth-.pdf> (last access: 22-06-2021).
- 8 Semenza, J. C. et al. Environmental Suitability of *Vibrio* Infections in a Warming Climate: An Early Warning System. *Environ. Health Perspect.* 125, 107004, <https://doi.org/10.1289/EHP2198> (2017).
- 9 Wohlers, J. et al. Changes in biogenic carbon flow in response to sea surface warming. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 106, 7067, <https://doi.org/10.1073/pnas.0812743106> (2009).
- 10 Andersson, A. et al. Projected future climate change and Baltic Sea ecosystem management. *Ambio* 44, 345-356, <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0654-8> (2015).
- 11 Wikner, J. & Andersson, A. Increased freshwater discharge shifts the trophic balance in the coastal zone of the northern Baltic Sea. *Global Change Biol.* 18, 2509-2519, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02718.x> (2012).
- 12 Bertilsson, S. et al. Photochemically induced changes in bioavailable carbon and nitrogen pools in a boreal watershed. *Aquat. Microb. Ecol.* 19, 47-56, <https://doi.org/10.3354/ame019047> (1999).
- 13 Rodríguez, J. et al. Effects of Organic Pollutants on Bacterial Communities Under Future Climate Change Scenarios. *Front. Microbiol.* 9, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02926> (2018).
- on benthic productivity in a coastal marine system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 396, 13-25, <https://doi.org/10.3354/meps08290> (2009).
- 6 Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G. & Conley, D. J. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 5628-5633, <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111> (2014).
- 7 Conley, D. J. et al. Hypoxia Is Increasing in the Coastal Zone of the Baltic Sea. *Environ. Sci. Technol.* 45, 6777-6783, <https://doi.org/10.1021/es201212r> (2011).
- 8 Laine, A. O., Sandler, H., Andersen, A.-B. & Stigzelius, J. Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and the Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrographical regime. *J. Sea Res.* 38, 135-159, [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(97\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(97)00034-8) (1997).
- 9 Altieri, A. H. & Gedan, K. B. Climate change and dead zones. *Global Change Biol.* 21, 1395-1406, <https://doi.org/10.1111/gcb.12754> (2015).
- 10 Carstensen, J. et al. Hypoxia in the Baltic Sea: Biogeochemical cycles, benthic fauna, and management. *Ambio* 43, 26-36, <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0474-7> (2014).
- 11 Elmgren, R. Man's Impact on the Ecosystem of the Baltic Sea: Energy Flows Today and at the Turn of the Century. *Ambio* 18, 326-332 (1989).
- 12 Takolander, A., Leskinen, E. & Cabeza, M. Synergistic effects of extreme temperature and low salinity on foundational macroalga *Fucus vesiculosus* in the northern Baltic Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 495, 110-118, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.07.001> (2017).
- 13 Westerborn, M., Mustonen, O., Jaatinen, K., Kilpi, M. & Norkko, A. Population Dynamics at the Range Margin: Implications of Climate Change on Sublittoral Blue Mussels (*Mytilus trossulus*). *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00292> (2019).
- 14 Dippner, J. W., Hänninen, J., Kuosa, H. & Vuorinen, I. The influence of climate variability on zooplankton abundance in the Northern Baltic Archipelago Sea (SW Finland). *ICES J. Mar. Sci.* 58, 569-578, <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1048> (2001).
- 15 Westerborn, M., Kilpi, M. & Mustonen, O. Blue mussels, *Mytilus edulis*, at the edge of the range: population structure, growth and biomass along a salinity gradient in the north-eastern Baltic Sea. *Mar. Biol.* 140, 991-999, <https://doi.org/10.1007/s00227-001-0765-6> (2002).
- 16 Kautsky, N. Quantitative studies on gonad cycle, fecundity, reproductive output and recruitment in a baltic *Mytilus edulis* population. *Mar. Biol.* 68, 143-160, <https://doi.org/10.1007/BF00397601> (1982).
- 17 Kovtun, A. et al. Influence of abiotic environmental conditions on spatial distribution of charophytes in the coastal waters of West Estonian Archipelago, Baltic Sea. *J. Coastal Res.* 412-416 (2011).
- 18 Ehlers, A., Worm, B. & Reusch, T. B. H. Importance of genetic diversity in eelgrass *Zostera marina* for its resilience to global warming. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 355, 1-7, <https://doi.org/10.3354/meps07369> (2008).
- 19 Jonsson, P. R. et al. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key habitat former *Fucus vesiculosus*. *Divers. Distrib.* 24, 892-905, <https://doi.org/10.1111/ddi.12733> (2018).
- 20 Kotta, J. et al. Integrating experimental and distribution data to predict future species patterns. *Sci. Rep.-UK* 9, 1821, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41821-1> (2019).

Benthische Habitate

- 1 Remane, A. & Schlieper, C. Biology of Brackish Water. *Int. Rev. Hydrobiol.* 59, 586 (1974).
- 2 Olsson, J., Bergström, L. & Gårdmark, A. Top-Down Regulation, Climate and Multi-Decadal Changes in Coastal Zoobenthos Communities in Two Baltic Sea Areas. *PLoS ONE* 8, e64767, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064767> (2013).
- 3 Wiklund, A.-K. E., Sundelin, B. & Rosa, R. Population decline of amphipod *Monoporeia affinis* in Northern Europe: consequence of food shortage and competition? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 367, 81-90, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.08.018> (2008).
- 4 Rousi, H. et al. Long-term changes in coastal zoobenthos in the northern Baltic Sea: the role of abiotic environmental factors. *ICES J. Mar. Sci.* 70, 440-451, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss197> (2013).
- 5 Eriksson Wiklund, A. K., Ahlgren, K., Sundelin, B. & Andersson, A. Effects of warming and shifts of pelagic food web structure



- doi.org/10.1038/s41598-018-38416-3 (2019).
- 21 Andersson, A. et al. Projected future climate change and Baltic Sea ecosystem management. *Ambio* 44, 345-356, <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0654-8> (2015).
- 22 Beaugrand, G. The North Sea regime shift: Evidence, causes, mechanisms and consequences. *Prog. Oceanogr.* 60, 245-262, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.018> (2004).
- 23 Hiebenthal, C., Philipp, E. E. R., Eisenhauer, A. & Wahl, M. Effects of seawater pCO₂ and temperature on shell growth, shell stability, condition and cellular stress of Western Baltic Sea *Mytilus edulis* (L.) and *Arctica islandica* (L.). *Mar. Biol.* 160, 2073-2087, <https://doi.org/10.1007/s00227-012-2080-9> (2013).
- 24 Graiff, A., Liesner, D., Karsten, U. & Bartsch, I. Temperature tolerance of western Baltic Sea *Fucus vesiculosus* – growth, photosynthesis and survival. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 471, 8-16, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.05.009> (2015).
- 25 Wikner, J. & Andersson, A. Increased freshwater discharge shifts the trophic balance in the coastal zone of the northern Baltic Sea. *Global Change Biol.* 18, 2509-2519, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02718.x> (2012).
- 26 Kotta, J., Kotta, I., Simm, M. & Põllupüü, M. Separate and interactive effects of eutrophication and climate variables on the ecosystem elements of the Gulf of Riga. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 84, 509-518, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.07.014> (2009).
- 27 Grinsted, A. in *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Regional Climate Studies* (ed BACC II Author Team) 253-263 (Springer International Publishing, 2015).
- 28 Ehrnsten, E., Bauer, B. & Gustafsson, B. G. Combined Effects of Environmental Drivers on Marine Trophic Groups – A Systematic Model Comparison. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00492> (2019).
- 29 Weigel, B. et al. Long-term progression and drivers of coastal zoobenthos in a changing system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 528, 141-159, <https://doi.org/10.3354/meps11279> (2015).
- 30 Breitburg, D. et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359, eaam7240, <https://doi.org/10.1126/science.aam7240> (2018).
- 31 Räike, A., Taskinen, A. & Knuuttila, S. Nutrient export from Finnish rivers into the Baltic Sea has not decreased despite water protection measures. *Ambio* 49, 460-474, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01217-7> (2020).
- 32 Ehrnsten, E., Norkko, A., Müller-Karulis, B., Gustafsson, E. & Gustafsson, B. G. The meagre future of benthic fauna in a coastal sea—Benthic responses to recovery from eutrophication in a changing climate. *Global Change Biol.* 26, 2235-2250, <https://doi.org/10.1111/gcb.15014> (2020).
- 33 Holopainen, R. et al. Impacts of changing climate on the non-indigenous invertebrates in the northern Baltic Sea by end of the twenty-first century. *Biol. Invasions* 18, 3015-3032, <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1197-z> (2016).
- 34 Norkko, J. et al. A welcome can of worms? Hypoxia mitigation by an invasive species. *Global Change Biol.* 18, 422-434, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02513.x> (2012).
- 35 Sandman, A. N., Näslund, J., Gren, I.-M. & Norling, K. Effects of an invasive polychaete on benthic phosphorus cycling at sea basin scale: An ecosystem disservice. *Ambio* 47, 884-892, <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1050-y> (2018).
- 36 Kotta, J. et al. Novel crab predator causes marine ecosystem regime shift. *Sci. Rep.-UK* 8, 4956, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23282-w> (2018).
- 37 Casini, M. et al. Trophic cascades promote threshold-like shifts in pelagic marine ecosystems. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 106, 197, <https://doi.org/10.1073/pnas.0806649105> (2009).
- 38 Casini, M. et al. Multi-level trophic cascades in a heavily exploited open marine ecosystem. *P. Roy. Soc. B-Biol. Sci.* 275, 1793-1801, <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1752> (2008).
- 39 Östman, Ö. et al. Top-down control as important as nutrient enrichment for eutrophication effects in North Atlantic coastal ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 53, 1138-1147, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12654> (2016).
- 40 Ljunggren, L. et al. Recruitment failure of coastal predatory fish in the Baltic Sea coincident with an offshore ecosystem regime shift. *ICES J. Mar. Sci.* 67, 1587-1595, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq109> (2010).
- 41 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 42 Meier, H. E. M., Dieterich, C. & Gröger, M. Natural variability is a large source of uncertainty in future projections of hypoxia in the Baltic Sea. *Commun. Earth Environ.* 2, 50, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00115-9> (2021).
- 43 Alheit, J. et al. Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES J. Mar. Sci.* 62, 1205-1215, <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.04.024> (2005).
- 44 Rothäusler, E., Rugiu, L. & Jormalainen, V. Forecast climate change conditions sustain growth and physiology but hamper reproduction in range-margin populations of a foundation rockweed species. *Mar. Environ. Res.* 141, 205-213, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.09.014> (2018).
- 45 Rugiu, L., Manninen, I., Rothäusler, E. & Jormalainen, V. Tolerance and potential for adaptation of a Baltic Sea rockweed under predicted climate change conditions. *Mar. Environ. Res.* 134, 76-84, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.12.016> (2018).
- 46 Rugiu, L., Manninen, I., Rothäusler, E. & Jormalainen, V. Tolerance to climate change of the clonally reproducing endemic Baltic seaweed, *Fucus radicans*: is phenotypic plasticity enough? *J. Phycol.* 54, 888-898, <https://doi.org/10.1111/jpy.12796> (2018).
- 47 European Commission. DIRECTIVE 2008/56/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive) (Text with EEA relevance). (2008).
- 48 European Commission. COMMISSION DECISION (EU) 2017/848 of 17 May 2017 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters and specifications and standardised methods for monitoring and assessment, and repealing Decision 2010/477/EU, (2017).
- 49 European Commission. COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora., (1992).
- 50 Nyström Sandman, A. et al. Grön infrastruktur i havet : landskapsperspektiv i förvaltningen av Sveriges marina områden. Report No. Naturvårdsverket 6930, 130pp (2020).
- 51 Frazão Santos, C. et al. Integrating climate change in ocean planning. *Nat. Sustain.* 3, 505-516, <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0513-x> (2020).



Küsten- und Wanderfische

- 1 HELCOM. State of the Baltic Sea - Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. 155pp (Helsinki, Finland, 2018).
- 2 Böhling, P. et al. Variations in Year-Class Strength of Different Perch (*Perca fluviatilis*) Populations in the Baltic Sea with Special Reference to Temperature and Pollution. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48, 1181-1187, <https://doi.org/10.1139/f91-142> (1991).
- 3 Karås, P. & Thoreson, G. An application of a bioenergetics model to Eurasian perch (*Perca fluviatilis* L.). *J. Fish Biol.* 41, 217-230, <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1992.tb02652.x> (1992).
- 4 Lehtonen, H. & Lappalainen, J. The effects of climate on the year-class variations of certain freshwater fish species. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* 121, 37-44 (1995).
- 5 Karås, P. Recruitment of perch (*Perca fluviatilis* L.) from Baltic coastal waters. *Arch. Hydrobiol.* 138, 99-121, <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/138/1996/99> (1996).
- 6 Kjellman, J., Lappalainen, J. & Urho, L. Influence of temperature on size and abundance dynamics of age-0 perch and pikeperch. *Fish. Res.* 53, 47-56, [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(00\)00265-4](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(00)00265-4) (2001).
- 7 Heikinheimo, O., Pekcan-Hekim, Z. & Raitaniemi, J. Spawning stock-recruitment relationship in pikeperch *Sander lucioperca* (L.) in the Baltic Sea, with temperature as an environmental effect. *Fish. Res.* 155, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.02.015> (2014).
- 8 Kokkonen, E., Heikinheimo, O., Pekcan-Hekim, Z. & Vainikka, A. Effects of water temperature and pikeperch (*Sander lucioperca*) abundance on the stock-recruitment relationship of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) in the northern Baltic Sea. *Hydrobiologia* 841, 79-94, <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04008-z> (2019).
- 9 Pekcan-Hekim, Z. et al. Climate Warming and Pikeperch Year-Class Catches in the Baltic Sea. *Ambio* 40, 447-456, <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0143-7> (2011).
- 10 Candolin, U. & Voigt, H.-R. Population growth correlates with increased fecundity in three-spined stickleback populations in a human-disturbed environment. *Aquat. Sci.* 82, 21, <https://doi.org/10.1007/s00027-020-0695-3> (2020).
- 11 Kallio-Nyberg, I., Veneranta, L., Saloniemi, I., Jokikokko, E. & Leskelä, A. Different growth trends of whitefish (*Coregonus lavaretus*) forms in the northern Baltic Sea. *J. Appl. Ichthyol.* 35, 683-691, <https://doi.org/10.1111/jai.13898> (2019).
- 12 Veneranta, L., Hudd, R. & Vanhatalo, J. Reproduction areas of sea-spawning coregonids reflect the environment in shallow coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 477, 231-250, <https://doi.org/10.3354/meps10169> (2013).
- 13 Bergenius, M. A., Gårdmark, A., Ustups, D., Kaljuste, O. & Aho, T. Fishing or the environment-what regulates recruitment of an exploited marginal vendace (*Coregonus albula* (L.)) population? *Adv. Limnol.* 64, 57-70, <https://doi.org/10.1127/1612-166X/2013/0064-0029> (2013).
- 14 Veneranta, L., Urho, L., Koho, J. & Hudd, R. Spawning and hatching temperatures of whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) in the Northern Baltic Sea. *Adv. Limnol.* 64, 39-55, <https://doi.org/10.1127/1612-166X/2013/0064-0019> (2013).
- 15 Olsson, J., Bergström, L. & Gårdmark, A. Abiotic drivers of coastal fish community change during four decades in the Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 961-970, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss072> (2012).
- 16 Dahl, J. et al. The timing of spawning migration: implications of environmental variation, life history, and sex. *Can. J. Zool.* 82, 1864-1870, <https://doi.org/10.1139/z04-184> (2004).
- 17 Kallio-Nyberg, I., Jutila, E., Saloniemi, I. & Jokikokko, E. Association between environmental factors, smolt size and the survival of wild and reared Atlantic salmon from the Simojoki River in the Baltic Sea. *J. Fish Biol.* 65, 122-134, <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2004.00435.x> (2004).
- 18 Kallio-Nyberg, I., Jutila, E., Jokikokko, E. & Saloniemi, I. Survival of reared Atlantic salmon and sea trout in relation to marine conditions of smolt year in the Baltic Sea. *Fish. Res.* 80, 295-304, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.03.026> (2006).
- 19 Friedland, K. D. et al. Post-smolt survival of Baltic salmon in context to changing environmental conditions and predators. *ICES J. Mar. Sci.* 74, 1344-1355, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw178> (2017).
- 20 Tamario, C., Sunde, J., Petersson, E., Tibblin, P. & Forsman, A. Ecological and Evolutionary Consequences of Environmental Change and Management Actions for Migrating Fish. *Front. Ecol. Evol.* 7, <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00271> (2019).
- 21 Härmä, M., Lappalainen, A. & Urho, L. Reproduction areas of roach (*Rutilus rutilus*) in the northern Baltic Sea: potential effects of climate change. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65, 2678-2688, <https://doi.org/10.1139/f08-167> (2008).
- 22 Dainys, J. et al. Predicted climate change effects on European perch (*Perca fluviatilis* L.) - A case study from the Curonian Lagoon, south-eastern Baltic. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 221, 83-89, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.03.020> (2019).
- 23 Östman, Ö., Boström, M. K., Bergström, U., Andersson, J. & Lunneryd, S.-G. Estimating Competition between Wildlife and Humans-A Case of Cormorants and Coastal Fisheries in the Baltic Sea. *PLoS ONE* 8, e83763, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083763> (2014).
- 24 Huss, M., Lindmark, M., Jacobson, P., van Dorst, R. M. & Gårdmark, A. Experimental evidence of gradual size-dependent shifts in body size and growth of fish in response to warming. *Global Change Biol.* 25, 2285-2295, <https://doi.org/10.1111/gcb.14637> (2019).
- 25 van Dorst, R. M. et al. Warmer and browner waters decrease fish biomass production. *Global Change Biol.* 25, 1395-1408, <https://doi.org/10.1111/gcb.14551> (2019).
- 26 Hansson, S. et al. Competition for the fish - fish extraction from the Baltic Sea by humans, aquatic mammals, and birds. *ICES J. Mar. Sci.* 75, 999-1008, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx207> (2018).

Pelagische und bodennahe Fische

- 1 ICES. Baltic Sea Ecosystem - Fisheries Overview. Report of the ICES Advisory Committee ICES Advice 2019, section 4.2, 29pp, <https://doi.org/10.17895/ices.advice.5566> (2019).
- 2 Rau, A., Lewin, W.-C., Zettler, M. L., Gogina, M. & von Dorrien, C. Abiotic and biotic drivers of flatfish abundance within distinct demersal fish assemblages in a brackish ecosystem (western Baltic Sea). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 220, 38-47, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.035> (2019).
- 3 Dinesen, G. E. et al. Cod and climate: a systems approach for sustainable fisheries management of Atlantic cod (*Gadus*



- morhua) in coastal Danish waters. *J. Coast. Conserv.* 23, 943-958, <https://doi.org/10.1007/s11852-019-00711-0> (2019).
- 4 Andersen, N. G., Lundgren, B., Neuenfeldt, S. & Beyer, J. E. Diel vertical interactions between Atlantic cod *Gadus morhua* and sprat *Sprattus sprattus* in a stratified water column. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 583, 195-209 (2017).
- 5 Orio, A. et al. Spatial contraction of demersal fish populations in a large marine ecosystem. *J. Biogeogr.* 46, 633-645, <https://doi.org/10.1111/jbi.13510> (2019).
- 6 Solberg, I., Røstad, A. & Kaartvedt, S. Ecology of overwintering sprat (*Sprattus sprattus*). *Prog. Oceanogr.* 138, 116-135, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.08.003> (2015).
- 7 Neuenfeldt, S. The influence of oxygen saturation on the distributional overlap of predator (cod, *Gadus morhua*) and prey (herring, *Clupea harengus*) in the Bornholm Basin of the Baltic Sea. *Fish. Oceanogr.* 11, 11-17, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2002.00183.x> (2002).
- 8 Neuenfeldt, S. & Beyer, J. E. Oxygen and salinity characteristics of predator-prey distributional overlaps shown by predatory Baltic cod during spawning. *J. Fish Biol.* 62, 168-183, <https://doi.org/10.1046/j.1095-8649.2003.00013.x> (2003).
- 9 Neuenfeldt, S., Andersen, K. H. & Hinrichsen, H. H. Some Atlantic cod *Gadus morhua* in the Baltic Sea visit hypoxic water briefly but often. *J. Fish Biol.* 75, 290-294, <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02281.x> (2009).
- 10 Limburg, K. E. & Casini, M. Otolith chemistry indicates recent worsened Baltic cod condition is linked to hypoxia exposure. *Biol. Lett.* 15, 20190352, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0352> (2019).
- 11 Lefébure, R., Larsson, S. & Byström, P. A temperature-dependent growth model for the three-spined stickleback *Gasterosteus aculeatus*. *J. Fish Biol.* 79, 1815-1827, <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03121.x> (2011).
- 12 Lefébure, R., Larsson, S. & Byström, P. Temperature and size-dependent attack rates of the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*); are sticklebacks in the Baltic Sea resource-limited? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 451, 82-90, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.11.008> (2014).
- 13 Nissling, A. & Westin, L. Salinity requirements for successful spawning of Baltic and Belt Sea cod and the potential for cod stock interactions in the Baltic Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 152, 261-271 (1997).
- 14 Nissling, A., Westin, L. & Hjerne, O. Reproductive success in relation to salinity for three flatfish species, dab (*Limanda limanda*), plaice (*Pleuronectes platessa*), and flounder (*Pleuronectes flesus*), in the brackish water Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 59, 93-108, <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1134> (2002).
- 15 Petereit, C., Hinrichsen, H. H., Franke, A. & Köster, F. W. Floating along buoyancy levels: Dispersal and survival of western Baltic fish eggs. *Prog. Oceanogr.* 122, 131-152, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.01.001> (2014).
- 16 Illing, B., Moyano, M., Hufnagl, M. & Peck, M. A. Projected habitat loss for Atlantic herring in the Baltic Sea. *Mar. Environ. Res.* 113, 164-173, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.12.007> (2016).
- 17 Voss, R. et al. Egg mortality: predation and hydrography in the central Baltic. *ICES J. Mar. Sci.* 68, 1379-1390, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsr061> (2011).
- 18 Hinrichsen, H. H., Hüsey, K. & Huwer, B. Spatio-temporal variability in western Baltic cod early life stage survival mediated by egg buoyancy, hydrography and hydrodynamics. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 1744-1752, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss137> (2012).
- 19 Rajasilta, M. et al. Influence of environmental conditions, population density, and prey type on the lipid content in Baltic herring (*Clupea harengus membras*) from the northern Baltic Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 76, 576-585, <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0504> (2018).
- 20 Flinkman, J., Aro, E., Vuorinen, I. & Viitasalo, M. Changes in northern Baltic zooplankton and herring nutrition from 1980s to 1990s: top-down and bottom-up processes at work. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 165, 127-136 (1998).
- 21 Rönkkönen, S., Ojaveer, E., Raid, T. & Viitasalo, M. Long-term changes in Baltic herring (*Clupea harengus membras*) growth in the Gulf of Finland. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61, 219-229, <https://doi.org/10.1139/f03-167> (2004).
- 22 Casini, M., Bartolino, V., Molinero, J. C. & Kornilovs, G. Linking fisheries, trophic interactions and climate: threshold dynamics drive herring *Clupea harengus* growth in the central Baltic Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 413, 241-252 (2010).
- 23 Köster, F. W. et al. Eastern Baltic cod recruitment revisited—dynamics and impacting factors. *ICES J. Mar. Sci.* 74, 3-19, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw172> (2016).
- 24 MacKenzie, B. R. & Köster, F. W. Fish production and climate: sprat in the Baltic Sea. *Ecology* 85, 784-794, <https://doi.org/10.1890/02-0780> (2004).
- 25 Polte, P. et al. Reduced Reproductive Success of Western Baltic Herring (*Clupea harengus*) as a Response to Warming Winters. *Front. Mar. Sci.* 8, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.589242> (2021).
- 26 Nissling, A. in *Biology of the Baltic Sea*. (eds Hans Kautsky & Pauli Snoeijs) 115-123 (Springer Netherlands).
- 27 Baumann, H. et al. Recruitment variability in Baltic Sea sprat (*Sprattus sprattus*) is tightly coupled to temperature and transport patterns affecting the larval and early juvenile stages. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63, 2191-2201, <https://doi.org/10.1139/f06-112> (2006).
- 28 Nissling, A., Johansson, U. & Jacobsson, M. Effects of salinity and temperature conditions on the reproductive success of turbot (*Scophthalmus maximus*) in the Baltic Sea. *Fish. Res.* 80, 230-238, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.04.005> (2006).
- 29 Hakala, T. et al. Temporal and spatial variation in the growth rates of Baltic herring (*Clupea harengus membras* L.) larvae during summer. *Mar. Biol.* 142, 25-33, <https://doi.org/10.1007/s00227-002-0933-3> (2003).
- 30 Wieland, K., Jarre-Teichmann, A. & Horbowa, K. Changes in the timing of spawning of Baltic cod: possible causes and implications for recruitment. *ICES J. Mar. Sci.* 57, 452-464, <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0522> (2000).
- 31 Dodson, J. J. et al. Environmental determinants of larval herring (*Clupea harengus*) abundance and distribution in the western Baltic Sea. *Limnol. Oceanogr.* 64, 317-329, <https://doi.org/10.1002/lno.11042> (2019).
- 32 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369-3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 33 Schaber, M., Hinrichsen, H.-H. & Gröger, J. Seasonal changes in vertical distribution patterns of cod (*Gadus morhua*) in the Bornholm Basin, central Baltic Sea. *Fish. Oceanogr.* 21, 33-43, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2011.00607.x> (2012).
- 34 Bauer, B. et al. Food web and fisheries in the future Baltic Sea.



- Ambio, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01229-3> (2019).
- 35 Niiranen, S. et al. Combined effects of global climate change and regional ecosystem drivers on an exploited marine food web. *Global Change Biol.* 19, 3327-3342, <https://doi.org/10.1111/gcb.12309> (2013).
 - 36 Österblom, H. et al. Human-induced Trophic Cascades and Ecological Regime Shifts in the Baltic Sea. *Ecosystems* 10, 877-889, <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9069-0> (2007).
 - 37 Aneer, G. Some Speculations about the Baltic Herring (*Clupea harengus membras*) in Connection with the Eutrophication of the Baltic Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42, s83-s90, <https://doi.org/10.1139/f85-264> (1985).
 - 38 Möllmann, C. et al. Reorganization of a large marine ecosystem due to atmospheric and anthropogenic pressure: a discontinuous regime shift in the Central Baltic Sea. *Global Change Biol.* 15, 1377-1393, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01814.x> (2009).
 - 39 Pekcan-Hekim, Z. et al. The role of climate and fisheries on the temporal changes in the Bothnian Bay foodweb. *ICES J. Mar. Sci.* 73, 1739-1749, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw032> (2016).
 - 40 Sparrevohn, C. R., Lindegren, M. & Mackenzie, B. R. Climate-induced response of commercially important flatfish species during the 20th century. *Fish. Oceanogr.* 22, 400-408, <https://doi.org/10.1111/fog.12030> (2013).
 - 41 Jarre-Teichmann, A. et al. Stock-recruitment relationships for cod (*Gadus morhua callarias* L.) in the central Baltic Sea incorporating environmental variability. *Archive of Fishery and Marine Research* 48, 97-123 (2000).
- Wasservögel
- 1 Green, A. J. & Elmberg, J. Ecosystem services provided by waterbirds. *Biol. Rev.* 89, 105-122, <https://doi.org/10.1111/brv.12045> (2014).
 - 2 MacLean, I. M. D. et al. Climate change causes rapid changes in the distribution and site abundance of birds in winter. *Global Change Biol.* 14, 2489-2500, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01666.x> (2008).
 - 3 Skov, H. et al. Waterbird populations and pressures in the Baltic Sea. Vol. 550 (Nordic Council of Ministers, 2011).
 - 4 Aarvak, T., Jostein Ølen, I., Krasnov, Y. V., Gavrilov, M. V. & Shavynkin, A. A. The European wintering population of Steller's Eider *Polysticta stelleri* reassessed. *Bird Conserv. Int.* 23, 337-343, <https://doi.org/10.1017/S0959270912000251> (2013).
 - 5 Lehtikainen, A. et al. Rapid climate driven shifts in wintering distributions of three common waterbird species. *Global Change Biol.* 19, 2071-2081, <https://doi.org/10.1111/gcb.12200> (2013).
 - 6 Pavón-Jordán, D. et al. Climate-driven changes in winter abundance of a migratory waterbird in relation to EU protected areas. *Divers. Distrib.* 21, 571-582, <https://doi.org/10.1111/ddi.12300> (2015).
 - 7 Nilsson, L. & Haas, F. Distribution and numbers of wintering waterbirds in Sweden in 2015 and changes during the last fifty years. *Ornis Svecica* 26, 3-54-53-54 (2016).
 - 8 Marchowski, D., Jankowiak, Ł., Wysocki, D., Ławicki, Ł. & Girjatowicz, J. Ducks change wintering patterns due to changing climate in the important wintering waters of the Odra River Estuary. *PeerJ* 5, e3604, <https://doi.org/10.7717/peerj.3604> (2017).
 - 9 Fox, A. D., Nielsen, R. D. & Petersen, I. K. Climate-change not only threatens bird populations but also challenges our ability to monitor them. *Ibis* 161, 467-474, <https://doi.org/10.1111/ibi.12675> (2019).
 - 10 Pavón-Jordán, D. et al. Habitat- and species-mediated short- and long-term distributional changes in waterbird abundance linked to variation in European winter weather. *Divers. Distrib.* 25, 225-239, <https://doi.org/10.1111/ddi.12855> (2019).
 - 11 Vähätalo, A. V., Rainio, K., Lehtikainen, A. & Lehtikainen, E. Spring arrival of birds depends on the North Atlantic Oscillation. *J. Avian Biol.* 35, 210-216, <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2004.03199.x> (2004).
 - 12 Rainio, K., Laaksonen, T., Ahola, M., Vähätalo, A. V. & Lehtikainen, E. Climatic responses in spring migration of boreal and arctic birds in relation to wintering area and taxonomy. *J. Avian Biol.* 37, 507-515, <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2006.03740.x> (2006).
 - 13 Lehtikainen, A., Kilpi, M. & Öst, M. Winter climate affects subsequent breeding success of common eiders. *Global Change Biol.* 12, 1355-1365, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01162.x> (2006).
 - 14 Waldeck, P. & Larsson, K. Effects of winter water temperature on mass loss in Baltic blue mussels: Implications for foraging sea ducks. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 444, 24-30, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.03.007> (2013).
 - 15 Larsson, K. et al. Effects of an extensive *Prymnesium* polyplepis bloom on breeding eiders in the Baltic Sea. *J. Sea Res.* 88, 21-28, <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.12.017> (2014).
 - 16 Fox, A. D. et al. Current and Potential Threats to Nordic Duck Populations — A Horizon Scanning Exercise. *Ann. Zool.* 52, 193-220, 128 (2015).
 - 17 Clausen, K. K., Stjernholm, M. & Clausen, P. Grazing management can counteract the impacts of climate change-induced sea level rise on salt marsh-dependent waterbirds. *J. Appl. Ecol.* 50, 528-537, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12043> (2013).
 - 18 Clausen, K. K. & Clausen, P. Forecasting future drowning of coastal waterbird habitats reveals a major conservation concern. *Biol. Conserv.* 171, 177-185, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.01.033> (2014).
 - 19 Mikola, J., Miettinen, M., Lehtikainen, E. & Lehtilä, K. The effects of disturbance caused by boating on survival and behaviour of velvet scoter *Melanitta fusca* ducklings. *Biol. Conserv.* 67, 119-124, [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(94\)90356-5](https://doi.org/10.1016/0006-3207(94)90356-5) (1994).
 - 20 Berndt, R., Hein, K., Koop, B. & Lunk, S. Die Vögel der Insel Fehmarn. Husum Druck-u. Verlagsgesellschaft (2005).
 - 21 Hario, M. Mink predation on black guillemots at Söderskär in 1994-1999. *Suomen Riista* 48, 18-26 (2002).
 - 22 Nordström, M. et al. Effects of feral mink removal on seabirds, waders and passerines on small islands in the Baltic Sea. *Biol. Conserv.* 109, 359-368, [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00162-3) (2003).
 - 23 Kube, J., Brenning, U., Kruch, W. & Nehls, H. Bestandsentwicklung von bodenbrütenden Küstenvögeln auf Inseln in der Wismar-Bucht (südwestliche Ostsee): Lektionen aus 50 Jahren Prädatorenmanagement. *Vogelwelt* 126, 299-320 (2005).
 - 24 Herrmann, C. et al. in *HELCOM Red List of Baltic Sea species in danger of becoming extinct* Vol. No. 140 Baltic Sea Environment Proceedings (eds Tytti Kontula & Jannica Haldin) 74-89



- (Helsinki Commission, Helsinki, Finland, 2013).
- 25 Luigujõe, L., Kuresoo, A. & Rattiste, K. Population status of the Bewick's Swan (*Cygnus columbianus bewickii*) and protection proposals in Estonia. *Hirundo* 26, 53-79 (2013).
 - 26 Žydelis, R. et al. Bycatch in gillnet fisheries – An overlooked threat to waterbird populations. *Biol. Conserv.* 142, 1269-1281, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.025> (2009).
 - 27 Sonntag, N., Schwemmer, H., Fock, H. O., Bellebaum, J. & Garthe, S. Seabirds, set-nets, and conservation management: assessment of conflict potential and vulnerability of birds to bycatch in gillnets. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 578-589, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss030> (2012).
 - 28 Schwemmer, P., Mendel, B., Sonntag, N., Dierschke, V. & Garthe, S. Effects of ship traffic on seabirds in offshore waters: implications for marine conservation and spatial planning. *Ecol. Appl.* 21, 1851-1860, <https://doi.org/10.1890/10-0615.1> (2011).
 - 29 Fliessbach, K. L. et al. A Ship Traffic Disturbance Vulnerability Index for Northwest European Seabirds as a Tool for Marine Spatial Planning. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00192> (2019).
 - 30 Dierschke, V., Furness, R. W. & Garthe, S. Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. *Biol. Conserv.* 202, 59-68, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.016> (2016).
 - 31 Fox, A. D. & Petersen, I. K. Offshore wind farms and their effects on birds. *Dan. ornithol. foren. tidsskr.* 113, 86-101 (2019).
 - 32 Hansson, S. & Rudstam, L. G. Eutrophication and Baltic fish communities. *Ambio* 19, 123-125 (1990).
 - 33 Rönkä, M. T. H., Saari, C. L. V., Lehtikoinen, E. A., Suomela, J. & Häkkinen, K. Environmental changes and population trends of breeding waterfowl in northern Baltic Sea. *Ann. Zool.* 42, 587-602 (2005).
 - 34 Pavón-Jordán, D. et al. Positive impacts of important bird and biodiversity areas on wintering waterbirds under changing temperatures throughout Europe and North Africa. *Biol. Conserv.* 246, 108549, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108549> (2020).
- Meeressäugetiere**
- 1 Halkka, A. Changing climate and the Baltic region biota Doctoral dissertation thesis, University of Helsinki, (2020).
 - 2 Jevrejeva, S. et al. Baltic Sea ice seasons in the twentieth century. *Clim. Res.* 25, 217-227, <https://doi.org/10.3354/cr025217> (2004).
 - 3 Vihma, T. & Haapala, J. Geophysics of sea ice in the Baltic Sea: A review. *Prog. Oceanogr.* 80, 129-148, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.002> (2009).
 - 4 Luomaranta, A. et al. Multimodel estimates of the changes in the Baltic Sea ice cover during the present century. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 66, 22617, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.22617> (2014).
 - 5 Merkouriadi, I. & Leppäranta, M. Long-term analysis of hydrography and sea-ice data in Tvärminne, Gulf of Finland, Baltic Sea. *Clim. Change* 124, 849-859, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1130-3> (2014).
 - 6 Haapala, J. J., Ronkainen, I., Schmelzer, N. & Sztobryn, M. in Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (ed BACC II Author Team) 145-153 (Springer International Publishing, 2015).
 - 7 Laakso, L. et al. 100 years of atmospheric and marine observations at the Finnish Utö Island in the Baltic Sea. *Ocean Sci.* 14, 617-632, <https://doi.org/10.5194/os-14-617-2018> (2018).
 - 8 von Schuckmann, K. et al. Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4. *J. Oper. Oceanogr.* 13, S1-S172, <https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1785097> (2020).
 - 9 Meier, H. E. M. Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Clim. Dyn.* 27, 39-68, <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0124-x> (2006).
 - 10 Meier, H. E. M., Döscher, R. & Halkka, A. Simulated distributions of Baltic Sea-ice in warming climate and consequences for the winter habitat of the Baltic ringed seal. *Ambio* 33, 249-256, <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.4.249> (2004).
 - 11 Meier, H. E. M. in Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (ed BACC II Author Team) 243-252 (Springer International Publishing, 2015).
 - 12 Grinsted, A. in Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Regional Climate Studies (ed BACC II Author Team) 253-263 (Springer International Publishing, 2015).
 - 13 IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. (2019).
 - 14 Wilson, S. C. et al. Assessment of impacts and potential mitigation for icebreaking vessels transiting pupping areas of an ice-breeding seal. *Biol. Conserv.* 214, 213-222, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.05.028> (2017).
 - 15 Wilson, S. C., Crawford, I., Trukhanova, I., Dmitrieva, L. & Goodman, S. J. Estimating risk to ice-breeding pinnipeds from shipping in Arctic and sub-Arctic seas. *Mar. Policy* 111, 103694, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103694> (2020).
 - 16 Nabe-Nielsen, J., Sibby, R. M., Tougaard, J., Teilmann, J. & Sveegaard, S. Effects of noise and by-catch on a Danish harbour porpoise population. *Ecol. Model.* 272, 242-251, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.025> (2014).
 - 17 Vanhatalo, J., Vetemaa, M., Herrero, A., Aho, T. & Tiilikainen, R. By-Catch of Grey Seals (*Halichoerus grypus*) in Baltic Fisheries—A Bayesian Analysis of Interview Survey. *PLoS ONE* 9, e113836, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113836> (2014).
 - 18 Authier, M. et al. Workshop on fisheries Emergency Measures to minimize BYCatch of short-beaked common dolphins in the Bay of Biscay and harbour porpoise in the Baltic Sea (WKEMBYC). 354 (2020).
 - 19 Andersen, S. M., Teilmann, J., Dietz, R., Schmidt, N. M. & Miller, L. A. Behavioural responses of harbour seals to human-induced disturbances. *Aquat. Conserv.* 22, 113-121, <https://doi.org/10.1002/aqc.1244> (2012).
 - 20 Paterson, W. D. et al. Post disturbance haulout behaviour of harbour seals. *Aquatic Conservation* 29, 144-156 (2019).
 - 21 Härkönen, T. et al. The 1988 and 2002 phocine distemper virus epidemics in European harbour seals. *Dis. Aquat. Organ.* 68, 115-130, <https://doi.org/10.3354/dao068115> (2006).
 - 22 DeMaster, D. P., Fowler, C. W., Perry, S. L. & Richlen, M. F. Predation and Competition: The Impact of Fisheries on Marine-Mammal Populations Over the next one Hundred Years. *J. Mammal.* 82, 641-651, [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2001\)082<0641:PACTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2001)082<0641:PACTIO>2.0.CO;2) (2001).
 - 23 O'Shea, T. J. & Odell, D. K. Large-Scale Marine Ecosystem Change and the Conservation of Marine Mammals. *J. Mammal.* 89, 529-533, <https://doi.org/10.1644/07-MAMM-S-416R.1> (2008).



- 24 Sonne, C. et al. Health effects from contaminant exposure in Baltic Sea birds and marine mammals: A review. *Environ. Int.* 139, 105725, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105725> (2020).
 - 25 Murphy, S. et al. Reproductive Failure in UK Harbour Porpoises *Phocoena phocoena*: Legacy of Pollutant Exposure? *PLoS ONE* 10, e0131085, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131085> (2015).
 - 26 Southall, B. L. et al. Overview. *Aquat. Mamm.* 33, 411 (2007).
 - 27 Jüssi, M., Härkönen, T., Helle, E. & Jüssi, I. Decreasing Ice Coverage Will Reduce the Breeding Success of Baltic Grey Seal (*genus-species* "*Halichoerus grypus*") Females. *Ambio* 37, 80-85, 86 (2008).
 - 28 Hazen, E. L. et al. Marine top predators as climate and ecosystem sentinels. *Front. Ecol. Environ.* 17, 565-574, <https://doi.org/10.1002/fee.2125> (2019).
- Nicht-einheimische Arten
- 1 Murphy, K. R., Ritz, D. & Hewitt, C. L. Heterogeneous zooplankton distribution in a ship's ballast tanks. *J. Plankton Res.* 24, 729-734, <https://doi.org/10.1093/plankt/24.7.729> (2002).
 - 2 Gollasch, S. The Importance of Ship Hull Fouling as a Vector of Species Introductions into the North Sea. *Biofouling* 18, 105-121, <https://doi.org/10.1080/08927010290011361> (2002).
 - 3 Gollasch, S., Lenz, J., Dammer, M. & Andres, H.-G. Survival of tropical ballast water organisms during a cruise from the Indian Ocean to the North Sea. *J. Plankton Res.* 22, 923-937, <https://doi.org/10.1093/plankt/22.5.923> (2000).
 - 4 Olenin, S., Gollasch, S., Jonušas, S. & Rimkutė, I. En-Route Investigations of Plankton in Ballast Water on a Ship's Voyage from the Baltic Sea to the Open Atlantic Coast of Europe. *Int. Rev. Hydrobiol.* 85, 577-596, [https://doi.org/10.1002/1522-2632\(200011\)85:5/6<577::AID-IROH577>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1522-2632(200011)85:5/6<577::AID-IROH577>3.0.CO;2-C) (2000).
 - 5 Zaiko, A., Lehtiniemi, M., Narščius, A. & Olenin, S. Assessment of bioinvasion impacts on a regional scale: a comparative approach. *Biol. Invasions* 13, 1739-1765, <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9928-z> (2011).
 - 6 Nehring, S. Four arguments why so many alien species settle into estuaries, with special reference to the German river Elbe. *Helgoland Marine Research* 60, 127, <https://doi.org/10.1007/s10152-006-0031-x> (2006).
 - 7 Reise, K., Olenin, S. & Thielges, D. W. Are aliens threatening European aquatic coastal ecosystems? *Helgoland Marine Research* 60, 77, <https://doi.org/10.1007/s10152-006-0024-9> (2006).
 - 8 Olenin, S. & Leppäkoski, E. Non-native animals in the Baltic Sea: alteration of benthic habitats in coastal inlets and lagoons. *Hydrobiologia* 393, 233-243, <https://doi.org/10.1023/A:1003511003766> (1999).
 - 9 HELCOM. BALSAM PROJECT – WORK PACKAGE 4: Testing Monitoring Methods for Non-Indigenous Species in Ports. 57pp (Helsinki, Finland, 2015).
 - 10 Normant, M. et al. in BALSAM PROJECT – WORK PACKAGE 4: Testing Monitoring Methods for Non-Indigenous Species in Ports (eds M. Ruiz, J. Karhu, & H. Backer) 31-55 (Baltic Marine Environment Protection Commission, 2015).
 - 11 Kukliński, P. & Witalis, B. Wpływ wód balastowych na bioróżnorodność organizmów poroślowych portu Gdynia. (2011).
 - 12 Minchin, J. D. et al. Rapid expansion and facilitating factors of the Ponto-Caspian invader *Dikerogammarus villosus* within the eastern Baltic Sea. *Aquat. Invasions* 14, 165-181, <https://doi.org/10.3391/ai.2019.14.2.02> (2019).
 - 13 AquaNIS. Information system on aquatic non-indigenous and cryptogenic species, <http://www.corpi.ku.lt/databases/index.php/aquanis/>, (last access: 09.02.2021).
 - 14 Ojaveer, H. et al. Dynamics of biological invasions and pathways over time: a case study of a temperate coastal sea. *Biol. Invasions* 19, 799-813, <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1316-x> (2017).
 - 15 Stachowicz, J. J., Terwin, J. R., Whitlatch, R. B. & Osman, R. W. Linking climate change and biological invasions: Ocean warming facilitates nonindigenous species invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 15497, <https://doi.org/10.1073/pnas.242437499> (2002).
 - 16 Occhipinti-Ambrogi, A. Global change and marine communities: Alien species and climate change. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 342-352, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.11.014> (2007).
 - 17 Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G. & Dukes, J. S. Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species. *Conserv. Biol.* 22, 534-543, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x> (2008).
 - 18 Olyarnik, S. V. et al. in *Biological Invasions in Marine Ecosystems: Ecological, Management, and Geographic Perspectives* (eds Gil Rilov & Jeffrey A. Crooks) 215-238 (Springer Berlin Heidelberg, 2009).
 - 19 Pyke, C. R. et al. Current Practices and Future Opportunities for Policy on Climate Change and Invasive Species. *Conserv. Biol.* 22, 585-592, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00956.x> (2008).
 - 20 Rahel, F. J. & Olden, J. D. Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species. *Conserv. Biol.* 22, 521-533, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00950.x> (2008).
 - 21 Ng, C. A. & Gray, K. A. Forecasting the effects of global change scenarios on bioaccumulation patterns in great lakes species. *Global Change Biol.* 17, 720-733, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02299.x> (2011).
 - 22 Holopainen, R. et al. Impacts of changing climate on the non-indigenous invertebrates in the northern Baltic Sea by end of the twenty-first century. *Biol. Invasions* 18, 3015-3032, <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1197-z> (2016).
 - 23 Kornobis, S. Ecology of *Dreissena polymorpha* (Pal.) (*Dreissena*: *Bivalvia*) in lakes receiving heated water discharges. *Polskie Archiwum Hydrobiologii* 24, 531-545 (1977).
 - 24 Stanczykowska, A. & Stoczkowski, R. Are the changes in *Dreissena polymorpha* [Pall.] distribution in the Great Masurian Lakes related to trophic state? *Polskie Archiwum Hydrobiologii* 44, 417-429 (1997).
 - 25 Borcherdig, J. The annual reproductive cycle of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* Pallas in lakes. *Oecologia* 87, 208-218, <https://doi.org/10.1007/BF00325258> (1991).
 - 26 Sprung, M. Costs of reproduction : a study on metabolic requirements of the gonads and fecundity of the bivalve *Dreissena polymorpha*. *Malacologia* 33, 63-70 (1991).
 - 27 Sprung, M. Ecological requirements of developing *Dreissena polymorpha* eggs. *Arch. Hydrobiol., Suppl.bd., Monogr. Beitr* 79, 69-86 (1987).
 - 28 Claudi, R. & Mackie, G. L. (Lewis publishers, Boca Raton, Florida, 1994).
 - 29 Fanslow, D. L., Nalepa, T. F. & Lang, G. A. Filtration Rates of the



- Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) on Natural Seston from Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.* 21, 489-500, [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(95\)71061-9](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(95)71061-9) (1995).
- 30 Aldridge, D. W., Payne, B. S. & Miller, A. C. Oxygen consumption, nitrogenous excretion, and filtration rates of *Dreissena polymorpha* at acclimation temperatures between 20 and 32 °C. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52, 1761-1767, <https://doi.org/10.1139/f95-768> (1995).
 - 31 HELCOM. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets, <http://www.HELCOM.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>, (last access: 19.07.2021).
 - 32 Wimbush, J., Sloane, W., Farrell, J. & Nierzwicki-Bauer, S. A. in Conference proceeding: 13th international Conference on aquatic invasive species.
 - 33 Lee, V. A. & Johnson, T. B. Development of a Bioenergetics Model for the Round Goby (*Neogobius melanostomus*). *J. Great Lakes Res.* 31, 125-134, [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(05\)70244-6](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(05)70244-6) (2005).
 - 34 Almqvist, G. Round goby *Neogobius melanostomus* in the Baltic Sea – Invasion Biology in practice, Systemekologiska institutionen, (2008).
 - 35 Tomczak, M. T. & Sapota, M. R. The fecundity and gonad development cycle of the round goby (*Neogobius melanostomus* Pallas 1811) from the Gulf of Gdańsk. *Oceanol. Hydrobiol. Stud.* 35, 353-367 (2006).
 - 36 Leppäkoski, E. & Olenin, S. Non-native Species and Rates of Spread: Lessons from the Brackish Baltic Sea. *Biol. Invasions* 2, 151-163, <https://doi.org/10.1023/A:1010052809567> (2000).
 - 37 Orlova, M. I. et al. Effects of nonindigenous species on diversity and community functioning in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea). *Helgoland Marine Research* 60, 98-105, <https://doi.org/10.1007/s10152-006-0026-7> (2006).
 - 38 Arend, K. K. et al. Seasonal and interannual effects of hypoxia on fish habitat quality in central Lake Erie. *Freshw. Biol.* 56, 366-383, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02504.x> (2011).
 - 39 Maximov, A. A. Large-scale invasion of *Marenzelleria* spp. (Polychaeta; Spionidae) in the eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Russ. J. Biol. Invasions* 2, 11-19, <https://doi.org/10.1134/S2075111711010036> (2011).
 - 40 Josefsson, S., Leonardsson, K., Gunnarsson, J. S. & Wiberg, K. Bioturbation-Driven Release of Buried PCBs and PBDEs from Different Depths in Contaminated Sediments. *Environ. Sci. Technol.* 44, 7456-7464, <https://doi.org/10.1021/es100615g> (2010).
 - 41 Witte, S., Buschbaum, C., van Beusekom, J. E. E. & Reise, K. Does climatic warming explain why an introduced barnacle finally takes over after a lag of more than 50 years? *Biol. Invasions* 12, 3579-3589, <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9752-5> (2010).
 - 42 Pederson, J. et al. in ICES status report on climate change in the North Atlantic (eds P. C. Reid & L. Valdés) 262pp (ICES Cooperative Research Report No. 310, 2011).
- Ökosystemfunktionen
- 1 Kahru, M., Elmgren, R. & Savchuk, O. P. Changing seasonality of the Baltic Sea. *Biogeosciences* 13, 1009-1018, <https://doi.org/10.5194/bg-13-1009-2016> (2016).
 - 2 Hjerne, O., Hajdu, S., Larsson, U., Downing, A. S. & Winder, M. Climate Driven Changes in Timing, Composition and Magnitude of the Baltic Sea Phytoplankton Spring Bloom. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00482> (2019).
 - 3 Kahru, M., Elmgren, R., Kaiser, J., Wasmund, N. & Savchuk, O. Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: Correlations with environmental factors. *Harmful Algae* 92, 101739, <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101739> (2020).
 - 4 Kahru, M. & Elmgren, R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea. *Biogeosciences* 11, 3619-3633, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3619-2014> (2014).
 - 5 Casini, M. et al. Trophic cascades promote threshold-like shifts in pelagic marine ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 197, <https://doi.org/10.1073/pnas.0806649105> (2009).
 - 6 Möllmann, C. et al. Reorganization of a large marine ecosystem due to atmospheric and anthropogenic pressure: a discontinuous regime shift in the Central Baltic Sea. *Global Change Biol.* 15, 1377-1393, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01814.x> (2009).
 - 7 Eriksson, B. K. et al. Declines in predatory fish promote bloom-forming macroalgae. *Ecol. Appl.* 19, 1975-1988, <https://doi.org/10.1890/08-0964.1> (2009).
 - 8 Lindegren, M., Blenckner, T. & Stenseth, N. C. Nutrient reduction and climate change cause a potential shift from pelagic to benthic pathways in a eutrophic marine ecosystem. *Global Change Biol.* 18, 3491-3503, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02799.x> (2012).
 - 9 Suikkanen, S. et al. Climate Change and Eutrophication Induced Shifts in Northern Summer Plankton Communities. *PLoS ONE* 8, e66475, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066475> (2013).
 - 10 Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G. & Conley, D. J. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 5628-5633, <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111> (2014).
 - 11 Eriksson, B. K. et al. Effects of Altered Offshore Food Webs on Coastal Ecosystems Emphasize the Need for Cross-Ecosystem Management. *Ambio* 40, 786, <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0158-0> (2011).
 - 12 Östman, Ö. et al. Top-down control as important as nutrient enrichment for eutrophication effects in North Atlantic coastal ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 53, 1138-1147, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12654> (2016).
 - 13 Pekcan-Hekim, Z. et al. The role of climate and fisheries on the temporal changes in the Bothnian Bay foodweb. *ICES J. Mar. Sci.* 73, 1739-1749, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw032> (2016).
 - 14 Karlson, A. M. L. et al. Nitrogen fixation by cyanobacteria stimulates production in Baltic food webs. *Ambio* 44, 413-426, <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0660-x> (2015).
 - 15 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369-3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
 - 16 Svensson, F. et al. In situ warming strengthens trophic cascades in a coastal food web. *Oikos* 126, 1150-1161, <https://doi.org/10.1111/oik.03773> (2017).
 - 17 Pecuchet, L., Törnroos, A. & Lindegren, M. Patterns and drivers of fish community assembly in a large marine ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 546, 239-248, <https://doi.org/10.3354/meps11613> (2016).
 - 18 Niiranen, S. et al. Combined effects of global climate change

- and regional ecosystem drivers on an exploited marine food web. *Global Change Biol.* 19, 3327-3342, <https://doi.org/10.1111/gcb.12309> (2013).
- 19 Bauer, B. et al. Food web and fisheries in the future Baltic Sea. *Ambio*, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01229-3> (2019).
 - 20 Olsson, J., Bergström, L. & Gårdmark, A. Abiotic drivers of coastal fish community change during four decades in the Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 961-970, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss072> (2012).
 - 21 Helenius, L. K., Leskinen, E., Lehtonen, H. & Nurminen, L. Spatial patterns of littoral zooplankton assemblages along a salinity gradient in a brackish sea: A functional diversity perspective. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 198, 400-412, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.031> (2017).
 - 22 Bartels, P., Ask, J., Andersson, A., Karlsson, J. & Giesler, R. Allochthonous Organic Matter Supports Benthic but Not Pelagic Food Webs in Shallow Coastal Ecosystems. *Ecosystems* 21, 1459-1470, <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0233-5> (2018).
 - 23 Sandberg, J. Cross-ecosystem analyses of pelagic food web structure and processes in the Baltic Sea. *Ecol. Model.* 201, 243-261, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.023> (2007).
 - 24 Eklöf, J. S. et al. Experimental climate change weakens the insurance effect of biodiversity. *Ecol. Lett.* 15, 864-872, <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01810.x> (2012).
 - 25 Humborg, C. et al. High Emissions of Carbon Dioxide and Methane From the Coastal Baltic Sea at the End of a Summer Heat Wave. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00493> (2019).
 - 26 European Environment Agency. Maximum extent of ice cover in the Baltic Sea https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/maximum-extent-of-ice-cover-3#tab-chart_1, (last access: 27.11.2020).
 - 7 Clausen, K. K., Stjernholm, M. & Clausen, P. Grazing management can counteract the impacts of climate change-induced sea level rise on salt marsh-dependent waterbirds. *J. Appl. Ecol.* 50, 528-537, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12043> (2013).
 - 8 Takolander, A., Leskinen, E. & Cabeza, M. Synergistic effects of extreme temperature and low salinity on foundational macroalga *Fucus vesiculosus* in the northern Baltic Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 495, 110-118, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.07.001> (2017).
 - 9 Westerborn, M., Mustonen, O., Jaatinen, K., Kilpi, M. & Norkko, A. Population Dynamics at the Range Margin: Implications of Climate Change on Sublittoral Blue Mussels (*Mytilus trossulus*). *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00292> (2019).
 - 10 Dippner, J. W., Hänninen, J., Kuosa, H. & Vuorinen, I. The influence of climate variability on zooplankton abundance in the Northern Baltic Archipelago Sea (SW Finland). *ICES J. Mar. Sci.* 58, 569-578, <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1048> (2001).
 - 11 Kovtun, A. et al. Influence of abiotic environmental conditions on spatial distribution of charophytes in the coastal waters of West Estonian Archipelago, Baltic Sea. *J. Coastal Res.*, 412-416 (2011).
 - 12 Ehlers, A., Worm, B. & Reusch, T. B. H. Importance of genetic diversity in eelgrass *Zostera marina* for its resilience to global warming. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 355, 1-7, <https://doi.org/10.3354/meps07369> (2008).
 - 13 Jonsson, P. R. et al. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key habitat former *Fucus vesiculosus*. *Divers. Distrib.* 24, 892-905, <https://doi.org/10.1111/ddi.12733> (2018).
 - 14 Kotta, J. et al. Integrating experimental and distribution data to predict future species patterns. *Sci. Rep.-UK* 9, 1821, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38416-3> (2019).
 - 15 Jonsson, P. R., Moksnes, P.-O., Corell, H., Bonsdorff, E. & Nilsson Jacobi, M. Ecological coherence of Marine Protected Areas: New tools applied to the Baltic Sea network. *Aquat. Conserv.* 30, 743-760, <https://doi.org/10.1002/aqc.3286> (2020).
 - 16 HELCOM. Ecological coherence assessment of the Marine Protected Area network in the Baltic. 74pp (Helsinki, Finland, 2016).
 - 17 Khatiwala, S. et al. Global ocean storage of anthropogenic carbon. *Biogeosciences* 10, 2169-2191, <https://doi.org/10.5194/bg-10-2169-2013> (2013).

Marine Schutzgebiete

- 1 Laikre, L. et al. Lack of recognition of genetic biodiversity: International policy and its implementation in Baltic Sea marine protected areas. *Ambio* 45, 661-680, <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0776-7> (2016).
- 2 Lewis, N. et al. Large-scale marine protected areas: guidelines for design and management. xxviii + 120pp (Best Practice Protected Area Guidelines Series, No. 26, IUCN, Gland, Switzerland, 2017).
- 3 Dureuil, M., Boerder, K., Burnett, K. A., Froese, R. & Worm, B. Elevated trawling inside protected areas undermines conservation outcomes in a global fishing hot spot. *Science* 362, 1403, <https://doi.org/10.1126/science.aau0561> (2018).
- 4 HELCOM. Implementation of the Baltic Sea Action Plan 2018 - Three years left to reach good environmental status. Background document to the 2018 HELCOM Ministerial Meeting. 91pp (Brussels, Belgium, 2018).
- 5 Reusch, T. B. H. et al. The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. *Sci. Adv.* 4, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8195> (2018).
- 6 Clausen, K. K. & Clausen, P. Forecasting future drowning of coastal waterbird habitats reveals a major conservation concern. *Biol. Conserv.* 171, 177-185, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.01.033> (2014).

Nährstoffkonzentrationen und Überdüngung

- 1 Schneider, B., Eilola, K., Lukkari, K., Müller-Karulis, B. & Neumann, T. in Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (ed BACC II Author Team) 337-361 (Springer International Publishing, 2015).
- 2 Gustafsson, E., Savchuk, O. P., Gustafsson, B. G. & Müller-Karulis, B. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea. *Biogeochemistry* 134, 301-317, <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0361-6> (2017).
- 3 Conley, D. J., Humborg, C., Rahm, L., Savchuk, O. P. & Wulff, F. Hypoxia in the Baltic Sea and basin-scale changes in phosphorus biogeochemistry. *Environ. Sci. Technol.* 36, 5315-5320, <https://doi.org/10.1021/es025763w> (2002).
- 4 Savchuk, O. P. Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic



- Sea, 1970–2016. *Front. Mar. Sci.* 5, 95, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00095> (2018).
- 5 HELCOM. HELCOM thematic assessment of eutrophication 2011–2016., 83pp (Helsinki, Finland, 2018).
- 6 Carstensen, J. & Conley, D. J. Baltic Sea Hypoxia Takes Many Shapes and Sizes. *Limnol. Oceanogr. Bull.* 28, 125–129, <https://doi.org/10.1002/lob.10350> (2019).
- 7 Carstensen, J., Henriksen, P. & Heiskanen, A.-S. Summer algal blooms in shallow estuaries: Definition, mechanisms, and link to eutrophication. *Limnol. Oceanogr.* 52, 370–384, <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.1.0370> (2007).
- 8 Wasmund, N. et al. Extension of the growing season of phytoplankton in the western Baltic Sea in response to climate change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 622, 1–16, <https://doi.org/10.3354/meps12994> (2019).
- 9 Meier, H. E. M. et al. Assessment of Eutrophication Abatement Scenarios for the Baltic Sea by Multi-Model Ensemble Simulations. *Front. Mar. Sci.* 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00440> (2018).
- 10 Meier, H. E. M. et al. Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961–2099. *Clim. Dyn.* 39, 2421–2441, <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1339-7> (2012).
- 11 Meier, H. E. M. et al. Impact of climate change on ecological quality indicators and biogeochemical fluxes in the Baltic Sea: a multi-model ensemble study. *Ambio* 41, 558–573, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0320-3> (2012).
- 12 Saraiva, S. et al. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Front. Earth Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00244> (2019).
- 13 Neumann, T. et al. Extremes of temperature, oxygen and blooms in the Baltic Sea in a changing climate. *Ambio* 41, 574–585, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0321-2> (2012).
- 14 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369–3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 15 Meier, H. E. M. et al. Future projections of record-breaking sea surface temperature and cyanobacteria bloom events in the Baltic Sea. *Ambio* 48, 1362–1376, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01235-5> (2019).
- 16 Andersson, A. et al. Projected future climate change and Baltic Sea ecosystem management. *Ambio* 44, 345–356, <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0654-8> (2015).
- 17 Meier, H. E. M. et al. Assessment of Uncertainties in Scenario Simulations of Biogeochemical Cycles in the Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00046> (2019).
- 18 Blomqvist, S., Gunnars, A. & Elmgren, R. Why the limiting nutrient differs between temperate coastal seas and freshwater lakes: A matter of salt. *Limnol. Oceanogr.* 49, 2236–2241, <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.6.2236> (2004).
- 19 Ehrnsten, E., Norkko, A., Müller-Karulis, B., Gustafsson, E. & Gustafsson, B. G. The meagre future of benthic fauna in a coastal sea—Benthic responses to recovery from eutrophication in a changing climate. *Global Change Biol.* 26, 2235–2250, <https://doi.org/10.1111/gcb.15014> (2020).
- 20 Carstensen, J. et al. Factors regulating the coastal nutrient filter in the Baltic Sea. *Ambio* 49, 1194–1210, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01282-y> (2020).
- 21 HELCOM. HELCOM Baltic Sea Action Plan. 101pp (Krakow, Poland, 2007).
- 22 European Commission. DIRECTIVE 2008/56/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive) (Text with EEA relevance). (2008).
- 23 European Commission. DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. (2000).

Offshore-Windparks

- 1 WindEurope. Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2019. 40pp (Brussels, Belgium, 2020).
- 2 European Commission. Study on Baltic offshore wind energy cooperation under BEMIP - Final report. ENER/C1/2018-456, June 2019. 250pp (Directorate C - Renewables, Research and Innovation, Energy Efficiency, Brussels, Belgium, 2019).
- 3 Clark, S., Schroeder, F. & Baschek, B. The Influence of Large Offshore Wind Farms on the North Sea and Baltic Sea: A Comprehensive Literature Review. (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material-und Küstenforschung, 2014).
- 4 Gutow, L. et al. in *Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus: Challenges, Results and Perspectives* (eds Maritime Federal, Agency Hydrographic, Nature Conservation Federal Ministry for the Environment, & Safety Nuclear) 67–81 (Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014).
- 5 Dierschke, V., Garthe, S. & Mendel, B. in *Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts* (eds Julia Köller, Johann Köppel, & Wolfgang Peters) 121–143 (Springer Berlin Heidelberg, 2006).
- 6 Bergström, L. et al. Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment. *Environ. Res. Lett.* 9, 034012, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034012> (2014).
- 7 Peschko, V., Mendel, B., Mercker, M., Dierschke, J. & Garthe, S. Northern gannets (*Morus bassanus*) are strongly affected by operating offshore wind farms during the breeding season. *J. Environ. Manag.* 279, 111509, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111509> (2021).
- 8 Peschko, V., Mercker, M. & Garthe, S. Telemetry reveals strong effects of offshore wind farms on behaviour and habitat use of common guillemots (*Uria aalge*) during the breeding season. *Mar. Biol.* 167, 118, <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03735-5> (2020).
- 9 Peschko, V. et al. Effects of offshore windfarms on seabird abundance: Strong effects in spring and in the breeding season. *Mar. Environ. Res.* 162, 105157, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105157> (2020).
- 10 Rusu, E. An evaluation of the wind energy dynamics in the Baltic Sea, past and future projections. *Renew. Energy* 160, 350–362, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.152> (2020).
- 11 European Commission. An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future. (Brussels, Belgium, 2020).
- 12 European Commission. Guidance document on wind energy developments and EU nature legislation. 182pp (2020).
- 13 WindEurope. How offshore wind will help Europe go car-



bon-neutral 80pp (Brussels, Belgium, 2019).

- 14 Göke, C., Dahl, K. & Mohn, C. Maritime Spatial Planning supported by systematic site selection: Applying Marxan for offshore wind power in the western Baltic Sea. *PLoS ONE* 13, e0194362, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194362> (2018).

Küstenschutz

- 1 Harff, J. et al. in *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East: Past and Future Projection* (eds Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, & Hans von Storch) 15-35 (Springer International Publishing, 2017).
- 2 Liqueste, C., Zulian, G., Delgado, I., Stips, A. & Maes, J. Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecol. Indic.* 30, 205-217, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.013> (2013).
- 3 Weisner, E. & Schernewski, G. Adaptation to climate change: A combined coastal protection and re-alignment scheme in a Baltic tourism region. *J. Coastal Res.*, 1963-1968, <https://doi.org/10.2112/si65-332.1> (2013).
- 4 Nordstrom, K. F. Living with shore protection structures: A review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 150, 11-23, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003> (2014).
- 5 Spalding, M. D. et al. The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean Coast. Manage.* 90, 50-57, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007> (2014).
- 6 Schernewski, G., Schumacher, J., Weisner, E. & Donges, L. A combined coastal protection, realignment and wetland restoration scheme in the southern Baltic: planning process, public information and participation. *J. Coast. Conserv.* 22, 533-547, <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0542-4> (2018).
- 7 Schernewski, G., Bartel, C., Kobarg, N. & Karnauskaite, D. Retrospective assessment of a managed coastal realignment and lagoon restoration measure: the Geltinger Birk, Germany. *J. Coast. Conserv.* 22, 157-167, <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0496-6> (2018).
- 8 Schmidt, A., Striegnitz, M. & Kuhn, K. Integrating regional perceptions into climate change adaptation: a transdisciplinary case study from Germany's North Sea Coast. *Reg. Environ. Change* 14, 2105-2114, <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0338-x> (2014).
- 9 Hoffmann, G. & Lampe, R. Sediment budget calculation to estimate Holocene coastal changes on the southwest Baltic Sea (Germany). *Mar. Geol.* 243, 143-156, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.04.014> (2007).
- 10 BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. (Springer International Publishing, 2015).
- 11 Hopkins, T. S. et al. A Systems Approach Framework for the Transition to Sustainable Development: Potential Value Based on Coastal Experiments. *Ecol. Soc.* 17, <https://doi.org/10.5751/ES-05266-170339> (2012).
- 12 Baltranaitė, E., Povilanskas, R., Dučinskas, K., Ernšteinis, R. & Tõnisson, H. Systems Approach to Eastern Baltic Coastal Zone Management. *Water* 12, <https://doi.org/10.3390/w12113102> (2020).
- 13 HELCOM. RECOMMENDATION 16/3 - HELSINKI COMMISSION. 2pp (1995).

Schifffahrt

- 1 HELCOM. HELCOM Map and Data Service, <https://maps.helcom.fi/website/mapservice/>, (last access: 29.09.2020).
- 2 HELCOM. Shipping accidents in the Baltic Sea 2018. 33pp (2019).
- 3 Turner, D. R., Hassellöv, I.-M., Ytreberg, E. & Rutgersson, A. Shipping and the environment: Smokestack emissions, scrubbers and unregulated oceanic consequences. *Elementa-Sci. Anthropol.* 5, <https://doi.org/10.1525/elementa.167> (2017).
- 4 Haapala, J., Meier, H. E. M. & Rinne, J. Numerical investigations of future ice conditions in the Baltic Sea. *Ambio* 30, 237-244, <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.4.237> (2001).
- 5 Höglund, A., Pemberton, P., Hordoir, R. & Schimanke, S. Ice conditions for maritime traffic in the Baltic Sea in future climate. *Boreal Environ. Res.* 22, 245-265 (2017).
- 6 Rutgersson, A. et al. Natural Hazards and Extreme Events in the Baltic Sea region. *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, 1-80, <https://doi.org/10.5194/esd-2021-13> (2021).
- 7 De Ceuster, G., van Herbruggen, B. & Logghe, S. TREMOVE - description of model and baseline version 2.41. Report for the European Commission. (Leuven, Belgium, 2006).
- 8 IMO. MEPC 72/17 - Report of the Marine Environment Protection Committee on its seventy-second session. 64 (International Maritime Organization, 2018).

Tourismus

- 1 Jacobsen, P. B. State of the Tourism Industry in the Baltic Sea Region - 2018 Edition. 48pp (Baltic Sea Tourism Center (BSTC), Rostock, Germany, 2018).
- 2 Więckowski, M. & Cerić, D. Evolving tourism on the Baltic Sea coast: perspectives on change in the Polish maritime borderland. *Scand. J. Hosp. Tour.* 16, 98-111, <https://doi.org/10.1080/15022250.2016.1244598> (2016).
- 3 Port of Helsinki. Annual Report 2019, <https://vuosikertomus2019.portofhelsinki.fi/en/>, (last access: 30.11.2020).
- 4 Scott, D., Gössling, S. & Hall, C. M. International tourism and climate change. *WIREs Climate Change* 3, 213-232, <https://doi.org/10.1002/wcc.165> (2012).
- 5 Kahru, M., Elmgren, R. & Savchuk, O. P. Changing seasonality of the Baltic Sea. *Biogeosciences* 13, 1009-1018, <https://doi.org/10.5194/bg-13-1009-2016> (2016).
- 6 Ojaveer, H. et al. Twenty five years of invasion: management of the round goby *Neogobius melanostomus* in the Baltic Sea. *Manag. Biol. Invasions* 6, 329-339, <https://doi.org/10.3391/mbi.2015.6.4.02> (2015).
- 7 Hamilton, J. M., Maddison, D. J. & Tol, R. S. J. Climate change and international tourism: A simulation study. *Glob. Environ. Change* 15, 253-266, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.009> (2005).
- 8 Tonazzini, D. et al. Blue tourism, Towards a Sustainable Coastal and Maritime Tourism in World Marine Regions. (eco-union Barcelona, 2019).



Fischerei

- 1 ICES. Baltic Sea Ecosystem - Fisheries Overview. Report of the ICES Advisory Committee ICES Advice 2019, section 4.2, 29pp, <https://doi.org/10.17895/ices.advice.5566> (2019).
- 2 HELCOM. Recreational fisheries in the Baltic Sea and availability of data. 9pp (Tallinn, Estonia, 2017).
- 3 Zeller, D. et al. The Baltic Sea: Estimates of total fisheries removals 1950–2007. *Fish. Res.* 108, 356–363, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.10.024> (2011).
- 4 Persson, L. in *Total marine fisheries extractions by country in the Baltic Sea: 1950–present* (eds P. Rossing, S. Booth, & D. Zeller) 225–263 (Fisheries Centre Research Reports 18 (1). Fisheries Centre, 2010).
- 5 Setälä, J. et al. *Kalastuksen olosuhdekatsaus 2017*. 46pp (Luonnonvarakeskus (Luke) 2018).
- 6 Pekcan-Hekim, Z. et al. Climate Warming and Pikeperch Year-Class Catches in the Baltic Sea. *Ambio* 40, 447–456, <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0143-7> (2011).
- 7 Lappalainen, A. The effects of recent eutrophication on freshwater fish communities and fishery on the northern coast of the Gulf of Finland, Baltic Sea PhD thesis, University of Helsinki, Finland, (2002).
- 8 Bauer, B. et al. Food web and fisheries in the future Baltic Sea. *Ambio*, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01229-3> (2019).
- 9 Bauer, B. et al. Reducing eutrophication increases spatial extent of communities supporting commercial fisheries: a model case study. *ICES J. Mar. Sci.* 75, 1306–1317, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy023> (2018).
- 10 Tunca, S., Lindegren, M., Ravn-Jonsen, L. & Lindroos, M. Co-operative Fisheries Outperform Non-cooperative Ones in the Baltic Sea Under Different Climate Scenarios. *Front. Mar. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00622> (2019).
- 11 Niiranen, S. et al. Combined effects of global climate change and regional ecosystem drivers on an exploited marine food web. *Global Change Biol.* 19, 3327–3342, <https://doi.org/10.1111/gcb.12309> (2013).

Aquakultur

- 1 Asmala, E. & Saikku, L. Closing a Loop: Substance Flow Analysis of Nitrogen and Phosphorus in the Rainbow Trout Production and Domestic Consumption System in Finland. *Ambio* 39, 126–135, <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0024-5> (2010).
- 2 Kankainen, M., Vielma, J., Koskela, J., Niukka, J. & Niskanen, L. Olosuhteiden vaikutus kirjolojen kasvatuksen tehokkuuteen Suomen merialueilla. 34pp (Luonnonvarakeskus, Helsinki, Finland, 2020).
- 3 Huyben, D. et al. Dietary live yeast and increased water temperature influence the gut microbiota of rainbow trout. *J. Appl. Microbiol.* 124, 1377–1392, <https://doi.org/10.1111/jam.13738> (2018).
- 4 Kotta, J. et al. Cleaning up seas using blue growth initiatives: Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* 709, 136144, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136144> (2020).
- 5 Visch, W. et al. Spatial differences in growth rate and nutrient mitigation of two co-cultivated, extractive species: The blue mussel (*Mytilus edulis*) and the kelp (*Saccharina latissima*). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 246, 107019, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107019> (2020).

- 6 Benassai, G., Mariani, P., Stenberg, C. & Christoffersen, M. A Sustainability Index of potential co-location of offshore wind farms and open water aquaculture. *Ocean Coast. Manage.* 95, 213–218, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.007> (2014).

Marine Kohlenstoffspeicherung

- 1 Nellemann, C. et al. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment. (UNEP/Earthprint, 2009).
- 2 Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I. & Marbà, N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Change* 3, 961–968, <https://doi.org/10.1038/nclimate1970> (2013).
- 3 Waycott, M. et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 12377, <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106> (2009).
- 4 Hoegh-Guldberg, O. et al. in *The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action* 47–57 (World Resources Institute, 2019).
- 5 Pendleton, L. et al. Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE* 7, e43542, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542> (2012).
- 6 Spivak, A. C., Sanderman, J., Bowen, J. L., Canuel, E. A. & Hopkinson, C. S. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Nat. Geosci.* 12, 685–692, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0435-2> (2019).
- 7 Gattuso, J.-P. et al. Ocean Solutions to Address Climate Change and Its Effects on Marine Ecosystems. *Front. Mar. Sci.* 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337> (2018).
- 8 United Nations Environment Programme. Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people. (UNEP, Nairobi, Kenya, 2020).
- 9 Pessarrodona, A., Foggo, A. & Smale, D. A. Can ecosystem functioning be maintained despite climate-driven shifts in species composition? Insights from novel marine forests. *J. Ecol.* 107, 91–104, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13053> (2019).
- 10 Smale, D. A. et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nat. Clim. Change* 9, 306–312, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1> (2019).
- 11 Krause-Jensen, D., Duarte, C. M., Sand-Jensen, K. & Carstensen, J. Century-long records reveal shifting challenges to seagrass recovery. *Global Change Biol.* 27, 563–575, <https://doi.org/10.1111/gcb.15440> (2021).
- 12 Takolander, A., Cabeza, M. & Leskinen, E. Climate change can cause complex responses in Baltic Sea macroalgae: A systematic review. *J. Sea Res.* 123, 16–29, <https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.03.007> (2017).
- 13 Reusch, T. B. H. et al. The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. *Sci. Adv.* 4, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8195> (2018).
- 14 Bobsien, I. C. et al. Modeling eelgrass spatial response to nutrient abatement measures in a changing climate. *Ambio* 50, 400–412, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01364-2> (2021).
- 15 Jonsson, P. R. et al. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key

- habitat former *Fucus vesiculosus*. *Divers. Distrib.* 24, 892-905, <https://doi.org/10.1111/ddi.12733> (2018).
- 16 Clausen, K. K., Stjernholm, M. & Clausen, P. Grazing management can counteract the impacts of climate change-induced sea level rise on salt marsh-dependent waterbirds. *J. Appl. Ecol.* 50, 528-537, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12043> (2013).
- 17 Duarte, C. M. et al. Rebuilding marine life. *Nature* 580, 39-51, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7> (2020).
- 18 Weisner, E. & Schernewski, G. Adaptation to climate change: A combined coastal protection and re-alignment scheme in a Baltic tourism region. *J. Coastal Res.*, 1963-1968, <https://doi.org/10.2112/si65-332.1> (2013).
- 19 Leo, K. L., Gillies, C. L., Fitzsimons, J. A., Hale, L. Z. & Beck, M. W. Coastal habitat squeeze: A review of adaptation solutions for saltmarsh, mangrove and beach habitats. *Ocean Coast. Manage.* 175, 180-190, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.019> (2019).
- 20 Macreadie, P. I. et al. The future of Blue Carbon science. *Nat. Commun.* 10, 3998, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w> (2019).
- 21 Frigstad, H., Gundersen, H., Andersen, G. S., Borgersen, G., Kvile, K. Ø., Krause-Jensen, D., Boström, C., Bekkby, T., d'Auriac, M. A., Ruus, A., Thormar, J., Asdal, K., Hancke, K. Blue Carbon-climate adaptation, CO₂ uptake and sequestration of carbon in Nordic blue forests: Results from the Nordic Blue Carbon Project. *TemaNord* 2020:541. 139 pp. ISBN 978-92-893-6860-5 (PDF); ISBN 978-92-893-6861-2 (ONLINE). <http://dx.doi.org/10.6027/temanord2020-541> <https://www.norden.org/no/node/49407> (2021)
- 22 The Blue Carbon Initiative. <https://www.thebluecarboninitiative.org/>, (last access: 22.07.2021).
- 23 IUCN. Report: Blue Infrastructure Finance, where all win, <https://www.iucn.org/news/marine-and-polar/202003/report-blue-infrastructure-finance-where-all-win>, (last access: 22.07.2021).
- 24 Nordic Co-operation. Nordic Ministerial Declaration on Oceans and Climate, <https://www.norden.org/en/declaration/nordic-ministerial-declaration-oceans-and-climate>, (last access: 22.07.2021).
- 25 European Commission. Nature-based solutions, https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en, (last access: 22.07.2021).
- 26 FutureMARES. Climate Change and Future Marine Ecosystem Services and Biodiversity, <https://www.futuremares.eu/>, (last access: 22.07.2021).
- <https://doi.org/10.3390/w11071518> (2019).
- 5 Bauer, B. et al. Food web and fisheries in the future Baltic Sea. *Ambio*, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01229-3> (2019).
- 6 Huyben, D. et al. Dietary live yeast and increased water temperature influence the gut microbiota of rainbow trout. *J. Appl. Microbiol.* 124, 1377-1392, <https://doi.org/10.1111/jam.13738> (2018).
- 7 Visch, W. et al. Spatial differences in growth rate and nutrient mitigation of two co-cultivated, extractive species: The blue mussel (*Mytilus edulis*) and the kelp (*Saccharina latissima*). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 246, 107019, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107019> (2020).
- 8 Bobsien, I. C. et al. Modeling eelgrass spatial response to nutrient abatement measures in a changing climate. *Ambio* 50, 400-412, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01364-2> (2021).
- 9 Jonsson, P. R. et al. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key habitat former *Fucus vesiculosus*. *Divers. Distrib.* 24, 892-905, <https://doi.org/10.1111/ddi.12733> (2018).
- 10 Saraiva, S. et al. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Clim. Dyn.* 52, 3369-3387, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4330-0> (2019).
- 11 Svensson, F. et al. In situ warming strengthens trophic cascades in a coastal food web. *Oikos* 126, 1150-1161, <https://doi.org/10.1111/oik.03773> (2017).
- 12 Olsson, J., Bergström, L. & Gårdmark, A. Abiotic drivers of coastal fish community change during four decades in the Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 961-970, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss072> (2012).
- 13 Ivanauskas, E. & Razinkovas-Baziukas, A. Mapping and assessing commercial fisheries services in the Lithuanian part of the Curonian Lagoon. Submitted to *Acta Ichthyologica Et Piscatoria* (2021).
- 14 Bartoli, M. et al. Drivers of Cyanobacterial Blooms in a Hypertrophic Lagoon. *Front. Mar. Sci.* 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00434> (2018).
- 15 Dam Lam, R., Gasparatos, A., Chakraborty, S., Rivera, H. & Stanley, T. Multiple values and knowledge integration in indigenous coastal and marine social-ecological systems research: A systematic review. *Ecosyst. Serv.* 37, 100910, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100910> (2019).

Ökosystemleistungen

- 1 Culhane, F. E., Frid, C. L. J., Royo Gelabert, E., White, L. & Robinson, L. A. Linking marine ecosystems with the services they supply: what are the relevant service providing units? *Ecol. Appl.* 28, 1740-1751, <https://doi.org/10.1002/eap.1779> (2018).
- 2 Filies, C. & Schumacher, S. in *Climate Change Adaptation in Practice* 225-238 (2013).
- 3 Townsend, M. et al. The Challenge of Implementing the Marine Ecosystem Service Concept. *Front. Mar. Sci.* 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00359> (2018).
- 4 Milon, J. W. & Alvarez, S. The Elusive Quest for Valuation of Coastal and Marine Ecosystem Services. *Water* 11, 1518, <https://doi.org/10.3390/w11071518> (2019).



