



baltic.earth
Earth System Science for the Baltic Sea Region

Klimawandel in der Ostsee 2021 Faktenblatt

Klimawandel



BSEP n°180





Published by:
Helsinki Commission – HELCOM
Katajanokanlaituri 6 B
00160 Helsinki, Finland

www.helcom.fi

This document is part of the flagship publication series of HELCOM, the Baltic Sea Environment Proceedings (BSEP) that have been running since the entry into force of the first Helsinki Convention in 1980. Although this document has been approved for publication by the members of the Helsinki Commission, views expressed in this publication are the authors' own and might vary from those of the Helsinki Commission or its members. Any maps that are featured in this publication are intended for illustration purposes only and do not necessarily designate the exact boundaries of sovereign states and entities.

The development of this publication was steered by the Joint HELCOM/Baltic Earth Expert Network on Climate Change (EN CLIME).

For bibliographic purposes this document should be cited as:
"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)

All rights reserved. Information included in this publication or extracts thereof, with the exception of images and graphic elements that are not HELCOM's or Baltic Earth's own and identified as such, may be reproduced without prior consent on the condition that the complete reference of the publication is given as stated above.

Authors:

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

The following people have supported the production of the Climate Change Fact Sheet:

Maris Arro, Paweł Banaś, Imre Banyasz, Edyta Białowąs, 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 Jadczyzszyn, Eglė Jakubavičiūtė, Dominika Juszkowska, 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 project FutureMARES (<https://www.futuremares.eu/>)

Further, we thank four anonymous and independent reviewers for their detailed and constructive comments that helped to improve the fact sheet considerably.

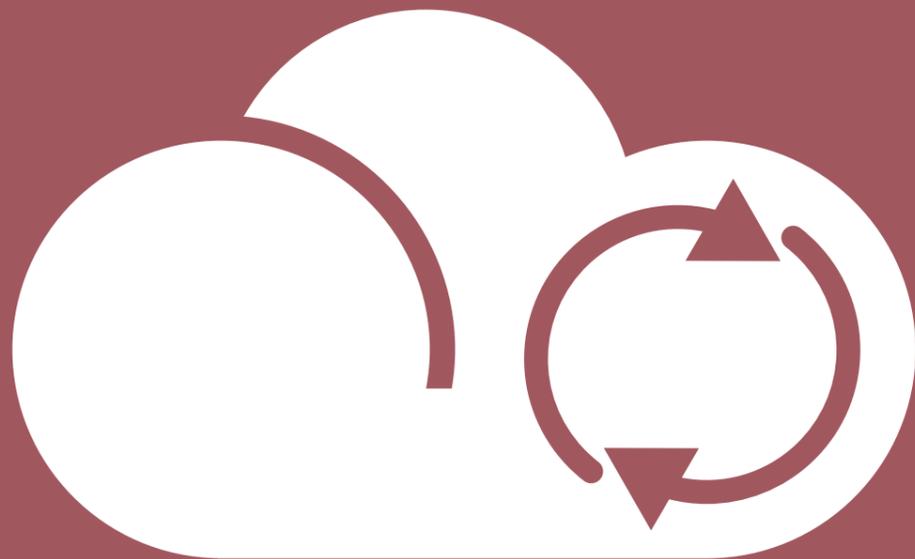
Editors: Jannica Haldin, Petra Kääriä, H.E. Markus Meier, Jonas Pålsson
Layout: Dominik Littfass

ISSN: 0357-2994

Contents

The Baltic: A sea of change	6	Indirect parameters: Ecosystem	36
Baltic Sea Expert Network on Climate Change – EN CLIME	7	Oxygen	38
Impact map	7	Microbial community and processes	39
Confidence assessment	7	Benthic habitats	40
Parameters covered	8	Coastal and migratory fish	41
Peer review of key messages	8	Pelagic and demersal fish	42
Climate change & climate mitigation	8	Waterbirds	43
Connections between parameters	9	Marine mammals	44
Climate future of the Baltic Sea	10	Non-indigenous species	45
Projections under a medium climate scenario	10	Marine protected areas	46
		Nutrient concentrations and eutrophication	47
Direct parameters (overview)	12	Ecosystem function	48
Indirect parameters: Ecosystem (overview)	14		
Indirect parameters: Human use (overview)	16	Indirect parameters: Human use	50
Direct parameters	18	Offshore wind farms	52
Air temperature	20	Coastal protection	53
Water temperature	21	Shipping	54
Large scale atmospheric circulation	22	Tourism	55
Sea ice	23	Fisheries	56
Solar radiation	24	Aquaculture	57
Salinity and saltwater inflows	25	Blue Carbon storage capacity	58
Stratification	26	Marine and coastal ecosystem services	59
Precipitation	27		
River run-off	28		
Carbonate chemistry	29		
Riverine nutrient loads and atmospheric deposition	30		
Sea level	31		
Wind	32	Glossary	62
Waves	33	Policy linkages	65
Sediment transportation	34	References	66





Der Klimawandel wirkt sich vielfältig auf die Ostsee aus. Wassertemperatur und Meeresspiegel steigen voraussichtlich an, die Eisbedeckung wird abnehmen. All dies hat Folgen für Ökosysteme und Biota: bei einigen marinen Arten werden Verschiebungen der Verbreitungsgebiete erwartet, die Produktivität des Benthos wird abnehmen, ebenso wie der Bruterfolg von Ringelrobben. Das gesamte Ökosystem und die menschliche Nutzung des Meeres sind betroffen; die Fischerei wird der Verlagerung der Verbreitungsgebiete folgen. In Zukunft werden wir wahrscheinlich ein breiteres Artenspektrum in der Aquakultur sehen. Die meisten Ökosystemleistungen werden sich voraussichtlich ändern — und das ist nur eine Auswahl.

Dieses Faktenblatt enthält aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zu den gegenwärtigen und voraussichtlich zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Ostsee. Es soll politische Entscheidungsträger:innen dabei unterstützen, den Klimawandel zu berücksichtigen, dient aber auch als Informationsquelle für 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, im Norden der Region nimmt der durchschnittliche Jahresniederschlag zu. Diese Veränderungen wirken sich auf die Natur der Ostsee, ihre Ökosysteme und Ökosystemleistungen, sowie auf die an das Meer gebundenen menschlichen Aktivitäten aus: Viele überwinternde Vögel 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 Schleppnetzfischerei beginnt nun früher im Jahr.

Ein komplexes System von Auswirkungen und Rückkopplungen zwischen klimatischen und nichtklimatischen Faktoren wirkt auf die Ostsee ein. Viele Umweltbelastungen beeinflussen bereits das Ökosystem, der Klimawandel fügt weitere hinzu. Diese verschiedenen Effekte des Klimawandels sowie deren Interaktion mit anderen menschlichen Einflüssen sind komplex und schwer einzuordnen. Zwischen den Regionen der Ostsee variieren die Einflüsse des Klimas und anderer anthropogener Einflüsse beträchtlich. Einfache Managementlösungen, die überall funktionieren, gibt es nicht. Entscheidungsträger müssen sich dieser Unterschiede bewusst sein und zur Abmilderung der Effekte einen adaptiven Managementansatz auf der Grundlage der besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse anwenden.

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 fortschreitende Verständnis des Klimawandels sowie seiner Auswirkungen auf den Zustand der Meeressysteme zu dokumentieren.

Anhand von 34 Parametern, die von EN CLIME als relevant für Wissenschaft und Management identifiziert wurden, wird beschrieben wie sich der Klimawandel bereits auf die Ostsee ausgewirkt hat und dies voraussichtlich in Zukunft tun wird. Bei diesen Parametern handelt es sich um physikalische und chemische Parameter, die direkt vom Klimawandel betroffen sind (Seite 18), sowie um Ökosystem- und menschliche Nutzungsparameter, die indirekt betroffen sind (Seite 36). Die vollständige Liste der Parameter ist in Tabelle 1 (Seite 8) aufgeführt.

Der erste Teil dieses Berichts enthält zusammenfassende Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die einzelnen Parameter (Seite 12-17) sowie eine Klimafolgenkarte, die die projizierten regionalen Veränderungen für ausgewählte Parameter unter dem RCP4.5-Klimaszenario in der Ostsee 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

2018 haben die Ostsee-Umweltschutzkommission (HELCOM) und Baltic Earth ein gemeinsames Expertennetzwerk zum Klimawandel im Ostseeraum (EN CLIME) gegründet. An diesem Netzwerk sind über 110 Forschende aus dem ganzen Ostseeraum beteiligt. Ziel ist die Bildung einer Plattform zur Koordinierung und Nutzung der vorhandenen Expertise zu den direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt und die Ökosysteme der Ostsee, um dieses Wissen den politischen Entscheidungsträgern zugänglich zu machen und mit ihnen in einen engeren Dialog zu treten.

Klimafolgenkarte

Die Klimafolgenkarte (Seiten 10-11) zeigt die projizierten regionalen Veränderungen für einige Parameter in bestimmten Teilbecken der Ostsee unter dem RCP4.5-Szenario. Um die Karte übersichtlich zu halten, wurde die Anzahl der

Parameter reduziert, obwohl alle 34 Parameter wichtig sind. Die ausgewählten Parameter erfüllten die folgenden Bedingungen: 1) direkte gesellschaftliche Relevanz und/oder Relevanz für andere Parameter, 2) mittleres bis hohes Vertrauen in die Veränderungen im Vergleich zum Rauschen und der Unsicherheit von Modellen/Expertenbeurteilung unter dem RCP4.5-Szenario und 3) eine Hotspotregion der Ostsee, wo Klimafolgen mit mittlerer bis hoher Zuverlässigkeit erwartet werden.

Bewertung des Konfidenzniveaus

Der Grad der Zuverlässigkeit der Aussagen wird auf einer Skala mit niedriger-mittlerer-hoher Zuverlässigkeit bewertet (Abbildung 1). Die Autor:innen wurden gebeten, bei der Festlegung der Zuverlässigkeit einer Aussage sowohl den Grad des Konsenses als auch den Umfang der Evidenz zu berücksichtigen und insgesamt die jeweils niedrigste Stufe zu wählen, d.h. das Vorsorgeprinzip anzuwenden (z. B. ist die Zuverlässigkeit insgesamt niedrig wenn der Konsens gering und der Umfang der Evidenz mittel ist).

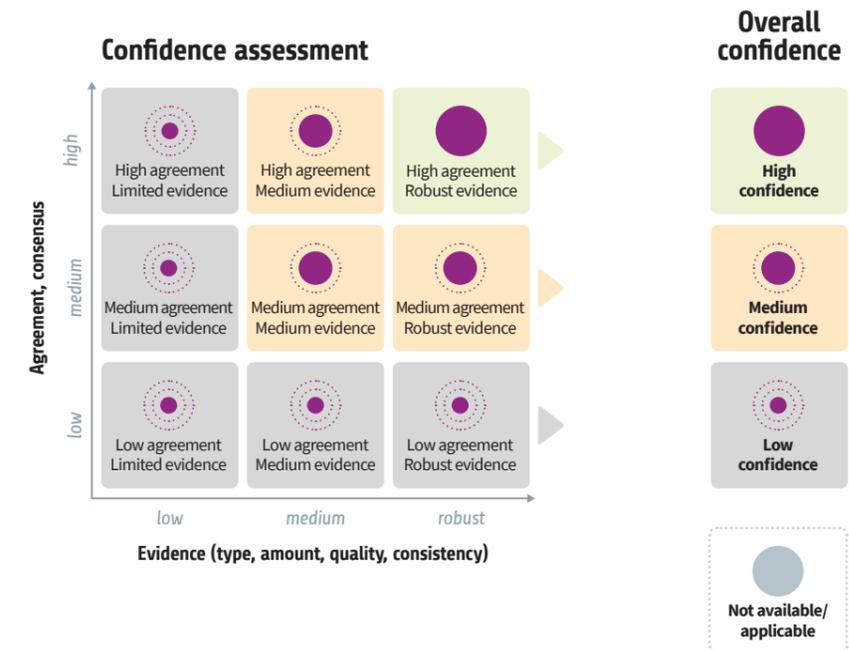


Figure 1. Das Gesamtkonfidenzniveau ergibt sich aus der Konfidenzbewertung der Übereinstimmung/Konsens über die bewerteten Daten und deren Nachweise.

Erfasste Parameter

Die Parameter wurden in sechs Kategorien eingeteilt: Energiekreislauf, Wasserkreislauf, Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf, Meeresspiegel und Wind, Biota und Ökosysteme, menschliche Aktivitäten und Ökosystemleistungen.

Die folgenden Parameter wurden als wichtig erachtet, aber in Ermangelung federführender Autor:innen nicht in diese Version des Faktenblatts aufgenommen:

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

Table 1. Vollständige Liste der EN CLIME-Parameter. Das Sternchen (*) kennzeichnet die Parameter, die Informationen über Extremereignisse enthalten.

Direct parameters	Categorization
Air temperature*	Energy cycle
Water temperature*	Energy cycle
Large scale atmospheric circulation	Energy cycle
Sea ice*	Energy cycle
Solar radiation	Energy cycle
Salinity and saltwater inflows*	Water cycle
Stratification	Water cycle
Precipitation*	Water cycle
River run-off*	Water cycle
Carbonate chemistry	Carbon and nutrient cycles
Riverine nutrient loads and atmospheric deposition	Carbon and nutrient cycles
Sea level*	Sea level and wind
Wind*	Sea level and wind
Waves*	Sea level and wind
Sediment transportation*	Sea level and wind

Indirect parameters	Categorization
Oxygen	Carbon and nutrient cycles
Microbial community and processes	Biota and ecosystems
Benthic habitats	Biota and ecosystems
Coastal and migratory fish	Biota and ecosystems
Pelagic and demersal fish	Biota and ecosystems
Waterbirds	Biota and ecosystems
Marine mammals	Biota and ecosystems
Non-indigenous species	Biota and ecosystems
Marine protected areas (MPAs)	Biota and ecosystems
Nutrient concentrations and eutrophication	Biota and ecosystems
Ecosystem function	Biota and ecosystems
Offshore wind farms	Human activities
Coastal protection	Human activities
Shipping	Human activities
Tourism	Human activities
Fisheries	Human activities
Aquaculture	Human activities
Blue carbon storage capacity	Services
Marine and coastal ecosystem services	Services

Begutachtung der Schlüsselbotschaften

Die Kernaussagen durchliefen ein zweistufiges „peer review“ Verfahren. Die erste Begutachtungsrunde wurde von sechs externen Wissenschaftler:innen durchgeführt, die zweite Runde von den EN-CLIME-Co-Chairs und dem HELCOM-Sekretariat.

Der Klimawandel und potenzielle Gegenmaßnahmen

Treibhausgasemissionen durch die Nutzung fossiler Brennstoffe und eine veränderte Landnutzung verändern das globale Klima. Bereits heute hat die Klimaänderung weitreichende Auswirkungen auf menschliche und natürliche Systeme.

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) schätzt, dass menschliches Handeln eine globale Erwärmung von rund 1,1 °C über dem vorindustriellen Niveau verursacht hat. In den kommenden Jahrzehnten wird sich die globale Erwärmung fortsetzen. Tempo und Ausmaß hängen von der globalen Entwicklung der Treibhausgasemissionen ab.

Um die Folgen des Temperaturanstiegs zu verringern, sind alle politischen Maßnahmen auf globaler Ebene bedeutsam, die auf die Reduktion der Treibhausgasemissionen abzielen. Mit Klimamodellen und verschiedenen Emissionsszenarien werden Projektionen des globalen und regionalen Klimas erstellt, um politische Entscheidungen wie das Pariser Abkommen zu unterstützen.

Um zukünftige Klimabedingungen im Verhältnis zu den Treibhausgasemissionen der kommenden Jahre zu beschreiben, werden sogenannte Repräsentative Konzentrationspfade (RCPs) verwendet. Die RCPs geben eine 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, das „Worst Case“-Szenario (RCP8.5) geht von unverändert hohen Emissionen aus. Ein Zwischenszenario (RCP4.5) wird in der Klimafolgenkarte dieses Blattes verwendet. Hier wird von einem wahrscheinlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von bis zu 2 bis 3 °C bis zum Jahr 2100 ausgegangen.

Die in diesem Faktenblatt genannten IPCC-Zahlen beruhen auf dem IPCC-Sachstandsbericht 5 (2013), dem Sonderbericht über Ozean und Kryosphäre im Klimawandel (2019) und früheren Veröffentlichungen, da der jüngste Sachstandsbericht 6 zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Blattes noch nicht veröffentlicht war. 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.)

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.

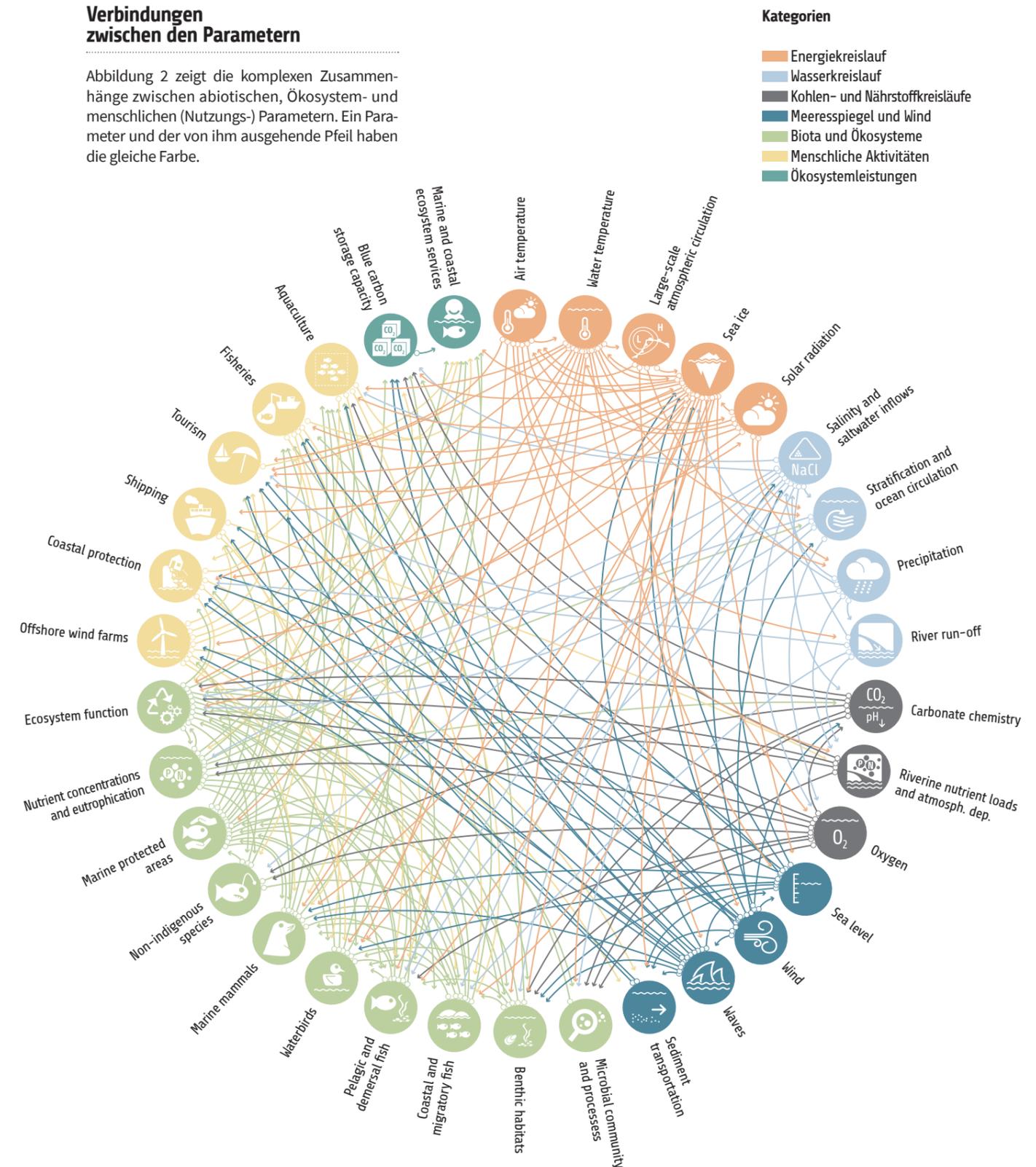


Figure 2. Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern, die für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels in der Ostsee verwendet wurden.

Klimatische Zukunft der Ostsee

Projektionen nach dem Klimaszenario RCP4.5

Die Klimafolgenkarte zeigt die projizierten regionalen Veränderungen einiger Parameter in bestimmten Teilbecken der Ostsee unter dem RCP4.5-Szenario. Um die Karte übersichtlich zu halten, wurde die Anzahl der Parameter reduziert, obwohl alle 34 Parameter wichtig sind. Die ausgewählten Parameter erfüllten die folgenden Bedingungen: 1) direkte gesellschaftliche Relevanz und/oder Relevanz für andere Parameter, 2) mittleres bis hohes Vertrauen in die Veränderungen im Vergleich zum Rauschen und der Unsicherheit von Modellen/Expertenbeurteilung unter dem RCP4.5-Szenario und 3) eine Hotspotregion der Ostsee, wo Klimafolgen mit mittlerer bis hoher Zuverlässigkeit erwartet werden.



Bottensee
Die Meeresoberflächen-Temperatur würde überall in der Ostsee ansteigen, zu allen Jahreszeiten, am stärksten im Sommer in der Bottenwiek und Bottensee. Winterniederschläge, auch Extremniederschläge, nähmen zu. Ein erhöhter Süßwasserzufluss brächte mehr gelösten organischen Kohlenstoff ins Meer, was einen Rückgang pelagischer Primärproduktion und Sedimentation des Phytoplanktons nach sich ziehen und sich negativ auf die benthischen Habitate auswirken würde. In der Bottensee, dem Finnischen Meerbusen und im Golf von Riga ginge die Eisbedeckung am stärksten zurück. In Folge käme es zu höheren Wellen und einer Zunahme der Schifffahrt. Die Verbesserung der Nahrungsverfügbarkeit für ziehende Wasservögel führte zu einer Verlagerung der Brut- und Überwinterungsgebiete nach Norden in eisfreie Küstengebiete. Im Schärenmeer könnten die Ringelrobbenpopulationen abnehmen.



Der Eingangsbereich der Ostsee
Die Meeresoberflächen-Temperatur stiege an. Der mittlere Meeresspiegel stiege relativ zum Land an. Es träten höhere Extremwasserstände auf. Eine Zunahme an atmosphärischem pCO₂ führte zu verstärkter Versauerung.



Bottenwiek
Die Lufttemperatur stiege an, am stärksten im Winter in der nördlichen Ostseeregion. Die Meeresoberflächen-Temperatur stiege an, Meereis-Dicke und Dauer der Eissaison nähmen ab. Winterniederschläge, auch Extremniederschläge, nähmen zu. Ein erhöhter Süßwasserzufluss brächte mehr gelösten organischen Kohlenstoff ins Meer, was zum Rückgang pelagischer Primärproduktion und Sedimentation des Phytoplanktons, und damit zur Beeinträchtigung benthischer Habitate führt. Das Land würde sich schneller als der projizierte Meeresspiegel heben. Der mittlere Meeresspiegel sank relativ zum Land.



Die zentrale Ostsee
Die Meeresoberflächen-Temperatur stiege an. Würden die BSAP-Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffbelastung umgesetzt, gingen Phosphorkonzentration und Algenblüten zurück, die Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser verbesserten sich. Ohne die 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 Benthos-Tiere verringerte. In den flachen Schärengewässern prägen lokale Unterschiede in Biogeochemie und Primärproduktivität das Benthos. In der südlichen Ostsee stiege der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es käme zu höheren Extremwasserständen. Die Sedimenttransporte veränderten sich.



Finnischer Meerbusen
Die Meeresoberflächen-Temperatur stiege an, Eisbedeckung, Eisdicke und Länge der Eissaison nähmen 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 wären betroffen. Mit geringerer Eisbedeckung nähmen die Wellenhöhen zu, aber auch das Potenzial für die Schifffahrt erhöhte sich, wobei dies mehr von ökonomischen Faktoren als vom Klimawandel abhinge. Im östlichen Finnischen Meerbusen stiege der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es käme zu höheren Extremwasserständen.



Rigaer Bucht
Die Meeresoberflächen-Temperatur stiege an, die Eisbedeckung nähme ab, was die Ringelrobbenpopulationen in der nördlichen Rigaer Bucht beeinträchtigte, ebenso Brut- und Überwinterungsgebiete ziehender Wasservögel. In der südlichen Rigaer Bucht stiege der mittlere Meeresspiegel relativ zum Land an, es käme zu höheren Extremwasserständen.

- Unterteilungen der Ostsee für diese Beurteilung**
1. Bottenwiek (Bottenwiek und Quark)
 2. Bottensee (Bottensee and 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

Kategorien

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



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 Hitzewellen 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.



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



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



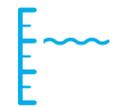
Karbonat-Chemie

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.



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

Kategorien

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



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 Vibriolen 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 sommerlichende 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



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.



Wasservogel

Die offensichtlichsten Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasservogel 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.



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 Naturschutzpotentiale 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.



Indirekte Parameter: Nutzung durch den Menschen (Überblick)

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

Kategorien

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



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.



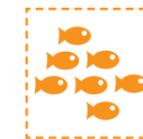
Tourismus

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.



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.

